

**Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
(ΕΛΜΕΠΑ)**



Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών “Ηλεκτρονικά Συστήματα
Τηλεπικοινωνιών & Αυτοματισμών” (ΗΣΤΑ)

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Μελέτη Συστήματος Κινητών Επικοινωνιών 5G
για Παροχή Internet σε Αεροσκάφη**

Ευάγγελος Καντουνάκης

AM: MT88

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Κόκκινος

Χανιά, Ιούνιος 2023

Hellenic Mediterranean University
(HMU)



Department of Electronic Engineering

MSc in Telecommunication & Automation Systems (TeleAutoS)

Master Thesis

**Study of a 5G Mobile Communication System for
Internet Services on Aircraft**

Evangelos Kandounakis

MT88

Thesis Supervisor: Evangelos Kokkinos

Chania, June 2023

Copyright © Ευάγγελος Καντουνάκης, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ιδρύματος.

Αφιερώνεται στα χαμένα
όνειρα, την ελπίδα και το
πάθος για μάθηση.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Ευάγγελο Κόκκινο για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε αναθέτοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας καθώς και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της. Είμαι ευγνώμων για την στήριξή του σε επίπεδο γνώσεων και εμπύχωσης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα, που με την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον αγαπημένο μου ανιψιό Εμμανουήλ Μαυράκη για την βοήθεια του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέχρι πρόσφατα, η δορυφορική σύνδεση ήταν ο μοναδικός τρόπος πρόσβασης στο Ίντερνετ για τους επιβάτες των αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας. Τα δίκτυα Αέρος-Εδάφους (Air-To-Ground / ATG) έχουν κάνει την εμφάνιση τους την τελευταία δεκαετία και αποτελούν ένα νέο τρόπο παροχής Ίντερνετ στους επιβάτες των αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας του. Βασίζονται στις αρχές των επίγειων ευρυζωνικών δικτύων και αποτελούνται από ένα δίκτυο επίγειων σταθμών βάσης σε ηπειρωτικές χώρες. Παρουσιάζουν πλεονεκτήματα σε σχέση με το αντίστοιχα δορυφορικά δίκτυα όπως το χαμηλότερο κόστος εξοπλισμού, αυξημένο throughput, υψηλότερη ταχύτητα και μεγαλύτερη κάλυψη σε ηπειρωτικές διαδρομές. Ωστόσο, οι προκλήσεις παραμένουν για τα επίγεια συστήματα ATG καθώς και για τον αντίστοιχο εξοπλισμό του αεροσκάφους. Η διατριβή πραγματοποιεί ανάλυση και ανασκόπηση βασικών δικτύων ATG, όπως του Ευρωπαϊκού EAN, του Αμερικανικού Gogo και του Κινεζικού ZTE.

Λέξεις κλειδιά: 4G, 5G, Beamforming, Σύστημα Αέρος-Εδάφους, Δίκτυο Αέρος-Εδάφους, Σταθμός Βάσης Αέρος-Εδάφους, ATG, A2G, Ίντερνετ, Παρεμβολές, Ενισχυτική και Αποσβεστική Συμβολή, MIMO, massiveMIMO, SINR, RSRP, RSRQ, EIRP, BER, φάσμα συχνοτήτων, κεραιοστοιχεία.

ABSTRACT

Until recently, civil aviation passengers could only access the Internet through satellite connection. Air-To-Ground (ATG) networks have made their appearance in the last decade as a new way of providing Internet to civil aviation passengers. They are based on the principles of terrestrial broadband networks and consist of a network of ground base stations in continental countries. They offer advantages over their satellite counterparts such as lower equipment costs, increased throughput, higher speed and greater coverage on continental routes. However, challenges remain for ground-based ATG systems as well as for the corresponding aircraft equipment. The thesis performs an analysis and review of key ATG networks, such as the European *EAN*, the American *Gogo* and the Chinese *ZTE*.

Key words: 4G, 5G, Beamforming, Air-To-Ground (ATG) System, Air-To-Ground (ATG) Network, Air-To-Ground Base Station, ATG, A2G, Internet, Interference, Destructive / Constructive Interference, MIMO, massive MIMO, SINR, RSRP, RSRQ, EIRP, BER, φάσμα συχνοτήτων, κεραιοστοιχεία.

Σύντομη Περίληψη

Τα δίκτυα διασύνδεσης αέρος - εδάφους (Air-To-Ground / ATG) επιτρέπουν πλέον την παροχή συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο για τους επιβάτες των αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας. Αρχικά, η διασύνδεση είχε στηριχθεί στα δορυφορικά δίκτυα (Air-To-Satellite / ATS) τα οποία υποφέρουν από υψηλά λειτουργικά κόστη και χαμηλή ταχύτητα και χωρητικότητα. Στις μέρες μας τα δίκτυα ATG συνεργάζονται με τα αντίστοιχα δορυφορικά ώστε τα πρώτα να παρέχουν υπηρεσίες στους επιβάτες κατά την διάρκεια ηπειρωτικών πτήσεων και τα δεύτερα σε διαθαλάσσιες ή διατλαντικές πτήσεις. Τα δίκτυα ATG διαθέτουν ένα νέο δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας, δηλαδή ειδικούς επίγειους σταθμούς βάσης, ικανούς να επικοινωνούν με αεροσκάφη σε μεγάλες αποστάσεις και υψόμετρα. Σε συνέχεια της αναβάθμιση των επίγειων ευρυζωνικών δικτύων, η τεχνολογία των δικτύων ATG μεταβαίνει από 4G (LTE) σε τεχνολογία 5G πλέον, με αναβαθμισμένες δυνατότητες throughput και χωρητικότητας. Τα νέας γενιάς δίκτυα ATG χρησιμοποιούν συχνότητες από 600 MHz έως και τα χιλιοστομετρικά κύματα, ενσωματώνοντας με αυτόν τον τρόπο φάσματα συχνοτήτων από προηγούμενα δίκτυα 3G και 4G. Ήδη εταιρείες όπως η Gogo στην Αμερική και η ZTE στην Κίνα προσφέρουν σύγχρονο Ίντερνετ με τεχνολογία 5G για τους επιβάτες αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας, ενώ η Ευρωπαϊκή EAN βρίσκεται σε διαδικασία αναβάθμισης.

Εκτενής Περίληψη

Τα κυβελωτά δίκτυα ως αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης καθημερινότητας αναδιαμορφώνουν συνεχώς διάφορους τομείς της ζωής όπως η επικοινωνία, η ψυχαγωγία, η εκπαίδευση, οι συναλλαγές και το εμπόριο. Ένας νέος τομέας που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι η παροχή συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο για τους επιβάτες των αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας. Αρχικά, η παροχή συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο για τους επιβάτες των αεροσκαφών στηρίχτηκε στα δορυφορικά δίκτυα. Ωστόσο, τα υψηλά λειτουργικά κόστη, η χαμηλή ταχύτητα και η μικρή χωρητικότητα οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας εναλλακτικής τεχνολογίας βασισμένη στα δίκτυα των επίγειων τηλεπικοινωνιών κινητής.

Τα δίκτυα διασύνδεσης αέρος - εδάφους (Air-To-Ground / ATG) πλέον επιτρέπουν την σύνδεση των επιβατών αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας στο διαδίκτυο. Η διαφορά ανάμεσα σε ένα κοινό επίγειο ευρυζωνικό δίκτυο και σε ένα δίκτυο ATG βρίσκεται στο δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας, δηλαδή το μέρος που είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία του αεροσκάφους με τον επίγειο σταθμό. Ειδικά σχεδιασμένοι επίγειοι σταθμοί ATG παρέχουν δυνατότητα κάλυψης σε μεγάλες αποστάσεις και υψόμετρα.

Τα πρώτα δίκτυα ATG βασισμένα σε τεχνολογία 3G έδωσαν τη σκυτάλη στα σύγχρονα δίκτυα 4G (LTE) παρέχοντας συνδεσιμότητα υψηλότερης ποιότητας σε μέσα μεταφορών με υψηλές ταχύτητες [8]. Πλέον, η τεχνολογία 5G είναι μια πραγματικότητα στα δίκτυα ATG αναβαθμίζοντας τις δυνατότητες τους σε throughput και χωρητικότητα [10], αφού ήδη εταιρείες όπως η Gogo στην Αμερική και η ZTE στην Κίνα προσφέρουν σύγχρονο Ίντερνετ με τεχνολογία 5G για τους επιβάτες αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας.

Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούνται κεραίες με πολυάριθμα κεραιοστοιχεία οι οποίες συνδυάζουν κεραιοστοιχεία μικρού μεγέθους και διασταυρωμένη πολικότητα (cross-polarized antenna elements / radiating elements) [128][157]. Τέτοιες κεραίες είναι οι MIMO (2x2, 3x3, 4x4, 8x8) και massive MIMO (πάνελ των 64 έως 256 κεραιοστοιχείων) [48][139][161][126][130]. Επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων μέσω Multiplexing (πολυπλεξίας) για την αύξηση του throughput είτε μέσω Diversity για αύξηση της αξιοπιστίας μετάδοσης της πληροφορίας. Χρησιμοποιείται επίσης τεχνολογία Beamforming για την κατευθυντικότητα του σήματος.

Τα δίκτυα 5G κάνουν χρήση τεχνολογιών massiveMIMO και Beamforming. Οι συστοιχίες massiveMIMO χρησιμοποιούν χιλιοστομετρικές συχνότητες (mmWave), οι οποίες λόγω του μικρότερου μήκους κύματος επιτρέπουν τη δημιουργία κεραιών πολύ μικρού μεγέθους καθώς και την παραγωγή στενών δεσμών. Μέσω του φαινομένου της αποσβεστικής ή ενισχυτικής αλληλεπίδρασης (συμβολή) των κυμάτων, επιτρέπουν την διαμόρφωση δεσμών (Beamforming) και την οδήγηση τους (Beam steering).

Ο αριθμός των κεραιοστοιχείων και η απόστασή τους επηρεάζουν το κέρδος και τη μορφή των δεσμών. ενώ το Beamforming επιτρέπει την κατάπνιξη παρεμβολών. Γενικότερα, το Beamforming μειώνει την παρεμβολή των σημάτων, αυξάνει το data throughput και την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και μειώνει τις παρεμβολές [122][123]. Υπάρχουν διάφορες δυο μορφές Beamforming: α) παθητικό και β) ενεργητικό. Το ενεργητικό διακρίνεται περαιτέρω σε αναλογικό, ψηφιακό και υβριδικό (Hybrid Beamforming) [123].

Η παροχή Ίντερνετ σε αεροσκάφη έχει τις ρίζες της στην Αμερική όταν το 1997, ο ιδρυτής της σημερινής εταιρείας Gogo, Jimmy Ray (τότε επωνυμία Aircell), δημιούργησε το πρώτο αναλογικό δίκτυο για παροχή κλήσεων εν πτήση στην Βόρεια Αμερική. Το 2009, η διάθεση του ευρυζωνικού Air-To-Ground (ATG) δικτύου στους επιβάτες της πολιτικής αεροπορίας έγινε πραγματικότητα. [13]

Σήμερα, διάφορες εταιρείες δραστηριοποιούνται στον τομέα της παροχής διασύνδεσης στο διαδίκτυο (Ίντερνετ) των αεροσκαφών της εμπορικής αεροπλοΐας. Ένα σύστημα αέρος-εδάφους (ATG) αποτελείται από τρία βασικά μέρη [92]: α) το Επίγειο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (Σταθμοί Βάσης / GS - Ground Station) στο οποίο συνδέεται το αεροσκάφος, β) το Κύριο Δίκτυο (Core Network), υπεύθυνο για την διαχείριση των πακέτων συνδεσιμότητας με εξωτερικά δίκτυα και γ) τον σταθμό του αεροσκάφους (AS - Aircraft station) για την επικοινωνία με το επίγειο δίκτυο σταθμών.

Οι επίγειοι σταθμοί βάσης (Ground BSs) του δικτύου ATG διαθέτουν μεγαλύτερες κεραιές από αυτές των κλασικών σταθμών των επίγειων κυψελωτών δικτύων με κλίση προς τον ουρανό (up-tilt) [92]. Βρίσκονται τοποθετημένοι σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους (Inter-site distances ISD) καθώς διαθέτουν μεγαλύτερη εμβέλεια για την αποφυγή συχνών handover (handoff) [51][81][95]. Στο δίκτυο Ασύρματης πρόσβασης

NG-RAN του νέου 5G αέρος-εδάφους (ATG) οι σταθμοί διαθέτουν μεγαλύτερο ISD το που φτάνει μέχρι τα 300 km σε μερικές περιπτώσεις [92].

Οι σταθμοί βάσεις διαθέτουν τρεις (3) έως έξι (6) πομποδέκτες (Transceivers) για την κάθετη και οριζόντια κάλυψη του εναέριου χώρου. Κάθε πομποδέκτης αποτελεί μια συστοιχία κεραιών που μπορεί να δημιουργήσει ένα αριθμό δεσμών ανά τεταρτημόριο με δυνατότητα Beamforming, εξυπηρετώντας έναν αριθμό αεροσκαφών. Το αεροσκάφος συνδέεται στον επίγειο σταθμό βάσης ATG μέσω του δικού του σταθμού βάσης (AS / Air Station) που αποτελείται από: α) πανκατευθυντικές (omnidirectional) κεραιές εγκατεστημένες στην άτρακτο του αεροπλάνου που εκπέμπουν και λαμβάνουν σήματα στον ορίζοντα κατά 360^0 , β) τη ράδιο-μονάδα αέρος - εδάφους (Air-to-Ground Radio), γ) τον διακομιστή (server) και δ) τις κεραιές Wi-Fi στην καμπίνα (access points) [96].

Σε ένα δίκτυο ATG υπάρχουν προκλήσεις λόγω συνθηκών. Το υψηλό υψόμετρο πτήσης (9.5 - 12 km) καθώς και η υψηλή ταχύτητα των αεροσκαφών (800 - 1200 km/h) να επηρεάζουν την ποιότητα της σύνδεσης λόγω συχνών handover [97] [51][81][92]. Κάτω από αυτές τις συνθήκες προκύπτουν θέματα σχετικά με την χρυσή τομή ανάμεσα στην χρήση κατάλληλων συχνοτήτων και απόδοσης του συστήματος. Ένα σοβαρό πρόβλημα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι το φαινόμενο Doppler, καθώς αυξάνει για τις συχνότητες πάνω από το φάσμα sub-7 με αποτέλεσμα να προκαλείται μετατόπιση των συχνοτήτων [51][52].

Σε αυτό προστίθεται η εξασθένηση του σήματος εξαιτίας της απορρόφησης συχνοτήτων λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών (υγρασία, βροχή, χιόνι) (Path Loss). Περιγράφεται με τον δείκτη FSPL (Free Space Path Loss - Απώλεια Διαδρομής Ελευθέρου Χώρου) ο οποίος αυξάνεται στις υψηλότερες συχνότητες ειδικότερα των χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWaves) με αποτέλεσμα την υψηλότερη απορρόφηση τους σε σχέση με τις χαμηλότερες συχνότητες. Το φαινόμενο οδηγεί σε μείωση του throughput αφού συνδέεται άμεσα με τη μείωση του λόγου σήματος - θορύβου SNR (signal-to-noise ratio). [93]

Τίθεται επίσης το ζήτημα της ασφάλειας σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα του εξοπλισμού, ώστε να μην επηρεάζονται τα όργανα και τα συστήματα του αεροσκάφους [15][51][52]. Στην Αμερική, γίνεται συζήτηση σχετικά με μια πιθανή παρεμβολή του φάσματος 3.7-3.98 GHz (C-Band) του δικτύου ATG στην λειτουργία των μετρητών

υψόμετρου (radio altimeters), τα οποία παρεμπιπτόντως κάνουν χρήση των παραπλήσιων συχνοτήτων 4.2 GHz - 4.4 GHz [83].

Οι κεραιές του επίγειου σταθμού βάσης στο σύγχρονο δίκτυο ATG 5G αποτελούνται από συστοιχίες massiveMIMO. Στο αεροσκάφος μέχρι στιγμής χρησιμοποιούνται πανκατευθυντικές κεραιές (omnidirectional antenna) MIMO τύπου Blade λόγω του μικρού μεγέθους τους, την οριζόντια κάλυψη 360⁰ με δυνατότητα διαφοροποίησης της κάλυψής στον κατακόρυφο άξονα και της πολύ καλής ποιότητας λήψης από όλες τις γωνίες [161].

Τα δίκτυα ATG καλύπτουν τις ανάγκες συνδεσιμότητας στο Ίντερνετ για πτήσεις στον ηπειρωτικό χώρο. Στην περίπτωση διηπειρωτικών πτήσεων όπου παρεμβάλλεται θάλασσα ή ωκεανός, η επιλογή παραμένει το δορυφορικό δίκτυο.. Το σημερινό Ευρωπαϊκό δίκτυο EAN (European Aviation Network) ATG είναι τεχνολογίας LTE και βρίσκεται σε διαδικασία αναβάθμισης σε 5G. Το δίκτυο διαθέτει 300 επίγειους σταθμούς βάσης (Ground Base Stations) με εμβέλεια 150 Km που εξυπηρετούν 30 Ευρωπαϊκές χώρες. Επιπλέον σταθμοί ATG εγκαθίστανται σε υπεράκτιες πλατφόρμες παραγωγής (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου & φυσικού αερίου, υπεράκτιες ανεμογεννήτριες) καθώς και πλοία στη Βόρεια θάλασσα [166].

Στην Ευρώπη, διάφορα συστήματα ATG μελετήθηκαν την προηγούμενη δεκαετία. Μερικά από αυτά είναι: το **ETSI TR 103 054 (2010)** [93] τεχνολογίας LTE FDD (Frequency Division Duplex) στα **2.6 GHz**, το **ETSI TR 101 599 (2012)** [96] στα φάσματα **2400 - 2483.5 MHz** και **5855 - 5875 MHz** με κανάλια 2×10 MHz FDD ή 20 MHz TDD και διαμόρφωση OFDM, το **ETSI TR 103 108 (2013)** [90] τεχνολογίας **3G UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System) και διαμόρφωσης CDMA TDD στο φάσμα **5855 - 5875 MHz** και εύρος καναλιού 5 MHz ή 10 MHz (όπου ερευνώνται διάφοροι τύποι κεραιών π.χ. πανκατευθυντικές (omni-directional), sector antennas, καθώς και κατευθυντικές (directional)), το **ETSI 303 316 V1.2.1 (2018)** [108] στο φάσμα συχνοτήτων **5855 - 5875 MHz** και το αποκλεισμένο φάσμα **1900 - 1920 MHz**.

Αντίστοιχα, η Αμερικάνικη εταιρεία παροχής ευρυζωνικού Ίντερνετ σε αεροσκάφη *Gogo*, έχει αναπτύξει το δικό της δίκτυο αέρος-εδάφους (ATG) στην Αμερική και Καναδά, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία 4G. Διαθέτει 225 (+) επίγειους σταθμούς βάσης (GBS). Παράλληλα, γίνονται εντατικές προσπάθειες για την εγκατάσταση του νέου συστήματος

5G καθώς στο τέλος του 2021 ολοκλήρωσε 7 ειδικά κατασκευασμένους σταθμούς βάσης ATG 5G για την διεξαγωγή ερευνών και ελέγχων, με στόχο την εγκατάσταση 150 συνολικά όμοιων σταθμών εντός του πρώτου εξαμήνου του 2022. Η εφαρμογή του 5G ATG δικτύου αναμένεται να ξεκινήσει το δεύτερο εξάμηνο του 2022. Το νέο δίκτυο 5G αέρος-εδάφους (ATG) της Gogo λειτουργεί στο φάσμα των **800 MHz** και συχνότητες **2.4 GHz**. Οι σταθμοί εδάφους χρησιμοποιούν κεραιές με τεχνολογία massive MIMO. [111][120]

Στην Ασιατική ήπειρο, το πρώτο δοκιμαστικό κυψελωτό δίκτυο παροχής Ίντερνετ σε αεροσκάφη (ATG) με τεχνολογία LTE δημιουργήθηκε το 2013 από την Κινεζική εταιρεία τηλεπικοινωνιών ZTE [85]. Στο τέλος του 2021, η ίδια εταιρεία δημιούργησε το δίκτυο αέρος-εδάφους (ATG) τεχνολογίας 5G με κύρια μπάντα την 4.9GHz (n79). Οι κεραιές των επίγειων σταθμών βάσης είναι Massive MIMO με κάλυψη 300km. [81][85][89]

Στην σύγχρονη έρευνα γίνεται προσπάθεια εξέλιξης κεραιών massiveMIMO για την επιφάνεια του αεροσκάφους για αυξημένη λειτουργικότητα στο επίπεδο Beamforming και στο επίπεδο θερμομηχανικής. Στην Ευρώπη υλοποιούνται διάφορα ερευνητικά προγράμματα όπως το ISABELLE Project και το ACASIAS Project. Στην Αμερική, το ερευνητικό κέντρο της NASA Glenn Research Center ανέπτυξε μια κεραία δορυφορικής σύνδεσης για drone, με χρήση λεπτού υποστρώματος aerogel χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς Dk, ίσης με αυτή του αέρα, για μεγαλύτερη απόδοση. [135][141][142]

Πρόλογος

Η μεταπτυχιακή διατριβή αποτελεί μια μελέτη της υπάρχουσας τεχνολογίας συστημάτων παροχής σύνδεσης αεροσκαφών στο διαδίκτυο, με έμφαση στο σύστημα αέρος - εδάφους το οποίο στην Αγγλική βιβλιογραφία αναφέρεται ως ATG ή A2G connectivity (Air-To-Ground) και περιλαμβάνει ένα ειδικά διαμορφωμένο δίκτυο επίγειων σταθμών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην έννοια της παροχής συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο για τα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας και επίσης γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής των ευρυζωνικών κυψελωτών δικτύων και εννοιών των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ακολουθεί μια αναδρομή στις τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας, ενώ μέσα από την ανάλυση του δικτύου 4G LTE παρουσιάζεται το σύγχρονο δίκτυο 5G.

Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται στην έννοια και τις αρχές της τεχνολογίας διαμόρφωσης δέσμης Beamforming και των συστημάτων massive MIMO και MIMO που στηρίζουν τα επίγεια δίκτυα ευρυζωνικότητας καθώς και τα δίκτυα ATG (Air-To-Ground). Γίνεται αναλυτική παρουσίαση τους με έμφαση στην διαμόρφωση δέσμης Beamforming 2D και 3D, καθώς και στην επίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η απόσταση των κεραιοστοιχείων και ο αριθμός τους.

Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τρεις τρόπους παροχής Ίντερνετ στα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας: α) σύνδεση αέρος-εδάφους (ATG), β) δορυφορική σύνδεση (ATS) και γ) δίκτυα Aeronautical Ad-hoc Networks (AANET). Αναλύονται τα μέρη του συνεργατικού υβριδικού συστήματος που επικρατεί έως σήμερα, δηλαδή του ειδικά διαμορφωμένου επίγειου κυψελωτού δικτύου ATG και της δορυφορικής κάλυψης. Τέλος, περιγράφεται ο εξοπλισμός των αεροσκαφών για πρόσβαση στα συστήματα του υβριδικού συστήματος.

Το κεφάλαιο 4 εστιάζεται στο σύστημα αέρος-εδάφους (ATG). Αναλύονται τέσσερα κυψελωτά συστήματα ATG: το Ευρωπαϊκό *EAN*, το Αμερικάνικο *Gogo*, το Κινεζικό *ZTE* και το Ιαπωνικό. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο Ευρωπαϊκό δίκτυο όπου υπάρχει σειρά μελετών καθώς και στο Αμερικανικό. Το κεφάλαιο κλείνει με αναφορά στις νέες έρευνες σχετικά με την ανάπτυξη συστημάτων Beamforming σχετικά με νέες τεχνολογίες οι οποίες βελτιώνουν την απόδοση ενός συστήματος στον επίπεδο της τεχνολογίας Beamforming.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες	vii
Περίληψη	ix
Abstract	xi
Σύντομη Περίληψη	xii
Εκτενής Περίληψη	xiii
Πρόλογος	xviii
Πίνακας Περιεχομένων	xx
Κατάλογος Εικόνων	xxiv
Κατάλογος Πινάκων	xxxι
Κατάλογος Συντομογραφιών	xxxii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Κυψελωτά Συστήματα	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Γενικές Έννοιες Κυψελωτών Συστημάτων	6
1.2.1 Γενική Αρχιτεκτονική Κυψελωτού Δικτύου	7
A. Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης RAN	8
➤ Βασικές Λειτουργίες του Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης RAN	12
B. Κύριο Δίκτυο (CN - Core Network)	13
1.2.2 Έννοιες Διάδοσης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	15
➤ EIRP - Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς	15
➤ FSPL - Απώλεια Διαδρομής Ελευθέρου Χώρου	17
➤ BER (Bit Error RateΦ)	19
➤ Ελάχιστο Απαιτούμενο SNR στην Έξοδο του Δέκτη	19
➤ SINR	21
➤ Διάγραμμα Ακτινοβολούμενης Ενέργειας κεραίας	23

1.3	Δίκτυο 5G	25
1.3.1	Ιστορική Αναδρομή	25
1.3.2	Εξέλιξη Δικτύου 5G	27
1.3.3	Αρχιτεκτονική Δικτύου 4G LTE	30
1.4	Μη Αυτόνομο Δίκτυο 5G (NSA)	35
1.5	Αυτόνομο Δίκτυο 5G (SA)	38
1.5.1	Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης 5G (NG-RAN) - Σταθμοί Βάσης	41
1.5.2	Φάσμα Συχνοτήτων Δικτύου 5G	44
1.5.3	Πολλαπλή Πρόσβαση (Multiple Access)	52
	➤ OFDM & OFDMA	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Beamforming - massive MIMO		62
2.1	Εισαγωγή	62
2.2	Πολικότητα Κεραίας	64
2.2.1	Γραμμική Πολικότητα (Linear Polarization)	65
2.2.2	Κυκλική Πολικότητα (Circular Polarization)	66
2.2.3	Ελλειπτική Πολικότητα (Elliptical Polarization)	66
2.2.4	Διαφορισμός Πολικότητας (Polarization Diversity)	67
	➤ Κεραιοστοιχεία MIMO - massive MIMO	69
2.3	MIMO	70
2.4	massive MIMO	74
2.4.1	Διάταξη κεραίας 5G massive MIMO - 2D/3D Beamforming	75
2.5	Beamforming	78
2.5.1	Διαμόρφωση Δέσμης - Beamforming	79
	➤ Επίδραση Αζιμούθιου θ και Ανύψωσης φ στο Κέρδος	84
	➤ Επίδραση Αριθμού Κεραιοστοιχείων στο Σήμα	86
	➤ Επίδραση Απόστασης Κεραιοστοιχείων στο Σήμα	88

2.5.2	Οδήγηση Δέσμης - Beam Steering	89
2.5.3	Μείωση Παρεμβολών - Interference Suppression	95
2.6	3D Beamforming	99
2.6.1	3D Beam steering - Εφαρμογή Βαρών	104
2.7	Τύποι Beamforming	110
2.7.1	Αναλογικό Beamforming (Analogue Beamforming)	111
2.7.2	Ψηφιακό Beamforming (Digital Beamforming)	113
2.7.3	Υβριδικό Beamforming (Hybrid Beamforming)	116
	➤ Υβριδικό Beamforming Μερικής Σύνδεσης	117
	➤ Υβριδικό Beamforming Πλήρους Σύνδεσης	118
2.8	Προσαρμοστική Διαμόρφωση Δέσμης (Adaptive Beamforming)	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Συνδεσιμότητα στο Ίντερνετ για Αεροσκάφη της Πολιτικής Αεροπορίας (Inflight Connectivity)		121
3.1	Εισαγωγή	121
3.2	Παραγωγικότητα - Ασφάλεια Πτήσεων	123
3.3	Τύποι Δικτύων Συνδεσιμότητας Αεροσκαφών στο Ίντερνετ	126
3.4	Γενική Αρχιτεκτονική Συστήματος ATG σε Αεροσκάφη	127
3.4.1	Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης Αέρος-Εδάφους (ATG)	128
3.4.2	Εναέριος Εξοπλισμός Δικτύου Air-To-Ground	134
3.5	Δορυφορική Σύνδεση Αεροσκάφους για Παροχή Ίντερνετ (ATS)	137
3.5.1	Σύγκριση Δικτύων ATG & ATS	144
3.6	Αεροναυτικά Ad-hoc Δίκτυα (AANETs - Aeronautical Ad-hoc Networks / Air-To-Air)	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Μελέτη Συνδεσιμότητας Αεροσκάφους στο Ίντερνετ		147
4.1	Εισαγωγή	147

4.2	Δικτύων Air-To-Ground (ATG)	150
4.2.1	European Aviation Network (EAN)	150
	➤ Διερευνημένα Πρότυπα Συστημάτων ATG του δικτύου EAN	152
4.2.2	Δίκτυο Αέρος-Εδάφους (ATG) Gogo	164
4.2.3	Δίκτυο Αέρος-Εδάφους (ATG) ZTE	168
4.2.4	Ιαπωνικό Δίκτυο Αέρος-Εδάφους (ATG)	169
4.3	Μελέτη Απόδοσης Συστημάτων ATG βασισμένα σε 5G	170
4.3.1	Δίκτυο ATG με τεχνολογία 5G NR στη χαμηλή μπάντα (Low band)	170
4.3.2	Δίκτυο ATG με τεχνολογία 5G NR στη μεσαία και χαμηλή μπάντα (Mid & Low band)	171
4.4	Σύγχρονη Έρευνα Συστημάτων Beamforming για Αεροσκάφη ...	172
4.4.1	Διηλεκτρικό υπόστρωμα PI nano-aerogel	174
4.5	Συμπεράσματα	179
4.6	Μελλοντική Έρευνα	181
	Βιβλιογραφία	182

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1	Αεροπορικές εταιρείες με Wi-Fi στο αεροσκάφος το 2018 [11] ...	1
Εικόνα 1.2	Η πρόβλεψη της Statista για αύξηση της ζήτησης αεροπορικών ταξιδιών το 2022 [53]	2
Εικόνα 1.3	Γενική απεικόνιση συνδεσιμότητας αεροσκάφους στο Διαδίκτυο – Συνεργασία ATG και Δορυφορικού Δικτύων [175]	3
Εικόνα 1.4	Γενική απεικόνιση του Δικτύου ATG [92]	4
Εικόνα 1.5	Γενικό Διάγραμμα Κυψελωτού Δικτύου Κινητής Τηλεφωνίας [28]	6
Εικόνα 1.6	Οι βασικές μονάδες του σταθμού βάσης (BS) στο δίκτυο RAN ...	7
Εικόνα 1.7	Αρχιτεκτονική D-RAN (Distributed RAN): Traditional BS vs Contemporary BS [29]	8
Εικόνα 1.8	Αρχιτεκτονική C-RAN (Centralized / Cloud RAN) [35]	9
Εικόνα 1.9	Εικονικοποίηση (Virtualization) των BBUs και του Router [35] ...	10
Εικόνα 1.10	Αρχιτεκτονική C-RAN με split BBU (Option 2) [71].....	10
Εικόνα 1.11	Αρχιτεκτονική O-RAN (Open RAN) [71].....	11
Εικόνα 1.12	Γενικό διάγραμμα εξέλιξης των δικτύων 2G/3G/4G [73]	13
Εικόνα 1.13	Το Κύριο Δίκτυο 5G Core (NG-Core) [28]	14
Εικόνα 1.14	EiRP - Ιδανική Ισοτροπική κεραία και κύριο λοβός [114]	15
Εικόνα 1.15	Δείκτης SINR σε σχέση με το σχήμα διαμόρφωσης και code rate [102]	24
Εικόνα 1.16	Πολικό διάγραμμα κεραίας (2D)	23
Εικόνα 1.17	Η εξέλιξη της κυψελωτής τεχνολογίας (1G - 5G)	25
Εικόνα 1.18	Χρήση δικτύων 5G vs Προηγούμενες τεχνολογίες (Erikson) [23]	27
Εικόνα 1.19	Το χρονοδιάγραμμα για το 5G (NR) NSA - 3GPP “Release 15” (Βασισμένο στο [68])	27
Εικόνα 1.20	Το χρονοδιάγραμμα της 3GPP για την σταδιακή υλοποίηση του δικτύου 5G μέσω των εκδόσεων “Release 16”, “Release 17” & “Release 18” [27]	28

Εικόνα 1.21	Non-Stand Alone (NSA) ή EN-DC και Stand Alone (SA) δίκτυο 5G [40]	29
Εικόνα 1.22	Η βασική αρχιτεκτονική του Δικτύου 4G [38]	30
Εικόνα 1.23	Οι διεπαφές για την επικοινωνία ανάμεσα στα μέρη του δικτύου 4G LTE [41]	31
Εικόνα 1.24	Carrier Aggregation για τα δίκτυα LTE Advanced και LTE Advanced Pro [43]	34
Εικόνα 1.25	Γενική αρχιτεκτονική του Δικτύου E-UTRA-NR DC (NSA) [36]	35
Εικόνα 1.26	Το δίκτυο 5G-NR σύμφωνα με την 3GPP TS 38.300 V15.4.0 (2018-12) [47]	37
Εικόνα 1.27	Απλοποιημένο διάγραμμα αρχιτεκτονικής 5G (SA): gNB, 5G Core και οι διεπαφές (interface)	38
Εικόνα 1.28	Βασική αρχιτεκτονική του Κυρίου Δικτύου 5G Core (NG-Core) [28]	38
Εικόνα 1.29	Οι διεπαφές Xn, NG, E1, F1 και F2 στο δίκτυο [66]	39
Εικόνα 1.30	Οι διάφοροι τύποι κεραιών του NG-RAN [48]	41
Εικόνα 1.31	MIMO vs Massive MIMO [59]	42
Εικόνα 1.32	Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [70]	44
Εικόνα 1.33	Απεικόνιση των συχνοτήτων του 5G: FR1 & FR2 [56]	45
Εικόνα 1.34	Ασύρματο δίκτυο 5G NR: Low-band, Mid-band και High-band [46]	45
Εικόνα 1.35	Χάρτης κατανομής φάσματος συχνοτήτων 5G σε διάφορες χώρες [46]	46
Εικόνα 1.36	Το NG-RAN διαθέτει τεχνολογία Multi-RAT [56]	47
Εικόνα 1.37	Εύρος (BW) vs Κάλυψη (Coverage) [42]	48
Εικόνα 1.38	Οι ζώνες συχνοτήτων του Ραδιοφάσματος (Radio Wave Spectrum) με βάση την διαπερατότητα που διαθέτουν [178]	49
Εικόνα 1.39	Παγκόσμιος χάρτης φάσματος χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (mmWave) [46]	51
Εικόνα 1.40	Τύποι αμφιδρόμησης: FDD & TDD	53
Εικόνα 1.41	Διαμόρφωση BPSK (Βασισμένο στο [153])	57
Εικόνα 1.42	Διαμόρφωση QPSK: Τα σύμβολα - dibits αντιστοιχισμένα στις τέσσερις διακριτές φάσεις ενός σήματος με διαφορά 90^0 , β) Ορθογώνιος αστερισμός συμβόλων (constellation diagram), β) Η Ακολουθία συμβόλων	56

Εικόνα 1.43	α) Διαμόρφωση 16QAM, β) διαμόρφωση 64QAM (βασισμένο στο [153])	59
Εικόνα 1.44	Διαμόρφωση OFDM: απεικόνιση συμβόλων στο πεδίο συχνοτήτων και χρόνου [50]	60

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1	Πυκνότητα Κίνησης Δεδομένων Κινητής (Mobile /Traffic Density) - Gbps/km ² /MHz ή GkM [123]	62
Εικόνα 2.2	Μείωση Πυκνότητας Κίνησης του δικτύου της Σεούλ με χρήση 28 GHz [123]	63
Εικόνα 2.3	Οι τρεις τύποι γραμμικής πολικότητας [127]	65
Εικόνα 2.4	Κυκλική πολικότητα: αριστερόστροφη και δεξιόστροφη [127] ...	66
Εικόνα 2.5	Ελλειπτική πολικότητα: αριστερόστροφη και δεξιόστροφη [127]	66
Εικόνα 2.6	Παράλληλη (α) και Ορθογωνική (β) πολικότητα κεραιών [157] ...	67
Εικόνα 2.7	Διαφορισμός Πόλωσης: α) Διασταυρωμένη πολικότητα (Cross-polarized polarity) [157], β) Δυο ροές δεδομένων ίδιας συχνότητας με αντίθετη πολικότητα +450 / -450 [138]	68
Εικόνα 2.8	α) Ζεύγη διπόλων αντίθετης πολικότητας σε διδιάστατο πάνελ (cross-polarized element array) 2x2, β) Συστοιχία διπόλων 8x8 [128]	69
Εικόνα 2.9	Εξωτερικές πανκατευθυντικές κεραιές αεροσκαφών MIMO [75][76]	72
Εικόνα 2.10	Η Περιοχή μη-κάλυψης κάτω από την Πανκατευθυντική κεραία (Προβολή κατακόρυφης κάλυψης) (Βασισμένο στο [161])	73
Εικόνα 2.11	MIMO vs massive MIMO [126]	74
Εικόνα 2.12	Uniform linear array: α) 2D Beamforming Αζιμούθιο, β) 2D Beamforming Ανύψωση, γ) 3D Beamforming [130]	75
Εικόνα 2.13	Πάνελ mMIMO 4 συστοιχίες x 16: (256 κεραιές) [123]	76
Εικόνα 2.14	α) Η κεραία AIR 3268 της Ericsson, β) Η διάταξη των στοιχείων της 8x8 array [133]	76
Εικόνα 2.15	Beamforming κατά την Εκπομπή (Transmission) & κατά την Λήψη (Reception) (Βασισμένο στο [122])	79
Εικόνα 2.16	Γραμμική συστοιχία κεραιών με δυο πανκατευθυντικά στοιχεία [122]	80
Εικόνα 2.17	Συγγραμμική κεραία (uniform linear array) - Εφαρμογή βαρών $w_1 \dots w_N$ στο σήμα λήψης στα στοιχεία $x_1 \dots x_N$ [122]	84

Εικόνα 2.18	Γεωμετρία της γραμμικής κεραίας λήψης (Far-field geometry) [156]	85
Εικόνα 2.19	Συσχέτιση κέρδους με τον αριθμό των στοιχείων μιας συγγραμμικής συστοιχίας κεραιών (uniform linear array) [122] ...	86
Εικόνα 2.20	Συσχέτιση κέρδους με την απόσταση των στοιχείων της συγγραμμικής συστοιχίας κεραιών (uniform linear array) [122] ...	88
Εικόνα 2.21	Συγγραμμική συστοιχία κεραιών (uniform linear array) με εφαρμογή καθυστέρησης σε κάθε στοιχείο [122]	89
Εικόνα 2.22	(α) Σήμα χωρίς εφαρμογή βάρους καθυστέρησης, (β) Σήμα μετά την εφαρμογή βάρους καθυστέρησης [122]	92
Εικόνα 2.23	Ενισχυτική και αποσβεστική συμβολή (Destructive & Constructive Interference): Τα σήματα από τους συνδρομητές Α και Β είναι ίδιας συχνότητας αλλά μόνο το σήμα από τον Α ενισχύεται [113]	93
Εικόνα 2.24	Ενισχυτική και Αποσβεστική Συμβολή (Destructive & Constructive Interference): Τα σήμα από τον συνδρομητή Α ενισχύεται λόγω της εισαγωγής κατάλληλης καθυστέρησης στα κεραιοστοιχεία που οδηγεί σε Ενισχυτική Συμβολή [113]	94
Εικόνα 2.25	Σχηματικό διάγραμμα μιας κεραίας συστοιχιών με δυο πανκατευθυντικά στοιχεία [122]	95
Εικόνα 2.26	Η προηγούμενη κεραία και το σήμα θορύβου με αζιμούθιο $\theta=30^\circ$ [122]	96
Εικόνα 2.27	Το επιθυμητό σήμα και η κατάπνιξη της παρεμβολής [122]	98
Εικόνα 2.28	Ομοιόμορφη ορθογωνική κεραία ισοτροπικών στοιχείων (uniform isotropic rectangular element array) [Βασισμένο στο 157]	99
Εικόνα 2.29	Ομοιόμορφη ορθογωνική κεραία ισοτροπικών στοιχείων (uniform isotropic rectangular element array) [Βασισμένο στο 157]	101
Εικόνα 2.30	Εφαρμογή βαρών στα στοιχεία της συστοιχίας για τον έλεγχο της κατεύθυνσης της δέσμης [Βασισμένο στο 157]	104
Εικόνα 2.31	Beam Steering δέσμης με την εφαρμογή βαρών στα στοιχεία της συστοιχίας [157]	106
Εικόνα 2.32	Γενική σχηματική απεικόνιση Αναλογικού Beamforming (ABF)	111
Εικόνα 2.33	Αναλογικό (Analogue) Beamforming α) Πομπός, β) Δέκτης [131]	111
Εικόνα 2.34	Γενική σχηματική απεικόνιση Ψηφιακού (Digital) Beamforming	113
Εικόνα 2.35	Ψηφιακό Beamforming α) Πομπός και β) Δέκτης [131]	114

Εικόνα 2.36	Αναπαράσταση σήματος σε μιγαδική μορφή	115
Εικόνα 2.37	Υβριδικό Beamforming [134]	116
Εικόνα 2.38	Μερικώς Συνδεδεμένο Υβριδικό Beamforming [131]	117
Εικόνα 2.39	Πλήρως Συνδεδεμένο Υβριδικό (Fully connected) Beamforming [131]	118
Εικόνα 2.40	Διάταξη στοιχείων συστοιχίας: (α) Γραμμική (Linear array), (β) Επίπεδη (Planar array).....	119

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1	Το προβλεπόμενο μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς In-flight Wi-Fi 2021-2031 σε εκατομμύρια Αμερικάνικα δολάρια [69]	122
Εικόνα 3.2	α) Δορυφορική Σύνδεση (Satellite To Air), β) Σύνδεση Αέρος-Εδάφους (A2G), γ) Aeronautical Ad-hoc Networks AANET [163]	126
Εικόνα 3.3	Γενική Αρχιτεκτονική του Συστήματος Air-To-Ground [93]	128
Εικόνα 3.4	Αμερική - α) Ιστός Σταθμού Βάσης ATG Gogo, β) Εγκατάσταση κεραιών στον ιστό Σταθμού Βάσης Gogo, γ) Ιστός Σταθμού Βάσης ATG Airsky (πηγή: βίντεο) [95][149]	130
Εικόνα 3.5	Κάλυψη τεσσάρων τεταρτημόριων από πομποδέκτες ενός σταθμού βάσης αέρος-εδάφους [96]	131
Εικόνα 3.6	Διαφοροποίηση του μοτίβου εκπομπής των κεραιών του Επίγειου Σταθμού και του Σταθμού Αεροσκάφους ανάλογα με την γωνία ανύψωσης πάνω από τον ορίζοντα [162]	133
Εικόνα 3.7	Ο εξοπλισμός της καμπίνας του αεροσκάφους για τη διασύνδεση στο διαδίκτυο [96]	134
Εικόνα 3.8	Η Gogo διαθέτει τέσσερεις κεραιές στην άτρακτο για πολλαπλή συνδεσιμότητα με επίγειους σταθμούς του συστήματος αέρος-εδάφους [87]	135
Εικόνα 3.9	Οι εναέριες πλατφόρμες επεξεργασίας σήματος της Gogo: α) Avance L5, β) Avance L3, γ) ATG [121]	136
Εικόνα 3.10	Η πλατφόρμα συνδεσιμότητας ATG της SmartSky [146]	137
Εικόνα 3.11	Δορυφορική σύνδεση για παροχή Wi-Fi στο αεροσκάφος [105] ...	137
Εικόνα 3.12	Ο εξοπλισμός της Gogo για δορυφορική σύνδεση του αεροσκάφους (ATS) [105]	138
Εικόνα 3.13	Κεραία 2Ku radome για ATS σύνδεση [110]	139

Εικόνα 3.14	Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων (Satellite frequency bands) [106]	140
Εικόνα 3.15	Χάρτες Δορυφορικής Συνδεσιμότητας ATS (Satellite Inflight Coverage Map): (α) Panasonic [103], β) ViaSat [104], γ) Gogo [103], δ) Κάλυψη δικτύου ATG της Intelsat [21]	141
Εικόνα 3.16	Τρεις τύποι δορυφόρων σύμφωνα με το ύψος της τροχιάς τους γύρω από την Γη καθώς και οι δορυφόροι GPS	142
Εικόνα 3.17	Συνοπτική σύγκριση των τριών τύπων δορυφόρων [163]	143
Εικόνα 3.18	Σύγκριση των δύο τύπων δικτύων - A2G & ATS [163]	144
Εικόνα 3.19	Τοπολογία δικτύου AANET [163]	145

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1	Το προφίλ μιας τυπικής εμπορικής πτήσης [93]	147
Εικόνα 4.2	Πλάγια όψη: η περιοχή μη-κάλυψης κάτω από την Πανκατευθυντική κεραία (Βασισμένο στο [161]) (Βασισμένο στο [161])	149
Εικόνα 4.3	α) Κάλυψη Δικτύου EAN: Επίγειο δίκτυο Σταθμών Βάσης (CGC-Complementary Ground Components) και Δορυφορικές υπηρεσίες [167], β) Το επίγειο δίκτυο Βάσης Σταθμών του EAN (ground network component): 300 LTE BS [44]	151
Εικόνα 4.4	Εγκατάσταση Επίγειων Σταθμών ATG σε πλατφόρμα παραγωγής στη Βόρεια θάλασσα [166]	152
Εικόνα 4.5	Δεξιά: Η LTE κεραία (δεξιά) του σταθμού αεροσκάφους για το επίγειο δίκτυο EAN ACGC (Aviation Complementary Ground Component), Αριστερά: Η δορυφορική κεραία του αεροσκάφους για το EAN Mobile Satellite Services (MSS) η οποία επικοινωνεί με τον δορυφόρο στην S-band [91]	153
Εικόνα 4.6	Προδιαγραφές κεραιών στο πρότυπο ETSI TR 101 599 (2012) [96] για τον Επίγειο Σταθμό (GS)	154
Εικόνα 4.7	Εκπομπή Ισχύος στο πρότυπο ETSI TR 101 599 (2012) [96] για τον Επίγειο Σταθμό και τον Σταθμό Αεροσκάφους	156
Εικόνα 4.8	Κέρδος (peak gain) επίγειας κεραίας (GBS) & (AS) ETSI TR 101 599 (2012) [96]	156
Εικόνα 4.9	Κέρδος Σταθμού Αεροσκάφους (AS) σε σχέση με την ανύψωση (Elevation) ETSI TR 101 599 (2012) [96]	157
Εικόνα 4.10	Σύγκριση κέρδους κεραιών αεροσκάφους και σταθμού βάσης για antenna arrays με 4 στοιχεία: α) Elevation Σταθμού Αεροσκάφους (AS), β) Elevation Επίγειου Σταθμού (GS) [96]	158

Εικόνα 4.11	Αζιμουθιακό (Οριζόντιο) μοτίβο α) Κεραίας σταθμού αεροσκάφους (AS) - συστοιχία (array) με 16 κεραίες β) Κεραίας σταθμού αεροσκάφους (AS) - συστοιχία (array) με 16 κεραίες [96]	159
Εικόνα 4.12	DA2GC Χαρακτηριστικά Πομπού GBS & AS (Transmitter Characteristics) ETSI TR 103 108 (2013) [90]	160
Εικόνα 4.12	Μέγιστα προτεινόμενα επίπεδα EIRP σύμφωνα με το πρότυπο EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) της ETSI [108]	160
Εικόνα 4.13	Επίπεδο EIRP του Σταθμού Βάσης (GBS) ATG σε σχέση με την ανύψωση της κεραίας - ETSI / EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) [108]	162
Εικόνα 4.14	Επίπεδο EIRP του Σταθμού του Αεροσκάφους (AS) και η ανύψωση της κεραίας - ETSI / EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) [108]	163
Εικόνα 4.15	Η μάσκα EIRP του Σταθμού του Αεροσκάφους (AS) σε σχέση με την ανύψωση της κεραίας για ύψος 10 km [108]	163
Εικόνα 4.16	Κάλυψη του δικτύου Gogo για το σύστημα ATG (4G) – Το δίκτυο καλύπτει Ηνωμένες πολιτείες, Καναδά και μέρη της Αλάσκας [174]	164
Εικόνα 4.17	α) Κάλυψη 5G με τη χρήση 150 επίγειων σταθμών βάσης ATG της Gogo [173], β) Μελλοντική κάλυψη 5G του Καναδά και τμημάτων της Αλάσκας [172]	165
Εικόνα 4.18	Γραφική αναπαράσταση συστήματος παροχής Ίντερνετ αέρος-εδάφους της Gogo υποστηρίζει τεχνολογίες 3G, 4G και 5G [172]	166
Εικόνα 4.19	Το φάσμα συχνοτήτων του δικτύου ATG 5G (2.4 GHz & 850 MHz) [168]	167
Εικόνα 4.20	Η κεραία ATG 5G (2.4 GHz & 850 MHz) [168]	168
Εικόνα 4.21	Το σύστημα 5G ATG της ZTE [81]	168
Εικόνα 4.22	Κεραία ενσωματωμένη στα φτερά ενός drone (Isabelle project) [135]	170
Εικόνα 4.23	Διάφοροι τύποι polyimide aerogel που ανέπτυξε το εργαστήριο της NASA [142]	173
Εικόνα 4.24	Υποστρώματα Κεραίων (Radome & Antenna Substrates): α) Μονής όψης β) Διπλής όψης - Blueshift [152]	174
Εικόνα 4.25	AeroZero® Polyimide Aerogel Laminates [164]	175
Εικόνα 4.26	Κατασκευαστικές ιδιότητες τυπωμένων φύλλων AeroZero® Laminates - Blueshift [164]	176
Εικόνα 4.27	Κατασκευαστικές ιδιότητες τυπωμένων φύλλων AeroZero® Laminates - Blueshift [164]	177

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Επίδραση αριθμού στοιχείων στο σήμα	87
Πίνακας 4.1	179
Πίνακας 4.2	180

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

3GPP	: 3rd Generation Partnership Project
AANET	: Aeronautical Ad-hoc Networks
agl	: Above ground level
ah	: Above horizon
ATS	: Air-to-Satellite
ATG / A2G	: Air-to-Ground
BBU	: Baseband Unit
BER	: Bit Error Rate - Ρυθμός Σφαλμάτων Δυαδικού Ψηφίου
BS	: Base Station
BTS	: Base Transceiver Station
BPSK	: Binary Phase Shift Keying
CGC	: Complementary Ground Component
CPRI	: Common Public Radio Interface
C-RAN	: Centralized RAN
DA2GC	: Broadband / Direct Air to Ground Communications
DL	: Downlink / Κατερχόμενη / Καθοδική / Ευθεία ζεύξη
D-RAN	: Distributed RAN
ETSI	: European Telecommunications Standards Institute
EUROCONTROL	: European Organisation for Safety of Air Navigation
FAA	: Federal Aviation Administration
FDD	: Frequency Division Duplexing
GSM	: Global System for Mobile Communication
IATA	: The International Air Transport Association
ICAO	: International Civil Aviation Organization
IFC	: In-Flight Connectivity
ISD	: Inter-site Distance

ITU	: International Telecommunication Union
LTE	: Long Term Evolution
MSS	: Mobile Satellite Services
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiplex / Διαμόρφωση Συχνότητας με Ορθογωνισμό
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation / Διαμόρφωση Πλάτους με Τετραγωνισμό
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
RU	: Radio Unit
RRU	: Remote Radio Unit
SC-FDMA	: Single Channel Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SNR	: Signal-to-Noise Ratio
TDD	: Time Division Duplexing / Αμφίδρομη Επικοινωνία με Διαίρεση Χρόνου
UL	: Uplink / Ανερχόμενη / Ανοδική / Αντίστροφη ζεύξη
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Κυβελωτά Συστήματα

1.1 Εισαγωγή

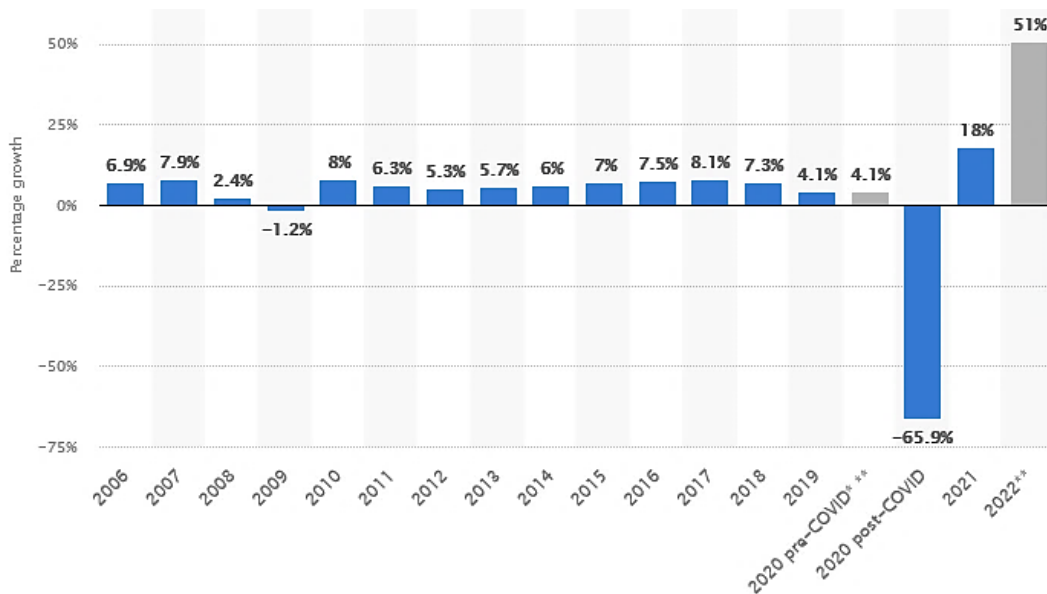
Τα κυβελωτά δίκτυα ως αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης ζωής διαμορφώνουν τομείς όπως η ψυχαγωγία, η εκπαίδευση, οι συναλλαγές, το εμπόριο και η επικοινωνία. Πλέον επιτρέπουν τη συνδεσιμότητα μέσω μεταφοράς (αυτοκίνητα, τρένα, αεροσκάφη) στο διαδίκτυο, έχοντας ξεπεράσει δύο προβλήματα: α) τα συχνά handover που προκαλούν απώλειες κλήσεων και εξάντληση της μπαταρίας του κινητού, και β) το φαινόμενο Doppler (Doppler Frequency Shift) που μειώνει την ποιότητα του σήματος. [51][52]



Εικόνα 1.1 Αεροπορικές εταιρείες με Wi-Fi στο αεροσκάφος το 2018 [11]

Τα σύγχρονα δίκτυα 4G (LTE) (και πλέον 5G), παρέχουν συνδεσιμότητα σε μέσα μεταφορών με υψηλές ταχύτητες (350 km/h π.χ. σε τρένα υψηλής ταχύτητας) αλλά πλέον

και στα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας όπου η συνδεσιμότητα τους στο διαδίκτυο έκανε τα πρώτα βήματα με τα δίκτυα 3G [8]. Ακόμα και πριν την κρίση της πανδημίας covid-19 το 2018, περίπου 56 αεροπορικές εταιρίες (Εικόνα 1.1) παρείχαν υπηρεσία Wi-Fi στους επιβάτες αεροσκαφών κατά την διάρκεια της πτήσης [11]. Προβλήματα όπως η ελλιπής ραδιοκάλυψη, το υψηλό latency και κόστος καθιστούσαν την συνδεσιμότητα των επιβατών στο διαδίκτυο προβληματική ή απρόσιτη σε πολλούς επιβάτες [9][10].



© Statista :

Εικόνα 1.2 Η πρόβλεψη της Statista για αύξηση της ζήτησης αεροπορικών ταξιδιών το 2022, μετά την εποχή covid 19 [53]

Η πανδημία του ιού covid-19 προκάλεσε σοβαρή ύφεση στα αεροπορικά ταξίδια το 2020 καθώς οι περιορισμοί δοκίμασαν τις εμπορικές αεροπορικές εταιρείες [7]. Οι αεροπορικές εταιρίες αντιμετώπισαν μια σειρά από εμπόδια, όπως οι καραντίνες σε διάφορες χώρες, το απρόβλεπτο κλείσιμο συνόρων και τα περίπλοκα πρωτόκολλα ασφαλείας (έρευνα Passenger Confidence Tracker 2021, Inmarsat [8]). Ωστόσο, η ίδια έρευνα αποτελεί πηγή ελπίδας για ανάκαμψη, αναφερόμενη στην έναρξη μια αυξητικής τάσης ζήτησης για αεροπορικά ταξίδια σε εγχώριο και σε διεθνές επίπεδο. Επίσης, η έρευνα “Annual growth

in global air traffic passenger demand from 2006 to 2022” της Statista [53] προβλέπει την εκτόξευση της ζήτησης αεροπορικών ταξιδιών μετά το έτος 2022 (Εικόνα 1.2). Αντίστοιχα, η Διεθνής Ένωση Αεροπορικών Μεταφορών (IATA - The International Air Transport Association) [16] προβλέπει τον διπλασιασμό του αριθμού των επιβατών των αεροπορικών εταιριών σε 8.2 δισεκατομμύρια στο διάστημα 2018 - 2037.

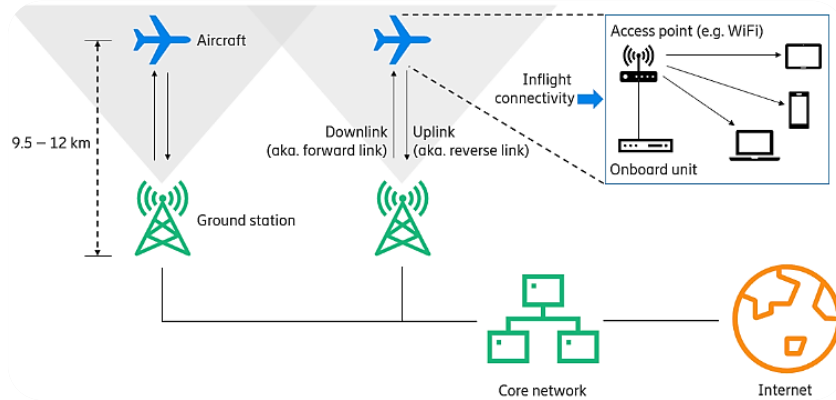
Οι υπηρεσίες των αεροπορικών εταιριών που παρέχονται στους επιβάτες θα παίξουν ρόλο στην ανάκαμψη των αεροπορικών μεταφορών (έρευνα Passenger Confidence Tracker 2021, Inmarsat [8]). Η συνδεσιμότητα στο Ιντερνέτ εν πτήσει είναι μια υπηρεσία η οποία διαφαίνεται να παίζει ρόλο προς αυτή την κατεύθυνση. Η συγκεκριμένη έρευνα δείχνει ότι μεγάλος αριθμός (41%) των ερωτηθέντων θεωρούν την παροχή της υπηρεσίας Wi-Fi εν πτήσει σημαντική, ενώ το ποσοστό αυξάνει για τους Αμερικανούς επιβάτες (55%).



Εικόνα 1.3 Γενική απεικόνιση συνδεσιμότητας αεροσκάφους στο Διαδίκτυο – Συνεργασία ATG και Δορυφορικού Δικτύων [175]

Στο παρελθόν, η πρόσβαση των αεροσκαφών στο Διαδίκτυο γινόταν μέσω δορυφορικής σύνδεσης, η οποία υπέφερε από χαμηλής ποιότητας σύνδεση και υψηλά λειτουργικά κόστη για την αεροπορική εταιρεία και τον επιβάτη. Η ανάπτυξη ενός δικτύου Αέρος-Εδάφους (Air-To-Ground ή ATG) για πρόσβαση στο διαδίκτυο που θα στηρίζεται στην λογική των

επίγειων δικτύων ευρυζωνικότητας ήταν απαραίτητη ώστε να είναι πιο προσιτό οικονομικά και να παρέχει υψηλότερες ταχύτητες. Ουσιαστικά, τα δυο δίκτυα συνεργάζονται (Εικόνα 1.3) αφού το δορυφορικό είναι απαραίτητο για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο στους επιβάτες σε συνθήκες όπου δεν υπάρχει πρόσβαση σε ένα δίκτυο ATG (π.χ. υπερατλαντικά ταξίδια). [163]



Εικόνα 1.4 Γενική εικόνα του Δικτύου ATG [92]

Ένα αεροσκάφος αερογραμμών κινείται συνήθως με ταχύτητα 800 km/h (η οποία μπορεί να φτάσει τα 1200 km/h) [81][92] και σε ύψος 9.5-12 km (31,000 - 38,000 feet) [97]. Το αεροσκάφος με τον κατάλληλο εξοπλισμό μπορεί να συνδεθεί στο Ίντερνετ μέσω ειδικά διαμορφωμένων επίγειων σταθμών βάσης (Εικόνα 1.4). Αυτοί αποτελούν μέρος του ειδικά σχεδιασμένου επίγειου συστήματος αέρος-εδάφους (Air-To-Ground ATG system). Οι συνηθισμένοι επίγειοι σταθμοί βάσης των κυψελωτών δικτύων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σύνδεση αεροσκαφών στο Ίντερνετ.

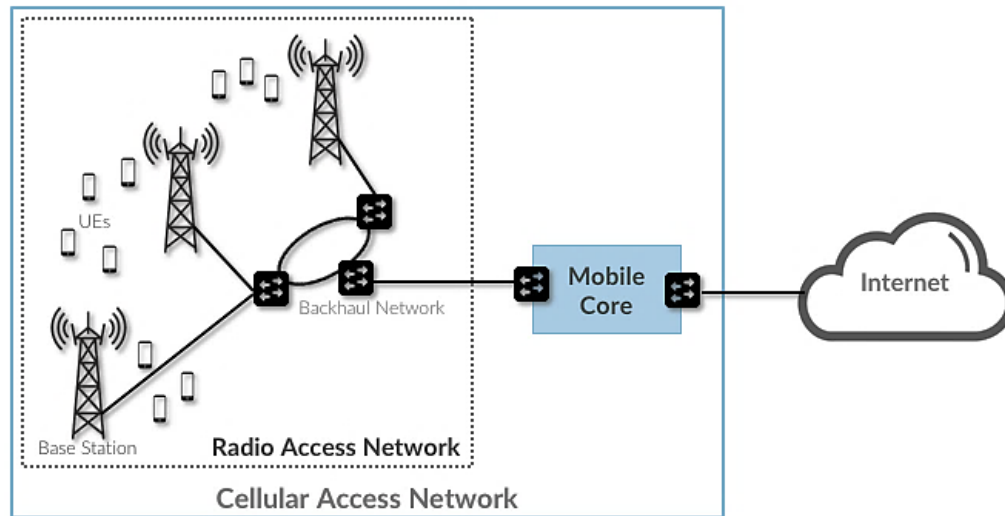
Υπάρχει απαίτηση για αυξημένη ισχύ και η κεραία τους (Μονάδα RU) πρέπει να είναι στραμμένη προς τον ουρανό για να συνδέεται με την αντίστοιχη κεραία του αεροσκάφους. Το σύστημα αέρος-εδάφους μοιράζεται το ίδιο γενικό θεωρητικό υπόβαθρο με αυτό των επίγειων κυψελωτών συστημάτων, καθώς οι επίγειοι σταθμοί βάσης έχουν παρόμοια αρχιτεκτονική με αυτή ενός σταθερού κυψελωτού δικτύου. Ωστόσο, ήδη διαθέσιμα συστήματα παροχής Ίντερνετ σε αεροσκάφη υστερούν συγκριτικά με τα αντίστοιχα

επίγεια ευρυζωνικά δίκτυα. Διαθέτουν χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (περίπου 10 Mbps) [9][10] ή ακόμα και 75Mbps όπως αυτό το LTE A2G της Nokia [49], και πρακτικά υστερούν σημαντικά σε σχέση με την ταχύτητα ενός επίγειου δικτύου 4G (100-300 Mbps) ή 5G (10-30 Gbps) [12].

Η εισαγωγή της τεχνολογίας 5G αναμένεται να συνεισφέρει σημαντικά στη βελτίωση αυτών των αδυναμιών [10]. Ήδη εταιρείες όπως η Gogo στην Αμερική προσφέρουν σύγχρονο Ίντερνετ με τεχνολογία 5G για τους επιβάτες συνδρομητικών αεροπορικών εταιρειών, δυστυχώς με κάποιο κόστος το οποίο παραμένει υψηλό [6]. Συνεπώς, η ύπαρξη ενός σύγχρονου δικτύου 5G, ειδικά σχεδιασμένου για τους επιβάτες των εμπορικών αερομεταφορών μιας νέας εποχής είναι επιτακτική [8]. Στην Ευρώπη ήδη το αντίστοιχο σύστημα παροχής Ίντερνετ σε αεροσκάφη βρίσκεται σε διαδικασίες αναβάθμισης σε 5G.

1.2 Γενικές Έννοιες Κυβελωτών Συστημάτων

1.2.1 Γενική Αρχιτεκτονική Κυβελωτού Δικτύου [28]



Εικόνα 1.5 Γενικό Διάγραμμα Κυβελωτού Δικτύου Κινητής Τηλεφωνίας [28]

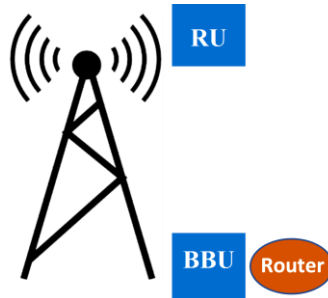
Ένα κυβελωτό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο εξάγωνων κυβελών. Κάθε κυβέλη διαθέτει ένα σταθμό ασύρματης επικοινωνίας (στα σύγχρονα δίκτυα 5G υπάρχουν περισσότεροι του ενός), ο οποίος ονομάζεται Σταθμός Βάσης (BS - Base Station). Ουσιαστικά, ένα κυβελωτό δίκτυο αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη (Εικόνα 1.5):

- A. Το Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης RAN (Radio Access Network)
- B. Το Κύριο Δίκτυο (Mobile Core Network ή απλά Core Network)

Ο Σταθμός Βάσης αποτελεί μέρος του Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης. Επιτρέπει μέσω ραδιοκυμάτων, την επίτευξη της επικοινωνίας ανάμεσα στους συνδρομητές UE (κινητό τηλέφωνο, smart phone, Η/Υ ή μια συσκευή η οποία ελέγχεται απομακρυσμένα) και μέσω του Δικτύου Κορμού (Core Network - CN) την σύνδεση με το νέφος/Ιντερνετ. Τα δυο

αυτά δίκτυα συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου μεταφοράς δεδομένων (Transport Network), το οποίο ονομάζεται Backhaul (Εικόνα 1.5).

Α. Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης RAN [29][35][71]



Εικόνα 1.6 Οι βασικές μονάδες του σταθμού βάσης (BS) στο δίκτυο RAN

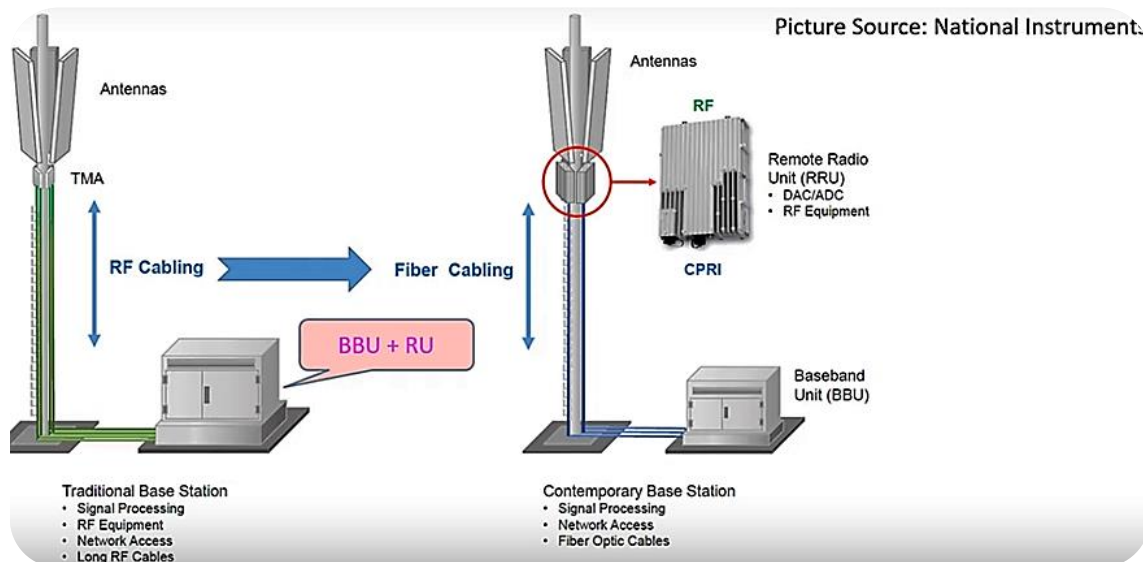
Ένα δίκτυο RAN αποτελείται από ένα σύνολο σταθμών βάσης (BSs / Base Stations), οι οποίοι αποκαλούνται επίσης cell towers / cell sites. Στα δίκτυα 2G, 3G, 4G και 5G αποκαλούνται BTS (Base Transceiver Station), Node B, eNodeB (eNB) και gNB αντίστοιχα. Η γενική δομή ενός σταθμού βάσης απαρτίζεται από τις παρακάτω μονάδες (Εικόνα 1.6):

- α) Κεραία (**antenna**)
- β) Μονάδα σήματος (Radio Unit - **RU**)
- γ) Μονάδα της βασικής ζώνης (Baseband Unit - **BBU**)
- δ) Δρομολογητή (**router**).

Γενικά, σύμφωνα με την ITU & CAICT [58], ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για μια σειρά λειτουργιών οι οποίες περιλαμβάνουν την παροχή κάλυψης με σήμα, την επεξεργασία του σήματος και τη μεταφορά δεδομένων. Αναλυτικότερη παρουσίαση των

λειτουργιών του του σταθμού βάσης (BS) πραγματοποιείται παρακάτω σε επόμενη ενότητα.

Η μονάδα BBU είναι υπεύθυνη για την διαχείριση του σταθμού βάσης, καθώς ελέγχει την κάλυψη και το σήμα, τη μετάδοση των δεδομένων και τη χωρητικότητα του συστήματος. Η RU συνδέεται με την κεραία και είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή του αναλογικού σήματος RF σε ψηφιακό και αντίστροφα και την ενίσχυση του σήματος. Η κεραία είναι τοποθετημένη πάνω στον ιστό και είναι υπεύθυνη για την εκπομπή και την λήψη των σημάτων καθώς και την διαμόρφωση του “σχήματος” της ραδιοκάλυψης.

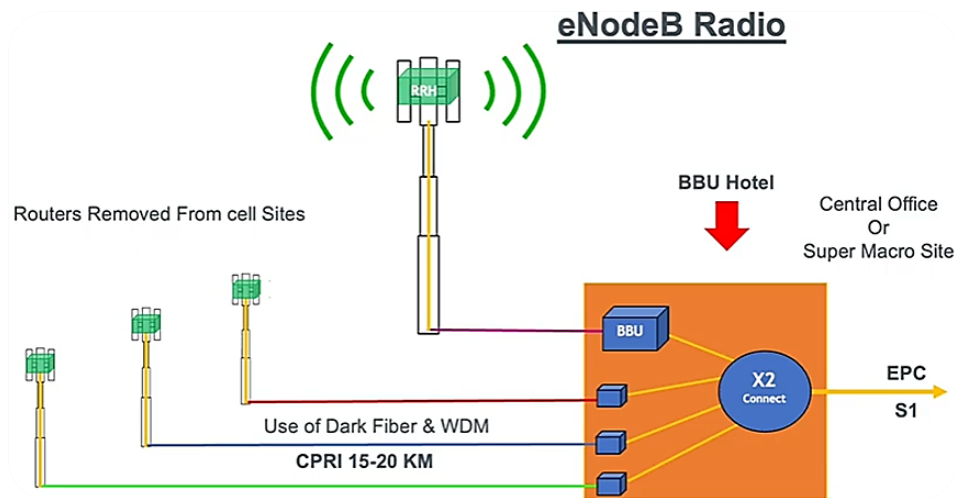


Εικόνα 1.7 Αρχιτεκτονική D-RAN (Distributed RAN):
Traditional BS vs Contemporary BS [29]

Στα παλαιότερα δίκτυα (2G / αρχικό 3G), το δίκτυο RAN αποτελείται από σταθμούς βάσης (BTS - Base Transceiver Station), οι οποίοι διατηρούσαν τις μονάδες BBU (Baseband Unit), RU (Radio Unit) και το router, σε μια μεταλλική καμπίνα δίπλα στην κεραία (antenna) (Εικόνα 1.7 - Traditional Base Station). Η κεραία συνδέονταν με τις μονάδες BBS και RU μέσω καλωδίου RF. Δυστυχώς, το κύριο μειονέκτημα της σύνδεσης μέσω καλωδίου RF αποτελούσαν οι υψηλές απώλειες λόγω εξασθένησης του RF σήματος.

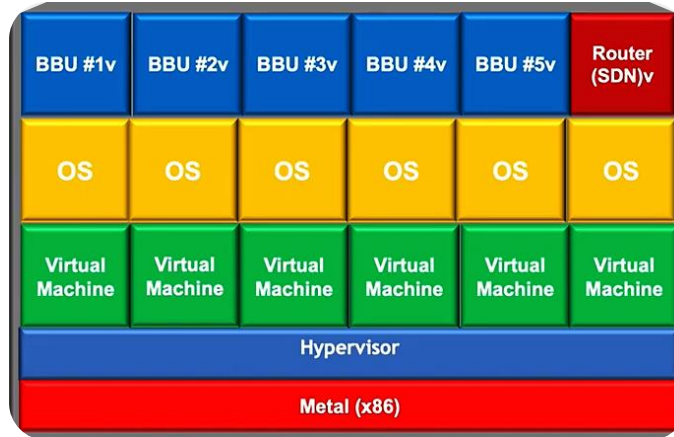
Στα μεταγενέστερα δίκτυα 3G και 4G, η μονάδα σήματος RU, μετονομαζόμενη πλέον σε RRU (Remote Radio Unit), τοποθετείται πάνω στην κεραία. Η μονάδα BBU και το router παραμένουν στη μεταλλική καμπίνα δίπλα στην κεραία (Εικόνα 1.7 - Contemporary Base Station). Οι μονάδες RRU και BBU συνδέονται πλέον με οπτική ίνα μέσω διασύνδεσης CPRI (Common Public Radio Interface) για ελαχιστοποίηση των απωλειών. Οι παραπάνω αρχιτεκτονικές RAN αντιστοιχούν στο D-RAN (Distributed RAN) ή κατακεντρωμένο Δίκτυο ραδιοπρόσβασης RAN.

Η αρχιτεκτονική D-RAN παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Ο μεγάλος όγκος των μηχανημάτων μεταφράζεται σε μεγάλο αποτύπωμα κάθε εγκατεστημένου σταθμού βάσης. Επιπλέον, αυτό έχει σαν συνέπεια το μεγάλο κόστος ενοικίασης χώρου από μια εταιρεία για την εγκατάστασή τους. Επίσης, η ύπαρξη ξεχωριστών μονάδων BBU για κάθε σταθμό βάσης συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. [72]



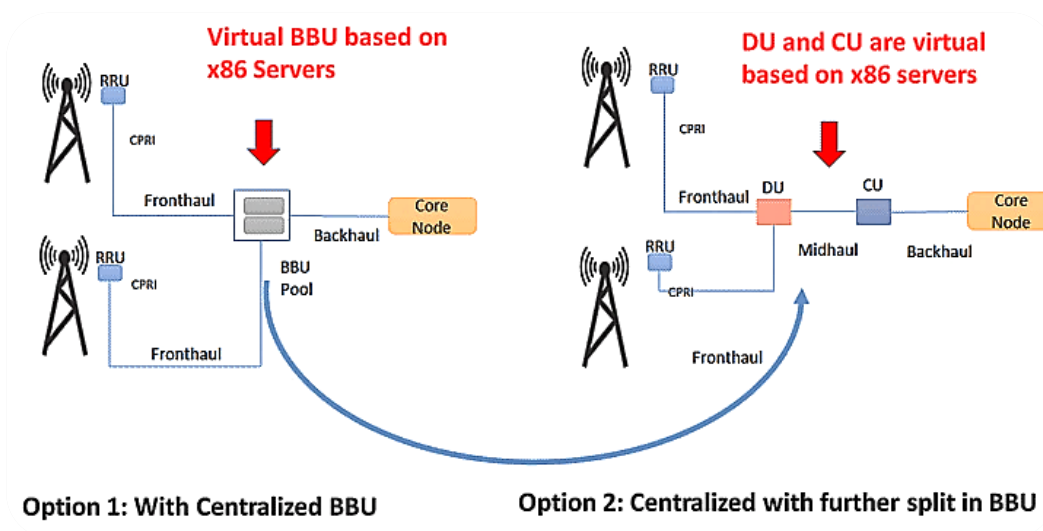
Εικόνα 1.8 Αρχιτεκτονική C-RAN (Centralized / Cloud RAN) [35]

Στο μεταγενέστερο δίκτυο 4G, η αρχιτεκτονική άλλαξε σε C-RAN (Centralized ή Cloud RAN). Οι μονάδες BBU και τα routers (διασύνδεση X2) μετακινήθηκαν σε ένα χώρο μακριά από την κεραία ο οποίος ονομάζεται BBU Hotel ή BBU pool ή Central Office (Εικόνα 1.8). Οι κεραίες συνδέονται με τους αντίστοιχους BBU μέσω της διασύνδεσης CPRI, με οπτικές ίνες (dark fiber) οι οποίες μπορεί να καλύπτουν αποστάσεις 15-20 km.



Εικόνα 1.9 Εικονικοποίηση (Virtualization) των BBUs και του Router [35]

Στο επόμενο στάδιο εξέλιξης επήλθε η εικονικοποίηση (virtualization) όλων των μονάδων BBU και του router (BBU Hotel ή Central Office) (Εικόνα 1.9). Εγκαθίσταται ένας διακομιστής (server) ο οποίος διαθέτει έναν hypervisor (λογισμικό που δημιουργεί και διαχειρίζεται εικονικές μηχανές), πάνω στον οποίο βρίσκονται εικονικές μηχανές (Virtual Machines) που υποστηρίζουν τις λειτουργίες των BBUs. Οι μονάδες BBU υποστηρίζονται από ένα SDN router (Software Defined Network). Η απλοποίηση της δομής του δικτύου αυξάνει την αποδοτικότητά του ενώ μειώνει το κόστος υλοποίησης και λειτουργίας.



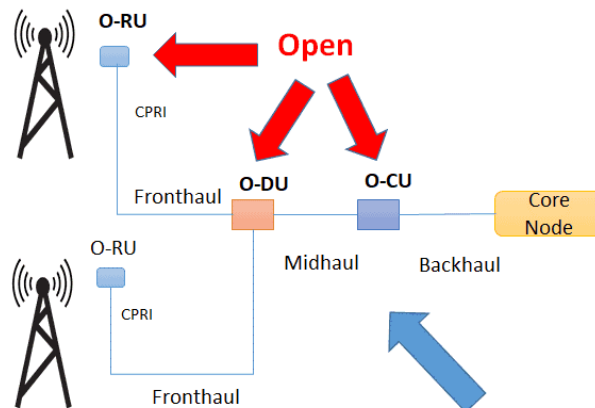
Εικόνα 1.10 Αρχιτεκτονική C-RAN με split BBU (Option 2) [71]

Στο δίκτυο 5G εφαρμόζεται μια παραλλαγή της αρχιτεκτονικής C-RAN (Centralized ή Cloud RAN) όπου η BBU pool χωρίζεται σε δυο επιμέρους μέρη (BBU split) (Εικόνα 1.10 - Option 2):

- α) τη μονάδα **DU** (Distributed Unit)
- β) τη μονάδα **CU** (Centralized Unit)

Η μονάδα DU βρίσκεται πλησιέστερα στις μονάδες RRU. Κάθε μονάδα CU συνδέεται με πολλαπλές μονάδες DU τις οποίες διαχειρίζεται, ενώ επίσης συνδέεται με το κύριο δίκτυο. Η σύνδεση ανάμεσα στα παραπάνω μέρη του Ασύρματου δικτύου, καθώς και με το Κύριο δίκτυο, επιτυγχάνεται μέσω τριών τύπων δικτύων μεταφοράς δεδομένων (Transport Networks) (Εικόνα 1.10 - Option 2):

- **Fronthaul:** Σύνδεση DU - RRU
- **Midhaul:** Σύνδεση DU - CU
- **Backhaul:** Σύνδεση CU - Core Network



Εικόνα 1.11 Αρχιτεκτονική O-RAN (Open RAN) [71]

Η αρχιτεκτονική του δικτύου 5G έχει προχωρήσει ένα βήμα πιο πέρα με την εφαρμογή της αρχιτεκτονική O-RAN (Open RAN) (Εικόνα 1.11). Πρόκειται για την ίδια αρχιτεκτονική C-RAN με διαχωρισμένο BBU (split) και εικονικοποίηση (virtualization), όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο, η διαφορά εντοπίζεται στην ευελιξία χρήσης

hardware και software, και γενικότερα την διαλειτουργικότητα την οποία προσδίδει η νέα αρχιτεκτονική στον RAN.

Η αρχιτεκτονική O-RAN καταργεί την παραδοσιακή εξάρτηση των δικτύων από την χρήση εξειδικευμένων hardware και software ενός αποκλειστικά κατασκευαστή-προμηθευτή (propriety vendor). Υπάρχει η δυνατότητα αγοράς και σύνθεσης hardware και software από διαφορετικούς προμηθευτές με αποτέλεσμα την διαλειτουργικότητα και τη μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου. Επίσης, πλέον επιτρέπεται η εικονοποίηση των RAN (virtualized RAN) και ο έλεγχός τους με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI powered control).

➤ **Βασικές Λειτουργίες του Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης RAN [28]**

Ο σταθμός βάσης (BS) ενός δικτύου RAN επιτελεί μια σειρά από βασικές λειτουργίες μερικές από τις οποίες είναι:

α) Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την απόδοση ενός ασύρματου καναλιού bearer σε ένα συνδρομητή UE. Αυτό αποδίδεται κατά την ενεργοποίηση της συσκευής (power-up) και επίσης κατά τα handover, ενώ απελευθερώνεται όταν η συσκευή (UE) παραμένει ανενεργή, ώστε να διατεθεί σε άλλους ενεργούς συνδρομητές.

β) Ο σταθμός βάσης είναι επίσης υπεύθυνος για την σύνδεση του χρήστη UE και του Κύριου δικτύου (Core Network) στο επίπεδο ελέγχου (Control plane) για σηματοδότηση (signaling), η οποία είναι υπεύθυνη για τις παρακάτω υπηρεσίες:

- Εγγραφή (Registration)
- Επικύρωση (Authentication)
- Ιχνηλάτηση (Tracking)

γ) Στα δίκτυα 4G και 5G, η συνδεσιμότητα ανάμεσα στο δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης RAN και το Κύριο δίκτυο (Core Network) βασίζεται στην χρήση διευθύνσεων IP (IP-based). Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την διακίνηση των πακέτων προερχόμενα από τα επίπεδα Ελέγχου (Control) και Χρήστη (User), ανάμεσα στον χρήστη UE και το Κύριο δίκτυο (Core Network) μέσω δυο πρωτοκόλλων IP:

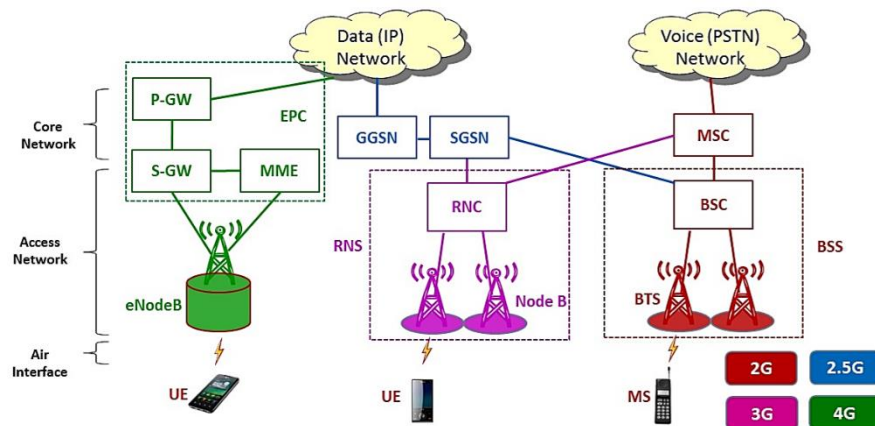
- SCTP/IP (Stream Control Transport Protocol)
- GTP /UDP /IP (General Packet Radio Service /User Datagram Protocol port)

Το πρωτόκολλο SCTP είναι υπεύθυνο για την διακίνηση των πακέτων στο επίπεδο ελέγχου (control) ενώ το πρωτόκολλο GTP/UDP/IP αναλαμβάνει την διακίνηση των πακέτων στο επίπεδο χρήστη (user).

δ) Επίσης, ο σταθμός βάσης συντονίζει την διαδικασία των handover κατά την μετακίνηση του χρήστη UE. Έτσι, ο σταθμός βάσης παρέχει σύνδεση εξασφαλίζοντας τη μεταφορά των πακέτων στα επίπεδα ελέγχου και χρήστη κατά την διάρκεια ενός handover.

ε) Ο σταθμός βάσης συντονίζει την ασύρματη μετάδοση multi-point προς έναν χρήστη UE. Ουσιαστικά, στην εποχή του 5G που απαιτείται massive connectivity, ο σταθμός βάσης συντονίζει την σύνδεση του χρήστη UE και διαχειρίζεται την πολλαπλή σύνδεση σε άλλους σταθμούς για την λήψη και εκπομπή δεδομένων.

B. Κύριο Δίκτυο (CN - Core Network) [28][73]



Εικόνα 1.12 Γενικό διάγραμμα εξέλιξης των δικτύων 2G/3G/4G [73]

Το Κύριο δίκτυο (Core Network) ως το κεντρικό μέρος του κυψελωτού δικτύου διαθέτει ποικίλες σημαντικές λειτουργίες στους συνδρομητές. Στην εικόνα 1.12 παρατηρούμε την εξέλιξη των δικτύων 2G/3G/4G. Ξεκινώντας από δεξιά προς τα αριστερά, το δίκτυο 2G

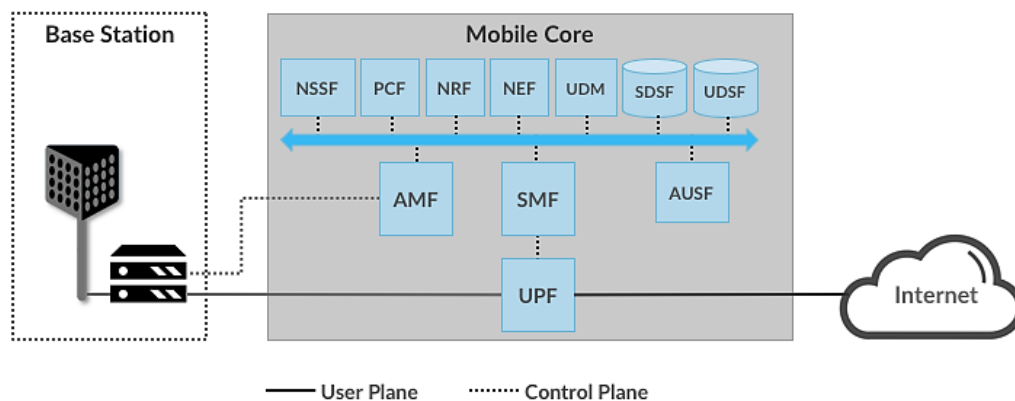
(GSM) διαθέτει το δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης το οποίο ονομάζεται BSS (Base Station Subsystem) και συνδέεται στο MSC (Mobile Switching Center) για την δρομολόγηση των φωνητικών κλήσεων. Ο σταθμός βάσης ονομάζεται BTS (Base Transceiver Station).

Στο επόμενο δίκτυο 2.5G προστέθηκε το Data Core του δικτύου στο ήδη υπάρχον MSC. Ουσιαστικά, το MSC αποτελούσε πλέον το Circuit Switch Core, υπεύθυνο για τις φωνητικές κλήσεις όπως είδαμε παραπάνω. Δηλαδή, έγινε πλέον η προσθήκη του Package Switch Core, αποτελούμενο από το SGSN (Serving GPRS Node) και το GGSN (Gateway GPRS Node).

Στο 3G τα Circuit Switch Core και Package Switch Core παρέμειναν και οι αλλαγές εστιάστηκαν περισσότερο στο Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης. Το Ασύρματο Δίκτυο ονομάζεται RNS (Radio Network Subsystem) και ο σταθμός βάσης NodeB. Στο 4G τα πράγματα αλλάζουν αφού το Circuit Switch Core δεν υπάρχει. Αυτό που παραμένει είναι το Package Switch Core το οποίο επαναπροσδιορίστηκε. Έχει επίσης γίνει διαχωρισμός των λειτουργιών σε δυο επίπεδα: α) Επίπεδο ελέγχου (Control Plane) και β) User Plane. Ο σταθμός βάσης ονομάζεται πλέον eNodeB.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.12, το Κύριο δίκτυο είναι πλέον το EPC (Evolved Packet Core). Περιληπτικά, παραθέτονται οι μονάδες που το αποτελούν και οι λειτουργίες τους:

- MME (Mobility Management Entity): Διαχειρίζεται την σηματοδότηση
- S-Gate (Serving Gateway) & P-GW (PDN Gateway): Διαχειρίζονται τα δεδομένα

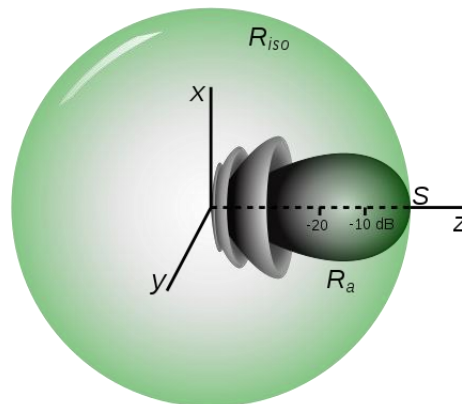


Εικόνα 1.13 Το Κύριο Δίκτυο 5G Core (NG-Core) [28]

Επίσης, όπως και στο δίκτυο 4G, έτσι και στο μεταγενέστερο δίκτυο 5G διατηρείται ο διαχωρισμός των λειτουργιών στα επίπεδα ελέγχου (Control Plane) και χρήστη User Plane (Εικόνα 1.13). Το δίκτυο 5G στην τελική του φάση θα συνεργάζεται με τους σταθμούς βάσης του 5G (gNodeB/gNB) για τα νέα τηλέφωνα 5G και παράλληλα θα δίνει πρόσβαση στα τηλέφωνα προηγούμενης τεχνολογίας μέσω των σταθμών βάσης 4G (eNodeB).

1.2.2 Έννοιες Διάδοσης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

➤ EIRP - Ενεργός Ακτινοβολούμενη Ισχύς [114]



Εικόνα 1.14 EIRP - Ιδανική Ισοτροπική κεραία και κύριο λοβός [114]

Η ισχύς που ακτινοβολεί η κεραία εκπέμπεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Μια θεωρητικά ιδανική ισοτροπική πανκατευθυντική (omnidirectional) κεραία όπως αυτή της εικόνας 1.14 ακτινοβολεί το σήμα σε ένα συμμετρικό μοτίβο γύρω της, στη μορφή μιας σφαίρας. Η Ισοδύναμη Ισότροπα Ακτινοβολούμενη Ισχύς EIRP (Effective Radiated Power ή Equivalent Isotropic Radiated Power) είναι η υποθετικά εκπεμπόμενη συνολική ισχύς μιας τέτοιας θεωρητικά ιδανικής ισοτροπικής κεραίας (0 dB ενίσχυση, σημείο που τέμνει το ισοτροπικό πεδίο S την περιφέρεια του κύκλου στην κατεύθυνση της ακτίνας -

Εικόνα 1.14), την οποία θα μετρούσαμε στην κατεύθυνση του κύριου λοβού μιας Κατευθυντικής κεραίας.

Ουσιαστικά, η ισχύς θα είναι ίση με την υποθετικά εκπεμπόμενη συνολική ισχύς της θεωρητικά ιδανικής ισοτροπικής κεραίας. Με άλλα λόγια, η Ισοδύναμη Ισότροπα Ακτινοβολούμενη Ισχύς (EiRP) μετράει την πυκνότητα ισχύος που εκπέμπει μια κεραία στην κατεύθυνση του κυρίου λοβού, δηλαδή του μέγιστου σήματος. Δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$EIRP = P_T + G_A - L \quad (1.1)$$

P_T = ισχύς του πομπού σε dBm ή dBW

G_A = κέρδος κεραίας σε dBi

L = απώλειες σε dB

Αν μιλάμε για κάποιο σταθμό βάσης ενός Ασύρματου Κυψελωτού δικτύου, τότε ισχύς εκπομπής αποτελεί την ισχύ στην έξοδο του combiner, και με το L αναφερόμαστε στις απώλειες λόγω του καλωδίου ή την οπτική ίνα και τον σύνδεσμο (connector) που τα συνδέει στην κεραία (RH Radio Head).

$$EIRP = P_T + G_{BS} - f_L \quad (1.2)$$

P_T = ισχύς του πομπού στην έξοδο του combiner σε dBm ή dBW

G_{BS} = κέρδος κεραίας σταθμού βάσης σε dBi

f_L = απώλειες του καλωδίου (feeder losses) σε dB

και επίσης σε dBW δίνεται ως:

$$EIRP \text{ (dBW)} = P_T \text{ (dBW)} + G_{BS} \text{ (dBW)} - f_L \text{ (dB)} \quad (1.3)$$

Είναι απαραίτητο μέγεθος στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Για παράδειγμα, στο Ευρωπαϊκό σύστημα αέρος-εδάφους EAN ορίζονται συγκεκριμένες συχνότητες και η Ενεργή Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος EIRP (Effective/Equivalent Isotropic Radiated Power), για κάθε δέσμη εκπομπής, και για συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων, από το πρότυπο EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) της ETSI [108]. Για παράδειγμα, για το

φάσμα συχνοτήτων 5850 - 5875 MHz ορίζεται το μέγιστο επίπεδο η Ενεργή Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος EIRP (Effective/Equivalent Isotropic Radiated Power), έως 32 dBm/MHz για κάθε δέσμη εκπομπής από την κεραία ενός σταθμού βάσης.

➤ **FSPL - Απώλεια Διαδρομής Ελευθέρου Χώρου [88][117][118]**

Ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα το οποίο εκπέμπεται από ένα πομπό, εξασθενεί κατά τη μετάδοση του σε ένα φυσικό μέσο. Το μοντέλο της απώλειας διαδρομής ελεύθερου χώρου θεωρεί μια ισοτροπική κεραία καθώς και την απουσία αντικειμένων ή επιφανειών γενικότερα από τις οποίες γίνεται απορρόφηση ή αντανάκλαση του σήματος.

Η Απώλεια Διαδρομής Ελευθέρου Χώρου FSPL (Free Space Path Loss) ουσιαστικά περιγράφει την εξασθένηση του σήματος καθώς απομακρύνεται από τον πομπό συναρτήσει της απόστασης στην περίπτωση LoS (line-of-sight path), δηλαδή όταν δεν υπάρχουν αντικείμενα ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη. Ουσιαστικά, η ισχύς του λαμβανομένου σήματος είναι κατά πολύ χαμηλότερη από αυτή του εκπεμπόμενου. Εξ ορισμού ορίζεται ως λόγος της εκπεμπόμενης ισχύος προς την λαμβανομένη ισχύ:

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} \quad (1.4)$$

Επίσης, η συνάρτηση Friis δηλώνει την σχέση της ισχύος εκπομπής της μιας κεραίας και την αντίστοιχη της λήψεως της άλλης κεραίας ως εξής:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \rightarrow \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2} \quad (1.5)$$

όπου: d = απόσταση ανάμεσα στις κεραίες πομπού t και δέκτη r

P_r : Λαμβανόμενη Ισχύς

P_t : Εκπεμπόμενη Ισχύς

G_r : Κέρδος κεραίας δέκτη

G_t : Κέρδος κεραίας πομπού

λ : το μήκος κύματος του σήματος

Η σχέση (1.5) δείχνει την εξασθένηση της ισχύος λήψης P_r καθώς το τετράγωνο της απόστασης ανάμεσα στις κεραίες πομπού και δέκτη αυξάνει. Επίσης, μπορούμε να την γράψουμε σε μια πιο σύγχρονη μορφή της σε σχέση με την κατευθυντικότητα της κεραίας ως εξής [118] :

$$\frac{P_t}{P_r} = D_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1.6)$$

όπου: D_r : η κατευθυντικότητα της κεραίας λήψης

D_t : η κατευθυντικότητα της κεραίας εκπομπής

και επειδή αναφερόμαστε σε ισοτροπικές κεραίες, $D_r = D_t = 1$. Αντικαθιστώντας στον τύπο (1.6) παίρνουμε:

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.7)$$

Επίσης, μπορούμε να γράψουμε την σχέση (1.4) σε dB:

$$P_L(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) \quad (1.8)$$

Επειδή ισχύει ότι $c=f*\lambda \Rightarrow \lambda=c/f$ και αντικαθιστώντας στην (1.7) παίρνουμε:

$$\frac{P_t}{P_r} = FSPL = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (1.9)$$

και τελικά αντικαθιστώντας την (1.9) στην (1.8) η απώλεια διαδρομής δίνεται σε dB ως:

$$P_L(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right) \quad (1.10)$$

Επίσης, έχουμε:

$$FSPL(\text{dB}) = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.44 \quad (1.11)$$

όπου: d = απόσταση ανάμεσα στον δέκτη και τον πομπό σε χιλιόμετρα (km)

f = η συχνότητα του σήματος σε MHz

και επίσης:

$$FSPL(dB) = 20 \log(d) + 20 \log(f) - 27.55 \quad (1.12)$$

όπου: d = απόσταση ανάμεσα στον δέκτη και τον πομπό σε μέτρα (m)

f = η συχνότητα του σήματος σε MHz

➤ **BER - Bit Error Rate [115]**

Σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα κατά τη μετάδοση δεδομένων μέσω ενός φυσικού μέσου μπορεί να γίνει εισαγωγή σφαλμάτων λόγω της αλλοίωσης της πληροφορίας. Ένας συντελεστής ο οποίος μπορεί να περιγράψει το ποσοστό εισαγωγής σφαλμάτων είναι ο λόγος σφαλμάτων BER. Περιγράφει την ακρίβεια της μετάδοσης ενός αριθμού δεδομένων μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Εκφράζεται ως το πηλίκο των εσφαλμένων bit τα οποία λαμβάνονται προς το σύνολο των bit τα οποία έχουν αποσταλεί. Ο αριθμός εκφράζεται επί τις εκατό ως εξής:

$$BER(\%) = \left(\frac{\text{Bit Σφάλματα}}{\text{Bit Συνολικά}} \right) \times 100\% \quad (1.13)$$

Επίσης, ο ρυθμός σφαλμάτων εκφράζεται ως αρνητική δύναμη του δέκα. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ένα σήμα με $BER = 10^{-6}$ τότε θα έχουμε ένα (1) σφάλμα για κάθε 1.000.000 bit τα οποία μεταδόθηκαν, ενώ αντίστοιχα για σήμα με $BER = 10^{-4}$ έχουμε 4 σφάλματα κατά τη μετάδοση 10.000 bit.

➤ **Ελάχιστο Απαιτούμενο SNR στην Έξοδο του Δέκτη - Χωρητικότητα Καναλιού [116][119]**

Πρόκειται για τον λόγο της ισχύος του λαμβανομένου σήματος προς την ισχύ του θορύβου, δηλαδή:

$$SNR = \frac{P_R}{P_N} \quad (1.14)$$

όπου: P_R : Ισχύς λαμβανομένου σήματος

P_N : Ισχύ του θορύβου.

Ο λόγος SNR δεν έχει μονάδες αλλά τυπικά εκφράζεται σε ντεσιμπέλ (dB) χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$\text{SNR}(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_R}{P_N} \right) \quad (1.15)$$

Όταν το $\text{SNR}(dB) = 0$ dB, τότε η Ισχύς του Λαμβανομένου σήματος = Ισχύς του Θορύβου.

Όταν το $\text{SNR}(dB) > 0$ dB, τότε η Ισχύς του Λαμβανομένου σήματος $>$ Ισχύς του Θορύβου.

Γενικά όσο μεγαλύτερο το SNR, τόσο υψηλότερο το σήμα σε σχέση με τον θόρυβο και συνεπώς, καλύτερο το κανάλι μετάδοσης. Όταν αναφερόμαστε σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα όπως στα κυψελωτά δίκτυα, τότε μπορούμε να περιγράψουμε το SNR επίσης ως [119]:

$$\text{SNR} = \frac{\text{Ισχύς Μετάδοσης} * \text{Κέρδος Καναλιού}}{\text{Ισχύς Θορύβου}} \quad (1.16)$$

Επειδή θεωρούμε μια ιστροπική κεραία όπου το σήμα μεταδίδεται ως μια ομοιόμορφη σφαίρα η οποία αυξάνει γύρω από την κεραία, θεωρούμε ότι σε μια ακτίνα d . Η εκπεμπόμενη ισχύς της κεραίας σε ακτίνα d διανέμεται στην επιφάνεια μια σφαίρας, η οποία έχει εμβαδόν $4\pi d^2$. Αντίστοιχα, η κεραία ενός κινητού είναι μικρή με εμβαδόν και συνεπώς θεωρούμε την ενεργό επιφάνεια κεραίας μοναδιαίου κέρδους, δηλαδή $\frac{\lambda^2}{4\pi}$. Ο λόγος του εμβαδού της κεραίας του κινητού προς το εμβαδόν της επιφάνειας της σφαίρας (του σήματος της κεραίας) μας δίνει:

$$\frac{\frac{\lambda^2}{4\pi}}{4\pi d^2} = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{d^2} \quad (1.17)$$

Το κέρδος του καναλιού G_c είναι:

$$C = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{d^2} \right) - 20 \log_{10}(d) \text{ dB} \quad (1.18)$$

Γνωρίζουμε ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος N_o (Power Spectral Density) ορίζεται ως $N_o = 4.002 \cdot 10^{-21}$ (watts/Hz) σε θερμοκρασία $T_o = 290\text{K}$ (περιβάλλοντος).

Ο θόρυβος N δίνεται ως το γινόμενο της φασματικής πυκνότητας ισχύος N_o (Power Spectral Density) και του εύρους ζώνης του καναλιού BW , δηλαδή:

$$N = N_0 * BW \quad (1.19)$$

Ωστόσο, προτιμούμε να τον δίνουμε σε dBm και συνεπώς διαιρώντας με 1mW θα έχουμε:

$$\frac{N_0 * BW}{1mW} = -174 + 10 \log_{10}(BW) \text{ (dBm)} \quad (1.20)$$

και συνεπώς έχουμε:

$$C = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{d^2} \right) - 20 \log_{10}(d) \text{ dB} \quad (1.21)$$

Επίσης, σύμφωνα με το θεώρημα του Shannon, η χωρητικότητα ενός καναλιού δίνεται ως:

$$C = BW \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.22)$$

Σύμφωνα με τον (1.22), η χωρητικότητα θα αυξάνει όσο ο θόρυβος μειώνεται ή όσο ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο αυξάνει, πράγμα πολύ σημαντικό στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

➤ SINR [116] [102]

Όπως γνωρίζουμε, η ενέργεια του σήματος μειώνεται κατά τη μετάδοσή του, οδηγώντας στην εξασθένιση ή την απώλεια διάδοσης του. Το SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) είναι η ένδειξη της ποιότητας του σήματος και ορίζεται ως ο λόγος του επιθυμητού επιπέδου σήματος προς το άθροισμα της ισχύος της παρεμβολής και του θορύβου, δηλαδή:

$$\text{SINR} = \frac{\text{Ισχύς του σήματος}}{\text{Θόρυβο} + \text{Ισχύ της Παρεμβολής}} \quad (1.23)$$

Οι διάφοροι πάροχοι δικτύων προσπαθούν να αυξήσουν το SINR είτε μέσω μείωσης του θορύβου είτε μέσω της αύξησης της ισχύος εκπομπής. Αυτό οδηγεί στην επίτευξη υψηλότερου σχήματος διαμόρφωσης (Modulation Coding Scheme MCS). Το σχήμα διαμόρφωσης (MCS) γενικότερα καθορίζει τον αριθμό των χρήσιμων bit τα οποία μεταφέρονται από ένα σύμβολο, και εξαρτάται από την ποιότητα του σήματος στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Στα δίκτυα 4G και 5G ένα σύμβολο αποκαλείται RE (Resource Element / Στοιχείο Πόρων). Ουσιαστικά, η βελτίωση του SINR βοηθάει ένας κυψελωτό δίκτυο με τους παρακάτω τρόπους:

- α) Συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας της κυψέλης
- β) Οδηγεί σε υψηλότερη τάξη διαμόρφωσης QAM
- γ) Προσδίδει υψηλότερη φασματική απόδοση
- δ) Προσφέρει αυξημένη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων

CQI	Range of SINR (dB)	MCS		Efficiency (Bits/RE)
		Modulation	Approximate code rate	
0	$SINR < -6.936$	Out of range	--	--
1	$-6.936 \leq SINR < -5.146$	QPSK	0.0762	0.1523
2	$-5.147 \leq SINR < -3.18$	QPSK	0.1172	0.2344
3	$-3.18 \leq SINR < -1.253$	QPSK	0.1885	0.3770
4	$-1.253 \leq SINR < 0.761$	QPSK	0.3008	0.6016
5	$0.761 \leq SINR < 2.699$	QPSK	0.4385	0.8770
6	$2.699 \leq SINR < 4.694$	QPSK	0.5879	1.1758
7	$4.694 \leq SINR < 6.525$	16 QAM	0.3691	1.4766
8	$6.525 \leq SINR < 8.573$	16 QAM	0.4785	1.9141
9	$8.573 \leq SINR < 10.366$	16 QAM	0.6016	2.4063
10	$10.366 \leq SINR < 12.289$	64 QAM	0.4551	2.7305
11	$12.289 \leq SINR < 14.173$	64 QAM	0.5537	3.3223
12	$14.173 \leq SINR < 15.888$	64 QAM	0.6504	3.9023
13	$15.888 \leq SINR < 17.814$	64 QAM	0.7539	4.5234
14	$17.814 \leq SINR < 19.829$	64 QAM	0.8525	5.1152
15	$SINR \geq 19.829$	64 QAM	0.9258	5.5547

Εικόνα 1.15 Δείκτης SINR σε σχέση με το σχήμα διαμόρφωσης & code rate [102]

Η εικόνα 1.15, απεικονίζει τιμές του εκτιμώμενου δείκτη SINR σε σχέση με το σχήμα διαμόρφωσης και code rate για ένα κανάλι 10 MHz στη μπάντα των 700 MHz, για 10% Block Error Rate (BLER) όπως προτείνεται για τα συστήματα LTE. Ο δείκτης SINR δεν παρέχεται στις προδιαγραφές 3GPP και συνήθως δεν αναφέρεται στο δίκτυο από κάποιο τερματικό (UE). Στο δίκτυο 5G NR υπάρχουν δυο τύποι SINR: α) SS-SINR και β) CSI-SINR (Channel State Information Reference Signal).

α) SS-SINR (Synchronization Signal-SINR)

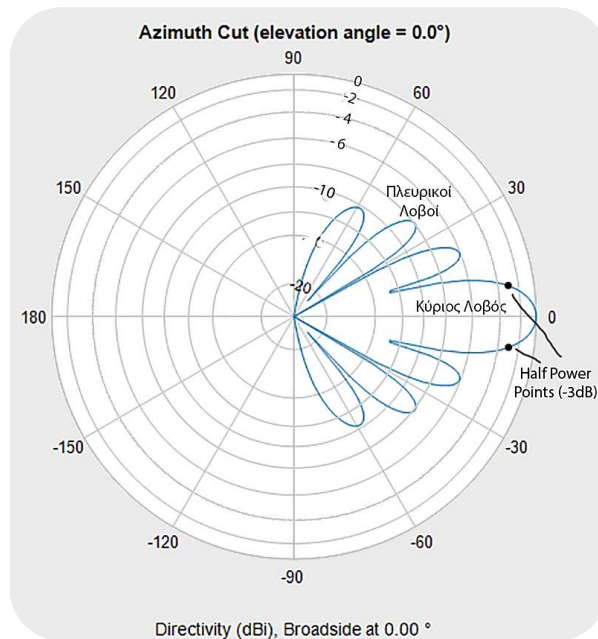
Πρόκειται για σήμα συγχρονισμού SINR το οποίο χρησιμοποιείται κατά τα handover, το οποίο με τη σειρά του χρησιμοποιείται από το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού (Secondary Synchronization Signal - SSS).

β) CSI-SINR

Είναι ένα σήμα αναφοράς το οποίο δίνει πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού. Χρησιμοποιείται από το κανάλι στα σήματα αναφορά του καναλιού CSI Reference Signals.

➤ Διάγραμμα Ακτινοβολούμενης Ενέργειας κεραίας [148]

Γνωρίζουμε ότι η ακτινοβολούμενη ένταση μιας κεραίας είναι διαφορετική προς κάθε κατεύθυνση. Επίσης, η ακτινοβολία που παράγει μπορεί να απεικονισθεί γραφικά με διάφορους τρόπους, όπως το πολικό διάγραμμα ή το τρισδιάστατο διάγραμμα τα οποία στην περίπτωση διαμόρφωσης ακτίνας (Beamforming), χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα μοτίβα.



Εικόνα 1.16 Πολικό διάγραμμα κεραίας - Οριζόντιο (Azimuth) (2D)

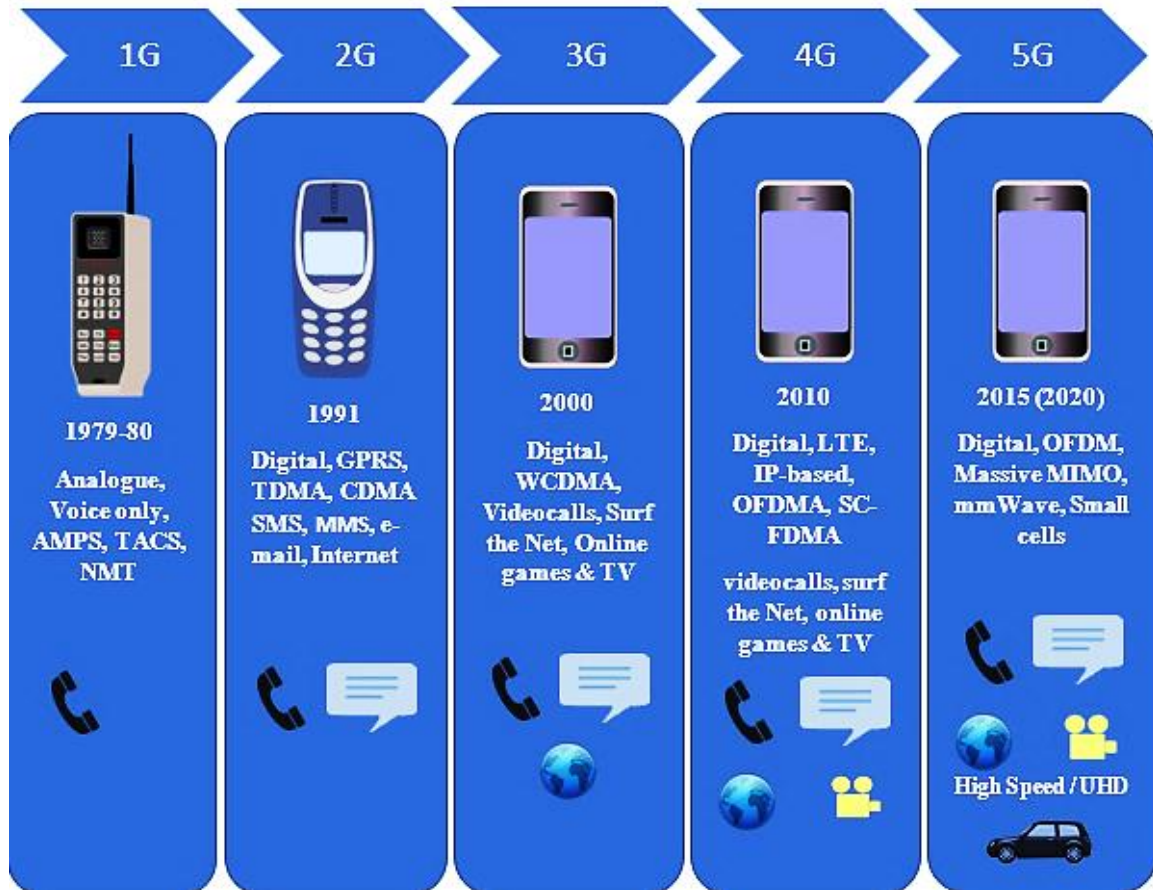
Στο πολικό διάγραμμα της εικόνας 1.16, το βασικό μοτίβο που παρατηρείται είναι ο Κύριος Λοβός (Main Beam / Lobe). Απεικονίζει την περιοχή της ακτινοβολίας με την

μέγιστη ενέργεια η οποία εκπέμπεται προς μια κατεύθυνση και συνεπώς χαρακτηρίζει την κατευθυντικότητα της κεραίας. Οι Πλευρικοί Λοβοί (Side lobes) αποτελούν μικρότερους λοβούς οι οποίοι βρίσκονται γύρω από τον κύριο λοβό αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις. (π.χ. 60, 40, 20 και -60, -40, -20 μοίρες στην εικόνα 1.16)

Τα Σημεία Μισής Ισχύος (Half Power Points) είναι τα σημεία όπου ο κύκλος των -3dB διασχίζει τον κύριο λοβό. Ουσιαστικά, προσδιορίζουν το Εύρος Δέσμης Μισής Ισχύος (Half Power Beam width - HPBW), όπου η ένταση της ακτινοβολίας του κυρίου λοβού μειώνεται κατά 50% (δηλαδή -3dB) σε σχέση με το μέγιστο. Στην εικόνα παρατηρούμε ότι τα σημεία μισής ισχύος αντιστοιχούν περίπου σε 10^0 και -10^0 (ή 360^0), και συνεπώς το εύρος δέσμης μισής ισχύος (HPBW) είναι 20^0 .

1.3 Δίκτυο 5G

1.3.1 Ιστορική Αναδρομή [23][45]



Εικόνα 1.17 Η εξέλιξη της κυψελωτής τεχνολογίας (1G - 5G)

Σύμφωνα με τους Li [67] και Keenan [22], το κυψελωτό δίκτυο 1G εμφανίστηκε στην Ιαπωνία το 1979 και στην Αμερική το 1980 (Εικόνα 1.17). Διέθετε αναλογική τεχνολογία Διαμόρφωσης Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης FDMA (Frequency Division Multiple Access) με διάφορες μορφές ανάλογα την χώρα, όπως AMPS (Advanced Mobile Phone System), TACS (Total Access Communications System), NMT (Nordic Mobile Telephone). Η ταχύτητα έφτανε τα 8-10 Kbps και υποστήριζαν μόνο φωνητικές κλήσεις.

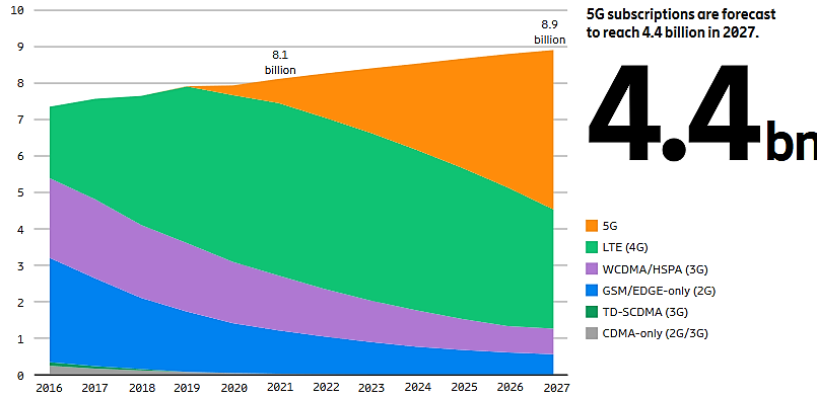
Οι εξελίξεις στην ψηφιακή τεχνολογία οδήγησαν στην ανάπτυξη μιας σειράς ψηφιακών κυψελωδών δικτύων (Εικόνα 1.17). Το 1991 εμφανίστηκε το 2G GSM (Global System for Mobile Communication) το οποίο διέθετε τεχνολογία Πολλαπλής Διαμόρφωσης με Διαίρεση Χρόνου TDMA (Time-Division Multiple Access) και Πολλαπλής Διαμόρφωσης με Διαίρεση Κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access).

Περιλάμβανε φωνητικές κλήσεις, την αποστολή και λήψη μηνυμάτων SMS (Short Messaging Services) και MMS (Multimedia Messaging Services) ενώ η ταχύτητα του έφτανε έως 64Kbps. Η έκδοση 2.5G διέθετε ταχύτητα 144Kbps και δυνατότητα λήψης - αποστολής e-mail και περιήγησης στο διαδίκτυο. Επίσης, εισήγαγε την τεχνολογία GPRS (General Packet Radio Service), δηλαδή την χρήση πρωτοκόλλων μεταγωγής πακέτων.

Το κυψελωτό δίκτυο 3G UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) παρουσιάστηκε στην Ευρώπη το 2000 (στην Αμερική ονομαζόταν CDMA2000), διαθέτοντας υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Η έμφαση ήταν στην ταχύτητα και συνεπώς οι χρήστες είχαν τη δυνατότητα για βιντεοκλήσεις, περιήγηση στο διαδίκτυο, διαδικτυακή τηλεόραση και διαδικτυακά παιχνίδια. Υποστήριζε πρόσβαση με WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και ταχύτητες 144 Kbps-2 Mbps.

Στα τέλη της δεκαετίας 2000, δημιουργήθηκε το δίκτυο 4G LTE (Long-Term Evolution), βασισμένο σε διευθύνσεις IP (IP-based mobile network), το οποίο παρείχε μικρή καθυστέρηση (latency), υψηλή ποιότητα φωνής, μετάδοση ροών δεδομένων (streaming) και υποστήριξη μέσω κοινωνικής δικτύωσης. Διέθετε πρόσβαση με OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) στο Downlink (173 Mbps) και SC-FDMA (Single Carrier Frequency Modulation Access) στο Uplink (58 Mbps).

Το 2015, η 3GPP (3rd Generation Partnership Project - παγκόσμιος φορέας προδιαγραφών ο οποίος αναπτύσσει διεθνή πρότυπα κινητής τηλεφωνίας) έθεσε τις προδιαγραφές για το νέο δίκτυο 5G, ένα σύνθετο κυψελωτό δίκτυο το οποίο συνδυάζει διάφορες τεχνολογίες και με ταχύτητα της τάξης των 20 Gbps. Η πρώτη φάση των προδιαγραφών του 5G όπως ορίζονται στην έκδοση Release-15 τελείωσε το 2019, ενώ οι διαδικασίες εγκατάστασης του συνεχίζονται. Βασικές τεχνολογίες που περιλαμβάνει το 5G είναι: OFDM, Massive MIMO, χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave) και small cells για χαμηλότερο SINR.



Εικόνα 1.18 Χρήση δικτύων 5G vs προηγούμενες τεχνολογίες (Erikson) [23]

Η έρευνα Erikson Mobility Report [23], πρόβλεψε ότι στο τέλος της τελευταίας δεκαετίας (2011-2021) ο αριθμός των συνδρομητών κυψελωτών δικτύων θα ανερχόταν σε 8.1 δισεκατομμύρια, εκ των οποίων 4.7 δισεκατομμύρια αποτελούν συνδρομητές στα δίκτυα 4G, και 660 εκατομμυρίων στα δίκτυα 5G (Εικόνα 1.18). Επίσης, η έρευνα προβλέπει την αύξηση των συνδρομητών κυψελωτών δικτύων στα 8.9 δισεκατομμύρια μέχρι το τέλος του 2027, εκ των οποίων 4.4 δισεκατομμύρια (49%) θα αφορούν στην πρόσβαση σε δίκτυα 5G έναντι των 3.3 δισεκατομμυρίων για τα δίκτυα 4G.

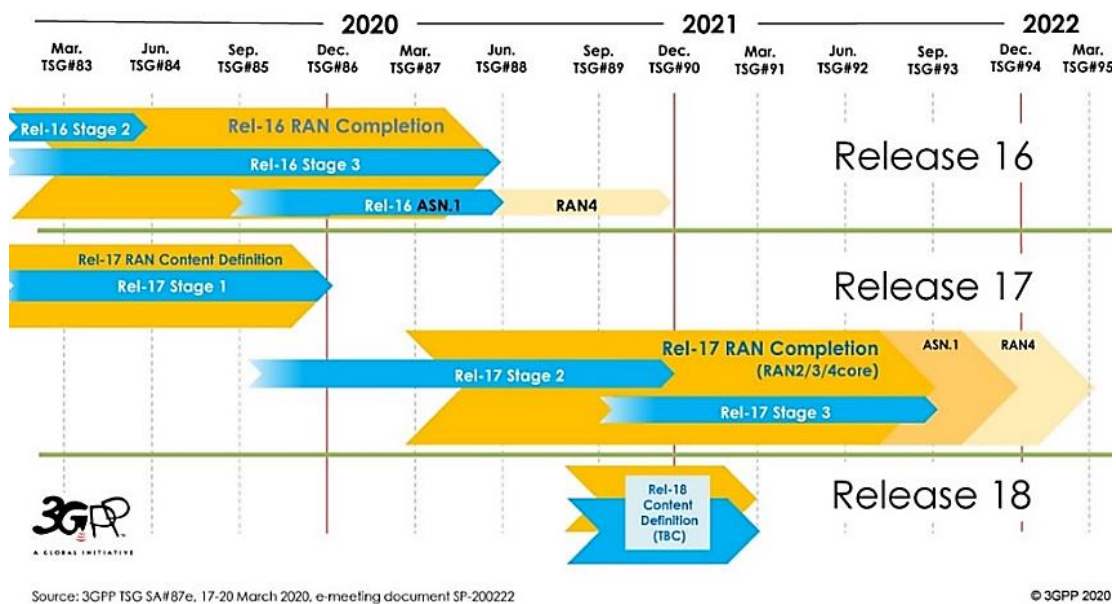
1.3.2 Εξέλιξη Δικτύου 5G

2016		2017				2018			
Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
αρχ. μελέτη 5G		5G Rel-15 NSA				ASN.1			
		5G Rel-15(συμπεριλαμβάνει Standalone)				ASN.1			
		στάδιο μελέτης 5G για την Rel-16				5G Rel-16			

Εικόνα 1.19 5G (NR) NSA, 3GPP-Release15 (Βασισμένο στο [68])

Η τεχνολογία 5G (5th Generation) ή 5G NR (5G New Radio) αποτελεί την επόμενη γενιά τεχνολογίας στον τομέα των ψηφιακών κυψελωτών δικτύων ως εξέλιξη της τεχνολογίας

4G (LTE - Long Term Evolution, 2009) [22]. Ο παγκόσμιος φορέας 3GPP έθεσε τις προδιαγραφές του δικτύου 5G (NR) με την πρώτη έκδοση “Release 15 early drop” (Εικόνα 1.19) το 2017 [26]. Η “Release 15” προσδιορίζει το χρονοδιάγραμμα και τα βήματα για την εγκατάσταση του δικτύου 5G (NR) και των μετατροπών του ήδη υπάρχοντος δικτύου 4G LTE σε ένα “σύνθετο” δίκτυο 5G (NR) Non-Stand Alone (NSA), το οποίο θα αρχίσει να ενσωματώνει λειτουργίες και μέρη του δικτύου 5G στις υποδομές του. Νέες ιδιότητες και δυνατότητες στο δίκτυο εισάγονται σε κάθε στάδιο υλοποίησης του δικτύου 5G.



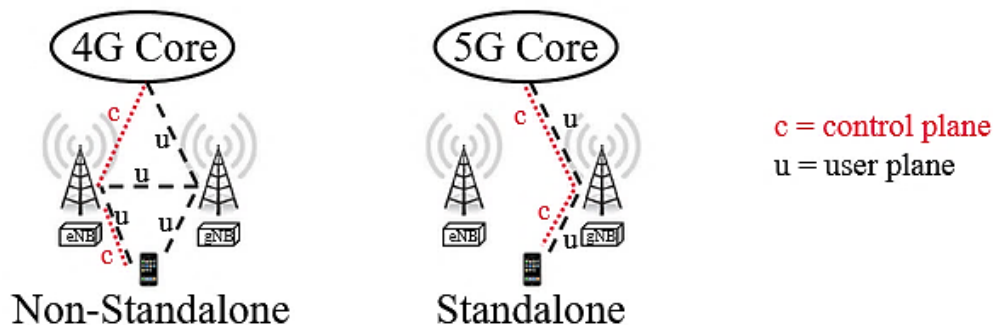
Εικόνα 1.20 3GPP - Σταδιακή υλοποίηση δικτύου 5G μέσω των εκδόσεων “Release 16”, “Release 17” & “Release 18” [27]

Η επόμενη έκδοση “3GPP Release 16” [27] (TR21.916) αποτέλεσε το δεύτερο στάδιο μετάβασης στο 5G (5G phase 2), το οποίο ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο 2020 (Εικόνα 1.20). Οι κύριες βελτιώσεις σχετίζονταν με το νέο δίκτυο ραδιοπρόσβασης 5G (NR) (radio interface) καθώς και με το υπάρχον δίκτυο ραδιοπρόσβασης 4G (LTE) (radio). Πιο συγκεκριμένα, έγιναν βελτιώσεις στη μεταξύ τους συνεργασία και την πρόσβαση του NR στις μη παραχωρημένες συχνότητες (unlicensed spectrum).

Μερικές από τις επιπλέον βελτιώσεις αφορούσαν στους παρακάτω τομείς:

- α) κινητή τηλεφωνία
- β) ευρυζωνική σύνδεση σε σιδηρόδρομους και σε τρένα υψηλής ταχύτητας
- γ) επικοινωνίες στον τομέα της ναυσιπλοΐας μέσω του 3GPP
- δ) εξοικονόμηση ενέργειας του χρήστη
- ε) παροχή υπηρεσιών σύνδεσης οχημάτων με συσκευές και υπηρεσίες *Vehicle-to-everything (V2X)*
- στ) την υπηρεσία *5G Satellite access* για πρόσβαση στο δορυφορικό δίκτυο

Οι εκδόσεις “3GPP Release 17” & “3GPP Release 18” (Εικόνα 1.20) προσδιορίζουν τις επόμενες βελτιώσεις και τροποποιήσεις ώστε να ολοκληρωθεί το επόμενο στάδιο εγκατάστασης του Δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN) της νέας γενιάς 5G έως το 2022. Οι τελικές εκδόσεις “Release 19 & 20” θα οδηγήσουν το δίκτυο σταδιακά να πάρει την τελική μορφή ως 5G Stand Alone (SA) με την εγκατάσταση του Δικτύου Κορμού (Core Network) έως το 2025.



Εικόνα 1.21 Non-Stand Alone (NSA) & Stand Alone (SA) 5G [40]

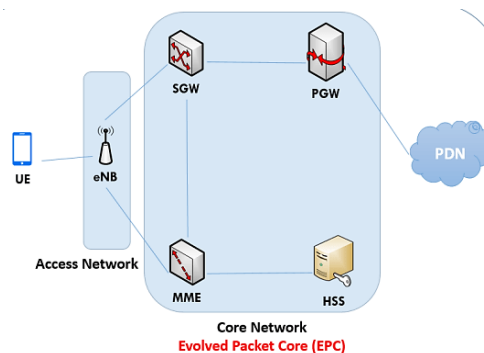
Το δίκτυο 5G αρχικά στην έκδοση “Release 15”, βρίσκεται σε μορφή Non-Stand Alone (NSA) (Εικόνα 1.21). Αποκαλείται E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC) (Evolved Universal Terrestrial Radio Access – New Radio) και αποτελείται από δυο τεχνολογίες: 4G και 5G. Το επίπεδο ελέγχου (control plane) παραμένει στο υπάρχον δίκτυο LTE 4G, όπου το Δίκτυο Κορμού (Core Network) του 4G EPC (Evolved Packet Core) διατηρεί τον

έλεγχο του δικτύου. Στο επίπεδο του χρήστη (user plane), θα συνυπάρχουν τεχνολογίες Δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN) 4G και 5G.

Στην τελική φάση, όπου θα έχουν υλοποιηθεί οι προβλεπόμενες εγκαταστάσεις και προσαρμογές, το δίκτυο περνάει στην επόμενη μορφή του ως αμιγώς 5G Stand Alone (SA) (Εικόνα 1.21), όπου το Δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) και το Δίκτυο Κορμού (Core Network) στηρίζονται αποκλειστικά στα συστήματα του 5G-NR. Στις επόμενες ενότητες γίνεται αναλυτικότερη αναφορά στο E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC) (NSA) καθώς και στο 5G-NR (SA).

Η ανάπτυξη του δικτύου 5G προωθείται παγκοσμίως με βάση χρονοδιαγράμματα που τίθενται από τις εκάστοτε χώρες. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί την ανάπτυξη του δικτύου 5G με δοκιμές εντός του 2017 και το 2018. Το 2020 αναμενόταν ένα πλήρως εμπορικό δίκτυο 5G σε τουλάχιστον μια μεγάλη πόλη για κάθε χώρα, με ορίζοντα το 2025 για πλήρη κάλυψη με το δίκτυο 5G, όλων των μεγάλων αστικών περιοχών αλλά και γενικότερα των διαδρομών που χαρακτηρίζονται ως μεταφορικές των χωρών της ΕΕ. [46]

1.3.3 Αρχιτεκτονική Δικτύου 4G LTE [41][45][48]



Εικόνα 1.22 Η βασική αρχιτεκτονική του Δικτύου 4G [38]

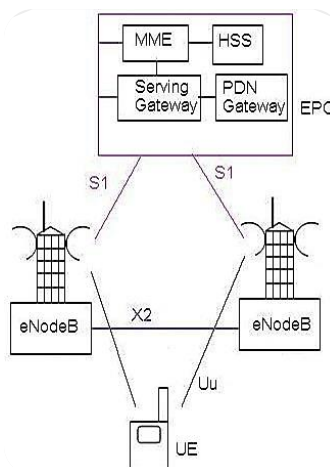
Για την κατανόηση της μεταβατικού δικτύου 5G, δηλαδή του Μη Αυτόνομου δικτύου 5G (NSA) δικτύου (ή E-UTRA-NR Dual Connectivity NSA), εξετάζεται πρώτα η βασική

δομή του δικτύου 4G LTE (Long Term Evolution). Τα τρία βασικά μέρη του LTE δικτύου είναι (Εικόνα 1.22):

- Ο Εξοπλισμός Χρήστη (UE)
- Το Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio)
- Το Δίκτυο Κορμού EPC (Evolved Packet Core)

Το τελευταίο είναι μια απλοποιημένη αρχιτεκτονική IP η οποία διαχειρίζεται τα πακέτα των δεδομένων (Data sessions) και τις φωνητικές κλήσεις των συνδρομητών. Συστατικό μέρος του δικτύου ασύρματης πρόσβασης E-UTRAN αποτελεί ο σταθμός βάσης (Base Station), ο οποίος ονομάζεται eNodeB ή eNB. Βασική λειτουργία του E-UTRAN είναι η διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ του χρήστη UE (π.χ. ένα έξυπνο τηλέφωνο) και EPC, δηλαδή η επίτευξη της ανοδικής (ανερχόμενη ή αντίστροφη) και καθοδικής ζεύξης (κατερχόμενη ή ευθεία) (UL, DL) του χρήστη UE στο EPC μέσω του eNB (eNodeB).

Σύμφωνα με την 3GPP [38], το δίκτυο LTE εφαρμόζει την επίπεδη αρχιτεκτονική (flat architecture), όπου ο σταθμός βάσης eNodeB (eNB) κάνει τον διαχωρισμό ανάμεσα στο επίπεδο χρήστη (user plane) και επίπεδο ελέγχου (control plane). Δηλαδή, διαχωρίζει την κίνηση των δεδομένων του χρήστη από τα δεδομένα που αφορούν την διαχείριση και τον έλεγχο του δικτύου, αλλά προωθεί και τα δύο στον EPC.



Εικόνα 1.23 Οι διεπαφές για την επικοινωνία ανάμεσα στα μέρη του δικτύου 4G LTE [41]

Η επικοινωνία αυτών των δεδομένων ανάμεσα στο Ασύρματο τμήμα E-UTRAN και το Κεντρικό δίκτυο (EPC) πραγματοποιείται μέσω συγκεκριμένων διεπαφών (interfaces) (Εικόνα 1.23). Δηλαδή, αυτές οι διεπαφές επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ των συνδρομητών/χρηστών UE, των σταθμών βάσης (κόμβων) eNodeB (eNB) και του Κυρίου δικτύου EPC. Συγκεκριμένα, η σύνδεση ανάμεσα στον συνδρομητή UE και έναν σταθμό βάσης eNodeB (eNB) είναι η διεπαφή Uu , ενώ δυο σταθμοί βάσης eNodeB (eNB) συνδέονται μέσω της διεπαφής X_2 . Η επικοινωνία ανάμεσα στο EPC και ένα σταθμό βάσης eNodeB (eNB) πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής S_1 . Η διασύνδεση του EPC με άλλα δίκτυα γίνεται μέσω της διεπαφής SGi .

Συνεπώς, όπως είδαμε παραπάνω, το κύριο δίκτυο EPC του LTE δικτύου αποτελεί μια αρχιτεκτονική η οποία διαχειρίζεται τόσο την διακίνηση δεδομένων (Data sessions), όσο και τις φωνητικές συνδιαλέξεις (Voice calls) των συνδρομητών (UE). Τα παρακάτω τέσσερα θεμελιώδη μέρη απαρτίζουν το Δίκτυο κορμού (EPC) (Εικόνα 1.23) και πραγματοποιούν σημαντικές διαχειριστικές λειτουργίες:

- Η κεντρική πύλη (gateway) Serving GW
- Η πύλη (gateway) PDN GW (Packet Data Network)
- Η βάση δεδομένων HSS (Home Subscriber Server)
- Η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας MME (Mobility Management Entity)

Αναλυτικότερα, τα δυο gateways, Serving GW και PDN GW διαχειρίζονται το επίπεδο χρήστη (user plane) και πιο συγκεκριμένα την επίτευξη της επικοινωνία του συνδρομητή UE με άλλους συνδρομητές UEs ή άλλα δίκτυα (external networks). Συνεπώς, η κεντρική πύλη Serving GW διαχειρίζεται την δρομολόγηση (routing) των πακέτων δεδομένων ανάμεσα στο RAN και το EPC. Παράλληλα προωθεί τα πακέτα δεδομένων προς την πύλη PDN. Αντίθετα, η πύλη PDN GW (Packet Data Network) αναλαμβάνει την σύνδεση ανάμεσα στο EPC και τα εξωτερικά δίκτυα, διαχειριζόμενο την απόδοση των IP διευθύνσεων (IP address). Κάθε φορά που ένας συνδρομητής UE εισάγεται στο δίκτυο, του αποδίδεται μια IP διεύθυνση, ώστε να καθίσταται δυνατή η ανταλλαγή πακέτων ανάμεσα σε διάφορα PDN του δικτύου LTE. Επίσης υποστηρίζει υπηρεσίες χρέωσης.

Όλα τα δεδομένα που σχετίζονται με τους συνδρομητές ενός συγκεκριμένου παρόχου, βρίσκονται αποθηκευμένα στην βάση δεδομένων HSS (Home Subscriber Server). Αυτά αφορούν πληροφορίες σχετικά με τον έλεγχο ταυτότητας (user authentication), εξουσιοδότηση πρόσβασης (access authorization) οι οποίες διεξάγονται μέσω του MME (Mobility Management Entity). Διαθέτει επίσης αποθηκευμένες πληροφορίες για τα MME με τα οποία ο συνδρομητής UE επικοινωνεί. Τέλος, η μονάδα MME (Mobility Management Entity), ως ο κύριος κόμβος ελέγχου πρόσβασης στο δίκτυο LTE, βρίσκεται στο επίπεδο ελέγχου (control plane) και εκτελεί διαχείριση Κινητικότητας (Mobility management), ελέγχοντας λειτουργίες υψηλού επιπέδου όπως η σηματοδότηση και η επικοινωνία με το HSS (Home Subscriber Server).

Κατά την αρχική εισαγωγή ενός κινητού στο δίκτυο, το MME εμπλέκεται στην διαδικασία ενεργοποίησης / απενεργοποίησης κομιστή (bearer), ενώ πραγματοποιεί την επιλογή S-GW για ένα κινητό σταθμό στο RAN ώστε να γίνει σύνδεση με το Κεντρικό δίκτυο EPC. Είναι επίσης, υπεύθυνο για την αντίστοιχη επιλογή S-GW για ένα κινητό σταθμό στο RAN κατά τη μεταπομπή (handoff) εντός του δικτύου LTE, όταν απαιτείται αλλαγή κόμβου δικτύου. Παράλληλα, είναι υπεύθυνο για την υπηρεσία ιχνηλάτησης (tracking) των τερματικών (UE) τα οποία βρίσκονται σε άεργη κατάσταση (idle mode), ώστε να γνωρίζει αν παραμένει διαθέσιμο (registered) και να του παρέχονται υπηρεσίες φωνής (Voice call) και πακέτα δεδομένων (Data packet). Στον τομέα της ασφάλειας πραγματοποιεί την πιστοποίηση (authentication) του συνδρομητή μέσω της βάσης δεδομένων HSS (Home Subscriber Server). Επίσης, είναι υπεύθυνο για υπηρεσίες τηλεειδοποίησης και επανεκπομπής.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το Κύριο Δίκτυο (Core Network) είναι γενικά υπεύθυνο για ένα σύνολο διεργασιών, όπως [28]:

- Απόδοση διευθύνσεων IP για την μεταφορά δεδομένων πληροφοριών (data) και δεδομένων φωνής (voice services) στο δίκτυο
- Έλεγχος Ποιότητας Υπηρεσιών QoS
- Έλεγχο των μεταπομπών (handovers) για αδιατάραχτη σύνδεση κατά τις μεταβάσεις των συνδέσεων ανάμεσα σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης
- Καταγραφή της χρήσης και της χρέωσης των συνδρομητών

Στο δίκτυο LTE προσφέρεται ένα εύρος συχνοτήτων που για την Ευρώπη διαθέτει συχνότητες 450 MHz 450/700/800/900 MHz καθώς και 1.8/2.1 GHz αλλά και υψηλότερες στα 3.6 MHz. Προσφέρεται ένα σύνολο μπαντών όπου άλλες χρησιμοποιούν διαμόρφωση FDD και άλλες TDD. Σύμφωνα με τον Frenzel [48] το δίκτυο LTE διαθέτει κλιμακωτή διαυλοποίηση και ως εκ τούτου το εύρος ζώνης περιλαμβάνει τις τιμές 1.4, 3, 5, 10, 15, και 20 MHz (component carriers). Ανάλογα με το κανάλι που χρησιμοποιείται και το είδος της υπηρεσίας που ζητείται, η συχνότητα της φέρουσας επιλέγει το εύρος ζώνης (BW). Καθώς το LTE βασίζεται στην διαμόρφωση OFDM και οι υποφέρουσες απέχουν κατά 15 kHz (περίοδος συμβόλου $1/15 \text{ kHz} = 66.7 \mu\text{s}$), ένας δίαυλος π.χ. 5 MHz μπορεί να διαθέτει $5 \text{ MHz} \times 66.7 \mu\text{s} = 667$ υποφέρουσες.

LTE (3GPP Release 8)	LTE-Advanced (3GPP Release 10)	LTE-Advanced Pro (3GPP Release 13)
No support for Carrier Aggregation	Aggregation of up to five (5) carriers	Aggregation of up to thirty-two (32) carriers
Maximum total bandwidth = 20 MHz	Maximum bandwidth with CA = 100 MHz	Maximum bandwidth with CA = 640 MHz

Εικόνα 1.24 Carrier Aggregation για τα δίκτυα LTE Advanced και LTE Advanced Pro [43]

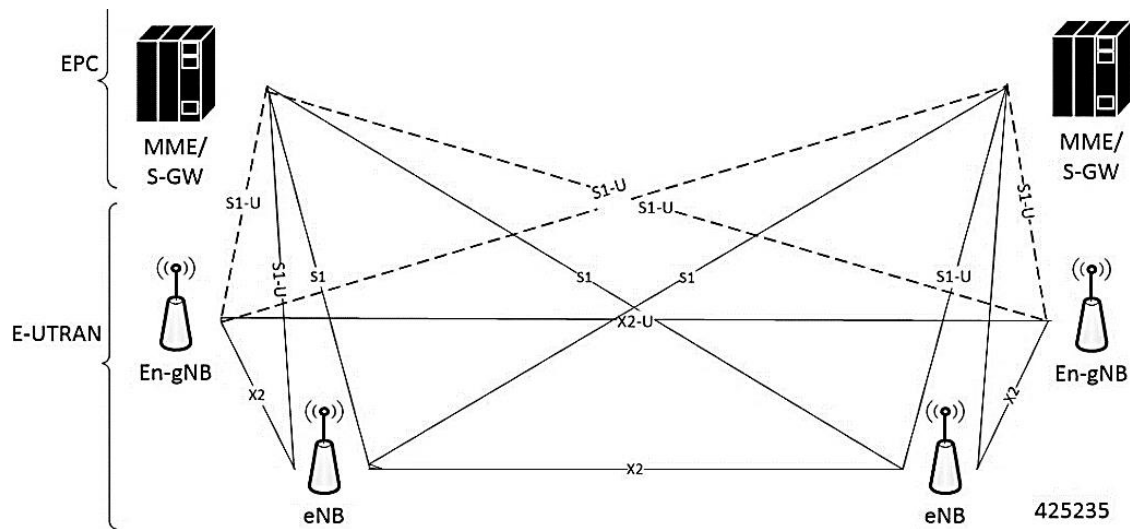
Ωστόσο, στο αναβαθμισμένο LTE Advanced, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της 3GPP Release 10, υπάρχει η δυνατότητα να αποδίδονται ακόμα μεγαλύτεροι δίαυλοι με εύρος άνω των 20 MHz έως και 100 MHz (Εικόνα 1.24). Οι παραπάνω αναφερόμενοι δίαυλοι του LTE, 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz και 20 MHz μπορούν να συνενώνονται φτάνοντας μέχρι πέντε συνδυασμούς ώστε να παράγουν εύρος ζώνης που φτάνει έως 100 MHz. Η 3GPP release 13 στην μεταγενέστερη έκδοση LTE Advanced Pro προσφέρει τη δυνατότητα συνένωσης τριάντα δύο (32) φερόντων (carriers) και συνεπώς το μέγιστο εύρος δικτύου να φτάνει τα 640 MHz ($20 \text{ MHz} \times 32$).

Έτσι, αντί της χρήσης ενός διαύλου (frequency band), συνδυάζονται δίαυλοι οι οποίοι ανήκουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Αυτές αποδίδονται σε μια συσκευή για την

αύξηση του εύρους συχνοτήτων και συνεπώς της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Η συγκεκριμένη τεχνική ονομάζεται συνάθροιση διαύλων ή φερόντων (Carrier Aggregation - CA) και εφαρμόζεται τόσο στην διαμόρφωση TDD όσο και στην FDD. Η τεχνική της εφαρμόζεται και στο 5G, επίσης. Σχετικά με την διαμόρφωση της ασύρματης επικοινωνίας η οποία εφαρμόζεται στο δίκτυο LTE 4G, χρησιμοποιούνται δυο τύποι: α) διαμόρφωση OFDMA για την κατερχόμενη ζεύξη DL και β) διαμόρφωση SC-FDMA για την ανερχόμενη ζεύξη UL.

1.4 Μη Αυτόνομο Δίκτυο 5G (NSA) [36][47][45]

Η αρχιτεκτονική Non-Stand Alone (NSA) ή E-UTRA-NR Dual Connectivity (DC) του δικτύου 5G αποτελεί την μεταβατική αρχιτεκτονική, όπου το δίκτυο 5G είναι ενσωματωμένο στο ήδη υπάρχον LTE (4G) δίκτυο. Ο συνδρομητής UE (User Equipment) συνδέεται και στα δύο δίκτυα ταυτόχρονα για την επικοινωνία δεδομένων, δηλαδή στο υπάρχον δίκτυο 4G αλλά και στο νέο δίκτυο 5G. Όπου δεν υπάρχει δίκτυο 5G, η πρόσβαση στο δίκτυο θα γίνεται αποκλειστικά μέσω του δικτύου 4G.[36]



Εικόνα 1.25 Γενική αρχιτεκτονική Δικτύου E-UTRA-NR DC (NSA) [36]

Ουσιαστικά, το E-UTRA-NR Dual Connectivity (DC) (NSA) του δικτύου 5G εφαρμόζει Διπλή Συνδεσιμότητα (Dual Connectivity). Πρώτον, αξιοποιεί την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία Κυρίου δικτύου (CN) του δικτύου 4G, δηλαδή το EPC (Εικόνα 1.25) στο επίπεδο ελέγχου (Control Plane). Δεύτερον, συνδυάζει το Κύριο δίκτυο του 4G (EPC) με δυο τεχνολογίες RAN: α) την τεχνολογία Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης (RAN - Radio Access Network) του 4G και β) το νέο RAN (NR) του δικτύου 5G. Σε αυτή την μεταβατική φάση, κυρίαρχο είναι το δίκτυο 4G, όπου το δίκτυο 5G λειτουργεί συμπληρωματικά.

Δηλαδή, στην αρχιτεκτονική (DC), η υπάρχουσα τεχνολογία 4G χρησιμοποιείται ως βάση για την εισαγωγή της τεχνολογίας 5G. Στο τμήμα του δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης (RAN) συνυπάρχουν τόσο η τεχνολογία Ασύρματης πρόσβασης eNodeB (ή eNB) του δικτύου LTE 4G η οποία λειτουργεί ως Κύριος κόμβος (Master Node) πρόσβασης, όσο και η τεχνολογία Ασύρματης πρόσβασης en-gNB του 5G-NR, η οποία λειτουργεί ως Δευτερεύον κόμβος (Secondary Node). Δηλαδή, διακρίνουμε δυο συνδέσεις: α) Σύνδεση UE – eNodeB (eNB) – EPC και β) Σύνδεση UE – en-gNB – EPC.

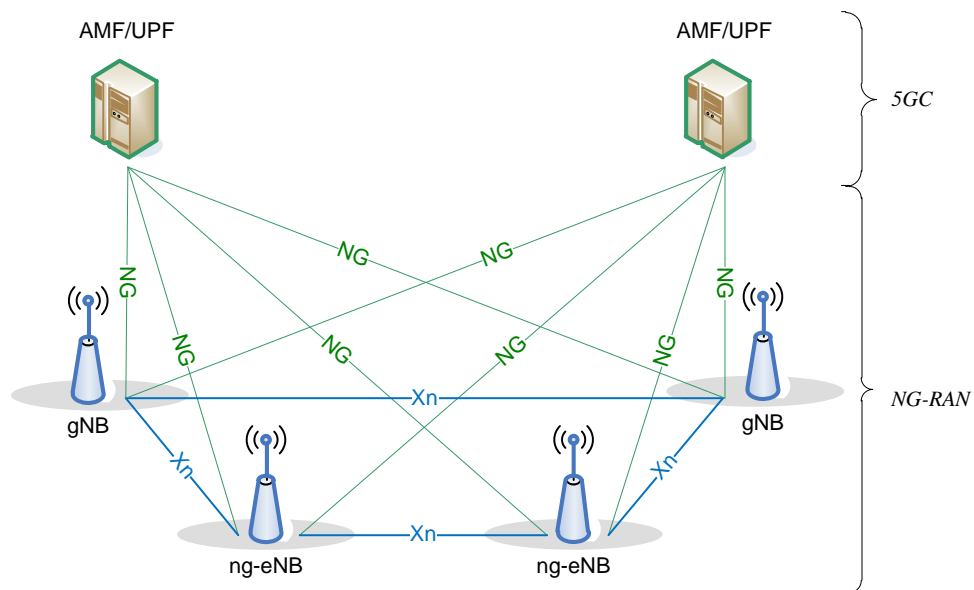
Οι δυο αυτές ασύρματες τεχνολογίες (Radio) συνεργάζονται μεταξύ τους έτσι ώστε ο en-gNB, όπου υπάρχει, προσφέρει επιπρόσθετο bandwidth για την διασύνδεση στο EPC (Evolution Packet Core) του LTE. Συνεπώς, ένα χρήστης (UE) συνδέεται στο Κύριο Δίκτυο EPC (Evolved Packet Core) του E-UTRA-NR (DC) 5G (Εικόνα 1.25) μέσω του eNB (eNodeB) του δικτύου 4G, αλλά παράλληλα και μέσω του en-gNB του δικτύου 5G εφόσον είναι διαθέσιμο, και εφόσον η συσκευή είναι τεχνολογίας 5G.

Με αυτό τον τρόπο, οι διάφοροι φορείς κινητών τηλεπικοινωνιών σε αυτή τη μεταβατική φάση, επιτυγχάνουν να παρέχουν υπηρεσίες 5G έστω με μικρότερη ταχύτητα από αυτή του 5G SA αλλά μεγαλύτερη από του LTE (4G), με χαμηλότερο κόστος, χωρίς απότομες και ριζικές αλλαγές στην τεχνολογία. Παράλληλα, οι χρήστες δεν εξωθούνται σε άμεση αντικατάσταση της υπάρχουσας τεχνολογίας των κινητών συσκευών τους.

Το E-UTRA-NR (DC) αποτελεί ένα δίκτυο με διπλή τεχνολογία το οποίο διαθέτει τις διεπαφές X2 και S1 του δικτύου LTE (ενότητα 1.4.3 - αρχιτεκτονική του δικτύου 4G LTE). Πιο συγκεκριμένα, στο Μη αυτόνομο Δίκτυο 5G (NSA), η διεπαφή X₂ χρησιμοποιείται για την επικοινωνία ανάμεσα στους διάφορους κόμβους του δικτύου E-UTRAN (Εικόνα

3.10), επιτρέποντας την επικοινωνία ανάμεσα στους σταθμούς eNB του LTE καθώς και ανάμεσα στους en-gNB του 5G, αλλά επίσης και μεταξύ των eNB και en-gNB.

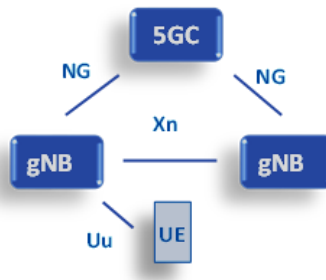
Γενικότερα, οι σταθμοί βάσης eNodeB (eNB) και en-gNB σχετίζονται με λειτουργίες οι οποίες αφορούν στην διαχείριση αλλά και τον καταμερισμό των ραδιοπόρων του ασύρματου δικτύου RAN καθώς και των bearer, ώστε να παρέχονται οι κατάλληλες συχνότητες στους συνδρομητές (UEs) κατά την διάρκεια των συνδέσεων. [45].



Εικόνα 1.26 Το δίκτυο 5G-NR σύμφωνα με την 3GPP TS 38.300 V15.4.0 (2018-12) [47]

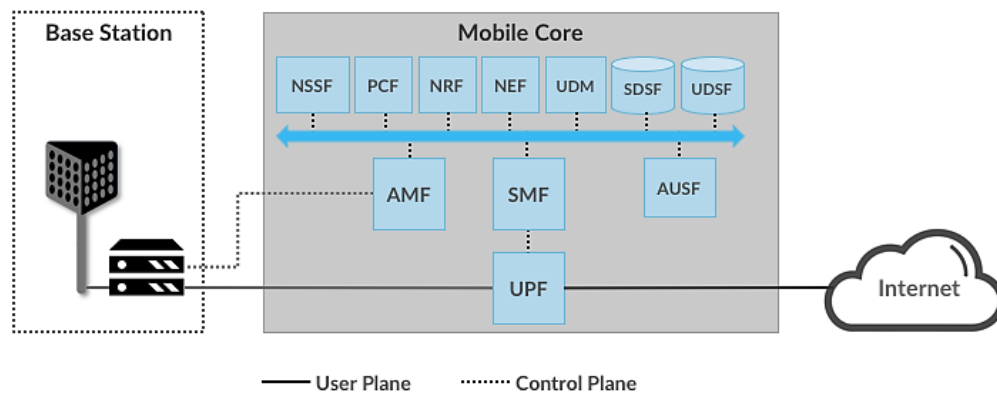
Ωστόσο, σύμφωνα με την έκδοση 15 (Release 15) της 3GPP [47], το δίκτυο στην δεύτερη φάση της διπλής συνδεσιμότητας (DC - μη αυτόνομο NSA), θα αποκτήσει το Κεντρικό δίκτυο του 5G, δηλαδή το 5G Core (NG-Core) (Εικόνα 1.26). Σε αυτή τη φάση πλέον, οι προγενέστεροι σταθμοί βάσης eNB θα έχουν μετατραπεί σε ng-eNB, ενώ παράλληλα οι διεπαφές για την επικοινωνία ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και το κύριο δίκτυο, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, θα είναι αυτές του αυτόνομου 5G-NR: NG και Xn.

1.5 Αυτόνομο Δίκτυο 5G-NR (SA)[28]



Εικόνα 1.27 Απλοποιημένο διάγραμμα αρχιτεκτονικής 5G (SA): gNB, 5G Core και οι διεπαφές (interface)

Στην Αυτόνομη αρχιτεκτονική 5G (SA), τόσο το Ασύρματο Δίκτυο (NG-RAN) (Next Generation Radio Access Network) όσο και το Κύριο Δίκτυο (NG-Core ή 5G Nanocore) είναι τεχνολογίας 5G-NR [66]. Στο 5G (SA) υπάρχουν οι τύποι διεπαφών Xn, NG, E1, F1, F2 και Uu. Οι διεπαφές (interfaces) Xn και NG επιτρέπουν την επικοινωνία μέρη του του Ασύρματου δικτύου NG-RAN. Συγκεκριμένα, οι gNB σταθμοί επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω της διεπαφής (interface) Xn (Εικόνα 1.27) ενώ η διεπαφή NG επιτρέπει την διασύνδεση ανάμεσα σε ένα σταθμό βάσης gNB και το κύριο δίκτυο 5G Core. Ένας συνδρομητής UE συνδέεται με ένα σταθμό βάσης gNB μέσω της διεπαφής Uu.

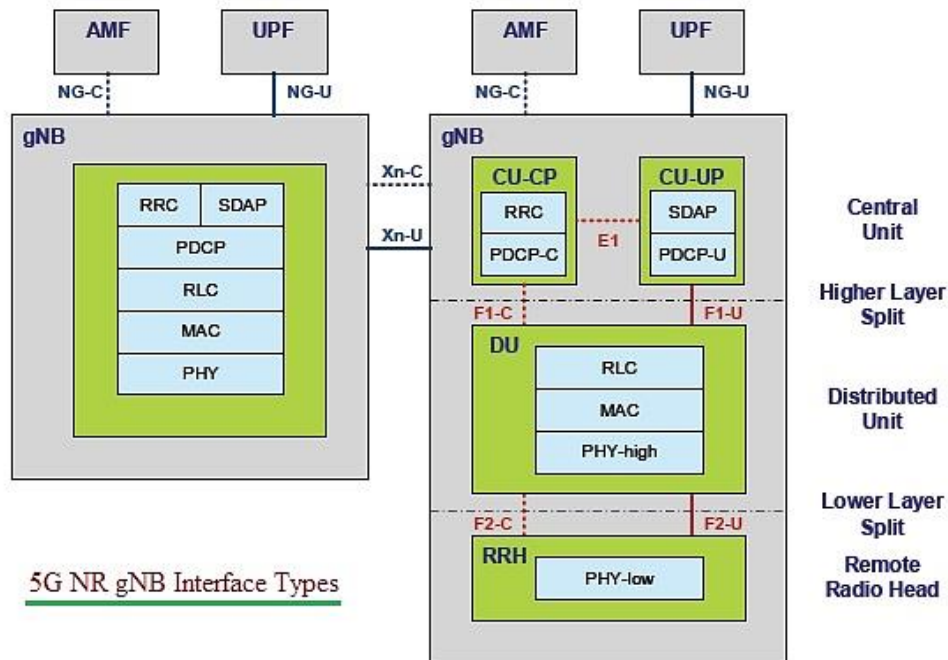


Εικόνα 1.28 Βασική αρχιτεκτονική του Κυρίου Δικτύου 5G Core (NG-Core) [28]

Ξεκινώντας από το Κύριο δίκτυο 5G (NG-Core), τα βασικά του μέρη οργανώνονται σε δυο ομάδες (Εικόνα 1.28), οι οποίες αντιστοιχούν στα επίπεδα ελέγχου (Control Plane - CP) και χρήστη (User Plane - UP). Ουσιαστικά, τα δυο αυτά επίπεδα αντιπροσωπεύουν τα πρωτόκολλα (διεπαφές) Uu και NG όπως είδαμε προηγουμένως, τα οποία εμπλέκονται στην επικοινωνία ανάμεσα στον συνδρομητή (UE), το ραδιοδίκτυο (NG-RAN) και το Κύριο δίκτυο (NG-CORE) του κυψελωτού δικτύου.

Δυο βασικά μέρη του NG-Core είναι τα εξής:

1. **AMF** (Access and Mobility Management Function)
2. **UPF** (User Plane Function)



Εικόνα 1.29 Οι διεπαφές Xn, NG, E1, F1 και F2 στο δίκτυο [66]

Στην εικόνα 1.29, παρατηρούμε αναλυτικότερα τις διεπαφές Xn, στα επίπεδα ελέγχου και χρήστη (Xn-C, Xn-U) για την επικοινωνία του ασύρματου δικτύου σταθμών μεταξύ τους NG-RAN, δηλαδή των σταθμών βάσης gNB. Παρατηρούμε επίσης την διεπαφή NG στα δυο επίπεδα (NG-C, NG-U) τα οποία συνδέονται με τα δυο βασικά μέρη του NG-Core,

δηλαδή το AMF μέσω της διεπαφής NG-C και το UPF μέσω της διεπαφής NG-U. Άλλες διεπαφές όπως οι E1, F1 και F2 διασυνδέουν τα διάφορα μέρη του κυρίου δικτύου.

Το **AMF** (Access and Mobility Management Function) ή Λειτουργία Διαχείρισης Πρόσβασης και Κινητικότητας ανήκει στο επίπεδο ελέγχου (control plane) και είναι υπεύθυνο για ένα σύνολο λειτουργιών, μερικές από τις οποίες είναι:

- Διαχείριση Προσβασιμότητας (reachability management) - Είναι υπεύθυνο για: α) έλεγχο ταυτότητας (user authentication), β) Εξουσιοδότηση πρόσβασης (access authorization). Κοινώς, ελέγχει ποια UEs έχουν πρόσβαση στον 5G (NG-Core) ώστε να μπορούν να επικοινωνούν με ένα δίκτυο Δεδομένων (DN) π.χ. Internet
- Διαχείριση Κινητικότητας (mobility management) - Ελέγχει την αλλαγή (handoff/handover) από έναν gNB σε έναν άλλο ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή συνέχεια της σύνδεσης κατά την διάρκεια μιας συνεδρίας (session)
- Υπηρεσία τοποθεσίας (location service)

Το **UPF** (User Plane Function) βρίσκεται όπως δείχνει το όνομά του, στο επίπεδο χρήστη (user plane) και εκτελεί υπηρεσίες όπως:

- Διαχειρίζεται και προωθεί την κίνηση δεδομένων ανάμεσα στο Ασύρματο Δίκτυο 5G NG-RAN (δηλαδή ενός UE συνδεδεμένου μέσω ενός σταθμού βάσης gNB στο 5G NG-RAN) και ένα δίκτυο δεδομένων (DN) π.χ. το Ίντερνετ
- Εφαρμόζει την Ποιότητα Υπηρεσιών QoS στην ανοδική (UL) και καθοδική (DL) σύνδεση στο Κύριο Δίκτυο 5G (NG-Core)
- Εκτελεί αναφορά κίνησης (traffic usage reporting)

Άλλα σημαντικά μέρη του Κυρίου δικτύου 5G (NG-Core) όπως απεικονίζονται στην εικόνα 3.10 είναι:

3. **AUSF** (Authentication Server Function) (Επίπεδο ελέγχου / control level) - Αποτελεί έναν server υπεύθυνο για την ταυτοποίηση του UE κατά την πρόσβαση στο 5G (NG-R) μέσω του UDM (Unified Data Management), όπου αποθηκεύεται το κλειδί κρυπτογράφησης της ταυτότητας του συνδρομητή UE
4. **UDM** (Unified Data Management) (Επίπεδο ελέγχου / control level) - Διαχειρίζεται την ταυτότητα του συνδρομητή UE και το κλειδί κρυπτογράφησης της ταυτότητας

5. **SMF** (Session Management Function) (επίπεδο χρήστη / user plane): Υπεύθυνο για την απόδοση διευθύνσεων IP και επίσης την διαχείριση της συνεδρίας ενός UE, έτσι ώστε να υπάρχει συγχρονισμός των PDU (Protocol Data Unit) και λειτουργιών του QoS ανάμεσα στα επίπεδα ελέγχου και χρήστη (control & user levels) [28][55]

1.5.1 Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης 5G (NG-RAN) [48][60]

Όπως αναφέραμε παραπάνω, το NG-RAN αποτελείται από δυο διαφορετικές αρχιτεκτονικές:

- Αυτόνομο Δίκτυο (SA) όπου οι σταθμοί gNB συνδέονται αποκλειστικά στο Κύριο δίκτυο του 5G (Core Network 5GC)
- Μη Αυτόνομο Δίκτυο (NSA) όπου οι σταθμοί βάσης gNB και ng-eNB συνεργάζονται

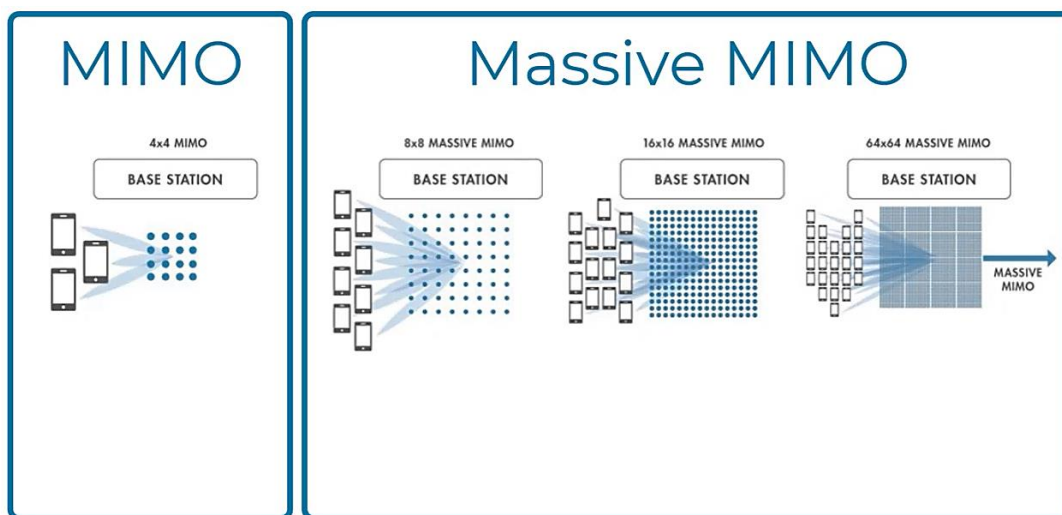
Μια ιδιότητα του δικτύου Ασύρματης πρόσβασης NG-RAN είναι η ετερογένεια. Ένα σύνολο ετερογενών τύπων σταθμών βάσης (κυψελών) συνεργάζονται συνδυαστικά και ιεραρχικά. Αυτές ανήκουν σε δυο κατηγορίες:

- α) Σταθμοί Βάσης (Κυψέλες) μακράς εμβέλειας (**Macro cells**)
- β) Σταθμοί Βάσης (Κυψέλες) μικρής εμβέλειας (**Small cells**)

	Femto	Pico	Micro/Metro	Macro
Indoor/outdoor	Indoor	Indoor or outdoor	Outdoor	Outdoor
Number of users	4–16	32–100	200	200–1000+
Max output power	20–100 mW	250 mW	2–10 W	40–100 W
Max cell radius	10–50 m	200 m	2 km	10–40 km
Bandwidth	10 MHz	20 MHz	20, 40 MHz	60–75 MHz
Technology	3G/4G/Wi-Fi	3G/4G/Wi-Fi	3G/4G/Wi-Fi	3G/4G
MIMO	2 × 2	2 × 2	4 × 4	4 × 4
Backhaul	DSL, cable, fiber	Microwave, mm	Fiber, microwave	Fiber, microwave

Εικόνα 1.30 Οι διάφοροι τύποι κεραιών του NG-RAN [48]

Τα **Macro cells** αποτελούν σταθμούς βάσης οι οποίοι βρίσκονται σε υψηλά σημεία πάνω σε ειδικές κατασκευές (ιστία) ή πάνω σε μεταλλικούς πύργους, συνήθους σε ύψος 15 - 60 μέτρα. Διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα, παρέχουν κάλυψη για ένα μεγάλο αριθμό συνδρομητών (200-1000+) (Εικόνα 1.30) και επίσης διαθέτουν μεγάλη ακτίνα εμβέλειας λόγω της χρήσης συχνοτήτων στην χαμηλή μπάντα (low band - περισσότερα στην ενότητα 1.5.2). Χρησιμοποιούν τεχνολογία massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) και αποτελούνται από κεραιές με μεγάλο αριθμό κεραιοστοιχείων (64-256).



Εικόνα 1.31 MIMO vs Massive MIMO [59]

Τα Macro cells (eNodeB) αποτελούσαν βασικό μέρος του δικτύου 4G. Το αρχικό δίκτυο LTE χρησιμοποιούσε τεχνολογία MIMO (Εικόνα 1.31), δηλαδή κεραιές 4 x 4 DL και 2 x 2 UL. Οι επόμενες εκδόσεις 4G, LTE-Advanced και LTE-Advanced PRO διέθεταν κεραιές Massive MIMO 8 x 8 DL (64 στοιχεία - δίπολα) και 4 x 4 UL (16 στοιχεία) (Εικόνα 2.13). Το δίκτυο 5G διαθέτει τεχνολογία Massive MIMO με κεραιές που διαθέτουν εκατοντάδες στοιχεία της τάξης 64, 128, 256 (π.χ. 64 x 64). Η τεχνολογία Massive MIMO συνεισφέρει στην βελτίωση της φασματικής και ενεργειακής απόδοσης του ασύρματου δικτύου. [57]

Παραδοσιακά, οι σταθμοί βάσης αποτελούσαν μεγάλες δομές (π.χ. eNodeB στο δίκτυο 4G) οι οποίες παρείχαν κάλυψη μακρινής εμβέλειας λόγω των σημάτων χαμηλών

συχνοτήτων που χρησιμοποιούσαν (π.χ. 700 MHz) και κατανάλωναν υψηλή ισχύ. Η άφιξη της τεχνολογίας 5G έφερε τα small cells (μικροί σταθμοί βάσης μικρής εμβέλειας).

Τα **Small cells** (κυψέλες μικρής εμβέλειας) χρησιμοποιούν χιλιοστομετρικές συχνότητες (mmWave) και επίσης, τεχνολογία Massive MIMO με κεραιές που διαθέτουν πολλά στοιχεία. Ανήκουν στους παρακάτω τρεις τύπους (Εικόνα 1.30) [60]:

- Femto cell (ακτίνα μερικές δεκάδες μέτρα - 50 m)
- Pico cell (ακτίνα μερικές εκατοντάδες μέτρα - 200 m)
- Micro cell (ακτίνα έως 2 km)

Τα small cells αποτελούν τη λύση σε διάφορα προβλήματα των κυψελωτών δικτύων για διάφορους λόγους. Πρώτον, είναι η απάντηση σε ένα σοβαρό πρόβλημα της τεχνολογίας 5G το οποίο προκύπτει από την χρήση των χιλιοστομετρικών (mmWaves) συχνοτήτων, οι οποίες έχουν υψηλό βαθμό εξασθένησης (attenuation) και συνεπώς, δεν διαπερνούν εμπόδια. Τα small cells είναι ευέλικτα λόγω των διαφορετικών τύπων τους και μπορούν να καλύψουν το κενό της συνδεσιμότητας.

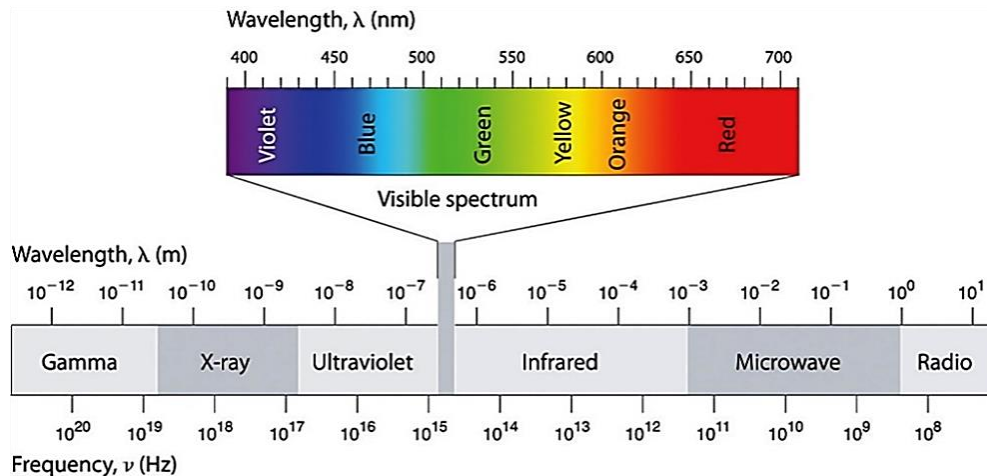
Δεύτερον, είναι σημαντικά οικονομικότερα όσον αφορά στην λειτουργία τους. Οι προηγούμενες αρχιτεκτονικές RAN βασίζονταν σε ένα μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης οι οποίοι ήταν ενεργειοβόροι. Τα small cells λόγω του μικρού μεγέθους τους αλλά και της κατασκευής τους απαιτούν σημαντικά μικρότερη ηλεκτρική ισχύ για την λειτουργία τους.

Τρίτον, οι διάφοροι τύποι small cells είναι ευέλικτοι καθώς λόγω του μικρού μεγέθους τους μπορούν να τοποθετηθούν όπου υπάρχει ανάγκη αύξησης της συνδεσιμότητας (Densification) στο δίκτυο, ώστε να αυξάνεται η συνδεσιμότητα και η χωρητικότητα του δικτύου. Ανάλογα με τον τύπο τους μπορούν να τοποθετηθούν εξωτερικά σε κολώνες στον δρόμο (Micro/Metro), σε κλειστούς χώρους (ως Femto ή Pico) όπως οικίες, κτιριακές εγκαταστάσεις επιχειρήσεων (γραφεία) ή κτίρια καθώς και σε δημόσιους χώρους όπως αεροδρόμια, σταθμούς τρένων, εμπορικά κέντρα και συνεδριακούς χώρους.

Ως αποτέλεσμα, τα small cells συνδράμουν στην βελτίωση του δικτύου 5G με πολλαπλούς τρόπους:

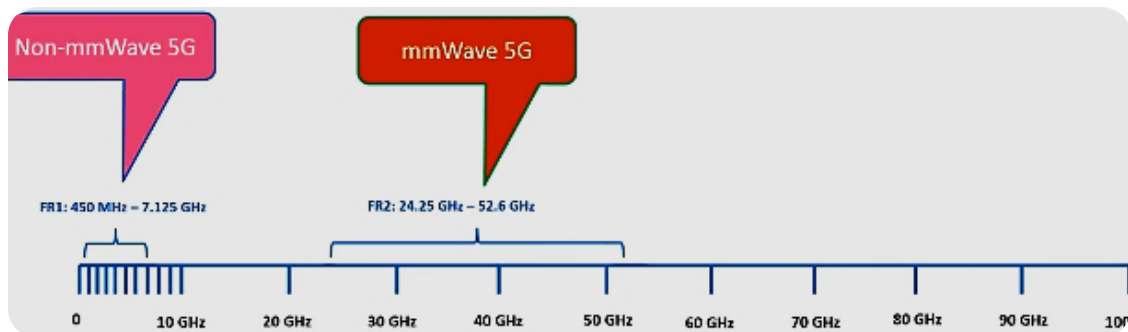
- Αυξάνουν την ταχύτητα (throughput) του δικτύου και μειώνουν το latency με την χρήση edge computing
- Βελτιώνουν την χωρητικότητα του δικτύου και συνεπώς την κάλυψη, χάρη στη μικρή εμβέλεια που δίνει τη δυνατότητα για επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και συνεπώς την χρήση τους για την μείωση της συμφόρησης του δικτύου σε συγκεκριμένες περιοχές με μεγάλη κίνηση
- Μειώνουν το κόστος χρήσης και εγκατάστασης
- Αυξάνουν την διάρκεια της μπαταρίας των χρηστών καθώς απαιτείται μικρότερη ισχύ εκπομπής λόγω μειωμένων αποστάσεων (μειωμένης εμβέλειας) ανάμεσα στους σταθμούς και τους χρήστες.

1.5.2 Φάσμα Συχνοτήτων Δικτύου 5G-NR [70][46]



Εικόνα 1.32 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [70]

Στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες γίνεται χρήση του ραδιοφάσματος (Radio Spectrum) στην περιοχή 3 kHz – 300 GHz του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το οποίο εκτείνεται στην περιοχή από 1 Hz έως και άνω των 10^{25} Hz (Εικόνα 1.32). Οι διάφοροι τύποι σταθμών βάσης του ραδιοδικτύου NG-RAN (ενότητα 1.6.1) κάνουν χρήση ενός εύρους συχνοτήτων του ραδιοφάσματος (Radio Spectrum) για την πραγματοποίηση της συνδεσιμότητας.

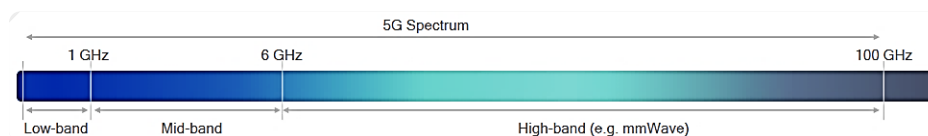


Εικόνα 1.33 Απεικόνιση των συχνοτήτων του 5G: FR1 & FR2 [56]

Ένα πολύ βασικό στοιχείο του νέου δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης του 5G-New Radio (NR) είναι η λειτουργία του σε δυο διαφορετικά εύρη συχνοτήτων, οι οποίες εκτείνονται στην περιοχή 450 MHz - 52,6 GHz (Εικόνα 1.33). Σύμφωνα με την 3GPP αυτές οι δυο κατηγορίες είναι [56]:

- **FR1:** 450 MHz - 7,125 GHz
- **FR2:** 24,25 GHz - 52,6 GHz

Οι συχνότητες της κατηγορίας FR1 ονομάζονται επίσης sub-6 GHz ή sub-7. Οι συχνότητες της κατηγορίας FR2 ονομάζονται χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave), παρόλο που το πραγματικό εύρος των mmWave ξεκινάει πιο ψηλά από τα 30 GHz. Επίσης, περιλαμβάνει και άλλες συχνότητες πάνω από την μπάνα των 50 GHz, όπως αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 1.34 Ασύρματο δίκτυο 5G NR: Low-band, Mid-band και High-band [46]

Το 5G-NR χρησιμοποιεί συχνότητες sub-6 GHz (ουσιαστικά sub-7 GHz) και χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave). Οι παραπάνω κατηγορίες συχνοτήτων FR1 και FR2 αναλύονται περαιτέρω σε τρεις μπάνες [46] (Εικόνα 1.34):

- **Low-band:** συχνότητες ≤ 1 GHz / sub-1 (600 MHz & 700 MHz)
- **Mid-band:** συχνότητες ≤ 6 GHz / sub-6 (κυρίως 3.4-3.8 GHz)
- **High-band:** 24.25-52,6 GHz / mmWaves

Η ανάγκη για διαθέσιμο φάσμα στο δίκτυο 5G οδήγησε την Ευρωπαϊκής Κομισιόν (Commission Implementing Decisions EU) σε μια σειρά αποφάσεων [61]:

- 2016(687) 28 Απριλίου 2016
- 2019/235 24 Ιανουαρίου 2019
- 2019/784 14 Μαΐου 2019

Με βάση αυτές, συμφωνήθηκαν οι τρεις παρακάτω εναρμονισμένες μπάντες συχνοτήτων (The three 5G pioneer bands), ώστε να γίνουν διαθέσιμες στα Ευρωπαϊκά κράτη για το δίκτυο 5G [61]:

- **Low-band:** 700 MHz (694-790 MHz)
- **Mid-band:** 3.6 GHz (3.4-3.8 GHz) (**primary band**)
- **High-band:** 26 GHz (24.25-27.5 GHz) (Δανία, Ιταλία, Φιλανδία, Ελλάδα, Σλοβενία και επίσης διαθέσιμο για άδειες στην Γερμανία)

	<1GHz	3GHz	4GHz	5GHz	6GHz	24-30GHz	37-50GHz	64-71GHz	>95GHz
600MHz (2x35MHz)	900MHz (2x35MHz) (B41/n41)	3.1-3.45GHz 3.45-3.55GHz 3.55-3.7GHz	3.7-3.98GHz	4.99GHz	5.9-7.1GHz	24.25-24.45GHz 24.75-25.25GHz 27.5-28.35GHz	37-37.6GHz 37.6-40GHz 47.2-48.2GHz	57-64GHz 64-71GHz	>95GHz
600MHz (2x35MHz)		3.475-3.65 GHz	3.65-4.0GHz			26.5-27.5GHz 27.5-28.35GHz	37-37.6GHz 37.6-40GHz	57-64GHz 64-71GHz	
700MHz (2x30 MHz)		3.4-3.8GHz			5.9-6.4GHz	24.5-27.5GHz		57-66GHz	
700MHz (2x30 MHz)		3.4-3.8GHz				26GHz		57-66GHz	
700MHz (2x30 MHz)		3.4-3.8GHz				26GHz		57-66GHz	
700MHz (2x30 MHz)		3.46-3.8GHz				26GHz		57-66GHz	
700MHz (2x30 MHz)		3.6-3.8GHz				26.5-27.5GHz		57-66GHz	
700MHz	2.5/2.6GHz (B41/n41)	3.3-3.6GHz		4.8-5GHz		24.75-27.5GHz	40.5-43.5GHz		
700/800MHz	2.3-2.39GHz	3.4-3.42GHz 3.42-3.7GHz 3.7-4.0GHz			5.9-7.1GHz	25.7-26.5GHz 26.5-28.9GHz 28.9-29.5GHz	37GHz	57-66GHz	
		3.6-4.1GHz		4.5-4.9GHz		26.6-27GHz 27-29.5GHz	39-43.5GHz 57-66GHz		
700MHz		3.3-3.6GHz				24.25-27.5GHz 27.5-29.5GHz	37-43.5GHz		
		3.4-3.7GHz				24.25-29.5GHz	39GHz	57-66GHz	

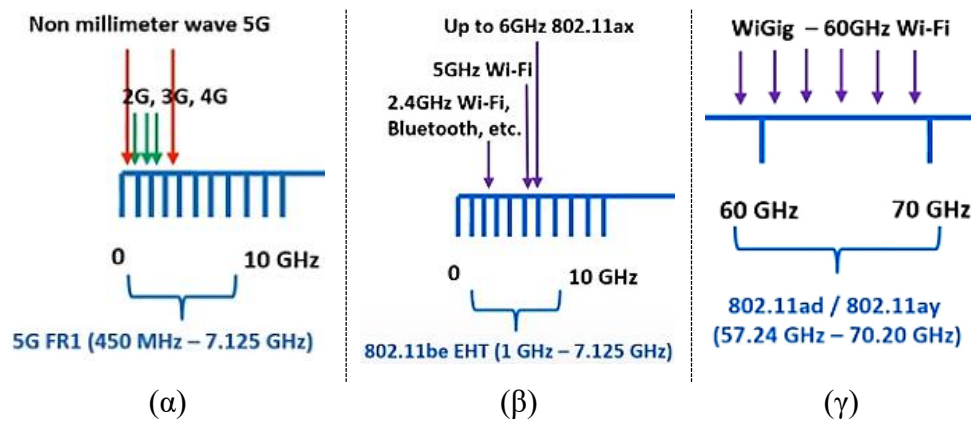
Licensed
Unlicensed/shared
Existing band

Εικόνα 1.35 Χάρτης κατανομής φάσματος συχνοτήτων 5G σε διάφορες χώρες [46]

Αντίστοιχα στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (USA), το αντίστοιχο φάσμα συχνοτήτων έχει την παρακάτω κατανομή (Εικόνα 1.35) [62]:

- **Low-band:** 600 MHz
- **Mid-band:** 2.6 GHz, 3.7 - 4.98 GHz
- **High-band:** 28 GHz (επίσης Ιαπωνία & Νότια Κορέα)

Γενικότερα, η προϋπάρχουσα χαμηλή μπάντα (Low-band) προσφέρει μεγαλύτερη κάλυψη, η υψηλή (High-band) προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες με την χρήση mmWave συχνοτήτων και η μεσαία (Mid-band) προσφέρει μια ενδιάμεση κάλυψη εξισορροπώντας την ταχύτητα και την κάλυψη. Η χαμηλή (Low-band) και η μεσαία ζώνη (Mid-band) ήταν βασικά μέρη του δίκτυο Ασύρματης πρόσβασης του LTE 4G.



Εικόνα 1.36 Το NG-RAN διαθέτει τεχνολογία Multi-RAT [56]

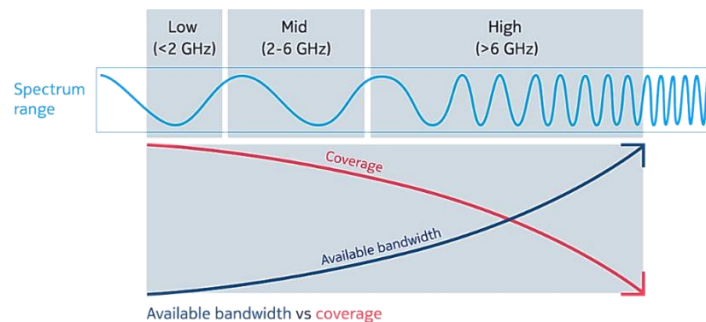
Ουσιαστικά, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης NG-RAN του 5G-NG διαθέτει τεχνολογία Multi-RAT (Multi-Radio Access Technology) [56]. Δηλαδή, εκτός από τις νέες mmWave συχνοτήτες (High-band), συμπεριλαμβάνει προγενέστερες τεχνολογίες RAT (Radio Access Technology) (Εικόνα 1.36α), όπως:

- **3G** (800/850/900 MHz, και 1.7/1.9/2.1 GHz)
- **4G** (EU: 450/700/800/900 MHz, 1.8/2.1 GHz & USA: 600/700/800/850 MHz, 1.4 GHz & 1.7/1.9/2.3/2.5/2.6 GHz [46])

Συμπεριλαμβάνονται επίσης, συχνότητες για Μη-Κυψελωτής τεχνολογίες (Non-Cellular technologies), όπως (Εικόνα 1.36β, γ)[56]:

- **Wi-Fi, Bluetooth** (2.4 GHz)
- **Wi-Fi** (5GHz)
- **802.11ax** (έως και 6 GHz)
- **802.11be EHT** (1GHz - 7.125 GHz)
- **WiGig 60GHz (802.11ad, 802.11ay)** (57.24-70.20 GHz)

Για παράδειγμα, το δίκτυο της Telekom [74] στην Γερμανία κάνει χρήση δυο διαφορετικών μπαντών στην περιοχή των sub-6 GHz: α) τη μπάντα **2.1 GHz** η οποία χρησιμοποιούνταν στο δίκτυο 3G και υπέστη ανακατανομή (refarming) για τα δίκτυα 4G/5G, και β) τη νέα μπάντα **3.6 GHz**. Η μπάντα 2.1 GHz προσδίδει μεγάλη ακτίνα κάλυψης λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος. Χρησιμοποιείται για να συνδέσει μικρές πόλεις στο δίκτυο ή μεγάλες μη πυκνοκατοικημένες περιοχές. Αντίθετα, η μπάντα 3.6 GHz αποδίδει προσδίδει μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτητα για την κάλυψη πυκνοκατοικημένων περιοχών. Επίσης, χρησιμοποιούνται οι συχνότητες 800, 900 MHz του δικτύου LTE ως άγκυρα για την πρόσδεση της 2.1 GHz του νέου δικτύου 5G στο υβριδικό δίκτυο 5G NSA, και 1,800 MHz, 2,600 MHz για την πρόσδεση της υψηλότερης συχνότητας 3.6 GHz του δικτύου 5G.



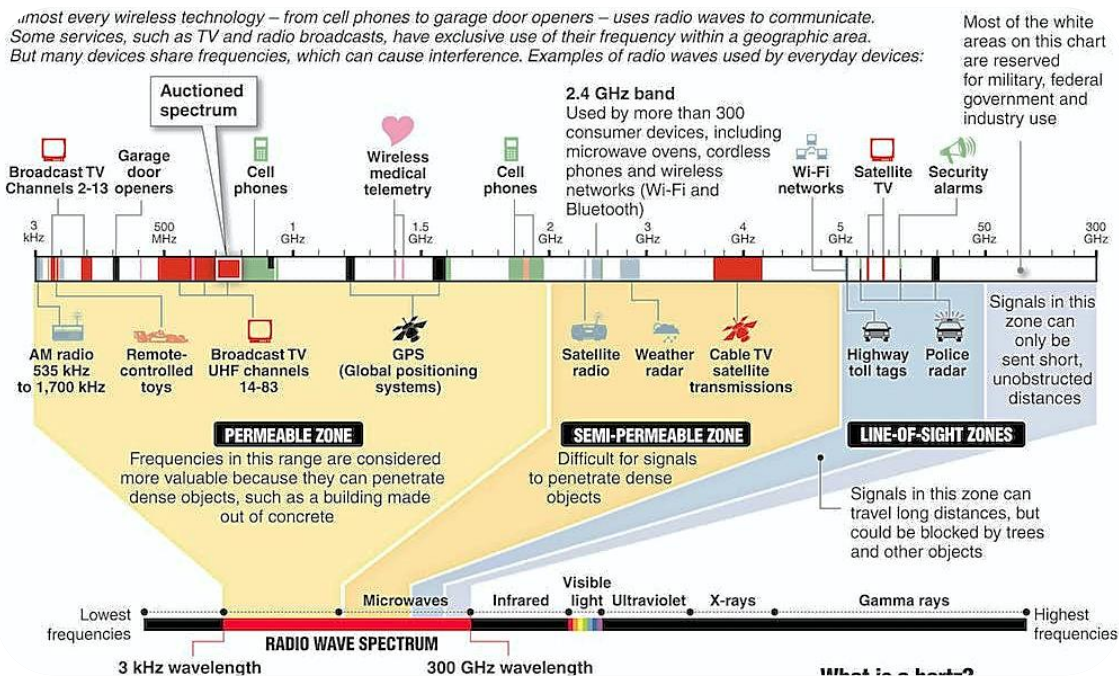
Εικόνα 1.37 Εύρος (BW) vs Κάλυψη (Coverage) [42]

Σύμφωνα με τη Nokia [42][63], το ήδη προϋπάρχον χαμηλό φάσμα συχνοτήτων (Low-band) (π.χ. η συχνότητα 600 MHz) χρησιμοποιείται στο δίκτυο 4G (*licensed spectrum*). Προσφέρει ευρύτερη εμβέλεια, υψηλότερο βάθος διείσδυσης αλλά περιορισμένο εύρος

συχνοτήτων (BW) (Εικόνα 1.37). Οι συχνότητες του χαμηλού φάσματος (Low band) είναι ιδανικές για ανοιχτές (rural), αραιοκατοικημένες περιοχές όπου προσφέρει μεγάλη κάλυψη για εκατοντάδες τετραγωνικά μίλια σε χιλιάδες συνδρομητές.

Το μεσαίο φάσμα (Mid-band), παρότι κυμαίνεται από 1-6 GHz, αναφέρεται στο φάσμα 2 - 6 GHz (π.χ. 2.5 GHz, και η C-band: 3.4 - 4.2 GHz). Είναι ιδανικό για το 5G καθώς σε αυτές οι συχνότητες αυξάνουν την χωρητικότητα του δικτύου ενώ επίσης, επιτρέπουν την μεταφορά υψηλού αριθμού δεδομένων σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις. Αποτελούν μια ενδιάμεση λύση διαθέτοντας μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων (BW) σχετικά με την χαμηλή μπάντα και σχετικά υψηλή εμβέλεια (Εικόνα 1.37).

Οι συχνότητες του υψηλού φάσματος (High-band) προσφέρουν πολύ μεγάλες ταχύτητες (1 Gbps - 3 Gbps) αλλά πολύ μικρή κάλυψη καθώς διαθέτουν μικρό βάθος διείσδυσης απορρόφηση και υψηλή εξασθένηση λόγω απορρόφησης. Συνεπώς, δεν καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις, και παρουσιάζουν ευπάθεια στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως υγρασία, βροχή και χιόνι λόγω της υψηλότερης απορρόφησης.



Εικόνα 1.38 Οι ζώνες συχνοτήτων του Ραδιοφάσματος (Radio Wave Spectrum) με βάση την διαπερατότητα που διαθέτουν [178]

Επίσης, ένας άλλο διαχωρισμός είναι αυτός σε ζώνες συχνοτήτων με βάση την δυνατότητα κάλυψης απόστασης και την ικανότητα τους να διαπερνούν αντικείμενα ως εξής (εικόνα 1.38):









- α) Συχνότητες που ανήκουν στην Διαπερατή ζώνη (Permeable Zone)
- β) Συχνότητες που ανήκουν στην Ημιπερατή Ζώνη (Semi-Permeable Zone)
- γ) Συχνότητες που ανήκουν στην Οπτική Επαφή (Line-of-Sight Zone / LOS)

Η πρώτη κατηγορία συχνοτήτων (3 KHz - 2 GHz) διαθέτει την ικανότητα να διαπερνάει διάφορα αντικείμενα, όπως κτίρια, λόγω του μεγάλου μήκους κύματος που διαθέτουν. Η δεύτερη κατηγορία (2 GHz – 5 GHz) διαθέτει συχνότητες οι οποίες έχουν πολύ μικρή έως καθόλου ικανότητα να διαπερνούν εμπόδια. Η τρίτη κατηγορία (5GHz – 300GHz) χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες, όπου η πρώτη υποκατηγορία συχνοτήτων (5GHz – 50GHz) μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις αλλά είναι ευπαθής και δεν διαπερνά αντικείμενα όπως τα κτίρια ή τα δέντρα.

Παρατίθεται παράδειγμα σύγκρισης διαθέσιμου εύρους ζώνης ανάμεσα σε δυο συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται στο δίκτυο 5G της Telekom [74], και οι οποίες βρίσκονται στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων, δηλαδή στο μεσαίο φάσμα (Mid-band). Η μπάνα 2.1 GHz αποδίδει 15 MHz εύρους ζώνης (BW) και προσδίδει μεγάλη ακτίνα κάλυψης, ενώ η υψηλότερη μπάνα 3.6 GHz αποδίδει 90 MHz και συνεπώς μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Γενικότερα, το δίκτυο 5G διαθέτει μια ευρεία ποικιλία εύρους συχνοτήτων όπως είδαμε, προσφέροντας τα παρακάτω φάσματα συχνοτήτων:

- **Αδειοδοτημένο φάσμα (Licensed Spectrum)** το οποίο περιλαμβάνει πάνω από 40 μπάνες του LTE παγκόσμια
- **Διαμοιραζόμενο (Shared Spectrum)** (π.χ. 3.5 GHz Αμερική ή 3.7 GHz Γερμανία)
- **Μη-αδειοδοτημένο φάσμα (Unlicensed Spectrum)** (π.χ. 5.9-7.1GHz Αμερική, 57-64 GHz & 64-71 GHz Αμερική & Καναδά, 5.9-6.4 GHz & 57-66 GHz Ευρώπη)

	24-28GHz	37-50GHz	50-71GHz	>95GHz
	24.25-24.45GHz 24.75-25.25GHz 27.5-28.35GHz	37-37.6GHz 37.6-40GHz 47.2-48.2GHz	57-64GHz 64-71GHz	>95GHz
	26.5-27.5GHz 27.5-28.35GHz	37-37.6GHz 37.6-40GHz	64-71GHz	
	24.5-27.5GHz			
	26GHz			
	26GHz			
	26GHz			
	26.5-27.5GHz			
	24.25-27.5GHz	40-43.5GHz		

Εικόνα 1.39 Παγκόσμιος χάρτης φάσματος χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (mmWave) [46]

Σχετικά με τα χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave) (Εικόνα 1.39), αποτελούν νέα προσθήκη στο φάσμα συχνοτήτων των κυψελωτών δικτύων. Είναι απαραίτητα για το ultra-high-speed mobile broadband του 5G, καθώς οι συχνότητες mmWave διαθέτουν περισσότερο εύρος συχνοτήτων (bandwidth) συγκριτικά με τις χαμηλότερες συχνότητες [62]. Συγκριτικά, η μπάντα των 700 MHz διαθέτει μόνο 45 MHz, ενώ η μπάντα συχνοτήτων 26 GHz η οποία έχει επιλεγεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει 2.25 GHz.

Γενικότερα, οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στα mmWave παγκόσμια είναι (Εικόνα 2.17 & 2.20) [46]:

- 24-28 GHz
- 37-50 GHz
- 50-71 GHz
- 64 GHz - 86 GHz

Κάθε χώρα επιλέγει τις δικές της συχνότητες εντός αυτών, π.χ. η Ευρωπαϊκή Ένωση, η Κίνα και η Αυστραλία έχουν επιλέξει τις συχνότητες 24.5-27.5 GHz, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής έχουν επιλέξει τις συχνότητες 24.25-24.45 GHz, 24.75-25.25 GHz, 27.5-28.35 GHz, 37-37.6 GHz, 37.6-40 GHz, 47.2-48.2 GHz, και 57-64 GHz, 64-71 GHz.

1.5.3 Πολλαπλή Πρόσβαση (Multiple Access) [48]

Το Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης σε ένα κυψελωτό δίκτυο χρησιμοποιεί κανάλια τα οποία όπως έχουμε προαναφέρει αναπτύσσονται στην περιοχή των UHF (Low-Band και μέρος της Mid-Band) και των μικροκυματικών συχνοτήτων. Υπεύθυνοι για την επιλογή και ανάθεση αυτών των ζωνών συχνοτήτων ευρύτερα είναι συγκριμένοι φορείς, όπως η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ραδιοτηλεπικοινωνιών - European Radio Communications Committee (ERC) στην ΕΕ και η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών στις Ηνωμένες Πολιτείες - Federal Communications Commission (FCC).

Οι ζώνες συχνοτήτων των κυψελωτών δικτύων είναι άμεσα συνδεδεμένες με την έννοια της πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access). Ο όρος αυτός υποδηλώνει την δυνατότητα επίτευξης πολυάριθμων ασύρματων ζεύξεων μεταξύ τερματικών, δηλαδή την τεχνική της πολυπλεξίας. Ουσιαστικά, αναφέρεται στην διάθεση του φάσματος συχνοτήτων του δικτύου μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας για τον διαμοιρασμό τους σε όσο το δυνατόν περισσότερους συνδρομητές.

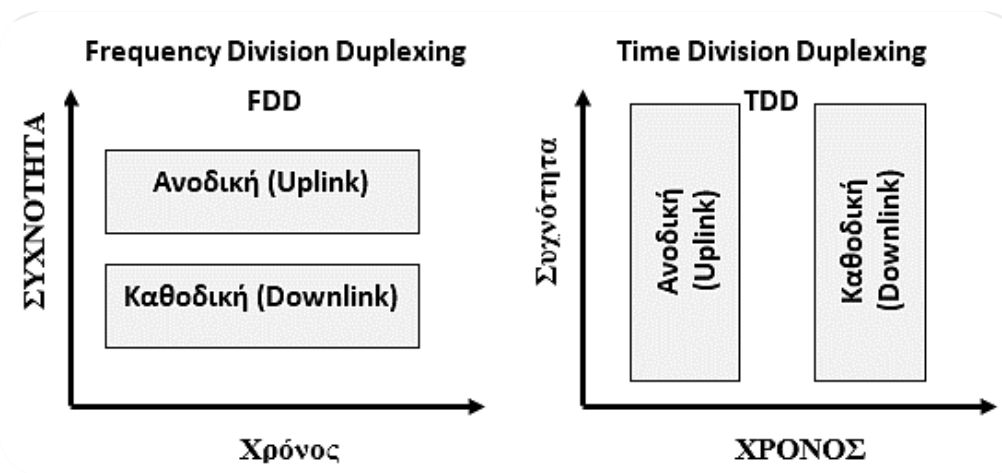
Η πολλαπλή πρόσβαση, ουσιαστικά, επιτρέπει την σύνδεση πολλών συνδρομητών μεταξύ τους μέσω του ίδιου καναλιού και συνεπώς, τον διαμοιρασμό της χωρητικότητας του, δηλαδή του εύρους ζώνης του καναλιού, για τη μετάδοση των πληροφοριών. Ο διαχωρισμός του καναλιού και γενικότερα η διαδικασία της πολλαπλής πρόσβαση επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης βασικών *ψηφιακών τεχνικών πολλαπλής προσπέλασης* (Πολυπλεξίας) στα κυψελωτά δίκτυα, οι οποίες είναι:

- Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου - TDMA (Time-Division Multiple Access)
- Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Συχνότητας - FDMA (Frequency-Division Multiple Access)
- Πολλαπλή Πρόσβαση με Κωδικοποίηση - CDMA (Code-Division Multiple Access)
- Επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων (Frequency reuse)
- Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χώρου (Spatial Multiplexing) (MU-MIMO, Beamforming)

Μια άλλη βασική έννοια στα κυβελωτά δίκτυα αποτελεί η **Αμφιδρόμηση (Duplexing)**, δηλαδή η δυνατότητα της αμφίδρομης μετάδοσης και λήψης της πληροφορίας μέσα από το ίδιο φυσικό κανάλι (physical channel). Ως προς τη μέθοδο επικοινωνίας ανάμεσα σε δυο τερματικά, διακρίνουμε δυο τύπους αμφιδρόμησης:

- Full Duplexing (Πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία)
- Half Duplexing (Ημι-αμφίδρομη επικοινωνία)

Στην περίπτωση της πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας (Full Duplexing), δυο τερματικά έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν δεδομένα μεταξύ τους ταυτόχρονα και αμφίδρομα. Αντίθετα, στην ημι-αμφίδρομη επικοινωνία (Half Duplexing) η επικοινωνία ανάμεσα σε δυο τερματικά δεν είναι ταυτόχρονη, καθώς μόνο ένα τερματικό μπορεί να επικοινωνεί δεδομένα στο ίδιο κανάλι κάθε φορά.



Εικόνα 1.40 Τύποι αμφιδρόμησης: FDD & TDD

Ως προς τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνουμε αμφιδρόμηση διακρίνουμε δυο τύπους (Εικόνα 1.40):

- Αμφιδρόμηση με Διαίρεσης Συχνότητας (FDD - Frequency Division Duplexing)
- Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Χρόνου (TDD - Time Division Duplexing)

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος αμφιδρόμησης είναι με Διαίρεση Συχνότητας (FDD), όπου ένα ζεύγος από δυο διαφορετικά κανάλια συχνοτήτων απαιτούνται για την επικοινωνία ανάμεσα σε δυο τερματικά στην ίδια χρονοθυρίδα (δηλαδή ταυτόχρονα): ένα για την ανοδική (UL) και ένα για την καθοδική (DL) ζεύξη. Για την αποφυγή παρεμβολών ανάμεσα στο UL και DL, αποδίδεται κατάλληλη απόσταση ανάμεσα στην κατώτερη συχνότητα του της μάντας του UL και την ανώτερη μάντα του DL (π.χ. $\Delta f = 15 \text{ KHz}$)

Στην περίπτωση της αμφιδρόμησης με Διαίρεση Χρόνου (TDD), η ταυτόχρονη μετάδοση της πληροφορίας ανάμεσα σε δυο τερματικά γίνεται με την χρήση μιας συχνότητας, όπου η UL και η DL πραγματοποιούνται με διαφορετικές χρονοθυρίδες (time slots).

Η λεπτομερής ανάλυση των τεχνικών Πολλαπλής Πρόσβασης (Πολυπλεξίας) είναι πέρα από της βλέψεις της εργασίας. Ωστόσο, για λόγους αναφοράς στα δίκτυα LTE και 5G, γίνεται μερική παρουσία των δυο παρακάτω σημαντικών τεχνικών FDMA:

- Πολυπλεξία με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας - OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
- Πολλαπλή Πρόσβαση με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητα OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

➤ **OFDM & OFDMA [48][153][154]**

Πρόκειται για δυο τεχνολογίες οι οποίες διαιρούν ένα κανάλι σε πολλαπλά υποκανάλια (subchannels), δηλαδή σε πολλαπλές υποφέρουσες (multiple subcarriers) με την χρήση αντίστροφου Μετασχηματισμού Fourier (Inverse fast Fourier transform IFFT) στον πομπό. Οι υποφέρουσες είναι ορθογώνιες μεταξύ τους για την αποφυγή παρεμβολών. Στον δέκτη εφαρμόζεται Μετασχηματισμός Fourier (FFT) για την απόπλεξη.

Πέρα από τις δομικές διαφορές τους, οι δυο τεχνολογίες OFDMA διαφέρουν πρακτικά ως προς την χρήση. Η τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) επιτρέπει την μετάδοση πληροφοριών ενός χρήστη σε κάθε κανάλι, σε αντίθεση με την τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) η οποία επιτρέπει την μετάδοση πληροφοριών σε ένα κανάλι για πολλαπλούς χρήστες, δηλαδή πολλών

σημάτων δεδομένων. Τόσο στο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης E-UTRAN του 4G LTE, όσο και στο μεταγενέστερο 4G LTE-Advanced υπήρχε διαθέσιμη η τεχνολογία διαμόρφωσης OFDMA. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι δυο παρακάτω τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης [176]:

- α) OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) για την καθοδική ζεύξη (DL)
- β) SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) για την ανοδική ζεύξη (UL)

Ουσιαστικά, η εξέλιξη του LTE σε LTE Advanced εισήγαγε καινοτομίες όπως το Carrier Aggregation - CA, δηλαδή τον συνδυασμό διαύλων που απέχουν κατά 15 KHz και ανήκουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και κλιμακωτούς διαύλους όπως 1.4, 3, 5, 10, 15, και 20 MHz (component carriers). Επίσης, εισήγαγε υψηλότερο αριθμό κεραιών, ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης (peak data rate) σε 1GBPS στην DL και 500MBPS στην UL.

Στο δίκτυο 5G χρησιμοποιείται η τεχνολογία OFDM τόσο στην Καθοδική ζεύξη (DL) όσο και στην Ανοδική (UL), ενώ παράλληλα γίνεται χρήση πολύ μεγαλύτερου αριθμού κεραιών. Παράλληλα, διατηρήθηκε η τεχνολογία Carrier Aggregation αλλά εδώ υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία χρήσης υποφερουσών αφού η απόσταση μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη, όπως 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz, 240 kHz, 480 kHz, και οι οποίες μπορούν να αποδώσουν έως 3300 υποκανάλια (subcarriers). Επίσης, διαθέτει καλύτερο SINR και συνεπώς μπορεί να επιτύχει διαμόρφωση υψηλότερης τάξης (higher order modulation).

Η διαμόρφωση OFDM προσφέρει το πλεονέκτημα της υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, μεγάλη συνδεσιμότητα (massive connectivity), υψηλή φασματική και ενεργειακή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση (latency), και το επιτυγχάνει με τον συνδυασμό δυο τεχνικών διαμόρφωσης:

- QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
- FDM (Frequency Division Multiplexing)

Η τεχνολογία OFDM υποστηρίζεται από τέσσερεις τύπους διαμόρφωσης του σήματος στο δίκτυο 5G:

- QPSK (Quadrature/Quaternary Phase Shift Keying - Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάση με Ορθογωνισμό)
- 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation – Διαμόρφωση Πλάτους με Ορθογωνισμό)
- 64QAM
- 256QAM

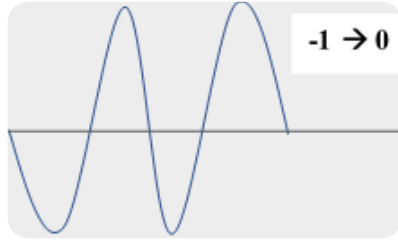
Αντίστοιχα στο δίκτυο LTE 4G υποστηρίζονται οι παρακάτω τύποι διαμόρφωσης του σήματος:

- QPSK (Quadrature/Quaternary Phase Shift Keying - Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάση με Ορθογωνισμό)
- 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation – Διαμόρφωση Πλάτους με Ορθογωνισμό)
- 64QAM

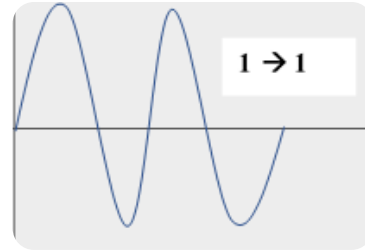
Αναλυτικότερα, ένα τηλεπικοινωνιακό σήμα έχει την χαρακτηριστική μορφή $A \cos(2\pi f_c + \theta)$. Η διαμόρφωση του σήματος μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή των παρακάτω παραμέτρων:

- α) του πλάτους του σήματος A (η διαμόρφωση αναφέρεται ως Amplitude Shift Key - ASK)
- β) της συχνότητας f (η διαμόρφωση αναφέρεται ως Frequency Shift Key - FSK)
- γ) της φάσης θ (η διαμόρφωση αναφέρεται ως Phase Shift Key - PSK)

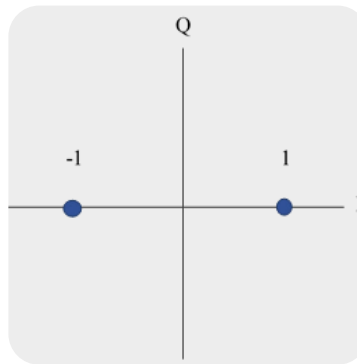
Στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες, τα σήματα είναι συνδυαστικό αποτέλεσμα της διαμόρφωσης κατά πλάτος (ASK) και της διαμόρφωσης κατά φάσης (PSK) ταυτόχρονα. Δηλαδή, είναι αποτέλεσμα διαμόρφωσης σήματος QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).



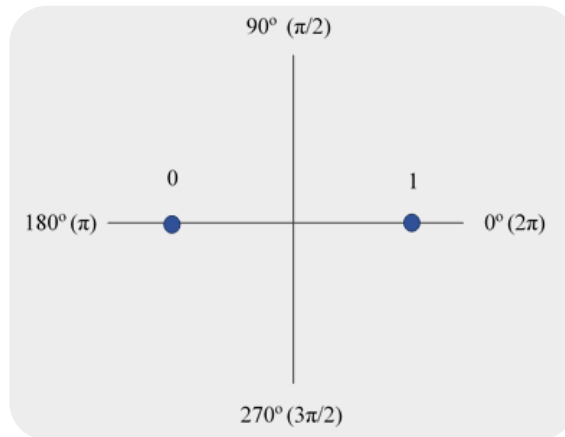
α) Σήμα: $A \cos(2\pi f_c + \theta)$ $A=1, \theta=180^\circ$
 → modulation symbol 0



β) Σήμα: $A \cos(2\pi f_c + \theta)$ $A=1, \theta=0^\circ$
 → modulation symbol 1



γ) Απεικόνιση των δυο σημάτων με διαφορά φάσης 180°

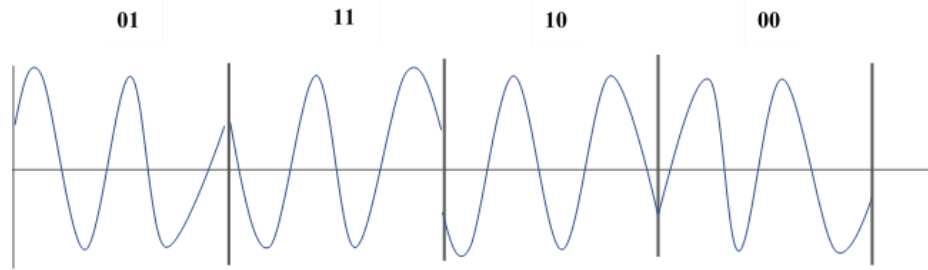


δ) Constellation Diagram

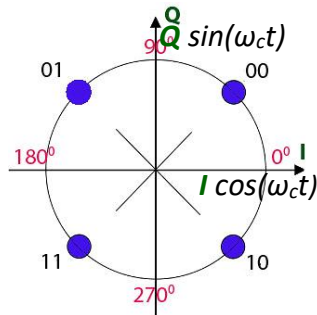
Εικόνα 1.41 Διαμόρφωση BPSK (Βασισμένο στο [153])

Στην διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying) ένα σύμβολο αντιστοιχεί σε 0 ή 1, δηλαδή χρησιμοποιείται ένα bit για την απεικόνιση δυο φάσεων. Ας υποθέσουμε δυο σήματα της μορφής $A \cos(2\pi f_c + \theta)$ με πλάτος $A=1$. Αν το ένα σήμα έχει φάση $\theta=0^\circ$ (εικόνα 1.41β) και το άλλο σήμα $\theta=180^\circ$ (εικόνα 1.41α), το σήμα με φάση $\theta=0^\circ$ αντιστοιχεί στο σύμβολο 1 και το σήμα με φάση 180° αντιστοιχεί στο σύμβολο 0. Τα δυο σήματα και

κατά συνέπεια τα δυο σύμβολα αντιστοιχούν στα σημεία -1 και 1 αντίστοιχα του καρτεσιανού διαγράμματος (εικόνα 1.40γ), καθώς διαθέτουν διαφορά φάσης 180° . Το constellation diagram (εικόνα 1.41δ) απεικονίζει τα δυο σύμβολα 0, 1 με διαφορά φάσης 180° .



(α)



(β)

Dibit	Μετατόπιση Φάσης
00	45°
01	135°
10	315°
11	225°

(γ)

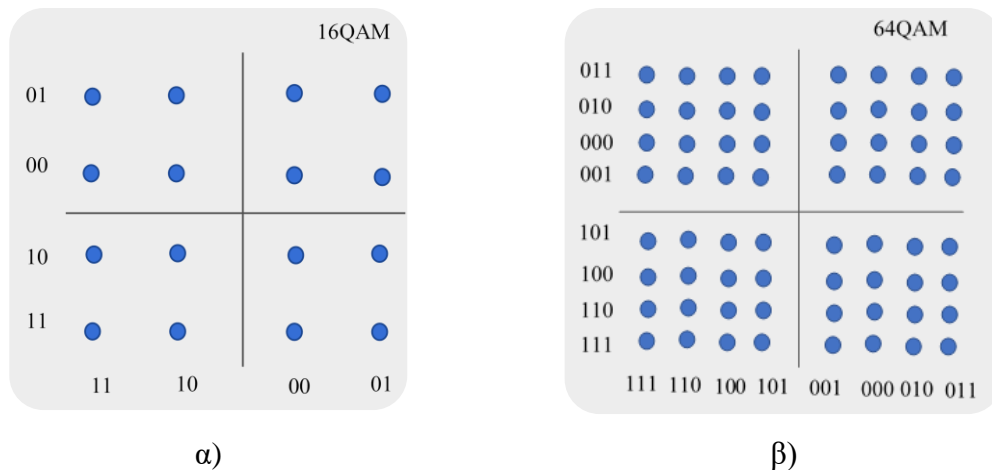
Εικόνα 1.42 Διαμόρφωση QPSK: Τα σύμβολα - dibits αντιστοιχισμένα στις τέσσερις διακριτές φάσεις ενός σήματος με διαφορά 90° , β) Ορθογώνιος αστερισμός συμβόλων (constellation diagram), β) Η ακολουθία συμβόλων

Στη διαμόρφωση QPSK, ένα σύμβολο κωδικοποιείται στον διαμορφωτή (modulator) σε ένα ζεύγος 2 bit (Εικόνα 1.42α, β). Συνεπώς, κάθε σύμβολο δεν αντιστοιχεί σε 0 ή 1 όπως προηγουμένως στην διαμόρφωση BPSK (Binary Phase-shift keying), αλλά σε ένα από τα ζεύγη 00, 01, 11 ή 10, τα οποία ονομάζονται dibits. Ουσιαστικά, το πλάτος παραμένει σταθερό (δηλαδή τα dibits βρίσκονται στην περιφέρεια ενός κύκλου), και συνεπώς τα

δεδομένα κωδικοποιούνται ως μια από τέσσερις φάσεις, οι οποίες διαφέρουν κατά 90^0 ($360/4 = 90^0$ - διαφορά φάσης $\pi/4$) η κάθε μία μεταξύ τους, όπως παρακάτω:

- $\pi/4$ (45^0)
- $3\pi/4$ (135^0)
- $5\pi/4$ (225^0)
- $7\pi/4$ (315^0)

Λόγω της διαφοράς των φάσεων κατά 90^0 ($\pi/4$), η διαμόρφωση περιγράφεται με τον όρο “ορθογωνισμό” (Quadrature). (Εικόνα 1.41β). Δηλαδή, κάθε σύμβολο dibit αποτελείται από δυο bits για κάθε διαμορφωμένη πληροφορία ή για κάθε κυματομορφή. Η διαμόρφωση QPSK επιτρέπει την αποστολή διπλάσιας πληροφορίας (αυξάνει το data rate) αφού κάθε σύμβολο κωδικοποιείται με δυο bits και παράλληλα υπάρχουν τέσσερις φάσεις όπως είδαμε παραπάνω.

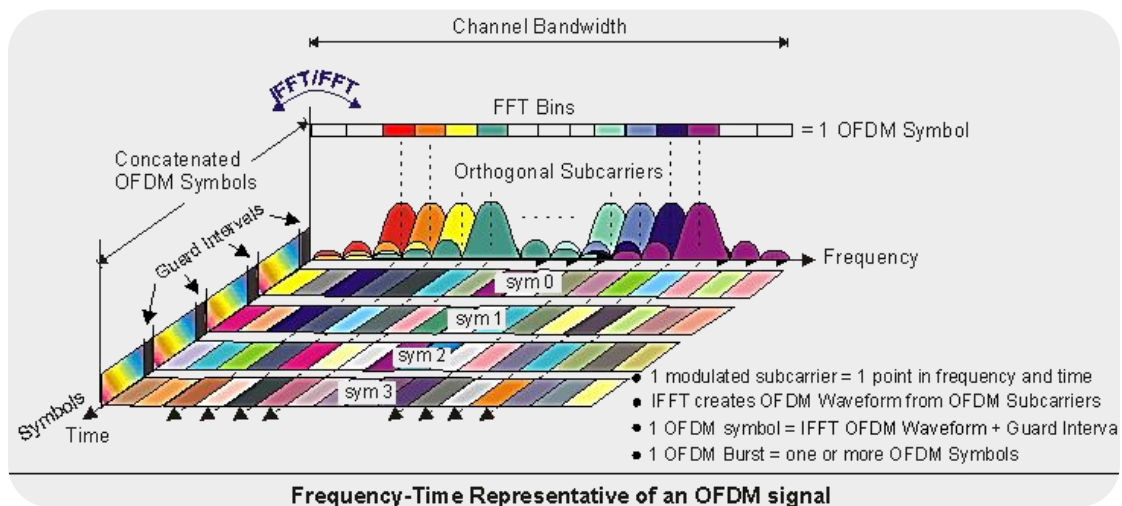


Εικόνα 1.43 α) Διαμόρφωση 16QAM, β) διαμόρφωση 64QAM (βασισμένο στο [153])

Ανεβαίνοντας διαμόρφωση σε 16QAM, κάθε πληροφορία αποτελείται ένα σύμβολο το οποίο κωδικοποιείται σε 4 ψηφία (quadbit) (Εικόνα 1.43α), και συνεπώς αποτελεί τον συνδυασμό τόσο της διαμόρφωσης πλάτους όσο και της διαμόρφωσης φάσης. Η

πληροφορία αποστέλλεται με τη μορφή αστερισμών (constellations) (Εικόνα 1.43) και με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης. Όσο αυξάνει ο αριθμός των σημείων σε έναν αστερισμό, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης. Ο συνδυασμός των δυο διαμορφώσεων συνεχίζει και σε ανώτερες διαμορφώσεις όπως στην 64QAM όπου κάθε σύμβολο κωδικοποιείται σε 6 ψηφία (hexabit) (Εικόνα 143β) και στην 256QAM όπου κάθε σύμβολο κωδικοποιείται σε 8 ψηφία (octabit).

Το πρόβλημα βέβαια που προκύπτει με την υψηλότερη διαμόρφωση είναι ότι καθώς αυξάνει ο αριθμός των σημείων σε έναν αστερισμό, μειώνεται η απόστασή τους και συνεπώς η διαμόρφωση είναι πιο επιρρεπής σε παρεμβολές που οδηγούν σε αλλοίωση της πληροφορίας. Σημαντικό για την επίτευξη υψηλής διαμόρφωσης και συνεπώς αύξησης του throughput και data capacity είναι το SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) να είναι υψηλό καθώς αυτό οδηγεί στην δυνατότητα υψηλότερης διαμόρφωσης QAM. [177]



Εικόνα 1.44 Διαμόρφωση OFDM: απεικόνιση συμβόλων στο πεδίο συχνοτήτων και χρόνου [50]

Στη διαμόρφωση OFDM (Εικόνα 1.44), κάθε κανάλι διαιρείται σε πολλαπλά υποκανάλια (subchannels), δηλαδή, σε πολλαπλές υποφέρουσες (multiple subcarriers) οι οποίες γειτνιάζουν χωρίς κενά ή μια δίπλα στην άλλη και είναι ορθογώνιες μεταξύ τους, ώστε να

αποφεύγονται οι παρεμβολές. Ειδικότερα, οι πληροφορίες διαμορφώνονται ως σύμβολα όπως είδαμε παραπάνω με την βοήθεια των μεθόδων διαμόρφωσης QPSK και QAM. Η διαμόρφωση της πληροφορίας με τη μορφή συμβόλων λαμβάνει χώρα τόσο στο πεδίο της συχνότητας, δηλαδή τα δεδομένα διαμορφώνονται σε πολλαπλά γειτονικά υποκανάλια (υποφέρουσες), όσο στο πεδίο του χρόνου με ένα αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (FFT - Fast Fourier Transformation) των υποφερουσών.

Στο πεδίο του χρόνου εισέρχονται μικρά χρονικά διαστήματα ανάμεσα στα σύμβολα, τα διαστήματα φύλαξης (guard intervals), ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε ενδοσυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference). Με αυτό τον τρόπο γίνεται πιο ομαλή η κατανομή ισχύος στο φάσμα του κάθε υποκαναλιού καθώς και στα άκρα του καναλιού, όπου λόγω της απότομης πτώσης ισχύος διευκολύνεται το φιλτράρισμα μέσω απλούστερων φίλτρων.

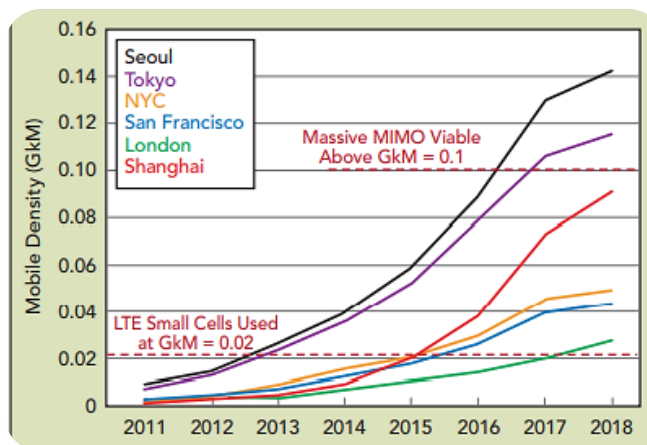
Ουσιαστικά, τα κύρια χαρακτηριστικά της Πολλαπλής Πρόσβασης με Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας – OFDMA, είναι τα εξής:

- α. Πολλαπλά υποκανάλια ή υποφέρουσες (Multiple subchannels ή Multiple subcarriers)
- β. Τα υποκανάλια ή υποφέρουσες είναι διαμορφωμένα κάθετα μεταξύ τους
- γ. Κάθε σύμβολο διαθέτει ένα χρονικό διάστημα φύλαξης (guard interval) για την αποφυγή της ενδοσυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Beamforming - massive MIMO

2.1 Εισαγωγή [122][123]



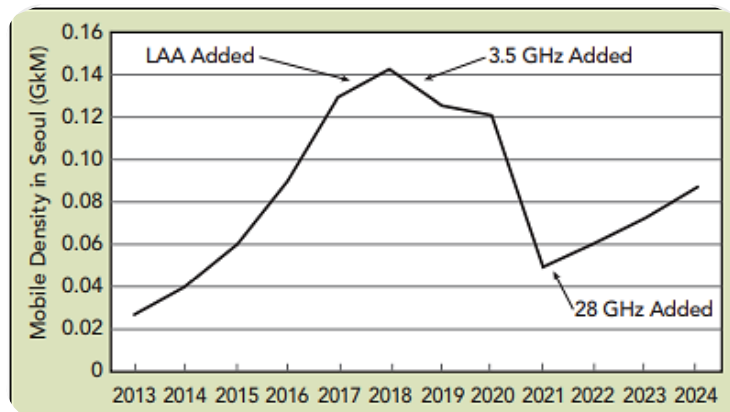
Εικόνα 2.1 Πυκνότητα Κίνησης Δεδομένων Κινητής (Mobile / Traffic Density) - Gbps/km²/MHz ή GkM [123]

Ένα εργαλείο απεικόνισης της κίνησης δεδομένων σε κόμβους υψηλού φορτίου δεδομένων κατά την ώρα υψηλής κίνησης, σε διάφορα μεγάλα μέρη του κόσμου αποτελεί η μέτρηση της Πυκνότητας της Κίνησης (Traffic Density tracking), η οποία συνδέεται άμεσα με την χωρητικότητα του δικτύου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ζήτησης δεδομένων που γίνονται παγκόσμια σε διάφορους παρόχους τονίζουν τη μεγάλη ανάγκη για την εξέλιξη των δικτύων και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν.

Η μέτρηση της Πυκνότητας της Κίνησης γίνεται σε Gigabits ανά sec ανά km² ανά MHz του φάσματος (Gbps/km²/MHz ή **GkM**) (Εικόνα 2.1). Με αυτόν τον τρόπο διεξάγονται συμπεράσματα ώστε οι πάροχοι να εφαρμόσουν περαιτέρω λύσεις στα δίκτυα, όπως την εισαγωγή small cells, την χρήση massive MIMO (massive Multiple-Input Multiple-

Output) καθώς και των mmWaves, ώστε να λύσουν το θέμα της έλλειψης χωρητικότητας. Γενικότερα, οι μετρήσεις δείχνουν ότι ο δείκτης **GkM** κινείται με αυξητικό ρυθμό για τα δίκτυα. Ένα παράδειγμα μιας περίπτωση με αυξημένη πυκνότητα κίνησης δεδομένων είναι οι περιπτώσεις της Σεούλ και του Τόκιο, όπου ξεπέρασε τα 0.10 GkM μέσα στο 2016 (Εικόνα 2.1).

Παράλληλα, φαίνεται ότι η χρήση small cells και η τεχνολογία massive MIMO για τη μείωση του κορεσμού της χωρητικότητας έδωσαν απάντηση στο πρόβλημα της χωρητικότητας. Τα **small cells** αποτέλεσαν λύση όπου το δίκτυο macro είχε φτάσει το επίπεδο Πυκνότητας Κίνησης (Traffic Density tracking) < 0.02 GkM (Εικόνα 2.1), ενώ η τεχνολογία **massive MIMO** αποδείχθηκε απαραίτητη όπου η Πυκνότητα Κίνησης (Traffic Density tracking) είχε ξεπεράσει τα 0.10 GkM (μετά το 2016).



Εικόνα 2.2 Μείωση Πυκνότητας Κίνησης του δικτύου της Σεούλ με χρήση 28 GHz [123]

Ωστόσο, η αυξανόμενη Πυκνότητα Κίνησης (Traffic Density tracking), οδήγησε στην χρήση ολοένα και μεγαλύτερου αριθμού small cells ως λύση, ώστε να επιτευχθεί αύξηση της χωρητικότητας στις περιοχές 1-3 GHz, ειδικά για τιμές οι οποίες ξεπερνούσαν τα 0.2 GkM. Πρόκειται για μια οικονομικά ασύμφορη λύση. Μια απάντηση στο πρόβλημα ήταν η προσθήκη φάσματος συχνοτήτων 5G, όπως έγινε στην Κορέα (Σεούλ), όπου το φάσμα π.χ. των 28 GHz αύξησε σημαντικά την χωρητικότητα με 800 MHz (Εικόνα 2.2).

Οι πάροχοι στηρίζουν την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για περισσότερα δεδομένα, χρησιμοποιώντας υψηλότερες συχνότητες στο φάσμα των cmWave και mmWave. Το περιβάλλον λειτουργίας του 5G NR για το επίγειο ευρυζωνικό σύστημα απαρτίζεται από νέα στοιχεία ασύρματης πρόσβασης όπως:

- Ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (Wideband performance) οι οποίες περιλαμβάνουν το φάσμα των sub-6 GHz, τα χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave) και συχνότητες έως τα 100 GHz
- Κεραίες massive MIMO
- Τεχνική Διαμόρφωσης Δέσμης (Beamforming) ή αλλιώς Διαμόρφωσης λοβού.

Το μικρό μήκος κύματος των συχνοτήτων mmWave επιτρέπει στις κεραίες τύπου massive MIMO να διαθέτουν αρκετά μικρό μέγεθος. Παράλληλα, η τεχνική Beamforming επιτρέπει την διαμόρφωση της δέσμης του σήματος της κεραίας και την δυναμική εστίασή της ισχύος του στην κατεύθυνση ενός χρήστη UE (π.χ. κινητό τηλέφωνο ή Η/Υ).

Το κεφάλαιο ξεκινάει με μια αναλυτική παρουσίαση θεωρητικών εννοιών σχετικά με τις κεραίες όπως η πολικότητα κεραιών, διαφορισμός πολικότητας, και την τοπολογία των κεραιών MIMO και massive MIMO που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της τεχνολογίας Beamforming.

2.2 Πολικότητα Κεραίας [127]

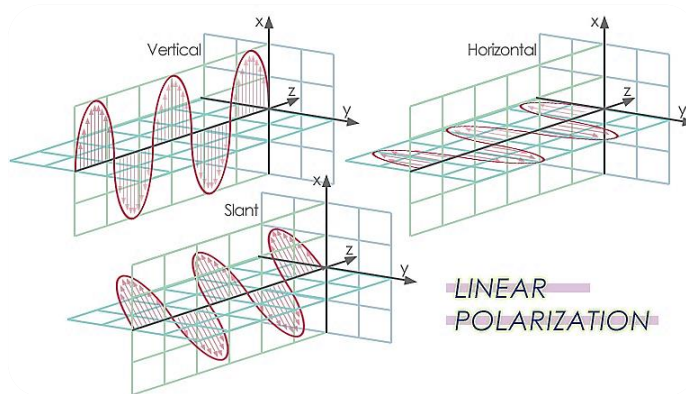
Ένα σημαντικό στοιχείο για μια κεραία είναι η πολικότητά της. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο τα οποία διαδίδονται ταυτόχρονα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση στον χώρο. Η πολικότητα ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος καθορίζεται από το επίπεδο στο οποίο ταλαντώνεται το ηλεκτρικό πεδίο κατά την διάδοσή του. Υπάρχουν τρία είδη πολικότητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων:

- Γραμμική Πολικότητα (Linear Polarization)
- Κυκλική Πολικότητα (Circular Polarization)
- Ελλειπτική Πολικότητα (Elliptical Polarization)

Όταν αναφερόμαστε στην πολικότητα της κεραίας, ουσιαστικά αναφερόμαστε στον τρόπο με το οποίο μεταδίδεται το ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα από την κεραία, δηλαδή την πολικότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπεται από την κεραία.

2.2.1 Γραμμική Πολικότητα (Linear Polarization) [127]

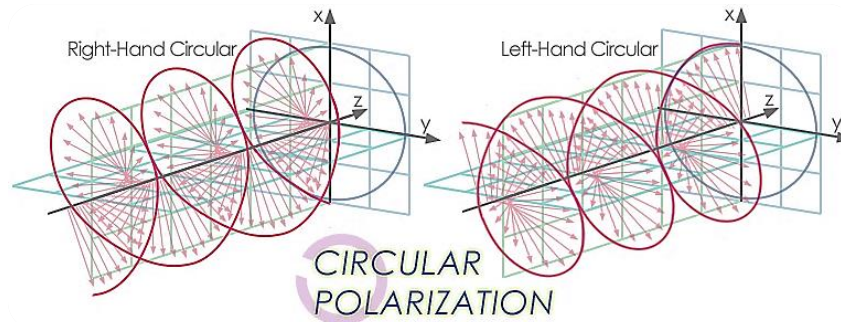
Στην περίπτωση της γραμμικής πολικότητας, το ηλεκτρικό πεδίο και το μαγνητικό ενός σήματος μεταδίδονται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση κάθετα μεταξύ τους. Εδώ ξεχωρίζουμε τρεις τύπους γραμμικής πολικότητας: α) Κάθετη (Vertical), β) Οριζόντια (Horizontal) και γ) Λοξή Πόλωση (Slant).



Εικόνα 2.3 Οι τρεις τύποι γραμμικής πολικότητας [127]

Όταν το ηλεκτρικό πεδίο του σήματος ταλαντώνεται κάθετα στο επίπεδο του άξονα y (Εικόνα 2.3), δηλαδή κάθετα της επιφάνειας της Γης τότε η πολικότητα του σήματος θεωρείται οριζόντια. Σε αυτήν την περίπτωση, το μαγνητικό πεδίο ταλαντώνεται στο κάθετο επίπεδο που σχηματίζει ο άξονας x). Στην αντίστροφη περίπτωση όπου το ηλεκτρικό πεδίο πάλλεται κάθετα στο επίπεδο του άξονα x, δηλαδή παράλληλα με την επιφάνεια της Γης, μιλάμε για κάθετη πολικότητα του σήματος. Ωστόσο, υπάρχει περίπτωση το ηλεκτρικό πεδίο να ταλαντώνεται υπό γωνία 45° μοιρών ως προς ένα επίπεδο αναφοράς και αντίστοιχα το εγκάρσιο μαγνητικό κατά -45° . Τότε αναφερόμαστε σε λοξή πόλωση (slant polarization).

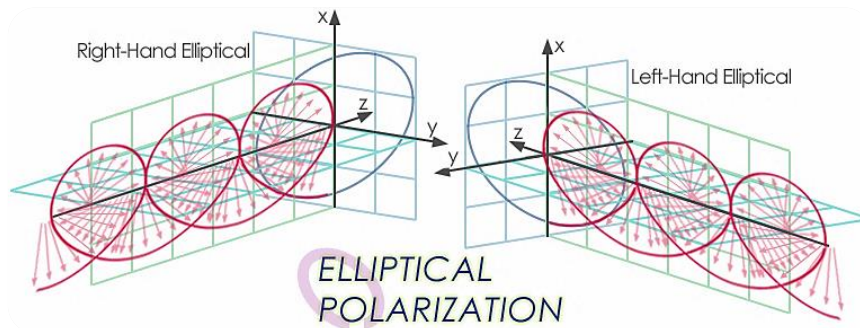
2.2.2 Κυκλική Πολικότητα (Circular Polarization) [127]



Εικόνα 2.4 Κυκλική πολικότητα: αριστερόστροφη και δεξιόστροφη [127]

Στην κυκλική πόλωση το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται μεταβάλλοντας την κατεύθυνση του κυκλικά καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στον χώρο (Εικόνα 2.4). Στην κυκλική πόλωση, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να περιστρέφεται δεξιά οπότε αναφερόμαστε σε δεξιά κυκλική πόλωση (Right-Hand Circular Polarization - RHCP) ή αριστερά οπότε πρόκειται για αριστερή κυκλική πόλωση (Left-Hand Circular Polarization - LHCP).

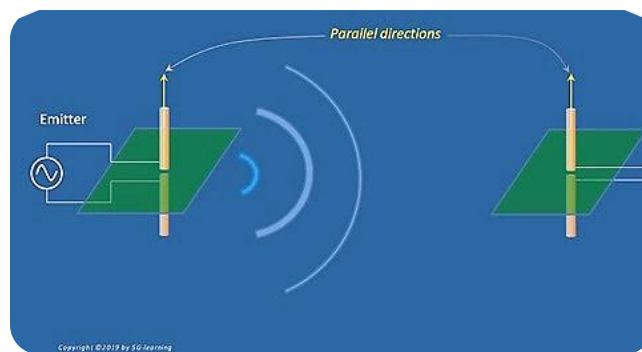
2.2.3 Ελλειπτική Πολικότητα (Elliptical Polarization) [127]



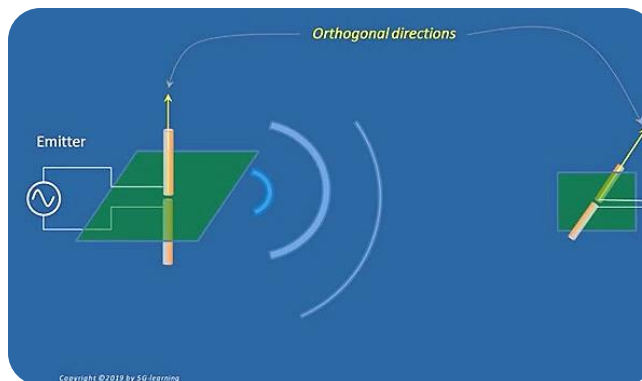
Εικόνα 2.5 Ελλειπτική πολικότητα: αριστερόστροφη και δεξιόστροφη [127]

Στην περίπτωση της ελλειπτικής πόλωσης (Εικόνα 2.5) το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλει την κατεύθυνση του συνεχόμενα με την μορφή ελλειπτικού έλικα καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται. Όπως είδαμε παραπάνω στην κυκλική πόλωση, έτσι και στην ελλειπτική πόλωση, μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφη είτε αριστερόστροφη.

2.2.4 Διαφορισμός Πολικότητας (Polarization Diversity) [128][157]



(α)



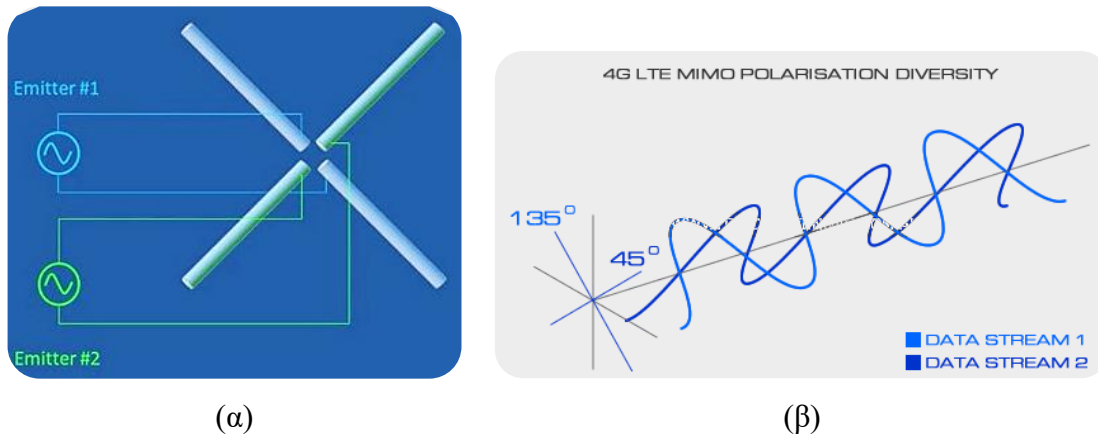
(β)

Εικόνα 2.6 Παράλληλη (α) και Ορθογωνική (β) πολικότητα κεραιών [157]

Για την επίτευξη της μέγιστης μεταφοράς ισχύος του σήματος από μια κεραία που εκπέμπει σε μια κεραία λήψης, βασικός κανόνας αποτελεί να διαθέτουν την ίδια

πολικότητα. Ας θεωρηθούν δυο δίπολα ως κεραίες, ένα για την εκπομπή του σήματος και ένα για την λήψη (Εικόνα 2.6). Στην περίπτωση που οι άξονες των δυο κεραιών (διπόλων) είναι παράλληλοι μεταξύ τους πρόκειται για παράλληλη πολικότητα (Εικόνα 2.6α). Αντίθετα, όταν οι άξονες τους σχηματίζουν γωνία 90^0 μεταξύ τους, τότε πρόκειται για ορθογωνική πολικότητα (Εικόνα 2.6β).

Η ορθογωνική πολικότητα μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο σε δυο κεραίες οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους (πομπός και δέκτης) αλλά και στην ίδια την κεραία. Αυτό σημαίνει ότι δίνεται η δυνατότητα σε μια κεραία να λαμβάνει ή να εκπέμπει σήματα τόσο με κάθετη πολικότητα όσο και σήματα με οριζόντια πολικότητα. Η κεραία σε αυτήν την περίπτωση αποτελείται από ένα ζεύγος διπόλων διαφορετικής πολικότητας το καθένα (οριζόντιας και κάθετης) τα οποία είναι τοποθετημένα κάθετα μεταξύ τους.



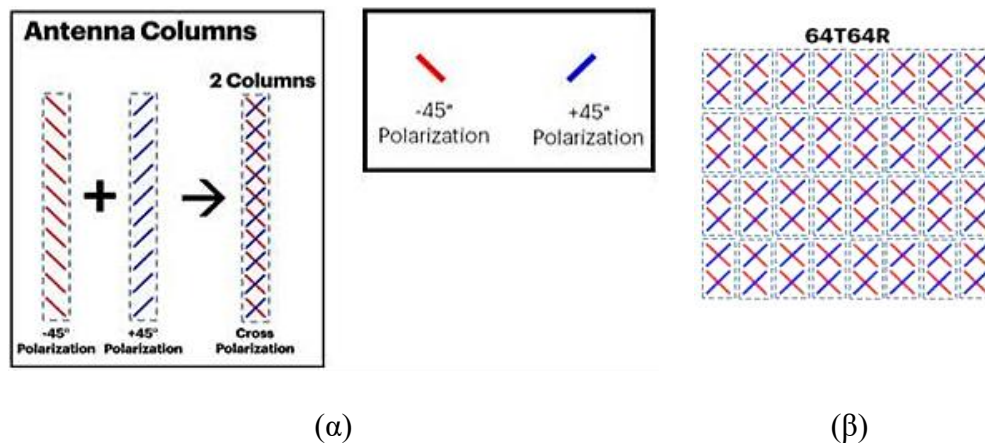
Εικόνα 2.7 Διαφορισμός Πόλωσης: α) Διασταυρωμένη πολικότητα (Cross-polarized polarity) $+45^0 / -45^0$ [157], β) Δυο ροές δεδομένων ίδιας συχνότητας με αντίθετη πολικότητα $+45^0 / -45^0$ [138]

Στην εικόνα 2.7α απεικονίζεται μια τοπολογία κεραίας εκπομπής με ορθογωνική πολικότητα. Ωστόσο, όπως φαίνεται στην εικόνα, η κεραία είναι στραμμένη κατά μια γωνία. Το ένα δίπολο διαθέτει κάθετη πολικότητα και το άλλο οριζόντια πολικότητα. Η κεραία με αυτή την διάταξη διαθέτει ορθογωνική πολικότητα αλλά λόγω της κλίσης των διπόλων, η πολικότητα ονομάζεται διασταυρωμένη (cross-polarization). Όπως φαίνεται

στην εικόνα 2.7α, τα δίπολα είναι στραμμένα κατά 45^0 και -45^0 για βέλτιστη απόδοση και συνεπώς διαθέτουν λοξή πολικότητα (slant polarization) το καθένα. Ωστόσο, ο συνδυασμός τους σε αυτές τις γωνίες αποτελεί διασταυρωμένη πολικότητα.

Η πολικότητα της κεραίας πρέπει να ταιριάζει με αυτήν του εισερχόμενου σήματος, ώστε να επιτυγχάνεται το μέγιστο κέρδος, δηλαδή, το μικρότερο δυνατόν Path Loss [123][126]. Η τεχνική χρήσης διασταυρωμένης πολικότητας σε μια κεραία (cross-polarized antenna) αποτελεί τον διαφορισμό πολικότητας κεραίας (polarization diversity). Ο διαφορισμός πολικότητας επιτρέπει στην κεραία τη μετάδοση δυο ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, δηλαδή δυο διαφορετικών ροών δεδομένων (data stream 1 & stream 2), με την ίδια συχνότητα (φέρον) στο ίδιο κανάλι (Εικόνα 2.7β).

➤ **Κεραιοστοιχεία MIMO - massive MIMO [128][157]**



(α) Ζεύγη διπόλων αντίθετης πολικότητας σε
 δισδιάστατο πάνελ (cross-polarized element array) 2x2,
 β) Συστοιχία διπόλων 8x8 [128]

Στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται κεραίες με πολυάριθμα κεραιοστοιχεία όπως συμβαίνει με τις κεραίες τύπου MIMO και massive MIMO. Αυτές οι κεραίες συνδυάζουν κεραιοστοιχεία με διασταυρωμένη πολικότητα (cross-polarized antenna

elements / radiating elements). Δηλαδή, κάθε κεραιοστοιχείο αποτελεί ένα διασταυρωμένο ζεύγος διπόλων, όπου το κάθε δίπολο έχει αντίθετη πολικότητα, δηλαδή -45° και $+45^\circ$ (Εικόνα 2.8α). Συνεπώς, πρόκειται για κεραίες διπλής πολικότητας (dual polarized antennas).

Τα ζεύγη διασταυρωμένων διπόλων τοποθετούνται σε μια στήλη ώστε να σχηματίσουν μια συστοιχία κεραιών (element array). όπου το σύνολο τους παράγει την διαμορφωμένη ακτίνα. Η στήλη διπόλων διασταυρωμένης πολικότητας της εικόνας 2.8α είναι 2x2 MIMO. Συνδυάζοντας τέτοιες στήλες μπορούν να δημιουργηθούν πάνελ δηλαδή μεγαλύτερες συστοιχίες κεραιών, δημιουργώντας συνδυασμούς που μπορούν να ποικίλουν, όπως 32, 64, 128, 256. Η εικόνα 2.8β απεικονίζει ένα πάνελ διπόλων 8x8, δηλαδή 64R δίπολα για την λήψη και 64T για την εκπομπή (128 κεραίες συνολικά).

2.3 MIMO [48][139][161]

Το σύστημα Πολλαπλής Εισόδου, Πολλαπλής Εξόδου MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) αποτελεί μια έξυπνη τεχνική, όπου μια κεραία αποτελείται από δύο ή περισσότερα κεραιοστοιχεία (elements) εκπομπής και δυο ή περισσότερα κεραιοστοιχεία λήψης, που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα. Ο στόχος είναι η αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού που χρησιμοποιείται καθώς και του ρυθμού της μετάδοσης και της λήψης των δεδομένων και της αξιοπιστίας της μετάδοσης. Χρησιμοποιείται στην τεχνολογία 4G LTE-Advanced και ουσιαστικά προηγήθηκε του πιο εξελιγμένου συστήματος massive MIMO.

Υπάρχουν δυο τύποι MIMO: α) SU-MIMO (Single User-MIMO) και β) MU-MIMO (Multi User-MIMO). Στην περίπτωση του SU-MIMO, ένα σημείο πρόσβασης (Access Point) που διαθέτει πολλαπλές κεραίες μπορεί να επικοινωνεί με μια μόνο συσκευή κάθε φορά. Αντίθετα, στην περίπτωση του MU-MIMO, ένα σημείο πρόσβασης (Access Point) μπορεί να επικοινωνεί (να εκπέμπει και να λαμβάνει πακέτα δεδομένων) με πολλές συσκευές, ταυτόχρονα, στην ίδια συχνότητα. Οι κεραίες τεχνολογίας MIMO με τεχνολογία Beamforming χρησιμοποιούν γενικά πιο στενούς λοβούς για υψηλότερο κέρδος και καλύτερη στόχευση σε σχέση με αυτές προγενέστερης τεχνολογίας κεραίες.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα μορφοποίησης και εκπομπής των δεδομένων στην τεχνολογία MIMO με δυο τρόπους:

- MIMO Multiplexing (Πολυπλεξία)
- MIMO Diversity

Στην περίπτωση MIMO Multiplexing, οι πληροφορίες διαιρείται σε μικρότερα πακέτα τα οποία μεταδίδονται από διαφορετικές κεραιές ταυτόχρονα ως ροές διαφορετικών δεδομένων μέσω της συχνότητας του καναλιού. Κατά την λήψη, τα πακέτα που φτάνουν λαμβάνονται από τις διαφορετικές κεραιές συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν την αρχική πληροφορία. Με αυτό τον τρόπο αυξάνουμε το ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή το throughput.

Στην περίπτωση της MIMO Diversity οι διάφορες κεραιές του πομπού εκπέμπουν όλες τα ίδια δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η ίδια πληροφορία θα μεταδοθεί και ο δέκτης θα την λάβει αφού η πληροφορία θα μεταδοθεί μέσω πολλαπλών σημάτων. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης των δεδομένων αυξάνει την αξιοπιστία μετάδοσης της πληροφορίας.

Στα κυβελωτά δίκτυα καθώς και στα ασύρματα LAN, υπάρχουνε διάφορες διατάξεις MIMO π.χ. 2x3 ή 2x4, με τις πιο συνηθισμένες διατάξεις να είναι οι εξής:

- 2x2 MIMO (δυο κεραιές εκπομπής, δυο κεραιές λήψης)
- 3x3 (τρεις κεραιές εκπομπής, τρεις κεραιές λήψης)
- 4x4 MIMO (τέσσερις κεραιές εκπομπής, τέσσερις κεραιές λήψης)
- 8x8 MIMO (οκτώ κεραιές εκπομπής, οκτώ κεραιές λήψης)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κεραιών MIMO οι οποίοι διαφέρουν ως προς την κάλυψη που προσφέρουν. Κάποιες κεραιές MIMO καλύπτουν μόνο έναν τομέα (sector) ενώ άλλοι τύποι όπως οι πανκατευθυντικές κεραιές (omnidirectional) μπορούν να καλύψουν αζιμουθιακά τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα.

Εκτός από τις κεραιές οι οποίες είναι σχεδιασμένες για χρήση στα σταθερά επίγεια δίκτυα 3G και 4G της κινητής τηλεφωνίας, υπάρχουν κεραιές MIMO οι οποίες εγκαθίστανται στην άτρακτο του αεροσκάφους για την σύνδεση των αεροσκαφών στο ίντερνετ.



- (α) **(S65-5366-727)**
Κεραία 2.2 - 2.5 GHz, δυο (2) θυρών, κάθετης πολικότητας



- (β) **(S65-5366-703)**
Πολυζωνική κεραία (multi-band) 700 MHz - 5900 MHz (LTE 700-2700 MHz / Wi-Fi 2400-2500 MHz / 4900-5900 MHz) πέντε (5) θυρών, οριζόντιας και κάθετης πολικότητας



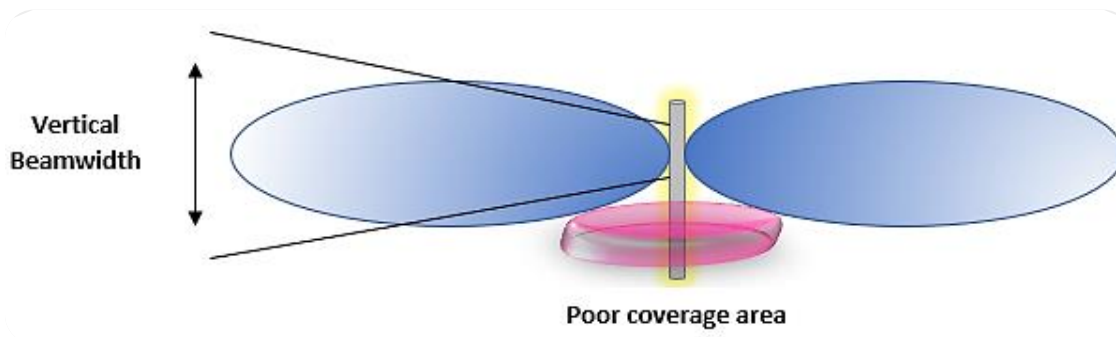
- (γ) **(Part # 1055-377)**
Κεραία S-Band (2.1-2.5GHz) αεροσκάφους τεσσάρων (4) θυρών (RF ports), διασταυρούμενη πόλωση 45⁰ αριστερά (slant left) & 45⁰ δεξιά για αυξημένο data throughput

Εικόνα 2.9 Εξωτερικές πανκατευθυντικές κεραίες αεροσκαφών MIMO [75][76]

Οι πιο συνηθισμένες κεραίες στα αεροσκάφη αποτελούν οι κεραίες τύπου περύγιου (Blade antennas) (Εικόνα 2.9 α & β). Πρόκειται για πανκατευθυντικές κεραίες οι οποίες διαθέτουν συνήθως ομοαξονικά συγγραμμικά δίπολα (coaxial collinear dipoles) ή συγγραμμικά δίπολα τύπου patch με microstrip (collinear microstrip patches).

Ένα χαρακτηριστικό των πανκατευθυντικών κεραιών είναι η ευελιξία και η απόδοσή τους. Όταν μια πανκατευθυντική κεραία είναι πολωμένη κυκλικά, διαθέτει μειωμένη ευαισθησία ως προς την πολικότητα των σημάτων και συνεπώς δεν επηρεάζεται από την κάθετη ή οριζόντια πόλωσή τους κατά την λήψη τους. Αυτό έχει ως συνέπεια

αποτελεσματικότερο κέρδος. Επίσης, ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που τις κάνει ελκυστικές σε εφαρμογές ATG στο αεροσκάφος είναι ότι αν διαθέτουν διπλή πολικότητα τότε εξασφαλίζουν μέγιστη απόδοσή αφού πραγματοποιείται μέγιστη μεταφορά ενέργειας των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων.



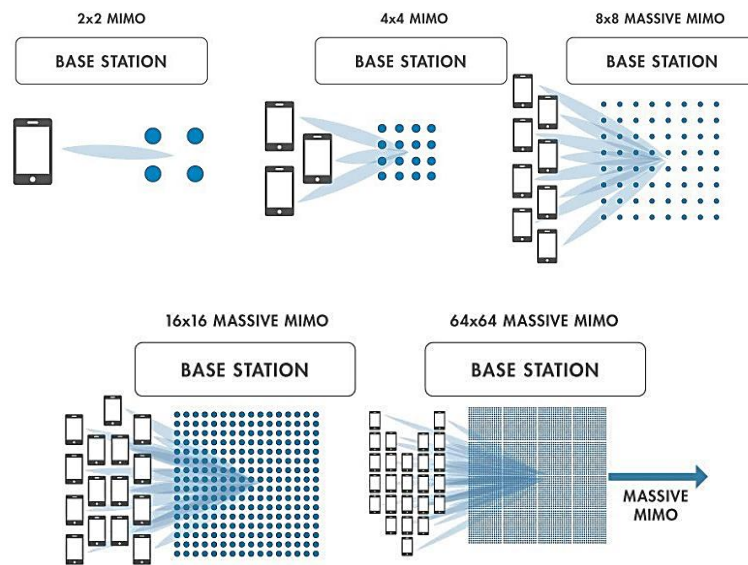
Εικόνα 2.10 Η Περιοχή μη-κάλυψης κάτω από την Πανκατευθυντική κεραία - Προβολή κατακόρυφης κάλυψης (Βασισμένο στο [161])

Ουσιαστικά ο τύπος πολικότητας για χρήση σε εφαρμογές επικοινωνίας αέρος - εδάφους (DA2GC) δεν προσδιορίζεται [99]. Ωστόσο, η πολικότητα της πανκατευθυντική κεραία, συνήθως είναι κάθετη (vertical polarization) (υπάρχουν επίσης διπλής πολικότητας). Διαθέτει οριζόντια κάλυψη 360° έχοντας την δυνατότητα να διαφοροποιεί την κάλυψή της στον κατακόρυφο άξονα (Vertical Beamwidth). Ωστόσο, υπάρχει ένα όριο στην κάλυψη αυτού του τύπου κεραίας στον κατακόρυφο άξονα καθώς δημιουργείται ένα κενό κάλυψης στην περιοχή της κεραίας κάτω από τον άξονα της (Εικόνα 2.10).

Στον αντίποδα βρίσκονται οι κατευθυντικές κεραίες οι οποίες μπορούν να διοχετεύουν την ενέργεια της ακτινοβολίας τους προς μια κατεύθυνση στον χώρο. Συνεπώς, μπορούν να καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις και να διαθέτουν μεγαλύτερο κέρδος. Αυτό το οφείλουν στην δυνατότητα η ακτινοβολία τους να περιορίζεται στην ένα οριζόντιο κάλυψη (horizontal pattern) σε τιμές ανάμεσα σε 30° - 90° και με τυπική τιμή 65° , καλύπτοντας μόνο ένα μέρος του χώρου (sector antennas).

2.4 massive MIMO [123][126][130]

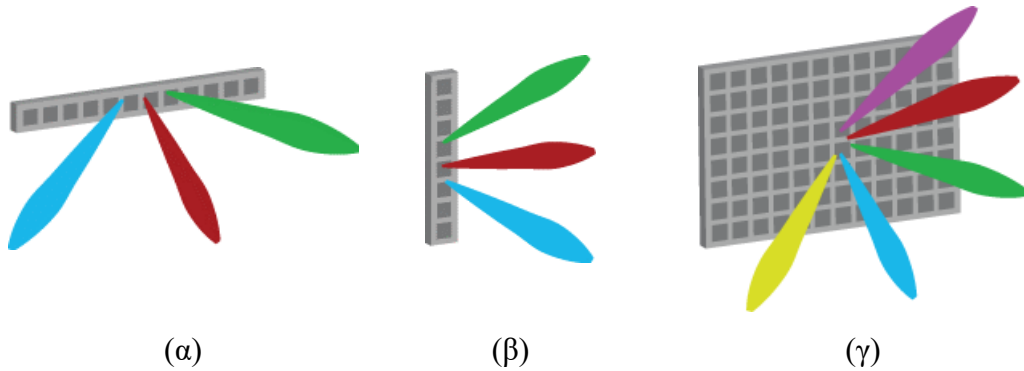
Ο όρος massive MIMO (massive Multiple-Input Multiple-Output) αναφέρεται στην τεχνολογία όπου οι κεραιές οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους σταθμούς βάσεων του Ασύρματου Δικτύου Πρόσβασης είναι συστοιχίες κεραιών οι οποίες λειτουργούν ως πομποδέκτες, καθώς διαθέτουν πομπούς και δέκτες μαζί (Transceivers).



Εικόνα 2.11 MIMO vs massive MIMO [126]

Μια συστοιχία κεραιών αποτελείται από ένα σύνολο μικρών κεραιών (κεραιοστοιχείων) ή ακτινοβολούντα στοιχεία (radiating elements), τα οποία κυμαίνονται από δεκάδες έως χιλιάδες. Ουσιαστικά, τα κεραιοστοιχεία βρίσκονται ομαδοποιημένα στην κεραιά σε διδιάστατα (2D) πάνελ των 64 έως 256 κεραιοστοιχείων. Κάθε κεραιά αποτελείται από ένα σύνολο πάνελ με κεραιοστοιχεία (Εικόνα 2.11). Παρακάτω ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση σχετικά με την δομή και την λειτουργία τους.

2.4.1 Διάταξη κεραίας 5G massive MIMO - 2D/3D Beamforming [123][130][133]

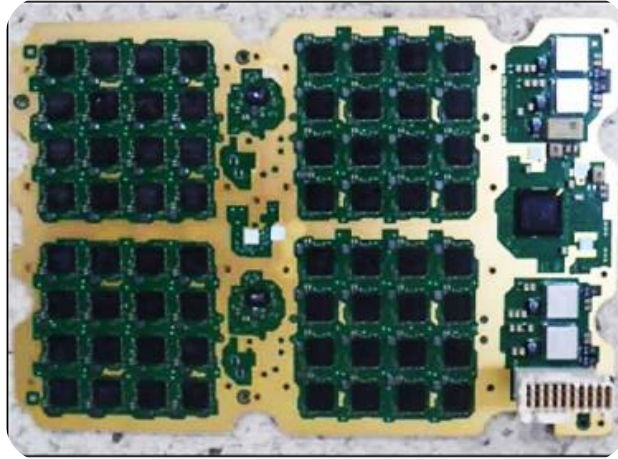


Εικόνα 2.12 Uniform linear array: α) 2D Beamforming Αζιμούθιο, β) 2D Beamforming Ανύψωση, γ) 3D Beamforming [130]

Γενικά, όλες οι σύγχρονες κεραίες διαθέτουν 2-8 κεραίες (κεραιοστοιχεία - elements) οι οποίες βρίσκονται τοποθετημένες στον οριζόντιο άξονα (element array) όπως αυτή στην εικόνα 2.12α. Όλες οι κεραίες διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά σχετικά με το μοτίβο εκπομπής σήματος και κατευθυντικότητα. Η συγκεκριμένη διάταξη της εικόνας 2.12α επιτρέπει το Beamforming μόνο σε οριζόντιο επίπεδο.

Αν αλλάξουμε την διάταξη σε κάθετη όπως αυτή της εικόνας 2.12β, εξακολουθεί η διαμόρφωση να είναι στις δυο διαστάσεις (2D Beamforming), αλλά τώρα μπορούμε να κατευθύνουμε την δέσμη στο κατακόρυφο άξονα μόνο, και συνεπώς να ελέγξουμε την ανύψωση της δέσμης. Συνδυάζοντας τις δυο διατάξεις μπορούμε να επιτύχουμε την διαμόρφωση της δέσμης στις τρεις διαστάσεις, δηλαδή να έχουμε 3D Beamforming όπου μπορούμε να ελέγξουμε τόσο το αζιμούθιο όσο και την ανύψωση.

Ουσιαστικά, σε ένα σύστημα massive MIMO, υπάρχει μεγάλος αριθμός κεραιοστοιχείων τοποθετημένα σε ένα δισδιάστατο 2D πάνελ (Εικόνα 2.12γ). Η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει τρισδιάστατη διαμόρφωση δέσης 3D Beamforming καθώς και χρήση πολλαπλών δεσμών, ενώ μπορούμε να το αποκαλούμε και τρισδιάστατο MIMO (3D-MIMO).

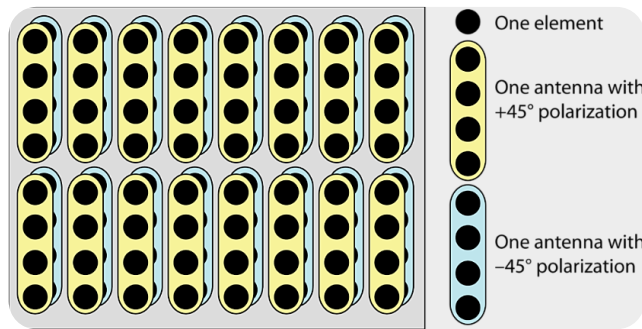


Εικόνα 2.13 Πάνελ mMIMO 4 συστοιχίες x 16: (256 κεραίες) [123]

Οι κεραίες οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι τύπου patch οι οποίες έχουν τροφοδοσία από ομοαξονικά καλώδια (patch coaxial fed antenna). Στην εικόνα 2.13 απεικονίζεται ένα πάνελ massive MIMO με patch, το οποίο διαθέτει τέσσερα (4) τομείς. Κάθε τομέας αποτελείται από 16 κεραίες (διασταυρωμένα ζεύγη δίπολων - dual polarized antennas). Συνολικά, η κεραία διαθέτει 256 κεραίες (διασταυρωμένα ζεύγη δίπολων), δηλαδή 4 x 16.



(α)



(β)

Εικόνα 2.14 α) Η κεραία AIR 3268 της Ericsson, β) Η διάταξη των στοιχείων της 8x8 array [133]

Ένα άλλο παράδειγμα κεραίας είναι αυτό της κεραίας *Massive MIMO* AIR 3268 της Ericsson (mid-band) (Εικόνα 2.14α). Η κεραία διαθέτει 128 στοιχεία (radiating elements)

τα οποία βρίσκονται σε διάταξη συστοιχιών 8x8 (array) διπλής πόλωσης (Εικόνα 2.12β). Η απόσταση των στοιχείων μεταξύ τους είναι περίπου 0.5λ ($\lambda/2$) στον οριζόντιο άξονα ενώ στον κάθετο άξονα τα στοιχεία απέχουν κατά 0.7λ ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερης ανύψωσης, δηλαδή αυξημένης κατακόρυφης κλίσης της δέσμης και συνεπώς αυξημένης κατακόρυφης κατευθυντικότητας και πιο συγκεκριμένα προς το έδαφος.

Παρόλο που τα στοιχεία είναι οργανωμένα σε ένα πάνελ 8×8 , το πάνελ δεν διαθέτει τετράγωνη μορφή αλλά παραλληλόγραμμη. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη απόσταση των στοιχείων στον κατακόρυφο άξονα (0.7λ). Τα στοιχεία στοιχίζονται σε τετράδες με κατακόρυφη διάταξη (Εικόνα 2.14β). Κάθε τετράδα αποτελεί μια κεραία η οποία αποκαλείται subarray και είναι συνδεδεμένο σε μια μονάδα RF.

Διαθέτουν την ίδια πολικότητα και παράγουν το ίδιο συγκεκριμένο μοτίβο ακτινοβολίας (radiation pattern), δηλαδή μια ακτίνα η οποία είναι στενή στο κατακόρυφο επίπεδο. Κάθε τέτοια τετράδα της ίδιας πολικότητας (π.χ. $+45^\circ$) στοιχίζεται παράλληλα με μια αντίστοιχη τετράδα της αντίθετης πολικότητας (-45°). Όσο μεγαλύτερο το sub-array, τόσο στενότερη γίνεται η δέσμη και συνεπώς μεγαλώνει και το κέρδος.

Γενικότερα, σε ένα σύστημα 5G Massive MIMO με διάταξη 64×64 στην κατερχόμενη (DL) ζεύξη, σημαίνει ότι ο σταθμός βάσης (BS) διαθέτει 64 κεραίες (antenna elements) και αντίστοιχα το κινητό διαθέτει 64 κεραίες (antenna elements) [132]. Αντίστοιχα, σε ένα σύστημα MIMO 4x2 στην κατερχόμενη (DL) ζεύξη, σημαίνει ότι ο σταθμός βάσης (BS) διαθέτει 2 κεραίες (antenna elements) και αντίστοιχα το κινητό διαθέτει άλλες 2 κεραίες.

Ειδικότερα για τις κεραίες τύπου massive MIMO ή MIMO ισχύει ότι η απόσταση των κεραιών ανάμεσα τους είναι 0.5λ (ή $\lambda/2$) της συχνότητας του σήματος. Το δίκτυο 5G πέρα από τις συχνότητες στην περιοχή sub-6 GHz χρησιμοποιεί και τις χιλιοστομετρικές συχνότητες. Λόγω της φύσης τους, οι χιλιοστομετρικές συχνότητες διαθέτουν πολύ μικρότερο μήκος κύματος από τις αντίστοιχες του sub-6 GHz, γεγονός το οποίο τις κάνει ιδανικές για χρήση στην νέα τεχνολογία massive MIMO.

Το μικρό μήκος κύματος επιτρέπει στο μέγεθος των κεραιών (δίπολων) και των ενσωματωμένων γραμμών μετάδοσης να έχουν πολύ μικρό μέγεθος. Παράλληλα, ένα άλλο

χαρακτηριστικό τους είναι ότι παράγουν δέσμες οι οποίες διαθέτουν πολύ μικρότερη διάμετρο, δηλαδή είναι στενότερες. [123]

Είναι γνωστό ότι το μήκος του δίπολου σε κάθε ζεύγος ορίζεται ως $\lambda/2$ και επειδή $\lambda=c/f$, το μήκος του θα εξαρτάται από την συχνότητα π.χ.:

700 MHz	-	42.85 cm	28 GHz	-	1.07 cm
3.5 GHz	-	8.6 cm	40 GHz	-	7.5 mm

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο μειώνεται το μήκος του δίπολου, πράγμα πολύ χρήσιμο για την κατασκευή κεραιών οι οποίες λειτουργούν σε χιλιοστομετρικές συχνότητες και οι οποίες διαθέτουν πολύ μικρό μέγεθος ενώ παράλληλα ενσωματώνουν μεγάλο αριθμό κεραιών ώστε να επιτυγχάνεται η τεχνολογία massive MIMO. Για παράδειγμα, μια τυπική κεραία MIMO LTE για συχνότητα 700 MHz και με την συνθήκη $\lambda/2$ (0.5 λ) ανάμεσα στα δίπολα απαιτεί απόσταση κεραιοστοιχείων ίση με 21.41 cm. Συνεπώς, 8 τέτοια στοιχεία σε οριζόντια διάταξη απαιτούν ένα πάνελ 1.71 m.

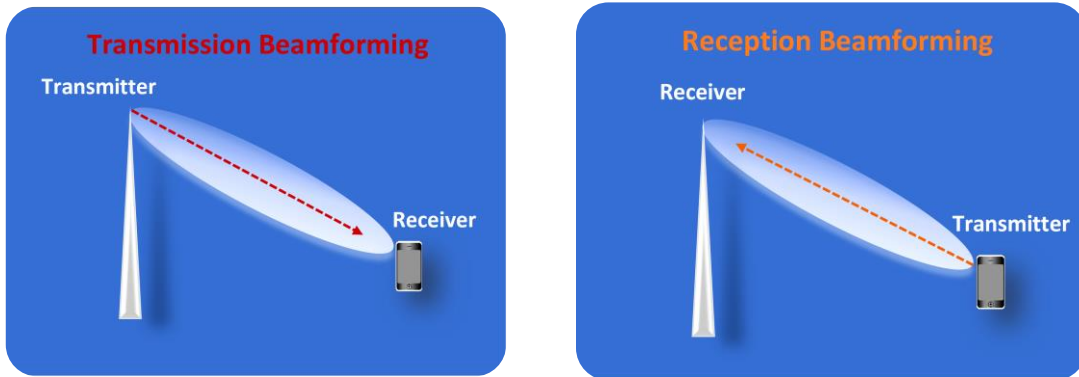
Αντίστοιχα, στην περίπτωση υψηλότερων συχνοτήτων, π.χ. 30 GHz, θα έχουμε $\lambda=9993.081933333\mu\text{m}$ και για $\lambda/2$ θα έχουμε απόσταση κεραιοστοιχείων ίση με 0.499654 cm (ή 4.9965 mm) και συνεπώς 8 στοιχεία σε οριζόντια διάταξη θα απαιτούν χώρο μόλις 3.997cm και περίπου 340 τέτοια στοιχεία για την διάσταση της προηγούμενης περίπτωσης με 1.71 m (ακριβέστερα για 169.88 m).

2.5 Beamforming

Η τεχνική beamforming εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης των σημάτων μιας συστοιχίας κεραιών (antenna array). Έτσι, αντί να γίνεται εκπομπή ενός σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις, πραγματοποιείται στοχευμένη εκπομπή του σήματος προς ένα τερματικό (π.χ. κινητό τηλέφωνο, H/Y ή κεραία ATG αεροσκάφους).

Η τεχνολογίες mmWave, κεραιές massive MIMO και Beamforming επιτρέπουν την εκπομπή δεσμών σήματος με διάμετρο στενότερη από αυτή που παράγεται με τη χρήση συχνοτήτων sub-6 GHz και γενικότερα χωρίς την χρήση της τεχνολογίας Beamforming.

Ένα σύνολο διεργασιών επεξεργασίας του σήματος εμπεριέχονται στην εφαρμογή της τεχνολογίας Beamforming τόσο κατά την εκπομπή του σήματος όσο και κατά την λήψη του, όπως ο έλεγχος του πλάτους και της φάσης του σήματος.

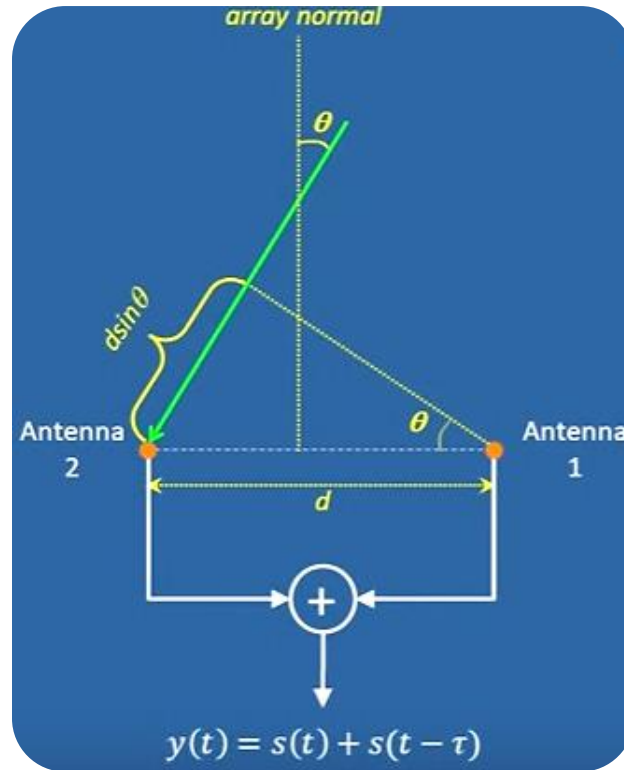


Εικόνα 2.15 Beamforming κατά την Εκπομπή (Transmission)
& κατά την Λήψη (Reception) (Βασισμένο στο [122])

Η τεχνική μπορεί να πραγματοποιείται κατά το Downlink στο επίπεδο των πομπών της κεραίας του σταθμού βάσης (BS), ώστε η ενέργεια του σήματος από μια συστοιχία πομπών (transmitter array) να εστιάζεται προς ένα συγκεκριμένο τερματικό χρήστη (UE) (Transmission Beamforming - Εικόνα 2.15). Αντιστρόφως, μπορεί να γίνει κατά το Uplink πάλι στο επίπεδο των δεκτών της κεραίας του σταθμού βάσης (BS), ώστε οι δέκτες της κεραίας να εστιάζουν στο τερματικό του χρήστη (UE) από το οποίο γίνεται λήψη του σήματος (Transmission Beamforming - Εικόνα 2.15).

Η έννοια Beam Steering (Καθοδήγηση της δέσμης) και η χρήση κεραιών mMIMO (συστοιχίες κεραιών - antenna arrays) είναι επίσης συνδεδεμένες με την τεχνική Beamforming. Με τον όρο Beamforming αναφερόμαστε στην εστίαση της ισχύος της δέσμης, ενώ ο όρος Beam Steering αναφέρεται στην τροποποίηση της κατεύθυνσης της δέσμης του σήματος. Ακολουθεί θεωρητική ανάλυση των λειτουργιών Beamforming και Beam Steering.

2.5.1 Διαμόρφωση Δέσμης - Beamforming [122][156]



Εικόνα 2.16 Γραμμική συστοιχία κεραιών με δυο πανκατευθυντικά στοιχεία [122]

Θεωρείται μια γραμμική συστοιχία κεραιών (Εικόνα 2.16) που αποτελείται από δυο πανκατευθυντικά (omnidirectional antenna elements) κεραιοστοιχεία τα οποία λειτουργούν ως δέκτες. Θεωρείται επίσης ένα σήμα το οποίο προσπίπτει στο πρώτο κεραιοστοιχείο (Antenna 1) της γραμμικής συστοιχίας την χρονική στιγμή t , με αζιμούθιο $\theta=30^\circ$.

Τότε, για το δεύτερο στοιχείο της κεραιάς (Antenna 2) της εικόνας 2.16, ισχύει ότι το σήμα πρέπει να διανύσει μία επιπλέον απόσταση l , η οποία με βάση την τριγωνομετρία (συνάρτηση του ημιτόνου της γωνίας θ) θα δίνεται ως $l = d \sin \theta$. Συνεπώς το σήμα φτάνει στην κεραιά Antenna 2 με την ίδια γωνία πρόσκρουσης, άλλα με καθυστέρηση τ

λόγω της απόστασης ανάμεσα στα κεραιοστοιχεία καθώς και της γωνίας πρόσπτωσης του σήματος. Αυτή η χρονική καθυστέρηση τ δίνεται από τον τύπο 2.1:

$$\tau = \frac{l}{c} = \frac{d \sin \theta}{c} \quad 2.1$$

Το συνολικό σήμα $y(t)$ που προκύπτει στην έξοδο των δυο κεραιοστοιχείων ορίζεται ως το άθροισμα των εξόδων τους, δηλαδή:

$$y(t) = s(t) + s(t - \tau) \quad 2.2$$

Στην συγκεκριμένη θεωρητική προσέγγιση γίνεται χρήση της χρονικής διαφοράς πρόσκρουσης του σήματος στην γραμμική συστοιχία.

Γνωρίζουμε ότι ένα διαμορφωμένο σήμα στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα δίνεται ως ημιτονοειδής συνάρτηση η οποία ορίζεται ως:

$$s(t) = x(t) \cos(\omega_0 t) \quad 2.3$$

όπου το $x(t)$ είναι η διαμόρφωση,

και $\cos(\omega_0 t)$ είναι το φέρον σήμα.

Συνεπώς, τα δυο σήματα που προσπίπτουν στα κεραιοστοιχεία με διαφορά χρόνου, δίνονται το καθένα ως:

$$s(t) = x(t) \cos(\omega_0 t) \quad 2.4$$

και

$$s(t - \tau) = x(t - \tau) \cos[(\omega_0(t - \tau))] \quad 2.5$$

και αντικαθιστώντας στον τύπο 2.2, προκύπτει:

$$y(t) = s(t) + s(t - \tau) \Rightarrow y(t) = x(t) \cos(\omega_0 t) + x(t - \tau) \cos[(\omega_0(t - \tau))] \quad 2.6$$

Αν θεωρηθεί ότι $\omega_0 \tau = \psi$, τότε η συνάρτηση $y(t)$ του τύπου 2.6 που αποτελεί το άθροισμα των δυο σημάτων που προσπίπτουν στα δυο κεραιοστοιχεία, δίνεται ως:

$$y(t) = x(t) \cos(\omega_0 t) + x(t) \cos(\omega_0 t - \psi) \quad 2.7$$

τα οποία πιο απλά δίνονται σε μιγαδική μορφή (μιγαδικά διανύσματα - phasors) ως:

$$y(t) = x(t) + x(t) e^{-j\psi} \quad 2.8$$

Συνεπώς, το άθροισμα των σημάτων $y(t)$ του τύπου 2.8 για την συστοιχία δυο κεραιών μπορεί να γραφεί ως:

$$y(t) = \sum_{n=1}^2 x(t) e^{j(n-1)\psi} \quad 2.9$$

Το σήμα $x(t)$ είναι σταθερός παράγοντας στην εξίσωση και θεωρείται επίσης μικρό σε σχέση με το φέρον. Συνεπώς, το άθροισμα Σ δεν εξαρτάται από αυτό και μπορεί επίσης να γραφεί ως:

$$y(t) = x(t) \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi} \quad 2.10$$

Καθώς ο ορισμός του *Array Factor (AF)* [156] είναι γνωστός, το παραπάνω άθροισμα δίνει τον *Array Factor (AF)* της συστοιχίας κεραιών (antenna array) δηλαδή:

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi} \quad 2.11$$

Ωστόσο, αντί της προσέγγισης ως προς την χρονική διαφορά πρόσπτωσης του σήματος στα κεραιοστοιχεία, να γίνει προσέγγιση με βάση την διαφορά φάσης τους. Γνωρίζοντας ήδη ότι η χρονική καθυστέρηση τ δίνεται από τον τύπο 2.1, μπορεί επίσης να υπολογιστεί η διαφορά της χρονικής καθυστέρησης Δt για τις δυο κεραιές της συστοιχίας (Εικόνα 2.27) ως:

$$\Delta t = \tau = \frac{d \sin \theta}{c} \quad 2.12$$

και συνεπώς μπορεί να προσεγγισθεί το l ως συνάρτηση του μήκους κύματος και να υπολογιστεί η διαφορά φάσης $\Delta\Phi$ συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του σήματος.

Ως γνωστό, ισχύει ότι η διαφορά φάσης $\Delta\Phi = \omega \cdot \Delta t$ όπου:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{και} \quad f = c/\lambda$$

Αντικαθιστώντας στον τύπο 2.12, η διαφορά φάσης $\Delta\Phi$ δίνεται ως:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad 2.13$$

Για απόσταση κεραιοστοιχείων $d = \lambda/2$ η διαφορά φάσης ανάμεσα σε καθένα από αυτά είναι:

$$\Delta\Phi = \pi \sin \theta \quad 2.14$$

και επειδή για κάθε κεραιοστοιχείο η απόσταση l αυξάνεται λόγω της γωνίας πρόσπτωσης του σήματος, η γωνία πρόσπτωσης θ θα εξαρτάται από αυτήν και θα αλλάζει σύμφωνα με:

$$\sin(\theta) = l/d \quad 2.15$$

Επειδή στην συγκεκριμένη περίπτωση, αντί της χρονικής προσέγγισης όπου προηγουμένως θεωρήθηκε ότι $\omega_0 t = \psi$, η προσέγγιση γίνεται ως προς την διαφορά φάσης, και πλέον με βάση τον τύπο 2.13 θεωρείται ότι: $\Delta\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta = \psi$.

Σε αυτή την περίπτωση, είναι φανερό ότι το σήμα εξόδου $y(t)$ που δίνεται από τύπο 2.10

$$y(t) = x(t) \sum_{n=1}^2 e^{j(n-1)\psi} \quad 2.10$$

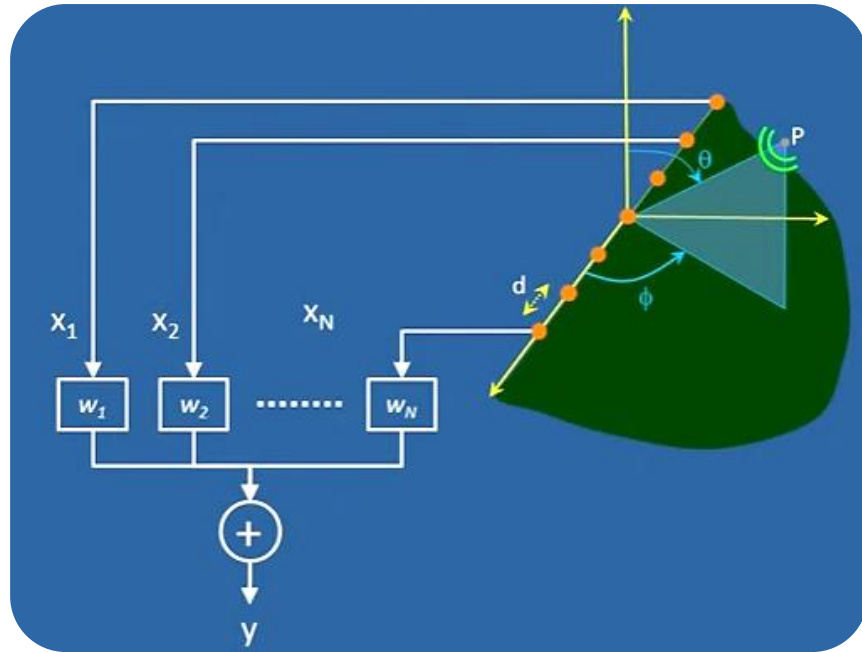
εξαρτάται από την γωνία πρόσκρουσης θ .

Τέλος, αντικαθιστώντας την 2.11 στην 2.10, και λύνοντας ως προς $\mathbf{AF}(\theta)$, ουσιαστικά δίνεται η συνάρτηση μεταφοράς της κεραίας:

$$y(t) = x(t)AF(\theta) \Rightarrow \mathbf{AF}(\theta) = \frac{\mathbf{y}(t)}{\mathbf{x}(t)} \quad 2.15$$

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω και τον τύπο 2.15, προκύπτει ότι το κέρδος της κεραίας είναι η συνάρτηση μεταφοράς, και εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης θ του σήματος.

➤ Επίδραση Αζιμούθιου θ και Ανύψωσης φ στο Κέρδος

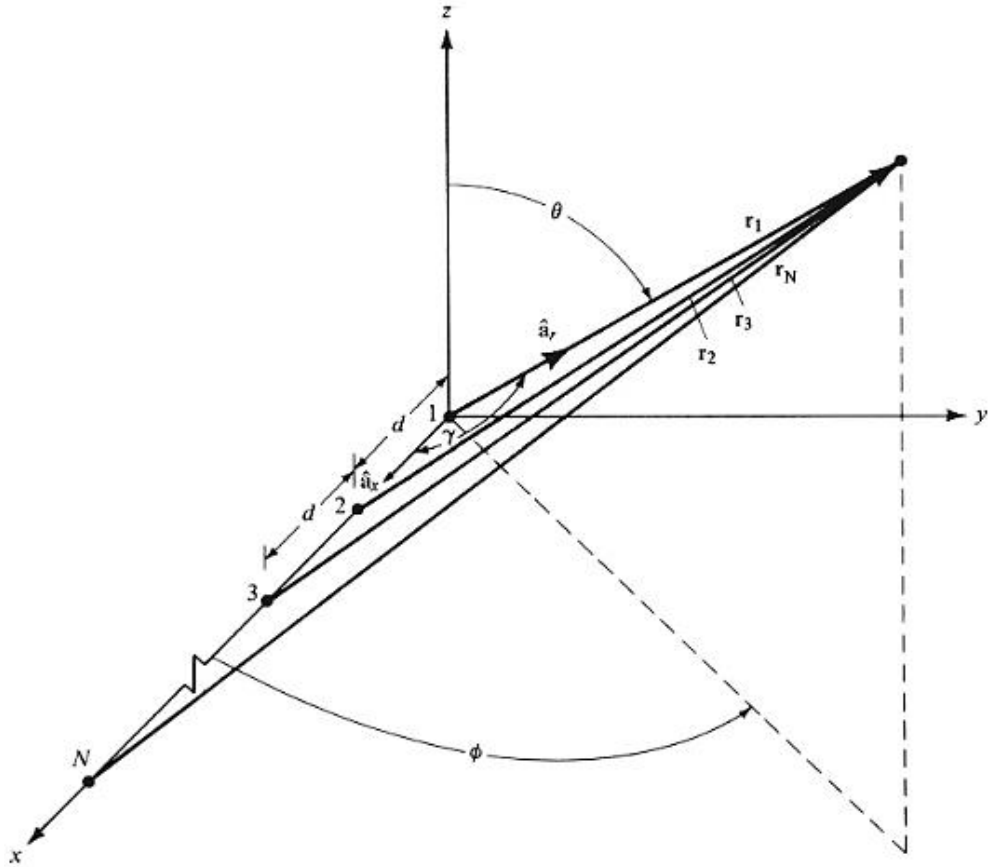


Εικόνα 2.17 Συγγραμμική κεραία (uniform linear array) - Εφαρμογή βαρών $w_1 \dots w_N$ στο σήμα λήψης στα στοιχεία $x_1 \dots x_N$ [122]

Ας θεωρηθεί η συγγραμμική συστοιχία κεραιών (uniform linear array) της εικόνας 2.17 ενός σταθμού βάσης (BS), η οποία διαθέτει τα πανκατευθυντικά κεραιοστοιχεία (omnidirectional elements) x_1, x_2, \dots, x_N , τα οποία ισαπέχουν κατά απόσταση d . Σε κάθε κεραιοστοιχείο εφαρμόζεται ένα βάρος w_1, w_2, \dots, w_N στο σήμα που λαμβάνεται. Επίσης, θεωρείται ότι το σήμα προσπίπτει στην κεραία με ανύψωση θ , και αζιμούθιο φ .

Είναι γνωστό από την θεωρία ότι ο Array Factor είναι συνάρτηση των δυο παραπάνω γωνιών: της γωνίας ανύψωσης θ και του αζιμούθιου φ [156] και δίνεται ως:

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N w_n e^{j(n-1)\psi} \quad 2.16$$



Εικόνα 2.18 Γεωμετρία της γραμμικής κεραίας λήψης
(Far-field geometry) [156]

Εφόσον τα στοιχεία βρίσκονται στον άξονα x (ή έστω στον άξονα y αλλά όχι στον z) (Εικόνα 2.18) και θεωρώντας την γεωμετρία μακρινού πεδίου (far field geometry), μπορεί να εκφρασθεί το ψ ως μιγαδικό διάνυσμα (phasor), δηλαδή [156]:

$$\psi = k \cdot d \cdot \cos \gamma + \beta \quad 2.17$$

όπου β είναι μια προοδευτική διέγερση φάσης (progressive phase excitation) και γ είναι το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων $r_1 \dots r_N$ (dot product) της εικόνας 2.18 (ουσιαστικά της προβολής του σήματος από την πηγή εκπομπής p πάνω σε κάθε στοιχείο $x_1 \dots x_N$ της κεραίας της εικόνας 2.18). Αυτό σημαίνει ότι για να κατευθύνουμε το πρώτο μέγιστο (λοβό) σε γωνία $\theta=0^\circ$, πρέπει να θέσουμε στον τύπο 2.17 $\psi=0$ και $\cos 0^\circ=1$ δηλαδή, $\psi = k d \cos \gamma + \beta = k d \cos 180^\circ + \beta = k d + \beta = 0 \Rightarrow \beta = -k d$

Αντίθετα, για να κατευθύνουμε το πρώτο μέγιστο (λοβό) σε γωνία $\theta=180^0$, τότε θέτουμε $\psi=0$ στον τύπο 2.17 και $\cos 180^0 = -1$ και συνεπώς έχουμε $\psi = k d \cos \gamma + \beta = k d \cos 0^0 + \beta = -k d + \beta = 0 \Rightarrow \beta = k d$

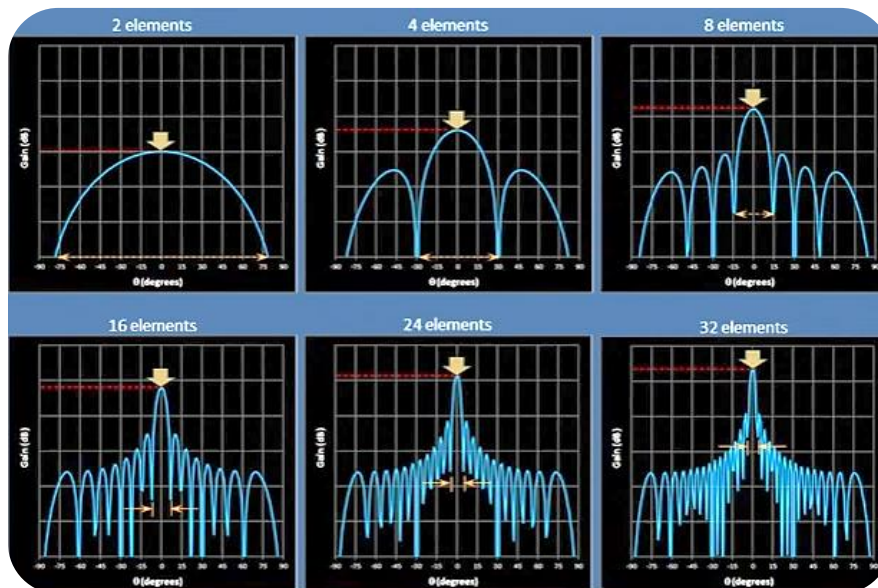
Γενικότερα, το $\cos(\gamma)$ δίνεται από τον παρακάτω τύπο 2.18 [156]:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = (\hat{a}_x \sin \theta \cos \Phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \Phi + \hat{a}_z \cos \theta) \Rightarrow \\ \cos \gamma &= \sin \theta \sin \Phi \Rightarrow \gamma = \cos^{-1}(\sin \theta \sin \Phi) \end{aligned} \quad 2.18$$

Με βάση την συνάρτηση *Array Factor* 2.16, και αντικαθιστώντας το ψ με βάση τους τύπους 2.17 και 2.18, το σήμα y δίνεται συναρτήσει των βαρών ως:

$$y(t) = AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N w_n e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_n \sin \theta \cos \varphi} \quad 2.19$$

➤ Επίδραση Αριθμού Κεραιοστοιχείων στο Σήμα



Εικόνα 2.19 Συσχέτιση κέρδους με τον αριθμό των στοιχείων μιας συγγραμμικής συστοιχίας κεραιών (uniform linear array) [122]

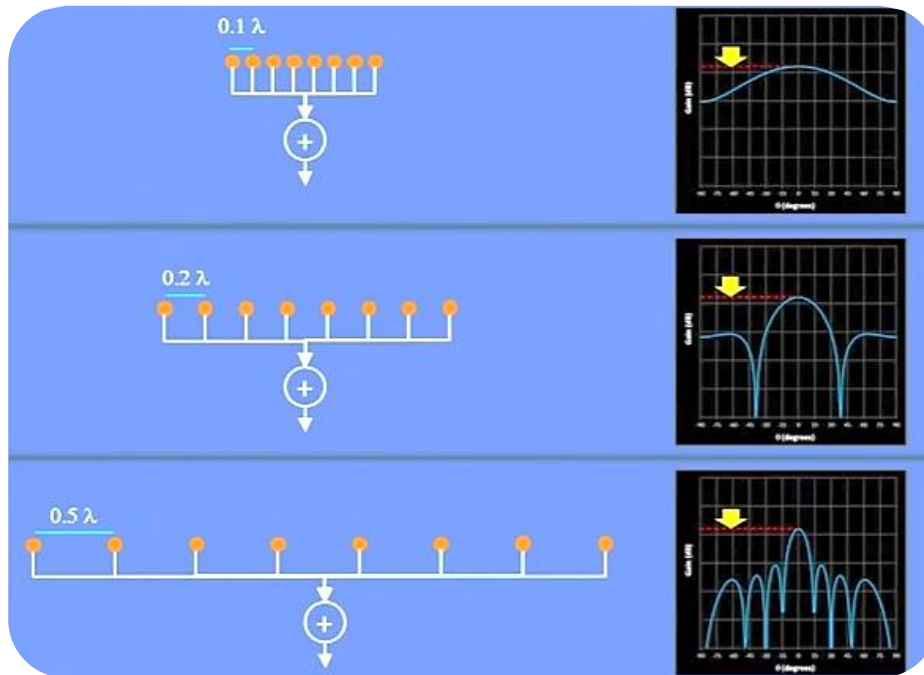
Όπως φαίνεται από την συνάρτηση 2.19, το σήμα $y(t)$ για μια πανκατευθυντική κεραία είναι συνάρτηση της συχνότητας (λ) και της γωνίας πρόσκρουσης θ του σήματος. Επίσης, αν θεωρηθεί ότι η απόσταση των στοιχείων στην κεραία είναι 0.5λ , και ότι τα βάρη έχουν την ίδια τιμή, τότε η αύξηση του αριθμού των κεραιοστοιχείων (από 2 σε 4, 8, 16, 24 και 32) προκαλεί μείωση του πλάτους του κυρίου λοβού και παράλληλα την αύξηση του κέρδους του κυρίου λοβού (Εικόνα 2.19).

Παράλληλα, η αύξηση των στοιχείων της κεραίας οδηγεί στον σχηματισμό περισσότερων δευτερευόντων λοβών με μειωμένο πλάτος και κέρδος. Συνεπώς, η αύξηση του αριθμού των κεραιοστοιχείων προκαλεί σημαντική αύξηση της εστίασης και του κέρδους του σήματος. Ο πίνακας 2.1 αποτελεί την σύνοψη όλων των παραπάνω σχετικά με την επίδραση του αριθμού των στοιχείων στην δέσμη, για απόσταση των στοιχείων 0.5λ .

Αύξηση Αριθμού Κεραιοστοιχείων	
(+)	(-)
<ul style="list-style-type: none"> • Μείωση εύρους του κυρίου λοβού • Αύξηση κέρδους κυρίου λοβού • Μείωση πλάτους των πλευρικών λοβών • Εστίαση του σήματος (Directivity) 	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του αριθμού των πλευρικών λοβών

Πίνακας 2.1 Επίδραση αριθμού στοιχείων στο σήμα

➤ **Επίδραση Απόστασης των Κεραιοστοιχείων στο Σήμα**



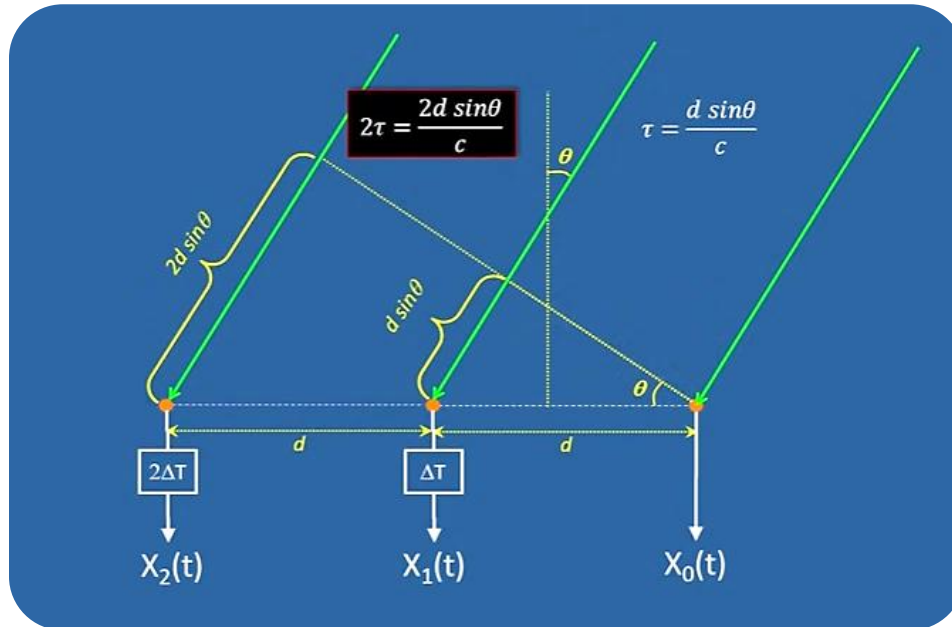
Εικόνα 2.20 Συσχέτιση κέρδους με την απόσταση των στοιχείων της συγγραμμικής συστοιχίας κεραιών (uniform linear array) [122]

Η μεταβολή της απόστασης ανάμεσα στα κεραιοστοιχεία $X_0, X_1 \dots X_{N-1}$ επίσης επηρεάζει την διάμετρο του κυρίως λοβού. Θεωρείται η παραπάνω κεραία της εικόνας 2.20 με οκτώ (8) κεραιοστοιχεία που ισαπέχουν κατά d . Μεταβάλλοντας την απόσταση d κατά 0.1λ , 0.2λ και 0.5λ των στοιχείων, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η απόσταση, τόσο μειώνεται η διάμετρος του κυρίου λοβού με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εστίαση του σήματος. Ωστόσο, το κέρδος δεν αυξάνεται με την μεταβολή της απόστασης ανάμεσα στα κεραιοστοιχεία.

Γενικότερα, φαίνεται ότι τόσο η αύξηση του αριθμού των κεραιοστοιχείων σε μια κεραία, όσο και της απόστασης μεταξύ τους επηρεάζει την διάμετρο του κυρίως λοβού προκαλώντας την μείωσή της, και κατά συνέπεια την αύξηση της εστίασης της ισχύος του σήματος προς την κατεύθυνση του κυρίου λοβού. Ωστόσο, δεν συμβαίνει το ίδιο για το κέρδος του σήματος. Η αύξηση του αριθμού των κεραιοστοιχείων προκαλεί σημαντική

αύξηση του κέρδους του σήματος ενώ η μεταβολή της απόστασης των κεραιοστοιχείων το αφήνει ανεπηρέαστο.

2.5.2 Οδήγηση Δέσμης - Beam Steering [122][113][160]



Εικόνα 2.21 Συγγραμμική συστοιχία κεραιών (uniform linear array) με εφαρμογή καθυστέρησης σε κάθε στοιχείο [122]

Ας θεωρηθεί η συγγραμμική συστοιχία κεραιών (uniform linear array) της εικόνας 2.21, η οποία διαθέτει πανκατευθυντικά κεραιοστοιχεία $X_0, X_1 \dots X_7$ (π.χ. οκτώ κεραιοστοιχεία όπως προηγουμένως) τα οποία ισαπέχουν κατά d . Ας θεωρηθεί ένα σήμα το οποίο φτάνει στην κεραία με γωνία θ ως προς την κεραία.

Εφαρμόζοντας βάρη π.χ. $0, \Delta T, 2\Delta T \dots 8\Delta T$, τα οποία εισάγουν μια καθυστέρηση ΔT (ουσιαστικά μετατοπίζουν τη φάση του σήματος) στο σήμα λήψης σε κάθε κεραιοστοιχείο, παράγεται ένα σύνθετο σήμα Y το οποίο είναι συνάρτηση της συχνότητας (λ) και της γωνίας πρόσκρουσης θ (αζιμούθιο) του σήματος όπως ήδη έχει αναφερθεί προηγουμένως.

Η καθυστέρηση για το στοιχείο X_1 δίνεται από τον τύπο 2.1, όπως προηγουμένως στην ενότητα Beamforming (2.5.1) δηλαδή:

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c} \quad 2.1$$

Για το στοιχείο X_2 δίνεται από τον τύπο 2.20:

$$2\tau = \frac{2d \sin \theta}{c} \quad 2.20$$

Ξεκινώντας με το σήμα $X_0(t)$, αυτό μπορεί να δοθεί σε ημιτονοειδή μορφή, όπως συνήθως διαμορφώνεται στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Δηλαδή, δίνεται σε συνάρτηση με το συνημίτονο ως:

$$\mathbf{X}_0(\mathbf{t}) = \mathbf{x}(t) \cos \omega_0 t \quad 2.21$$

όπου $\omega_0 = 2\pi f$.

Παρομοίως, το σήμα $X_1(t)$ δίνεται από τον ίδιο τύπο αλλά στον χρόνο t θα πρέπει να συνυπολογισθούν τα εξής:

- α) η καθυστέρηση τ του προσκρουόμενου σήματος λόγω της γωνίας θ και
- β) η καθυστέρηση ΔT που έχουμε προσθέσει λόγω του βάρους.

Συνεπώς, το σήμα $X_1(t)$ θα δίνεται από τον τύπο 2.22:

$$X_1(t) = x(t - \tau - \Delta T) \cos \omega_0(t - \tau - \Delta T) \quad 2.22$$

Επειδή θεωρείται ότι σε ένα δίκτυο κινητής, το εύρος του σήματος $x(t)$ είναι πολύ μικρότερο της συχνότητας του φέροντος, μπορεί να θεωρηθεί ότι το $x(t) \cong x(t - \tau - \Delta T)$ και αντικαθιστώντας στην 2.22 το σήμα $X_1(t)$ δίνεται ως:

$$\mathbf{X}_1(\mathbf{t}) = \mathbf{x}(t) \cos \omega_0(t - \tau - \Delta T) \quad 2.23$$

η οποία μπορεί να γραφεί επίσης σε μιγαδική μορφή (μιγαδικά διανύσματα - phasors) ως:

$$\mathbf{X}_1(\mathbf{t}) \cong \mathbf{x}(\mathbf{t}) e^{-j(\omega_0\tau + \omega_0\Delta T)} \quad 2.24$$

Αν οριστεί το φανταστικό μέρος ως $\psi = \omega_0\tau$ και το πραγματικό μέρος ως $\delta = \omega_0\Delta T$, αντικαθιστώντας στη συνάρτηση 2.24 το $X_1(t)$ δίνεται ως:

$$\mathbf{X}_1(\mathbf{t}) \cong \mathbf{x}(\mathbf{t}) e^{-j(\psi + \delta)} \quad 2.25$$

Για το στοιχείο X_2 , ισχύει ότι η συνάρτηση $X_2(t)$ του σήματος δίνεται ως:

$$X_2(t) = x(t - 2\tau - 2\Delta T) \cos \omega_0(t - 2\tau - 2\Delta T) \quad 2.26$$

και επειδή $x(t) \cong x(t - 2\tau - 2\Delta T)$, αντικαθιστώντας στην 2.26 το $X_2(t)$ είναι:

$$X_2(t) = x(t) \cos \omega_0(t - 2\tau - 2\Delta T) \Rightarrow X_2(t) \cong x(t) \cos[\omega_0(t - 2(\tau - \Delta T))] \quad 2.27$$

Η παραπάνω συνάρτηση 2.27 στη μιγαδική της μορφή (μιγαδικά διανύσματα - phasors) είναι:

$$\mathbf{X}_2(\mathbf{t}) \cong \mathbf{x}(\mathbf{t}) e^{-2j(\omega_0\tau + \omega_0\Delta T)} \quad 2.28$$

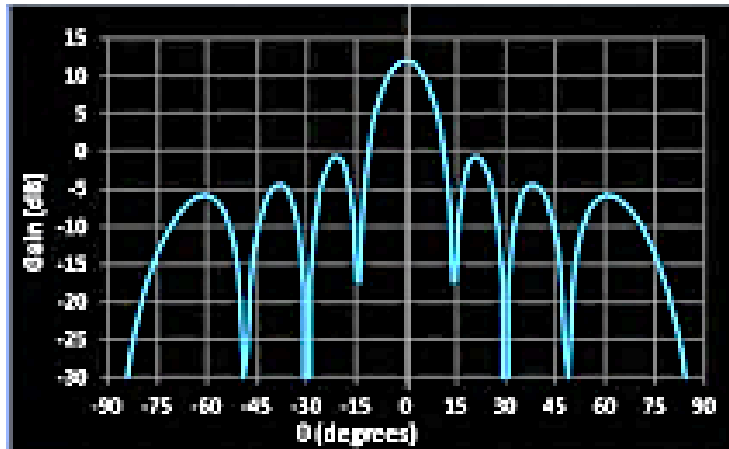
Τελικά, αντικαθιστώντας το φανταστικό μέρος $\psi = \omega_0\tau$ και το πραγματικό μέρος $\delta = \omega_0\Delta T$ στην 2.28, το $X_2(t)$ δίνεται από τον τύπο 2.29:

$$\mathbf{X}_2(\mathbf{t}) \cong \mathbf{x}(\mathbf{t}) e^{-2j(\psi + \delta)} \quad 2.29$$

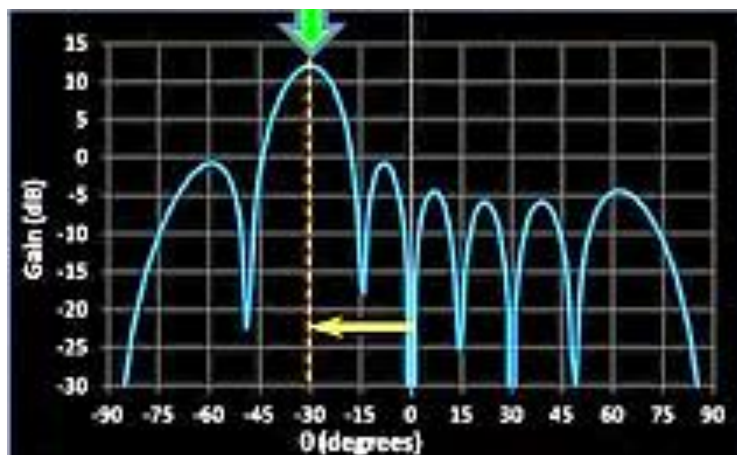
Το συνολικό σήμα εξόδου $Y(t)$ μετά την εφαρμογή των βαρών είναι το άθροισμα των εξόδων των κεραιών:

$$Y(t) = X_0(t) + X_1(t) + X_2(t) + \dots + X_7(t) \Rightarrow$$

$$Y(t) = x(t) + x(t) e^{-j(\psi + \delta)} + x(t) e^{-2j(\psi + \delta)} + \dots + x(t) e^{-7j(\psi + \delta)} \quad 2.30$$



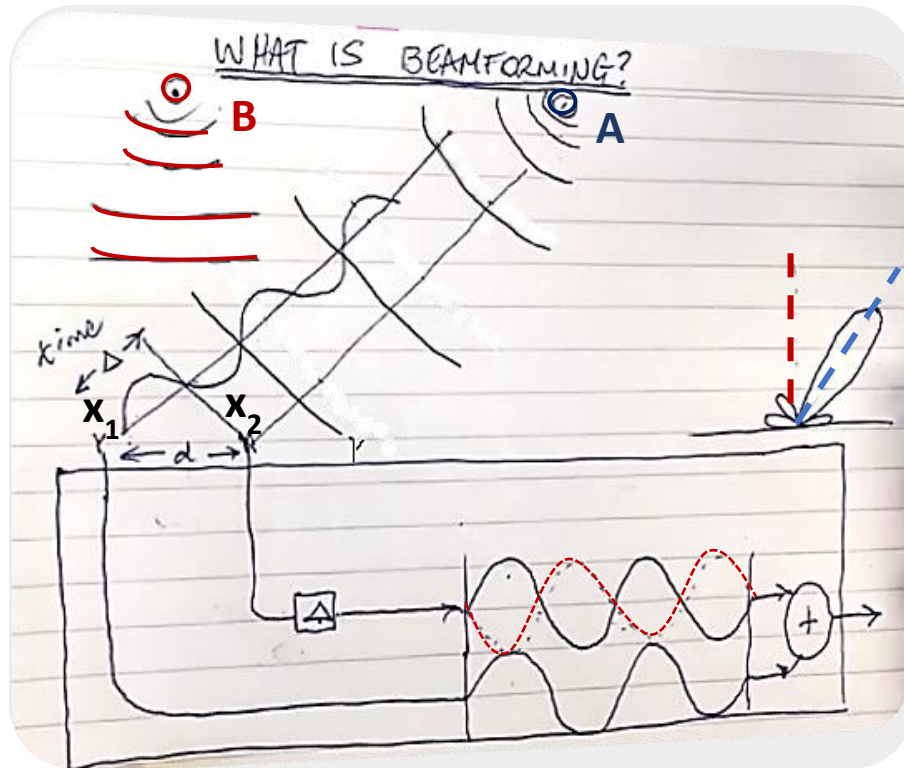
(α)



(β)

Εικόνα 2.22 (α) Σήμα χωρίς εφαρμογή βάρους καθυστέρησης, (β) Σήμα μετά την εφαρμογή βάρους καθυστέρησης [122]

Στο διάγραμμα της εικόνας 2.22, παρατηρούμε ότι για οκτώ (8) στοιχεία και απόσταση $\lambda/2$ μεταξύ τους, ο κύριος λοβός αρχικά χωρίς την εφαρμογή καθυστέρησης δεν αλλάζει κατεύθυνση (Εικόνα 2.22α), δηλαδή η κατεύθυνσή του παραμένει κάθετη στο επίπεδο της κεραίας, αντιστοιχώντας σε γωνία $\theta = 0^\circ$. Με την εφαρμογή καθυστέρησης στα κεραιοστοιχεία, αλλάζει κατεύθυνση του όπως φαίνεται στην εικόνα 2.22β, δηλαδή κατά -30° στη συγκεκριμένη περίπτωση. Όπως έχουμε αναφέρει, τα βάρη που εφαρμόζονται ουσιαστικά προκαλούν μετατόπιση της φάσης του σήματος σε κάθε κεραία. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να κατευθύνουμε το εκπεμπόμενο σήμα στην επιθυμητή κατεύθυνση.

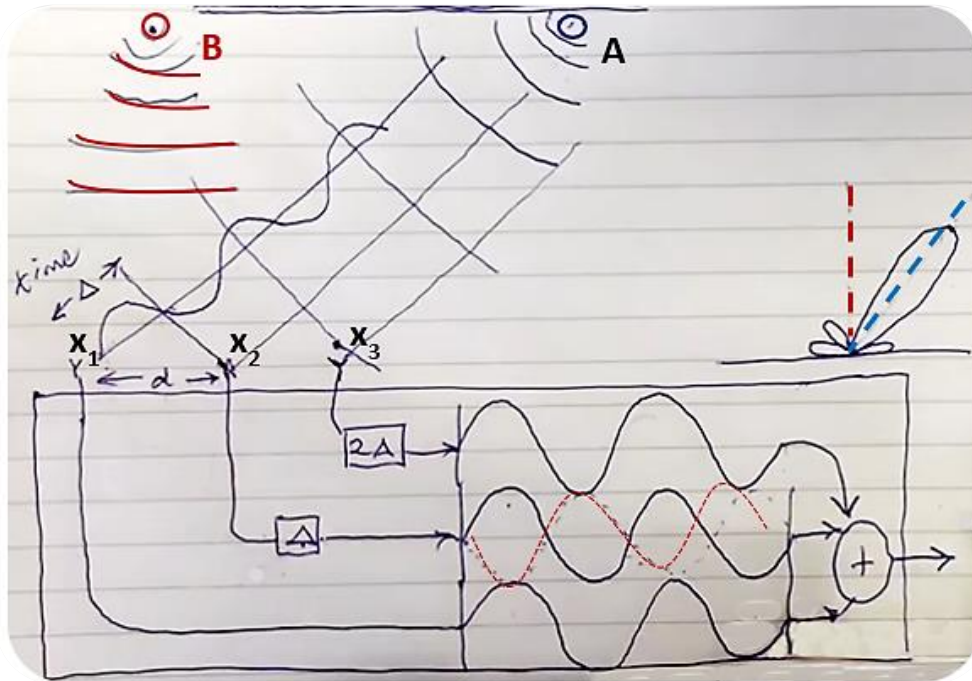


Εικόνα 2.23 Ενισχυτική και αποσβεστική συμβολή (Destructive & Constructive Interference): Τα σήματα από τους συνδρομητές A και B είναι ίδιας συχνότητας αλλά μόνο το σήμα από τον A ενισχύεται [113]

Ας θεωρήσουμε μια γραμμική συστοιχία κεραιών η οποία διαθέτει δύο antenna elements x_1, x_2 , και επίσης, ένα σήμα λήψης το οποίο προέρχεται από έναν συνδρομητή A στις 45° (Εικόνα 2.23). Το σήμα φτάνει στο x_1 με καθυστέρηση Δ (μισή περίοδος κύματος) σε σχέση με το x_2 . Για να γίνουν συμφασικές οι λήψεις από τα δυο elements, εισάγουμε καθυστέρηση Δ στο δεξί element x_2 . Τα δυο σήματα προστίθενται καθώς πλέον είναι συμφασικά (Ενισχυτική Συμβολή / Constructive Interference) και συνεπώς ενισχύεται η λήψη.

Ας θεωρήσουμε επίσης ένα σήμα ίδιας συχνότητας το οποίο προέρχεται από έναν συνδρομητή B, ο οποίος βρίσκεται βόρεια στις 0° (Εικόνα 2.23). Το σήμα από τον συνδρομητή B φτάνει στα elements x_1 και x_2 με μηδενική διαφορά φάσης. Ωστόσο, στο σήμα που λαμβάνεται από το δεξί element x_2 έχει ήδη εισαχθεί καθυστέρηση Δ (μισή

περίοδος) στον δέκτη (λαμβάνουμε την κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη στον αθροιστή). Κατά την άθροιση των σημάτων γίνεται cancel-out αφού τα σήματα δεν είναι πλέον συμφασικά λόγω της εισηγμένης καθυστέρησης Δ (Αποσβεστική Συμβολή / Destructive Interference), και συνεπώς ενισχύεται η λήψη από τον συνδρομητή A στις 45° .

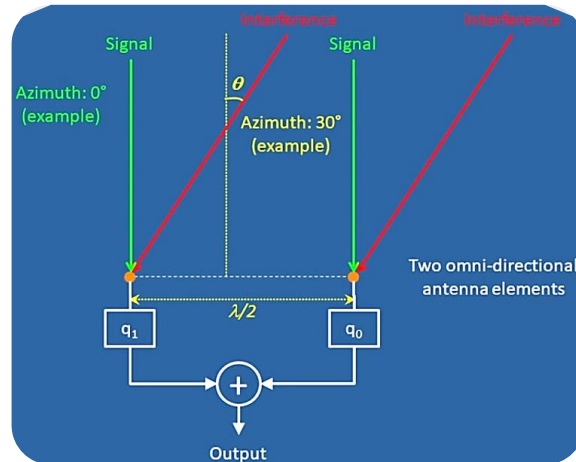


Εικόνα 2.24 Ενισχυτική και Αποσβεστική Συμβολή (Destructive & Constructive Interference): Τα σήμα από τον συνδρομητή A ενισχύεται λόγω της εισαγωγής κατάλληλης καθυστέρησης στα κεραιοστοιχεία που οδηγεί σε Ενισχυτική Συμβολή [113]

Τώρα, ας προσθέσουμε ένα τρίτο antenna element x_3 στην προηγούμενη συστοιχία (Εικόνα 2.24). Στο κεραιοστοιχείο x_3 πρέπει να εισαχθεί καθυστέρηση 2Δ ώστε κατά την λήψη του σήματος ίδιας συχνότητας προερχόμενο από τον συνδρομητή A στις 45° να είναι συμφασική η λήψη με αυτές στα κεραιοστοιχεία x_1, x_2 . Τα τρία σήματα προστίθενται και συνεπώς η ισχύς της λήψης από τον συνδρομητή A ενισχύεται. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε τόσο να οδηγήσουμε την δέσμη όσο και να καταπνίξουμε οποιεσδήποτε παρεμβολές.

2.5.3 Μείωση Παρεμβολών - Interference Suppression [122]

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που μπορεί να τροποποιηθεί με τη χρήση συστοιχιών κεραιών και της τεχνικής Beamforming αποτελεί η μείωση ή κατάπνιξη των παρεμβολών.



Εικόνα 2.25 Σχηματικό διάγραμμα μιας κεραιάς συστοιχιών με δυο πανκατευθυντικά στοιχεία [122]

Θεωρείται μια κεραιά με δυο πανκατευθυντικά κεραιοστοιχεία τα οποία απέχουν κατά $\lambda/2$ (Εικόνα 2.25). Επίσης, ας θεωρηθούν δυο σήματα: α) το επιθυμητό σήμα (πράσινο) το οποίο προσπίπτει στα δυο κεραιοστοιχεία της κεραιάς με αζιμούθιο $\theta = 0^\circ$, και β) ένα παρεμβαλλόμενο σήμα (κόκκινο) με αζιμούθιο με $\theta = 30^\circ$. Τότε, με κατάλληλο αλγόριθμο θα επιλέγεται το επιθυμητό σήμα και θα μειώνεται η επίδραση παρεμβολών.

Αρχικά, εξετάζονται τα δυο σήματα - επιθυμητό και παρεμβαλλόμενο - ξεχωριστά.

Επιθυμητό σήμα:

Το επιθυμητό ημιτονοειδές σήμα (πράσινο) είναι της μορφής:

$$S(t) = s(t) \cos \omega_0 t \quad 2.31$$

και στην πολική του μορφή είναι:

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{A}e^{j\omega_0 t} \quad 2.32$$

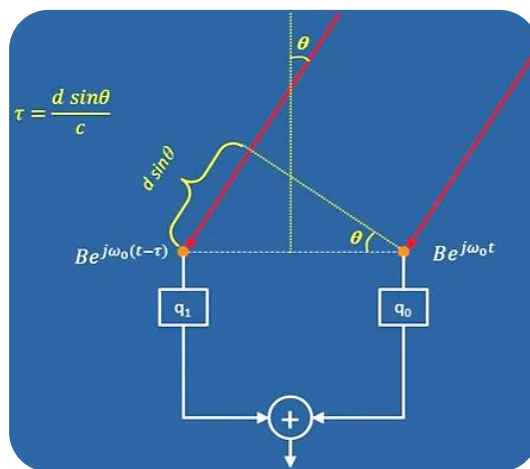
Αφού κάθε κεραιοστοιχείο λαμβάνει το σήμα με αζιμούθιο $\theta = 0^\circ$, το σήμα εισόδου και για τα δυο στοιχεία θα είναι το ίδιο όπως δίνεται παραπάνω από τον τύπο 2.32. Σε κάθε κεραιοστοιχείο θα εφαρμόζονται βάρη q_0 και q_1 αντίστοιχα (Εικόνα 2.25). Συνεπώς, για κάθε κεραιοστοιχείο ξεχωριστά ισχύει ότι:

$$s_0(t) = q_0 A e^{j\omega_0 t} \quad \text{και} \quad s_1(t) = q_1 A e^{j\omega_0 t} \quad 2.33$$

Το σήμα εξόδου $Y_S(t)$ είναι το άθροισμά των σημάτων της 2.33, δηλαδή:

$$Y_S(t) = s_0(t) + s_1(t) = q_0 A e^{j\omega_0 t} + q_1 A e^{j\omega_0 t} \quad 2.34$$

Παρεμβαλλόμενο Σήμα:



Εικόνα 2.26 Η προηγούμενη κεραία και το σήμα θορύβου με αζιμούθιο $\theta=30^\circ$ [122]

Επειδή το παρεμβαλλόμενο σήμα φτάνει στην κεραία με αζιμούθιου $\theta = 30^\circ$ (Εικόνα 2.26), το σήμα που φτάνει στο πρώτο στοιχείο είναι:

$$u_0(t) = Be^{j\omega_0 t} \quad 2.35$$

Στο δεύτερο στοιχείο το παρεμβαλλόμενο σήμα φτάνει με καθυστέρηση η οποία δίνεται από τον τύπο 2.1 της έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα Beamforming (2.5.1), δηλαδή:

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c} \quad 2.1$$

Συνεπώς, στο δεύτερο κεραιοστοιχείο το σήμα θα εμπεριέχει την καθυστέρηση τ και το σήμα εισόδου είναι:

$$u_1(t) = Be^{j\omega_0(t-\tau)} \quad 2.36$$

Αφού εφαρμόζονται τα βάρη q_0 και q_1 , τα παραπάνω σήματα γίνονται ως εξής:

$$u_0(t) = q_0 Be^{j\omega_0 t} \quad \text{και} \quad u_1(t) = q_1 Be^{j\omega_0(t-\tau)} \quad 2.37$$

Το τελικό σήμα εξόδου της κεραίας είναι:

$$Y_n(t) = u_0(t) + su_1(t) = q_0 Be^{j\omega_0 t} + q_1 Be^{j\omega_0(t-\tau)} \quad 2.38$$

Το τελικό σήμα στην έξοδο της κεραίας όταν συνυπάρχουν και τα δυο σήματα (επιθυμητό και παρεμβαλλόμενο) δίνεται από το άθροισμα των 2.34 και 2.38 με την παρακάτω σχέση:

$$Y(t) = Y_s(t) + Y_n(t) \Rightarrow$$

$$Y(t) = q_0 A e^{j\omega_0 t} + q_1 A e^{j\omega_0 t} + q_0 B e^{j\omega_0 t} + q_1 B e^{j\omega_0(t-\tau)} \quad 2.39$$

η οποία καταλήγει στην 2.40:

$$Y(t) = (q_0 A + q_1 A + q_0 B + q_1 B e^{j\omega_0 \tau}) e^{j\omega_0 t} \quad 2.40$$

Επειδή ισχύει ότι:

$$\omega_0 \tau = 2\pi f_0 \frac{\lambda \sin 30^\circ}{2} = 2\pi \frac{c}{2} \frac{1}{c} = \frac{\pi}{2} \quad 2.41$$

και της:

$$e^{-j\omega_0 \tau} = e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j \quad 2.42$$

Αντικαθιστώντας της 2.41 και 2.42 στην 2.40 προκύπτει η 2.43:

$$Y(t) = (q_0A + q_1A + q_0B - jq_1B)e^{j\omega_0t} \Rightarrow$$

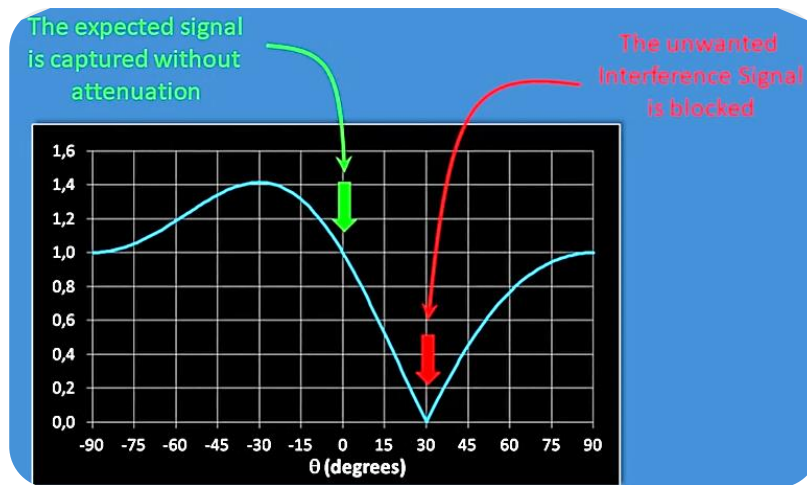
$$Y(t) = [(q_0 + q_1)A + (q_0 - jq_1)B]e^{j\omega_0t} \quad 2.43$$

Θεωρείται ότι ισχύει η παρακάτω συνθήκη (2.44):

$$q_0 + q_1 = 1 \qquad q_0 - jq_1 = 0 \quad 2.44$$

Λύνοντας της εξισώσεις στην 2.43 υπολογίζονται τα βάρη που απαιτούνται:

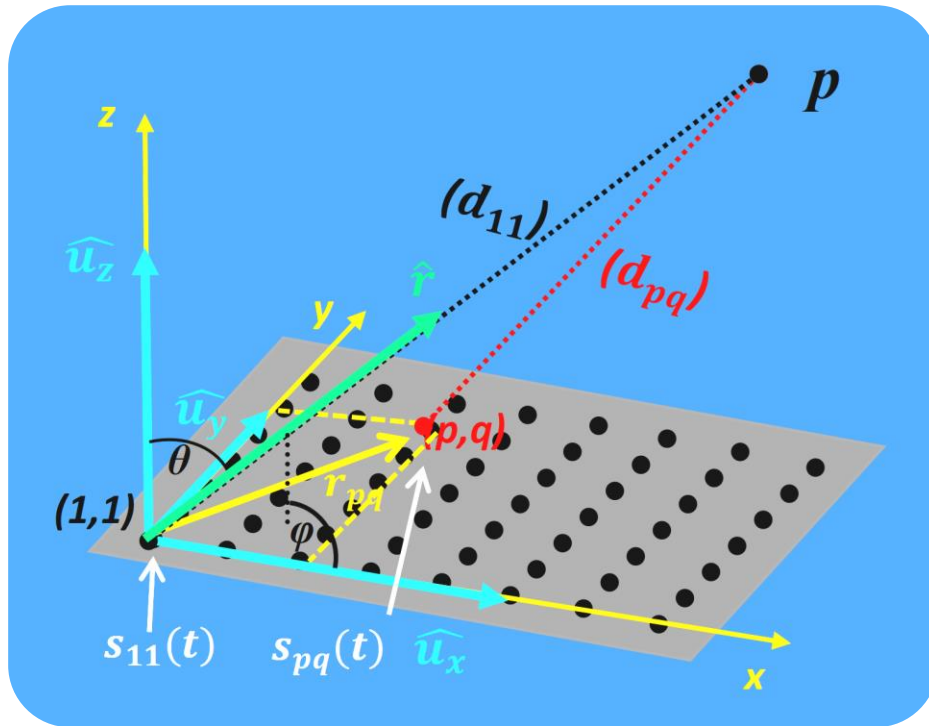
$$q_0 = \frac{1}{2}(1 + j) \qquad q_1 = \frac{1}{2}(1 - j) \quad 2.45$$



Εικόνα 2.27 Το επιθυμητό σήμα και η κατάπνιξη της παρεμβολής [122]

Συνεπώς, όταν χρησιμοποιούμαι την τεχνική Beamforming μπορούμε λάβουμε ένα επιθυμητό σήμα καταπνίγοντας μια παρεμβολή. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 2.27 όπου από τα δυο σήματα, όπου έχει γίνει λήψη του επιθυμητού σήματος χωρίς εξασθένιση ενώ το ανεπιθύμητο έχει αποκλειστεί.

2.6 3D Beamforming [157]



Εικόνα 2.28 Ομοιόμορφη ορθογωνική κεραία ιστροπικών στοιχείων (uniform isotropic rectangular element array)

[Βασισμένο στο 157]

Θεωρείται η ομοιόμορφη ορθογωνική κεραία ιστροπικών στοιχείων (uniform isotropic rectangular element array) της εικόνας 2.28. Θεωρούνται επίσης δυο σήματα τα οποία εκπέμπονται ταυτόχρονα από δυο κεραιοστοιχεία: α) ένα σήμα από το κεραιοστοιχείο με συντεταγμένες (1,1), καλύπτοντας απόσταση d_{11} μέχρι το σημείο P στον ορίζοντα, και β) ένα δεύτερο σήμα από το κεραιοστοιχείο με συντεταγμένες (p,q), καλύπτοντας απόσταση d_{pq} μέχρι το σημείο K στον ορίζοντα.

Το πρώτο σήμα καλύπτει την απόσταση d_{11} σε χρόνο $t_{1,1}$ και το δεύτερο σήμα καλύπτει την απόσταση d_{pq} σε χρόνο $t_{p,q}$. Ισχύει ότι $t_{1,1} > t_{p,q}$. Η χρονική διαφορά ανάμεσα τους ονομάζεται τ . Η διαφορά της απόστασης είναι $d = d_{11} - d_{pq}$, και συνεπώς θεωρείται ότι η

χρονική διαφορά $\tau_{pq} = \frac{d}{c}$. Είναι γνωστό ότι τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες αποτελούν σήματα ημιτονοειδούς μορφής και συνεπώς το σήμα που εκπέμπεται από το κεραιοστοιχείο (\mathbf{I}, \mathbf{I}) θα είναι:

$$s_{11}(t) = m(t) \cos \omega_0 t \quad 2.46$$

όπου $m(t)$ είναι το πλάτος του φέροντος $\cos \omega_0 t$ το οποίο αντιπροσωπεύει το σήμα πληροφορίας. Λόγω της διαφοράς χρόνου ανάμεσα στα δυο σήματα κατά την λήψη τους, το δεύτερο σήμα $s_{pq}(t)$ θα φτάνει στο σημείο P με τον επιπλέον χρόνο τ_{pq} και η σχέση του με το s_{11} θα είναι: $s_{pq}(t) = s_{11}(t + \tau_{pq})$. Συνεπώς, δίνεται το $s_{pq}(t)$ ως:

$$s_{pq}(t) = m(t + \tau_{pq}) \cos[\omega_0(t + \tau_{pq})] \quad 2.47$$

Στα συστήματα 5G, θεωρείται ότι το σήμα διαμόρφωσης έχει μικρότερη γωνιακή ταχύτητα από το φέρον. Συνεπώς, και στην συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται η ίδια συνθήκη και θεωρείται ότι $m(t + \tau_{pq})$ είναι μικρότερο σε σχέση με το φέρον (το φέρον είναι πολύ υψηλότερης συχνότητας).

Συνεπώς, το λαμβανόμενο σήμα $s_{pq}(t)$ μπορεί να γραφεί κατά προσέγγιση ως:

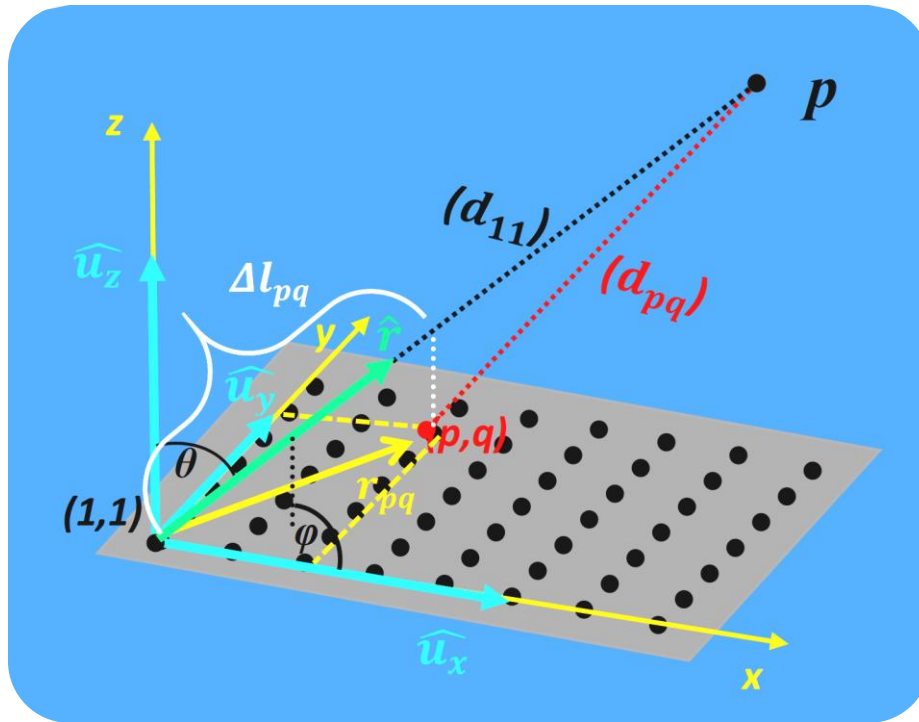
$$s_{pq}(t) = m(t) \cos(\omega_0 t + \omega_0 \tau_{pq}) \quad 2.48$$

Το παραπάνω μπορεί γραφεί ως το πραγματικό μέρος (Real part) μιγαδικού αριθμού, και τότε γίνεται:

$$s_{pq}(t) \cong \text{Re}[m(t) e^{j\omega_0 \tau_{pq}} \cdot e^{j\omega_0 t}] \quad 2.49$$

Για λόγους ευκολίας υπολογισμών, το πραγματικό μέρος της εξίσωσης και το εκθετικό μέρος του φέροντος σήματος $e^{j\omega_0 t}$ εκπίπτουν και συνεπώς η 2.48 καταλήγει στην 2.49 που αποτελεί τη μιγαδική περιβάλλουσα (μιγαδικό διάνυσμα του) (Complex envelope):

$$s_{pq}(t) \cong m(t) e^{j\omega_0 \tau_{pq}} \quad 2.50$$



Εικόνα 2.29 Ομοιόμορφη ορθογωνική κεραία ισοτροπικών στοιχείων (uniform isotropic rectangular element array) [Βασισμένο στο 157]

Θεωρώντας τα μοναδιαία διανύσματα $\hat{u}_x, \hat{u}_y, \hat{u}_z$ στους άξονες x, y και z αντίστοιχα καθώς και τα μοναδιαία διανύσματα \hat{r} (η απόσταση d_{11}) (Εικόνα 2.29), τότε με βάση την διανυσματική άλγεβρα, μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα r ως το άθροισμα των τριών καρτεσιανών προβολών τους:

$$\hat{r} = r_x \hat{u}_x + r_y \hat{u}_y + r_z \hat{u}_z \quad 2.51$$

Σε τριγωνομετρικό επίπεδο ισχύουν τα εξής:

$$\left. \begin{aligned} r_x &= \sin \theta \cos \varphi \\ r_y &= \sin \theta \sin \varphi \\ r_z &= \cos \theta \end{aligned} \right\} 2.52$$

Ακολουθώντας την ίδια λογική, το διάνυσμα r_{pq} που συνδέει τα σημεία (1,1) και (p,q) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\widehat{r}_{pq} = (p - 1) d_x \widehat{u}_x + (q - 1) d_y \widehat{u}_y \quad 2.53$$

Παρομοίως, μπορεί να υπολογιστεί η προβολή του \widehat{r}_{pq} στον νοητό άξονα που συνδέει τα σημεία (1,1) και P, δηλαδή στον άξονα της απόστασης d_{pq} (Εικόνα 2.??? ακριβώς πάνω). Αυτή η προβολή ονομάζεται ΔL_{pq} και αποτελεί το γινόμενο των διανυσμάτων \hat{r} και \widehat{r}_{pq} , δηλαδή:

$$\Delta L_{pq} = \hat{r} \cdot \widehat{r}_{pq} \quad 2.54$$

Αντικαθιστώντας τις 2.51 και 2.53 στην 2.54 προκύπτει η 2.55 ως:

$$\Delta L_{pq} = r_x (p - 1) d_x + r_y (q - 1) d_y \quad 2.55$$

Κάνοντας χρήση των τριγωνομετρικών εξισώσεων της 2.52 και αντικαθιστώντας τα r_x και r_y στην 2.55, υπολογίζεται το ΔL_{pq} ως:

$$\Delta L_{pq} = (p - 1) d_x \sin \theta \cos \varphi + (q - 1) d_y \sin \theta \sin \varphi \quad 2.56$$

Είναι γνωστό ότι:

$$\left. \begin{aligned} \omega_o &= 2\pi f \\ f &= c/\lambda \\ \tau_{pq} &= \frac{\Delta l_{pq}}{c} \end{aligned} \right| \Rightarrow$$

οπότε προκύπτει ότι:

$$\omega_o \tau_{pq} = 2\pi \frac{c \Delta l_{pq}}{\lambda c} \Rightarrow \omega_o \tau = 2\pi \frac{\Delta l_{pq}}{\lambda} \quad 2.57$$

Με βάση τον τύπο 2.57 και τον παραπάνω τύπο 2.50 που δίνει το σήμα $s_{pq}(t)$ το οποίο εκπέμπεται από το στοιχείο p,q , υπολογίζεται ότι το σήμα $s_{pq}(t)$:

$$s_{pq}(t) = m(t) e^{j\omega_0\tau_{pq}} \Rightarrow s_{pq}(t) = m(t) e^{j2\pi\frac{\Delta l_{pq}}{\lambda}} \quad 2.58$$

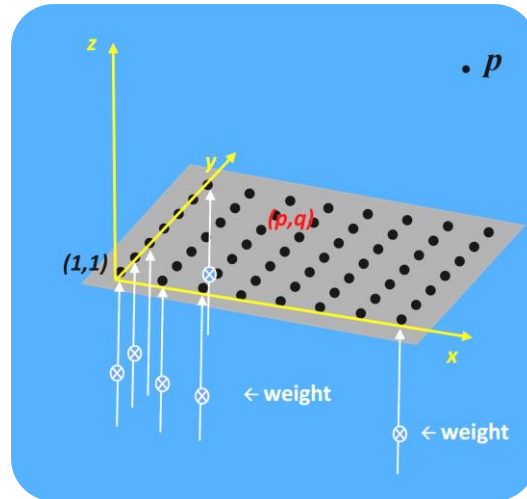
Λύνοντας την 2.58 και αντικαθιστώντας την 2.56 στον εκθετικό όρο Δl_{pq} υπολογίζεται το σήμα $s_{pq}(t)$ στο σημείο P ως:

$$\begin{aligned} s_{pq}(t) &= m(t) e^{j2\pi\frac{\Delta l_{pq}}{\lambda}} \Rightarrow \\ s_{pq}(t) &= m(t) e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[(p-1)d_x \sin\theta \cos\varphi + (q-1)d_y \sin\theta \sin\varphi]} \Rightarrow \\ \mathbf{s}_{pq}(t) &= m(t) e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda}d_x(p-1)\sin\theta\cos\varphi + \frac{2\pi}{\lambda}d_y(q-1)\sin\theta\sin\varphi\right]} \quad 2.59 \end{aligned}$$

Αν σε όλα τα στοιχεία της συστοιχίας εφαρμόζεται το ίδιο διαμορφωμένο φέρον σήμα, τότε το σήμα που θα λαμβάνεται στο σημείο P θα αποτελεί το άθροισμα όλων των σημάτων $s_{full}(t)$ που εκπέμπονται από όλα τα στοιχεία της συστοιχίας με διαστάσεις (M, N), δηλαδή:

$$\begin{aligned} s_{full}(t) &= \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N m(t) e^{j\left[\frac{2\pi d_x}{\lambda}(p-1)\sin\theta\cos\varphi + \frac{2\pi d_y}{\lambda}(q-1)\sin\theta\sin\varphi\right]} \Rightarrow \\ \mathbf{s}_{full}(t) &= m(t) \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N e^{j\left[\frac{2\pi d_x}{\lambda}(p-1)\sin\theta\cos\varphi + \frac{2\pi d_y}{\lambda}(q-1)\sin\theta\sin\varphi\right]} \quad 2.60 \end{aligned}$$

2.6.1 3D Beam Steering - Εφαρμογή Βαρών [157]



Εικόνα 2.30 Εφαρμογή βαρών στα στοιχεία της συστοιχίας για τον έλεγχο της κατεύθυνσης της δέσμης [Βασισμένο στο 157]

Αν στην προηγούμενη συστοιχία γίνει εφαρμογή συγκεκριμένων βαρών w σε κάθε στοιχείο της (Εικόνα 2.30), δηλαδή σημάτων με συγκεκριμένο πλάτος και φάση (π.χ. σήματα με μιγαδική μορφή), υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της κατεύθυνσης της δέσμης. Συνεπώς, θα μπορούσε να υπολογιστεί το σήμα που λαμβάνεται στο σημείο P μετά την εκπομπή τους από το στοιχείο (p,q) .

Αυτό πραγματοποιείται αν στον προηγούμενο τύπο 2.59, το οποίο προσδιορίζει το σήμα που λαμβάνεται στο σημείο P μετά την εκπομπή του από το στοιχείο (p,q) , προστεθεί η επίδραση του βάρους w , δηλαδή:

$$s_{pq}(\mathbf{t}) = m(t) e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} d_x (p-1) \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} d_y (q-1) \sin \theta \sin \varphi \right]} \quad 2.59$$

και

βάρος w_{pq}

οπότε, το σήμα που λαμβάνεται στο σημείο P μετά την εκπομπή του από το στοιχείο (p,q) περιγράφεται από τον τύπο 2.61:

$$\mathbf{s}_{pq}(\mathbf{t}) = m(t) \mathbf{w}_{pq} e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} d_x (p-1) \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} d_y (q-1) \sin \theta \sin \varphi \right]} \quad 2.61$$

Προηγουμένως, ο τύπος 2.60 υπολόγιζε το συνολικό σήμα που λαμβάνεται στο σημείο P (από ολόκληρη την συστοιχία), δηλαδή:

$$\mathbf{s}_{full}(\mathbf{t}) = m(t) \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} d_x (p-1) \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} d_y (q-1) \sin \theta \sin \varphi \right]} \quad 2.60$$

Συνεπώς, συνδυάζοντας τους τύπους 2.60 και 2.61, παίρνουμε το συνολικό σήμα που λαμβάνεται στο σημείο P από ολόκληρη την συστοιχία, υπό την επίδραση των βαρών πλέον, το οποίο είναι:

$$\mathbf{s}_{full}(\mathbf{t}) = m(t) \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \mathbf{w}_{pq} e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} d_x (p-1) \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} d_y (q-1) \sin \theta \sin \varphi \right]} \quad 2.62$$

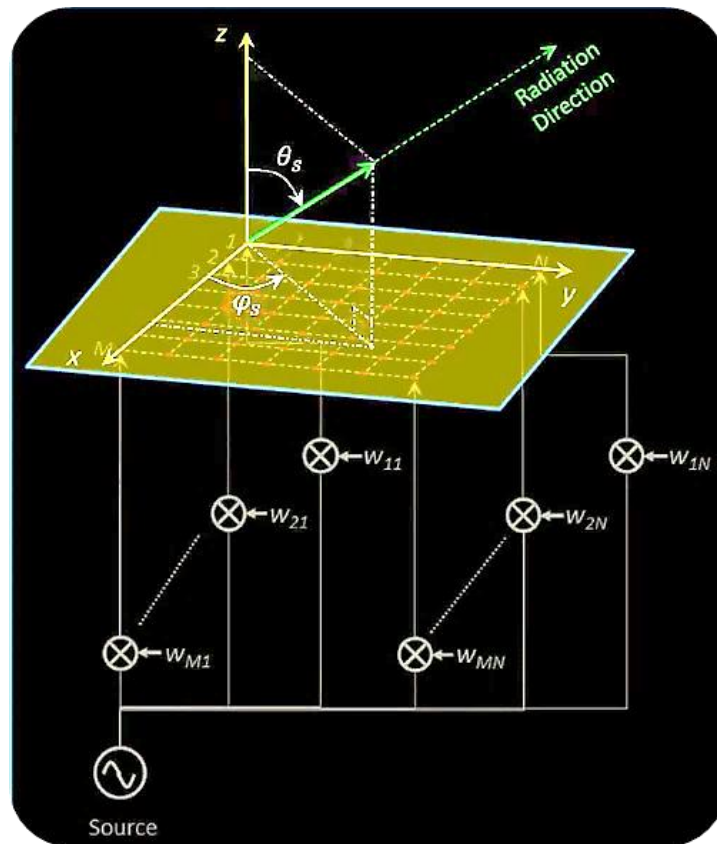
Σε αυτή την συνάρτηση (τύπος 2.62) ο συντελεστής ακτινοβολίας της κεραίας $AF(\theta, \varphi)$, ο οποίος ουσιαστικά περιγράφει το μοτίβο της ακτινοβολίας της κεραίας και δίνεται ως:

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \mathbf{w}_{pq} e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} d_x (p-1) \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} d_y (q-1) \sin \theta \sin \varphi \right]} \Rightarrow$$

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \mathbf{w}_{pq} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_x (p-1) \sin \theta \cos \varphi} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_y (q-1) \sin \theta \sin \varphi} \quad 2.63$$

Ονομάζοντας $u = \sin \theta \cdot \cos \varphi$ και $v = \sin \theta \cdot \sin \varphi$ (αποτελούν τα τριγωνομετρικά ορίσματα $r_x = \sin \theta \cdot \cos \varphi$ και $r_y = \sin \theta \cdot \sin \varphi$ που αναφέρθηκαν παραπάνω στους τύπους της 2.52), η 2.63 μπορεί να γραφεί πιο απλά ως:

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \mathbf{w}_{pq} e^{j \frac{2\pi d_x}{\lambda} (p-1) u} e^{j \frac{2\pi d_y}{\lambda} (q-1) v} \Rightarrow \quad 2.64$$



Εικόνα 2.31 Beam Steering δέσμης με την εφαρμογή βαρών στα στοιχεία της συστοιχίας [157]

Ας υποτεθεί ότι η δέσμη της συστοιχίας θα οδηγηθεί σύμφωνα με τις γωνίες θ_s και φ_s οι οποίες απεικονίζονται στην εικόνα 2.31. Θεωρούνται δυο μεταβλητές u_s και v_s Με βάση τα προηγούμενα, για αυτές τις γωνίες ισχύει ότι:

$$u_s \triangleq \sin \theta_s \cdot \cos \varphi_s \quad \text{και} \quad v_s \triangleq \sin \theta_s \cdot \sin \varphi_s \quad 2.65$$

και θεωρώντας ότι:

$$\mathbf{w}_{pq} \triangleq e^{-j \frac{2\pi d_x}{\lambda} (p-1) u_s} \cdot e^{-j \frac{2\pi d_y}{\lambda} (q-1) v_s} \quad 2.66$$

μπορεί να υπολογιστούν τα βάρη \mathbf{w} που απαιτούνται για Beam steering της δέσμης.

Τα παραπάνω βάρη διαμορφώνουν το νέο AF ως εξής:

$$AF_{new}(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N e^{j \frac{2\pi d_x}{\lambda} (p-1) (u-u_s)} e^{j \frac{2\pi d_y}{\lambda} (q-1) (v-v_s)} \Rightarrow \quad 2.67$$

$$AF_{new}(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M e^{j \frac{2\pi d_x}{\lambda} (p-1) (u-u_s)} \sum_{q=1}^N e^{j \frac{2\pi d_y}{\lambda} (q-1) (v-v_s)} \quad 2.68$$

Δηλαδή, το διπλό άθροισμα του τύπου 2.67 έγινε το άθροισμα δυο αθροισμάτων (τύπος 2.68). Ουσιαστικά πρόκειται για δυο AF : α) τον $AF_x(\theta, \varphi)$ ο οποίος εξαρτάται από το p και ουσιαστικά από το x , και β) τον δεύτερο $AF_y(\theta, \varphi)$ ο οποίος εξαρτάται από το q και ουσιαστικά από το y όπως περιγράφονται παρακάτω:

$$AF_x(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M e^{j \frac{2\pi d_x}{\lambda} (p-1) (u-u_s)} \quad 2.69$$

$$AF_y(\theta, \varphi) = \sum_{q=1}^N e^{j \frac{2\pi d_y}{\lambda} (q-1) (v-v_s)} \quad 2.70$$

➤ Array Factor $AF_x(\theta, \varphi)$

Για λόγους απλοποίησης, θεωρείται μια βοηθητική μεταβλητή ψ_x η οποία είναι:

$$\psi_x = \frac{2\pi d_x}{\lambda} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \quad 2.71$$

Συνεπώς, ο τύπος 2.69 με την βοήθεια της μεταβλητής ψ_x δίνεται σε μια πιο βοηθητική μορφή ως μια πρόοδο (progression):

$$AF_x(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^M e^{j\psi_x(p-1)} \Rightarrow$$

$$AF_x(\theta, \varphi) = 1 + e^{j\psi_x} + e^{j2\psi_x} + e^{j3\psi_x} + e^{j(M-1)\psi_x} \quad 2.72$$

Με βάση τον τύπο 2.71 της μεταβλητής ψ_x , αν

$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s$ τότε $\psi_x = 0$ και συνεπώς η 2.72 γίνεται:

$$AF_x(\theta, \varphi) = 1 + 1 + \dots + 1 = M$$

Αντίθετα, αν

$\mathbf{u} \neq \mathbf{u}_s$ τότε $\psi_x \neq 0$ και συνεπώς η 2.72 γίνεται μια γεωμετρική πρόοδος όπου κάθε στοιχείο της είναι της μορφής:

$$\mathbf{r} = e^{j\psi_x}$$

Επίσης, γνωρίζουμε ότι το άθροισμα μιας γεωμετρικής προόδου είναι:

$$S = AF_x = \frac{1 - r^M}{1 - r}$$

και συνεπώς ο Array Factor $AF_x(\theta, \varphi)$ δίνεται ως:

$$AF_x(\theta, \varphi) = \frac{1 - e^{j\psi_x M}}{1 - e^{j\psi_x}} = \frac{e^{j\psi_x M} - 1}{e^{j\psi_x} - 1} \quad 2.73$$

Σύμφωνα με το θεώρημα του Euler ισχύει ότι:

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x$$

και συνεπώς το ημίτονο ενός αριθμού x είναι:

$$\sin x = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j} = \frac{e^{jx} - \frac{1}{e^{jx}}}{2j} = \frac{e^{j2x} - 1}{2je^{jx}} \Rightarrow \sin\left(\frac{x}{2}\right) = \frac{e^{jx} - 1}{2je^{j\frac{x}{2}}} \Rightarrow$$

$$e^{jx} - 1 = 2je^{j\frac{x}{2}} \sin \frac{x}{2} \quad 2.74$$

Με βάση την 2.74, ο Array Factor $AF_x(\theta, \varphi)$ του τύπου 2.73 γίνεται:

$$AF_x(\theta, \varphi) = \frac{e^{j\psi_x M} - 1}{e^{j\psi_x} - 1} = \frac{2je^{j\frac{x}{2}} \sin\left(\frac{M\psi_x}{2}\right)}{2je^{j\frac{x}{2}} \sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \Rightarrow \quad 2.75$$

$$AF_x(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{M\psi_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \quad 2.76$$

➤ Array Factor $AF_y(\theta, \varphi)$

Αντίστοιχα και για τον Array Factor $AF_y(\theta, \varphi)$, ακολουθώντας την ίδια λογική προσδιορίζεται ως:

$$AF_y(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \quad 2.77$$

2.7 Τύποι Beamforming [123]

Ως γνωστό, οι κεραιές μετατρέπουν τα σήματα RF σε εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αντίστροφα. Είδαμε ότι κεραιές οι οποίες χρησιμοποιούν την τεχνική Beamforming αποτελούνται από συστοιχίες κεραιών, και επίσης, ότι το κέρδος της κεραιάς αυξάνεται όσο αυξάνεται η κατευθυντικότητα της, δηλαδή όσο μειώνεται η διάμετρος της δέσμης και συνεπώς ένα δίκτυο 5G οδηγείται σε αύξηση της χωρητικότητάς του.

Τα σήματα που εκπέμπονται από κάθε στοιχείο της κεραιάς αλληλοεπιδρούν καταστροφικά και δημιουργικά ώστε να παραχθεί ένα εστιασμένο σήμα προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Με βάση τα χαρακτηριστικά μιας κεραιάς, ο τύπος Beamforming που εκτελούν ανήκει σε μια από τις δυο παρακάτω κατηγορίες:

- Παθητικό Beamforming (Passive Beamforming)
- Ενεργητικό Beamforming (Active Beamforming)

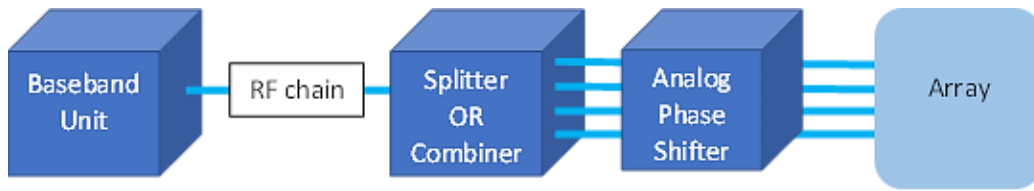
Στο παθητικό Beamforming η κεραιά έχει σταθερά χαρακτηριστικά που οφείλονται στην κατασκευή της. Πρόκειται για μια κατευθυντική κεραιά η οποία εκπέμπει το διαμορφωμένο σήμα που παράγει προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Σε αντίθεση, μια κεραιά με ενεργητικό Beamforming είναι μια δυναμική κεραιά, αφού πίσω από κάθε κεραιοστοιχείο υπάρχει ένα κύκλωμα, το οποίο μεταβάλλει την φάση του σήματος σε σχέση με τα άλλα στοιχεία, ώστε να επιτυγχάνεται όχι μόνο η μεταβολή της διαμέτρου της δέσμης αλλά και της κατεύθυνσης της.

Το ενεργητικό Beamforming (Active Beamforming) κατηγοριοποιείται σε τρεις περαιτέρω τύπους οι οποίοι είναι οι εξής:

- α) Αναλογικό Beamforming (Analogue Beamforming)
- β) Ψηφιακό Beamforming (Digital Beamforming)
- γ) Υβριδικό Beamforming (Hybrid Beamforming)

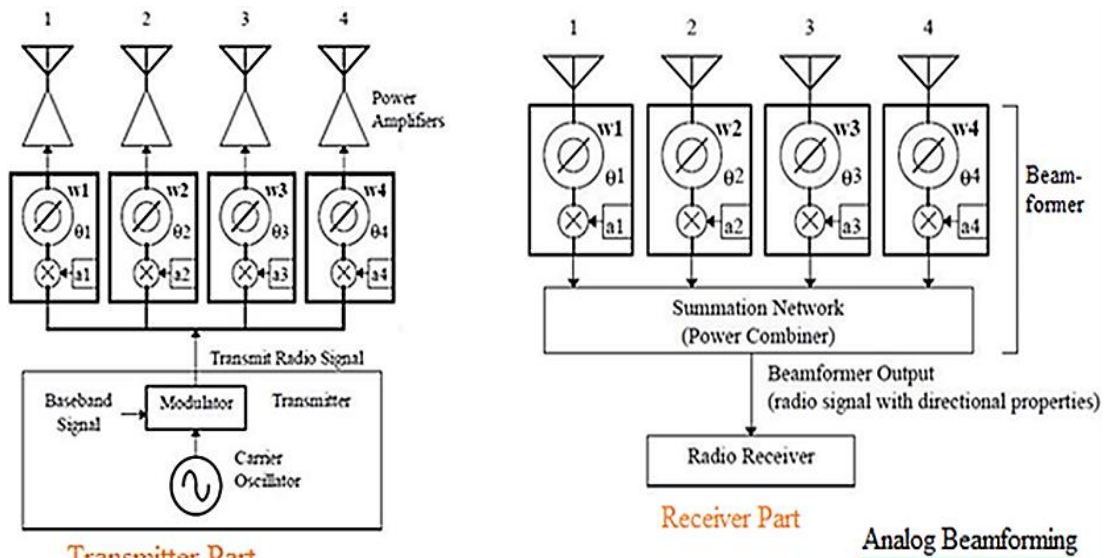
Γενικά, η τεχνική Beamforming μειώνει την παρεμβολή των σημάτων, βελτιώνει το SNR και κατά συνέπεια το κέρδος της κεραιάς, και συνεπώς αυξάνει το data throughput και την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.

2.7.1 Αναλογικό Beamforming (Analogue Beamforming - ABF) [123][131][155]



Εικόνα 2.32 Γενική σχηματική απεικόνιση Αναλογικού Beamforming (ABF)

Το αναλογικό Beamforming, είναι μια απλή μέθοδος διαμόρφωσης της δέσμης. Γενικά, η μετατόπιση φάσης των σημάτων (Analogue Phase Shifter) (Εικόνα 2.32) λαμβάνει χώρα στο αναλογικό μέρος του συστήματος, και ανάλογα αν πρόκειται για εκπομπή ή λήψη, ένας splitter ή combiner αντίστοιχα τροφοδοτεί τις κεραίες ή το κύκλωμα εξόδου του δέκτη.



(α)

(β)

Εικόνα 2.33 Αναλογικό (Analogue) Beamforming α)

Πομπός, β) Δέκτης [131]

Στην περίπτωση του δέκτη (Εικόνα 2.33β), αρχικά εφαρμόζεται η μετατόπιση της φάσης του των ληφθέντων σημάτων στα κυκλώματα μετατόπισης φάσης (phase shifter). Έπειτα, τα σήματα εισέρχονται σε ένα μίκτη. Στην περίπτωση της εκπομπής του σήματος (Εικόνα 2.33α), το σήμα προς εκπομπή διαμορφώνεται στη μονάδα Baseband από όπου εξέρχεται και τροφοδοτείται στους Beamformer, δηλαδή στο κύκλωμα που εφαρμόζεται η μετατόπιση πλάτους και φάσης, ώστε κάθε στοιχείο της κεραίας να τροφοδοτηθεί με αυτό το σήμα.

Κάθε Beamformer διαθέτει κατάλληλα κυκλώματα για την εφαρμογή βαρών $W_1, W_2 \dots W_n$ στο αναλογικό σήμα στην έξοδο του διαμορφωτή. Τα βάρη μεταβάλλουν το πλάτος του σήματος ($a_1, a_2 \dots a_n$) και την φάση του ($\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$). Επίσης, υπάρχει ένας διαμοιραστής ισχύος (power divider) ο οποίος τροφοδοτεί συγκεκριμένο αριθμό κεραίων π.χ. ένας διαμοιραστής ισχύος τεσσάρων δρόμων (4 way) τροφοδοτεί 4 συστοιχίες.

Στην περίπτωση της λήψης του σήματος από την κεραία (Εικόνα 2.33β), το λαμβανόμενο σήμα από τις κεραίες τροφοδοτείται στους Beamformers όπου εφαρμόζονται συγκεκριμένα βάρη ($W_1 \dots W_n$) (διαμόρφωση μεταβολή πλάτους και φάσης) σε κάθε κεραία της συστοιχίας κεραίων (antenna array). Έπειτα, τα σήματα από τις διάφορες κεραίες αθροίζονται και τροφοδοτούνται σε ένα μετατροπέα ADC.

Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι υπάρχουν 128 κεραιοστοιχεία στην κεραία διαθέσιμα για την λήψη, τότε κάθε σήμα από αυτά θα διέλθει μέσα από τα αναλογικά κυκλώματα προσθήκης βαρών (μετατόπισης φάσης) και έπειτα θα τροφοδοτηθούν σε ένα αναλογικό αθροιστή. Με τη σειρά του, το σήμα εξόδου του αθροιστή θα υποστεί μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D).

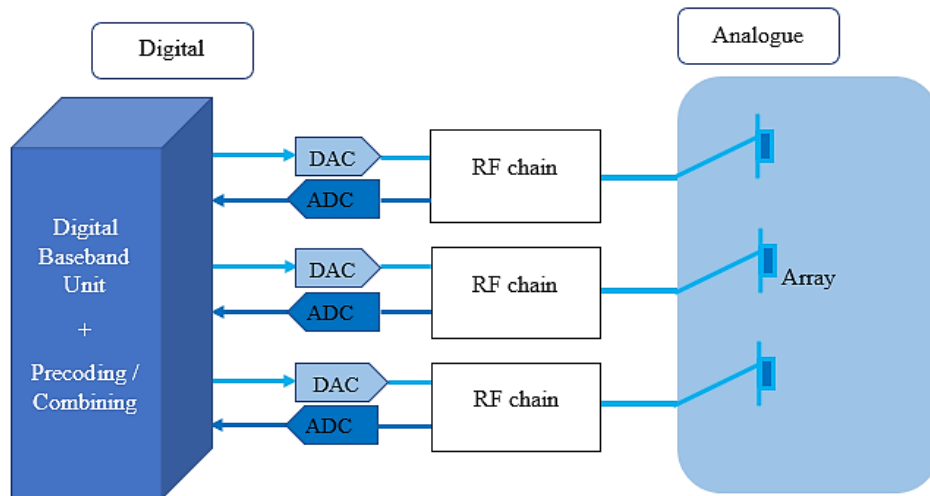
Υπάρχουν δυο περιορισμοί σε αυτή την τεχνολογία. Επειδή η συγκεκριμένη διάταξη συνδέεται σε μια μόνο μονάδα Baseband και συνεπώς σε μια μονάδα RF, μπορεί να διαχειριστεί μόνο ένα κανάλι δεδομένων και συνεπώς να δημιουργήσει μόνο μια δέσμη. Επίσης, λόγω των αναλογικών κυκλωμάτων που διαθέτει για την μετατόπιση των φάσεων (phase shifters), περιορίζεται η χρήση τους σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

Στο αναλογικό Beamforming κάθε κεραία διαθέτει μια αναλογική μονάδα για την μετατόπιση της φάσης (phase shifter), όπου αφού αθροίσουν το σήμα το στέλνουν στη

μονάδα ADC μετατροπής του σήματος (radio converter) για ψηφιακή επεξεργασία (στην περίπτωση του δέκτη). Αντίθετα, στο ψηφιακό Beamforming, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, κάθε κεραία αποτελεί ένα κανάλι εκπομπής - λήψης (Transceiver) και συνεπώς, δεν διαθέτουν κύκλωμα μετατόπισης φάσης (phase shifter) αφού ουσιαστικά το Beamforming γίνεται στο επίπεδο της ψηφιακής επεξεργασίας.

Ουσιαστικά, στο αναλογικό Beamforming χρησιμοποιούμε ένα κύκλωμα μετατόπισης φάσης (phase shifter) για κάθε κεραία οι οποίοι μοιράζονται μια μόνο κοινή μονάδα μετατροπής A/D - D/A, ενώ στην περίπτωση του ψηφιακού κάθε αφού η μετατόπιση φάσης γίνεται στο επίπεδο της ψηφιακής επεξεργασίας, χρειάζεται ένας μετατροπέας ADC - DAC για κάθε κεραία.

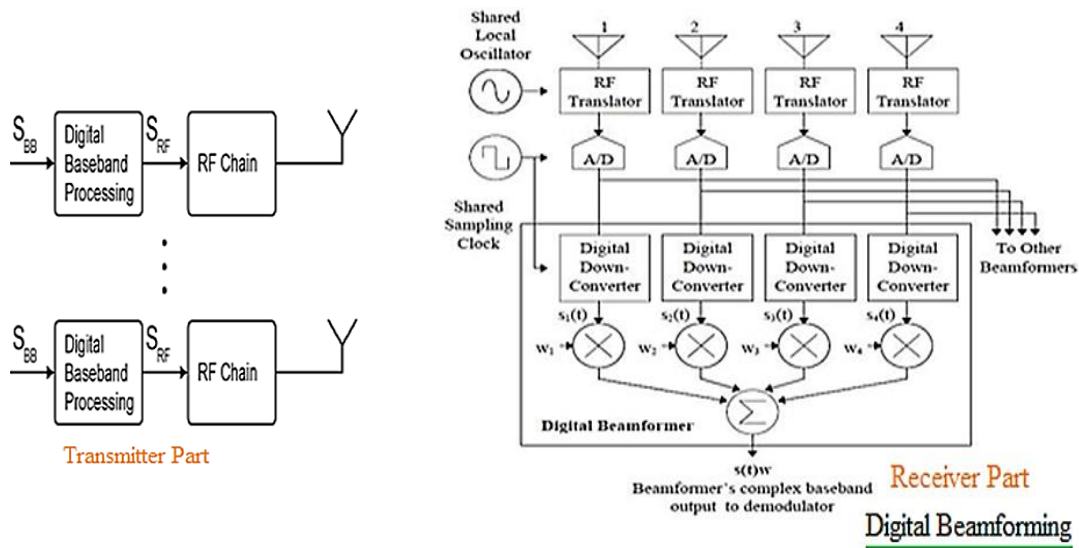
2.7.2 Ψηφιακό Beamforming (Digital Beamforming DBF) [131][155][78]



Εικόνα 2.34 Γενική σχηματική απεικόνιση Ψηφιακού (Digital) Beamforming

Στο ψηφιακό Beamforming, σε αντίθεση με το αναλογικό Beamforming δεν υπάρχει ξεχωριστό κύκλωμα μετατόπισης φάσης σε κάθε κεραία όπως είδαμε και προηγουμένως, αφού κάθε κεραία αποτελεί έναν πομποδέκτη (transceiver) που διαθέτει το δικό της κύκλωμα επεξεργασίας των σημάτων, δηλαδή μετατροπής ADC ή DAC και Digital

Beamformer (Εικόνα 2.34). Δηλαδή, κατά την λήψη, κάθε στοιχείο το οποίο π.χ. λαμβάνει ένα σήμα, τροφοδοτεί έναν μετατροπέα ADC ώστε στην έξοδο να δημιουργηθεί μια ροή. Έπειτα, με την χρήση βαρών (phase shifting) το σύνολο των ροών που δημιουργούνται στις εξόδους των μετατροπέων ADC προστίθενται ψηφιακά ώστε να παραχθεί ένα σήμα. Κάθε RF chain τροφοδοτεί μια κεραία, οπότε το σύστημα διαχειρίζεται πολλαπλές ροές δεδομένων / κανάλια (data streams) και συνεπώς εκπέμπει πολλαπλές δέσμες ταυτόχρονα.



(α)

(β)

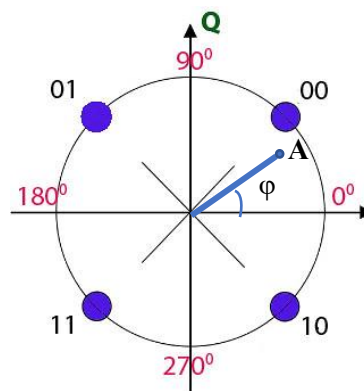
Εικόνα 2.35 Ψηφιακό Beamforming α) Πομπός και β) Δέκτης [131]

Ουσιαστικά, κατά την λήψη του σήματος από την κεραία (Εικόνα 2.35β), RF translators μετατρέπουν το RF σήμα σε μια χαμηλότερη συχνότητα IF μέσω της χρήσης ενός μίκτη και ενός τοπικού ταλαντωτή (Shared Local Oscillator). Η συχνότητα IF έπειτα τροφοδοτείται στους ADC μετατροπείς και το ψηφιακό σήμα που προκύπτει, με τη σειρά του τροφοδοτείται στους DDC μετατροπείς. Στην συνέχεια εφαρμόζονται τα βάρη $W_1, W_2 \dots W_n$ και τα σήματα τροφοδοτούνται σε έναν αθροιστή.

Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι υπάρχουν 128 κεραιοστοιχεία στην κεραία διαθέσιμα για την λήψη, τότε κάθε σήμα από αυτά θα διέλθει μέσα από τους ADC μετατροπείς και

θα προκύψουν 128 ψηφιακές ροές δεδομένων (Data streams). Με τη σειρά τους, θα εισέλθουν στους αθροιστές όπου θα προστεθούν ψηφιακά με βάρη (phase shifts).

Κατά την λήψη (Εικόνα 2.35β), τα βάρη εφαρμόζονται μετά από τα στάδια της μετατροπής ADC (Analogue-Digital-Converter) και DDC (Digital Down Converter), με το δεύτερο να μετατρέπει το ψηφιακό σήμα σε μια χαμηλότερη συχνότητα και με μικρότερο sampling. Κατά την εκπομπή (Εικόνα 2.35α), τα βάρη εφαρμόζονται πριν τον μετατροπέα DAC (Digital-Analogue-Converter).



Εικόνα 2.36 Αναπαράσταση σήματος σε μιγαδική μορφή

Στην βαθμίδα DDC, το ψηφιακό σήμα αναλύεται στις συνιστάμενες τους I/Q ή I + j Q. Στο παράδειγμα της εικόνας 2.36, το σημείο A διαθέτει ένα πραγματικό μέρος $I = A \cos(\varphi)$ και ένα φανταστικό μέρος $Q = A \sin(\varphi)$, και συνεπώς με βάση τον τύπο του Euler $\cos(\phi) + j \cdot \sin(\phi) = e^{j\varphi}$ έχουμε:

$$I + jQ = A (\cos(\varphi) + j \sin(\varphi)) = A e^{j\varphi} \quad 2.42$$

Και στον μίκτη θα πάρουμε:

$$A_1 \cdot e^{j\phi_1} + A_2 e^{j\phi_2} = A_1 A_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} \quad 2.43$$

Συνεπώς, για δυο σήματα s_1 και s_2 (Εικόνα 2.36) με πλάτος A_1 και A_2 αντίστοιχα, έχουμε:

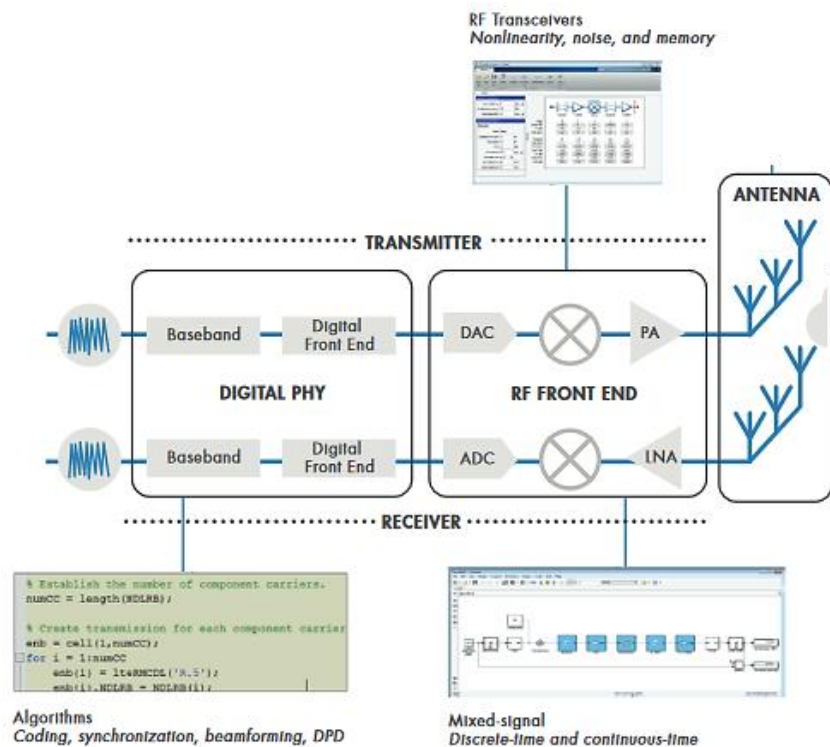
$$s_1 + s_2 = A_1 e^{j\varphi_1} + A_2 e^{j\varphi_2} = A_1 A_2 e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad 2.44$$

2.7.3 Υβριδικό Beamforming (Hybrid Beamforming HBF) [131][134][159]

Είναι γνωστό ότι οι χιλιοστομετρικές συχνότητες (mmWave) παρουσιάζουν αυξημένη Απώλεια Διαδρομής Ελευθέρου Χώρου (FSPL) όπως φαίνεται από την συνάρτηση Friis λόγω του μικρού μικρότερου κύματος λ που διαθέτουν.

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

Η αντιμετώπιση του φαινομένου γίνεται μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών όπως σε μια συστοιχία - phased array. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται α) η μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων (streams) μέσω πολυπλεξίας (Multiplexing) και β) η διαμόρφωση της δέσμης (Beamforming). Το ψηφιακό Beamforming (DBF), είδαμε προηγουμένως ότι προσφέρει τη δυνατότητα διαμόρφωσης πολλαπλών δεσμών. Ωστόσο, υπάρχουν προβλήματα. Στο ψηφιακό Beamforming απαιτείται μεγάλος αριθμός μονάδων RF chains, ίσως με τον αριθμό των κεραιών. Η δομή αυτή οδηγεί σε πολυπλοκότητα της μονάδας, σε υψηλότερο κόστος και σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας.



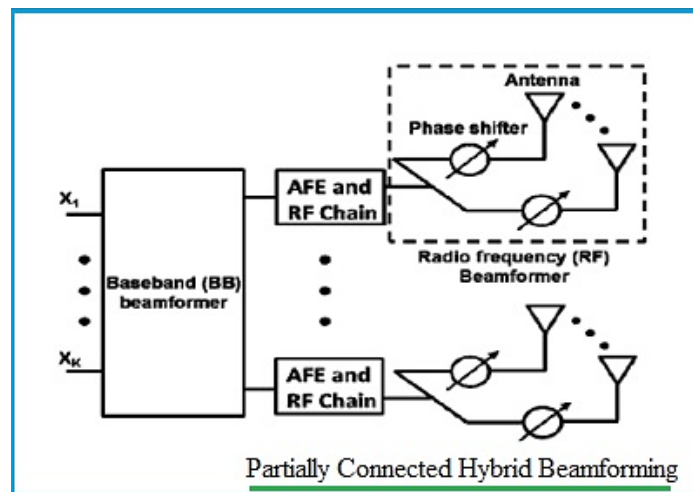
Εικόνα 2.37 Υβριδικό Beamforming [134]

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, χρησιμοποιείται το υβριδικό Beamforming (Hybrid Beamforming - HBF), το οποίο αποτελεί τον συνδυασμό των δυο προηγούμενων τύπων: του αναλογικού και του ψηφιακού Beamforming. Η τεχνική εφαρμόζει αναλογικά την μετατόπιση φάσης στο επίπεδο του RF (στις υπο-συστοιχίες κεραιών / sub-arrays), ενώ παράλληλα εφαρμόζει ψηφιακές τεχνικές στα επίπεδα του Baseband όπου διαμορφώνεται και κωδικοποιείται το σήμα που προέρχεται από ή τροφοδοτεί τις συστοιχίες τις υπο-συστοιχίες κεραιών (Εικόνα 2.37). Επίσης, τόσο το υβριδικό όσο και το ψηφιακό Beamforming κάνουν χρήση της τεχνικής precoding (προκωδικοποίηση) για να μειώσουν την πολυπλοκότητα του συστήματος και να αυξήσουν την ικανότητα διαχείρισης των πολλαπλών ακτινών.

Διακρίνουμε δυο τύπους υβριδικού Beamforming:

- Υβριδικό Beamforming Μερικής Σύνδεσης (Partially connected) ή Sub-array υβριδικό beamforming
- Υβριδικό Beamforming Πλήρους Σύνδεσης (Fully connected) ή Full-array υβριδικό Beamforming

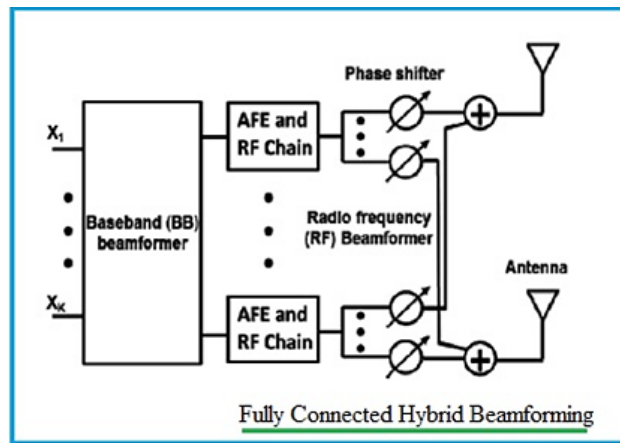
➤ Υβριδικό Beamforming Μερικής Σύνδεσης



Εικόνα 2.38 Μερικώς Συνδεδεμένο Υβριδικό Beamforming [131]

Στο υβριδικό Beamforming Μερικής σύνδεσης, κάθε κανάλι AFE/RF (Antenna Front End/RF) (Εικόνα 2.38), έχει πρόσβαση σε κάποιες συγκεκριμένες ομάδες συστοιχιών κεραιών (antenna subarrays). Δηλαδή, κάθε RF chain συνδέεται με ένα υποσύνολο κεραιών.

➤ **Υβριδικό Beamforming Πλήρους Σύνδεσης**



Εικόνα 2.39 Πλήρως Συνδεδεμένο Υβριδικό (Fully connected) Beamforming [131]

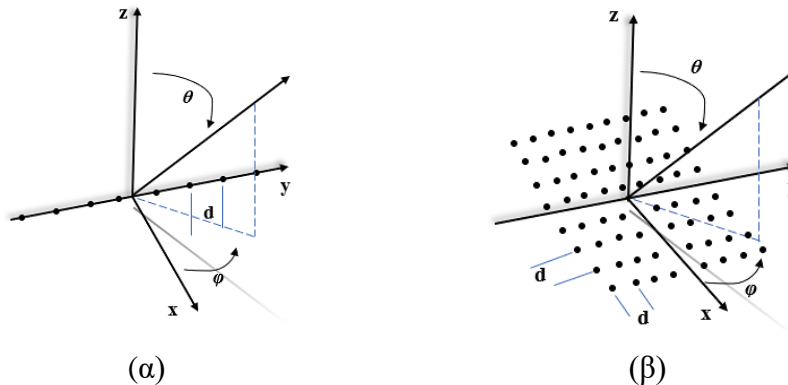
Σε αντίθεση με το υβριδικό Beamforming Μερικής σύνδεσης, η αρχιτεκτονική του υβριδικού Beamforming Πλήρους σύνδεσης επιτρέπει σε κάθε Antenna Front End (AFE/RF) να έχει πρόσβαση σε όλες τις κεραίες του συστήματος (Εικόνα 2.39). Ένας αριθμός από διαφορετικές συχνότητες RF οι οποίες προέρχονται από διαφορετικές μονάδες Antenna Front End (AFE/RF) συνδυάζονται και τροφοδοτούν ξεχωριστά διαφορετικές κεραίες από όπου και εκπέμπονται.

Οι δυο αρχιτεκτονικές διαθέτουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Η αρχιτεκτονική του υβριδικού Beamforming μερικής σύνδεσης διαθέτει πιο απλή συνδεσμολογία και συνεπώς μικρότερες απώλειες. Ωστόσο, οι δέσμες οι οποίες δημιουργεί το σύστημα είναι πιο ευρείες σε σχέση με αυτές της αρχιτεκτονικής της Πλήρους

σύνδεσης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κανάλια / ροές δεδομένων (μονάδες AFE/RF) συνδέονται μόνο με συγκεκριμένες υπο-ομάδες (sub-arrays) κεραιών και συνεπώς το σύστημα διαθέτει μικρότερη κατευθυντικότητα των δεσμών και αυξημένες παρεμβολές ανάμεσα τους

Αντίθετα, η αρχιτεκτονική υβριδικού Beamforming πλήρους σύνδεσης παράγει πιο στενές δέσμες και συνεπώς διαθέτει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα καθώς και πολύ λιγότερες παρεμβολές. Ωστόσο, το πρόβλημα σε αυτή την αρχιτεκτονική είναι η ύπαρξη επιπλέον ειδικών κυκλωμάτων για τον συνδυασμό των σημάτων RF, με αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα της κυκλωματικής διάταξης, την εξασθένηση του σήματος και την απώλεια ισχύος.

2.8 Προσαρμοστική Διαμόρφωση Δέσμης (Adaptive Beamforming) [156]



Εικόνα 2.40 Διάταξη στοιχείων συστοιχίας: (α) Γραμμική (Linear array), (β) Επίπεδη (Planar array) [156]

Μια συστοιχία κεραιών αποτελείται από ένα σύνολο στοιχείων (κεραιών) κατανομημένα στο χώρο και σε συγκεκριμένη διάταξη. Υπάρχουν διάφοροι τύποι διάταξης (Εικόνα 2.40) με τις εξής δυο πιο γνωστές:

- Γραμμική διάταξη (Linear configuration)
- Επίπεδη διάταξη (Planar configuration)

Στην γραμμική διάταξη τα στοιχεία (κεραίες) βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή πάνω σε έναν άξονα ενώ στην επίπεδη διάταξη τα στοιχεία είναι τοποθετημένα σε ένα επίπεδο δυο διαστάσεων (2D). Στην περίπτωση της γραμμικής συστοιχίας, όταν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα εκπέμπεται κάθετα από την κεραία, δημιουργεί ένα μοτίβο

Η μεγάλη αλλαγή στην τεχνολογία κεραιών φασικής σύνθεσης (phased arrays) έγινε με την εισαγωγή ηλεκτρονικών φασικών συνθετών στην θέση των αντίστοιχων μηχανικών συνθετών φάσης. Η σύγχρονη ασύρματη τεχνολογία βασίζεται σε συστήματα έξυπνων κεραιών (smart-antenna systems) οι οποίες μπορούν να προσφέρουν Προσαρμοστική Διαμόρφωση της Δέσμης (Adaptive Beamforming). Η συγκεκριμένη τεχνική δίνει την δυνατότητα διαμόρφωσης της δέσμης σήματος από έναν σταθμό ή έναν τερματικό χρήστη (UE), όπου με την χρήση βαρών (phase shift) πραγματοποιείται αλλαγή της κατεύθυνσης της δέσμης του σήματος και διαμόρφωση του μοτίβου της.

Ουσιαστικά, στην Τεχνική Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης της Δέσμης χρησιμοποιούνται διανύσματα βαρών (weight vectors) τα οποία ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση κόστους (cost function). Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης Δέσμης (Adaptive Beamforming) που χρησιμοποιούνται αποτελούν οι εξής:

- Minimum Mean Square Error (MMSE)
- Maximum Signal-to-Noise Ratio (MSNR)
- Minimum (noise) Variance (MV).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συνδεσιμότητα στο Ίντερνετ σε Αεροσκάφη της Πολιτικής Αεροπορίας (In-Flight Connectivity)

3.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονοι όροι *In-Flight connectivity (IFC)* / *In-Flight systems* (Συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο εν πτήσει / Συστήματα σύνδεσης στο Διαδίκτυο εν πτήσει) [8][82][92], *Air-to-Ground (ATG) systems* (ή *A2G*) [81] και *Broadband Direct Air to Ground Communications (DA2GC)* [94][96], αποτελούν ορολογία του πεδίου της τεχνολογίας παροχής υπηρεσιών Ίντερνετ στους επιβάτες των αεροσκαφών των αεροπορικών εταιρειών.

Η ιστορία της παροχής Ίντερνετ σε αεροσκάφη ξεκίνησε το 1991 στην Αμερική, όταν ο ιδρυτής της σημερινής εταιρείας *Gogo*, Jimmy Ray, με την τότε επωνυμία *Aircell*, απεικόνισε πρόχειρα σε μια χαρτοπετσέτα την ιδέα του για παροχή τηλεφωνικής σύνδεσης σε αεροσκάφη. Το 1997, δημιούργησε το πρώτο δίκτυο παροχής τηλεφωνικών κλήσεων για την ιδιωτική αεροπλοΐα (*Business Aviation*). [13]

Στην Ευρώπη, το 2012, δημιουργήθηκε το πρώτο δοκιμαστικό κυψελωτό δίκτυο για την παροχή Ίντερνετ σε αεροσκάφη (*air-to-ground communication system*), το οποίο αποτελούσαν δυο σταθμοί βάσης (*BSs*) σε απόσταση 100 χιλιομέτρων μεταξύ τους [84]. Το σύστημα βασιζόταν στην τεχνολογία *LTE* και ήταν το αποτέλεσμα της συνεργασίας τριών εταιριών: της *Deutsche Telekom*, της *Alcatel-Lucent* και της *Airbus*.

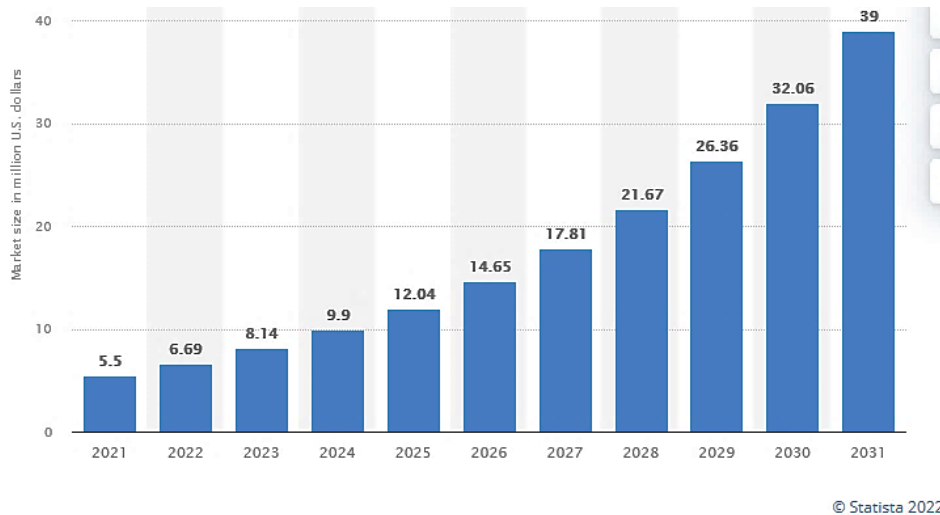
Το 2013 στην Ασιατική ήπειρο, η Κινεζική εταιρεία τηλεπικοινωνιών *ZTE* πραγματοποίησε με επιτυχία την διεξαγωγή της δικής της δοκιμής ενός αντίστοιχου *LTE* κυψελωτού συστήματος παροχής Ίντερνετ σε αεροσκάφη [85].

Σήμερα, διάφορες εταιρείες δραστηριοποιούνται στον τομέα της παροχής διασύνδεσης στο διαδίκτυο (Ίντερνετ) των αεροσκαφών της εμπορικής αεροπλοΐας ώστε οι επιβάτες αεροσκαφών να απολαμβάνουν πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες. Όπως αναφέρεται στην έρευνα *Passenger Confidence Tracker 2021* [8] (Ενότητα 1.1), η παροχή *inflight*

Ίντερνετ κρίνεται πλέον απαραίτητη για την ανάκαμψη των αεροπορικών εταιριών μετά την κρίση της επιδημίας covid-19.

Η έκθεση *Sky High Economics* του *LSE* [14] επίσης θεωρεί την παροχή υπηρεσιών Ίντερνετ εν πτήξει ως μια τεράστια οικονομική ευκαιρία για τις αεροπορικές εταιρείες ώστε να επιτύχουν αύξηση των κερδών τους αλλά και του αριθμού των επιβατών. Όπως αναφέρει, πρόκειται για μια νέα αγορά μεγέθους \$130 δις μέχρι το 2035, εκ των οποίων τα \$30 δις θα αποτελούν τα κέρδη των αεροπορικών εταιριών.

Αν προστεθεί επίσης και η πρόβλεψη της Διεθνούς Ένωσης Αεροπορικών Μεταφορών IATA (International Air Transport Association) [16] για αύξηση του αριθμού των επιβατών της αεροπλοΐας σε 8.2 δισεκατομμύρια μέχρι το 2037, τότε μιλάμε για μια τεράστια αγορά όπου οι αεροπορικές εταιρείες θα μπορέσουν να αποκτήσουν πρόσβαση σε νέες εμπορικές δυνατότητες και νέες οικονομικές προκλήσεις στο άμεσο μέλλον.



Εικόνα 3.1 Το προβλεπόμενο μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς In-flight Wi-Fi 2021-2031 σε εκατομμύρια Αμερικάνικα δολάρια [69]

Μια ακόμα έρευνα η οποία επίσης προβλέπει την άνοδο της νέας αγοράς συνδεσιμότητας σε Wi-Fi στα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας (In-flight Wi-Fi connectivity market) είναι αυτή της Statista [69] (Εικόνα 3.1). Συγκεκριμένα, υποστηρίζει μια αυξητική τάση

στο διάστημα 2022-2031, με την αγορά να αντιστοιχεί σε 39 εκατομμύρια Αμερικάνικα δολάρια έως το 2031. Οι δυο έρευνες φαίνεται να είναι συνυφασμένες μεταξύ τους καθώς η IATA (International Air Transport Association) [16] αιτιολογεί την αύξηση της συγκεκριμένης αγοράς ως αύξηση των επιβατών, ενώ αυτή της Statista [69] από την πλευρά της αύξησης του στόλου των αεροσκαφών.

Ενώ οι περισσότερες εταιρείες παρέχουν την υπηρεσία με χρέωση, υπάρχουν φωνές της πολιτικής μη χρέωσης της υπηρεσίας Wi-Fi εν πτήσει, όπως αυτή του Ed Bastian, CEO στη εταιρεία αερομεταφορών Delta Airlines, ο οποίος υποστηρίζει την δωρεάν παροχή γρήγορου Wi-Fi εν πτήσει [17]. Ωστόσο, φαίνεται ότι στη συγκεκριμένη εταιρεία προσφέρεται αποκλειστικά δωρεάν μόνο η υπηρεσία επικοινωνίας με μηνύματα (messaging) [18][24].

Μια Αμερικανική αεροπορική εταιρεία η οποία προσφέρει δωρεάν Wi-Fi εν πτήσει είναι η JetBlue [64][24], ενώ υπάρχουν επίσης, διάφορες διεθνείς αεροπορικές εταιρείες οι οποίες προσφέρουν δωρεάν Wi-Fi εν πτήσει [24] όπως: Air New Zealand, China Airlines, China Eastern, Norwegian Air. Ωστόσο, στην πλειοψηφία της η παροχή ευρυζωνικότητας εν πτήσει παραμένει μια ακριβή υπόθεση [54]. Οι εξελίξεις στον τομέα και ο ισχυρός ανταγωνισμός ίσως καταστήσουν την υπηρεσία πιο προσιτή.

3.2 Παραγωγικότητα - Ασφάλεια Πτήσεων

Οι τεχνολογίες στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν αναπτυχθεί με γοργούς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια [86]. Η συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο έχει επεκταθεί στα μέσα μεταφοράς, όπως το αυτοκίνητο, το τρένο και τις αεροπορικές πτήσεις. Δυο σημαντικά θέματα για τις αεροπορικές εταιρείες είναι τα εξής: α) η παραγωγικότητα, η οποία είναι συνυφασμένη με το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για την εγκατάσταση ενός συστήματος διασύνδεσης του αεροσκάφους στο Ίντερνετ, β) η ασφάλεια του συγκεκριμένου εξοπλισμού και των φορητών συσκευών των επιβατών για την πτήση.

Ο μέσος όρος ζωής ενός αεροσκάφους είναι το σύνθετο αποτέλεσμα ενός συνόλου μεταβλητών, όπως ο τύπος του αεροσκάφους, το έτος κατασκευής του, οι κύκλοι προσγειώσης-απογειώσης, οι ώρες πτήσης καθώς και οι κύκλοι συμπίεσης και

αποσυμπίεσης (pressurization - depressurization) λόγω απογειώσεων και προσγειώσεων οι οποίοι προκαλούν φθορές στα μεταλλικά τμήματα. Με βάση αυτά, υπολογίζεται ότι ο μέσος κύκλος ζωής ενός εμπορικού αεροσκάφους κυμαίνεται περίπου στα 30 έτη. [18]

Αν συνυπολογίσουμε επίσης, τους ωριαίους καθημερινούς ελέγχους στα gate πριν τις πτήσεις σε κάθε στάση, καθώς και τους προγραμματισμένους και απρογραμμάτιστους ελέγχους συντήρησης, τότε το κόστος σε ώρες και συνολικά σε χρήμα αυξάνεται [19]. Οδηγούμαστε, λοιπόν, σε μια πραγματικότητα όπου πολλά αεροσκάφη είναι μεγαλύτερα των 10 ετών και συνεπώς ένα σύστημα διασύνδεσης στο Ίντερνετ δεν είναι προεγκατεστημένο, αλλά απαιτείται η εγκατάσταση του να πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια της ζωής του αεροσκάφους.

Ωστόσο, όπως είδαμε παραπάνω, η καθήλωση ενός αεροσκάφους στο έδαφος για αρκετές ώρες, μεταφράζεται σε χαμένες ώρες πτήσης και προβλήματα στην οργάνωση των προγραμμάτων πτήσεων. Μια εταιρεία πρέπει να συνυπολογίσει το κόστος τόσο λόγω χαμένων ωρών πτήσης αλλά και λόγω της εγκατάστασης ακριβού αερομεταφερόμενου εξοπλισμού. Σύγχρονες εταιρείες όπως η Inmarsat, εγκαθιστούν τον εξοπλισμό του δικτύου της EAN σε ένα αεροσκάφος σε επτά (7) ώρες μειώνοντας την επίδραση της διαδικασίας εγκατάστασης στην παραγωγικότητα του αεροσκάφους [2].

Τα σύγχρονα αεροσκάφη βασίζονται στην ηλεκτρονική και ψηφιακή τεχνολογία, καθώς ηλεκτρονικοί υπολογιστές ελέγχουν τα διάφορα συστήματα και πολύπλοκες λειτουργίες τους [80]. Συνεπώς, για την ασφάλεια της πτήσης, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα του αερομεταφερόμενου εξοπλισμού του δικτύου, ώστε να μην επηρεάζονται τα όργανα και τα συστήματα του αεροσκάφους και να αποτραπεί κάθε περίπτωση κινδύνου για την ασφάλεια της.

Επίσης, είναι εξίσου σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι η χρήση φορητών ηλεκτρονικών συσκευών των επιβατών κατά τη διάρκεια της πτήσης, π.χ. κινητά τηλέφωνα (smartphones), ταμπλέτες (tablets) φορητοί Η/Υ (laptop), σε συνδυασμό με τον αερομεταφερόμενο εξοπλισμό, δεν απειλεί την ασφάλεια της πτήσης. [15]

Το δίκτυο 5G χρησιμοποιεί τρία φάσματα συχνοτήτων: high-band, mid-band και low-band. Οι προβληματισμοί αφορούν στην χρήση της τεχνολογίας 5G για την ασφάλεια των

πτήσεων. Συγκεκριμένα, εκφράζεται φόβος για πιθανή παρεμβολή των συχνοτήτων της C-Band (εντός της mid-band), δηλαδή του φάσματος συχνοτήτων 3.7-3.98 GHz (C-Band), το οποίο χρησιμοποιείται στην Αμερική, στην λειτουργία των μετρητών υψόμετρου (radio altimeters), τα οποία λειτουργούν στις παραπλήσιες συχνότητες 4.2 GHz-4.4 GHz. [83]

Σύμφωνα με το Διευθυντή πωλήσεων της Telecom / APITech D. J. Swift [109], η συγκεκριμένη επικινδυνότητα σχετίζεται ουσιαστικά με την παρουσία σταθμών βάσης 5G οι οποίοι λειτουργούν σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων, κοντά σε αεροδιαδρόμους αεροσκαφών. Επίσης, υπάρχουν φόβοι για παρεμβολές σε άλλα όργανα των αεροσκαφών μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Class A Terrain Awareness Warning Systems (TAWS-A)
- Enhanced Ground Proximity Warning Systems (EGPWS)
- Traffic Alert and Collision Avoidance Systems (TCAS II)
- Automatic Flight Guidance and Control Systems (AFGCS)

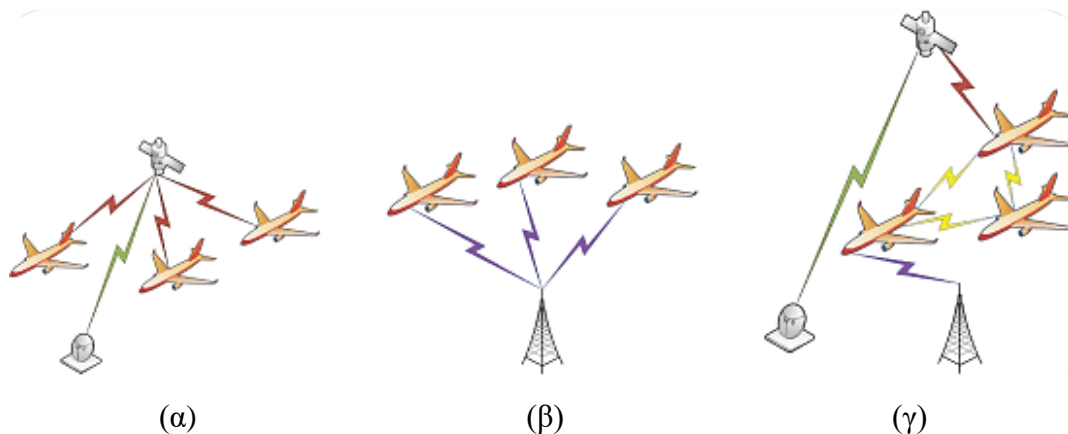
Το συγκεκριμένο πρόβλημα, ωστόσο, δεν αφορά την Αμερικάνικη εταιρεία Gogo, η οποία ως γνωστό δραστηριοποιείται στο χώρο των συστημάτων αέρος-εδάφους για παροχή ευρυζωνικότητας σε αεροσκάφη. Το δίκτυο αέρος-εδάφους 5G της εταιρείας χρησιμοποιεί συχνότητες μακριά από αυτές των μετρητών υψόμετρου (radio altimeters), δηλαδή στην μπάντα των 800 MHz band και στο μη αδειοδοτημένο φάσμα των 2.423 GHz - 2.475 GHz (2.4GHz), και συνεπώς αποκλείει παρεμβολές.[111]

Στην Ευρώπη, αυτός ο κίνδυνος έχει εξαλειφθεί καθώς οι συχνότητες του δικτύου 5G βρίσκονται στο εύρος 3.4 GHz-3.8 GHz, αρκετά μακριά από τις συχνότητες λειτουργίας των μετρητών υψόμετρων (radio altimeters) (4.2 GHz-4.4 GHz) ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές στις περιοχές των αεροδρομίων [83]. Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Ασφάλειας Αεροπλοΐας (EASA) [65] επιτρέπει πλέον την παραμονή φορητών ηλεκτρονικών συσκευών των επιβατών σε λειτουργία κατά τη διάρκεια της πτήσης, αφού δεν θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των πτήσεων.

Ωστόσο, σχετικές αποφάσεις της EASA [15][20], εξασφαλίζουν την επιβολή ειδικής διαδικασίας αξιολόγησης συστήματος παροχής Wi-Fi, ώστε κάθε εταιρεία να πραγματοποιεί την δική της αξιολόγηση, για τον προσδιορισμό των δικών της κανόνων

λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο, διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων των αεροσκαφών και η αδιατάραχτη πτητική ικανότητα του αεροσκάφους και συνεπώς, η ασφάλεια της πτήσης.

3.3 Τύποι Δικτύων Συνδεσιμότητας Αεροσκαφών στο Ίντερνετ [163]



Εικόνα 3.2 α) Δορυφορική Σύνδεση (Satellite To Air), β) Σύνδεση Αέρος-Εδάφους (A2G), γ) Aeronautical Ad-hoc Networks AANET [163]

Οι διεθνείς οργανισμοί *International Civil Aviation Organization (ICAO)*, *European Organisation for Safety of Air Navigation (EUROCONTROL)* και *Federal Aviation Administration (FAA)*, κατατάσσουν τα υπάρχοντα δίκτυα για την σύνδεση αεροσκαφών στο διαδίκτυο σε τρεις τύπους:

- Δορυφορική Σύνδεση (Satellite Connectivity / Air-To-Satellite / ATS)
- Δίκτυο Αέρος - Εδάφους (Air-To-Ground / A2G network)
- Αεροναυτικά Ad-hoc Δίκτυα (Air-To-Air / Aeronautical Ad-hoc Networks - AANETs)

Η δορυφορική σύνδεση (Εικόνα 3.2α) προσφέρει την ευρύτερη κάλυψη αλλά δυστυχώς διαθέτει μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος χρήσης και λειτουργίας. Η χρήση ειδικά σχεδιασμένων επίγειων σταθμών για την σύνδεση ενός αεροσκάφους στο διαδίκτυο

(Εικόνα 3.2β) είναι αρκετά πιο ελκυστική από πλευράς ταχύτητα και κόστους αλλά δυστυχώς δεν διαθέτουν την ευρύτερη δορυφορική κάλυψη, καθώς δεν μπορούν να προσφέρουν κάλυψη πάνω από απομακρυσμένες περιοχές όπως μεγάλοι θαλάσσιοι όγκοι (π.χ. ωκεανοί).

Τα δίκτυα AANET (Εικόνα 3.2γ) αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση καθώς η σύνδεση στο διαδίκτυο πραγματοποιείται μέσω ζεύξεων ανάμεσα σε αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας τα οποία βρίσκονται εν πτήση.

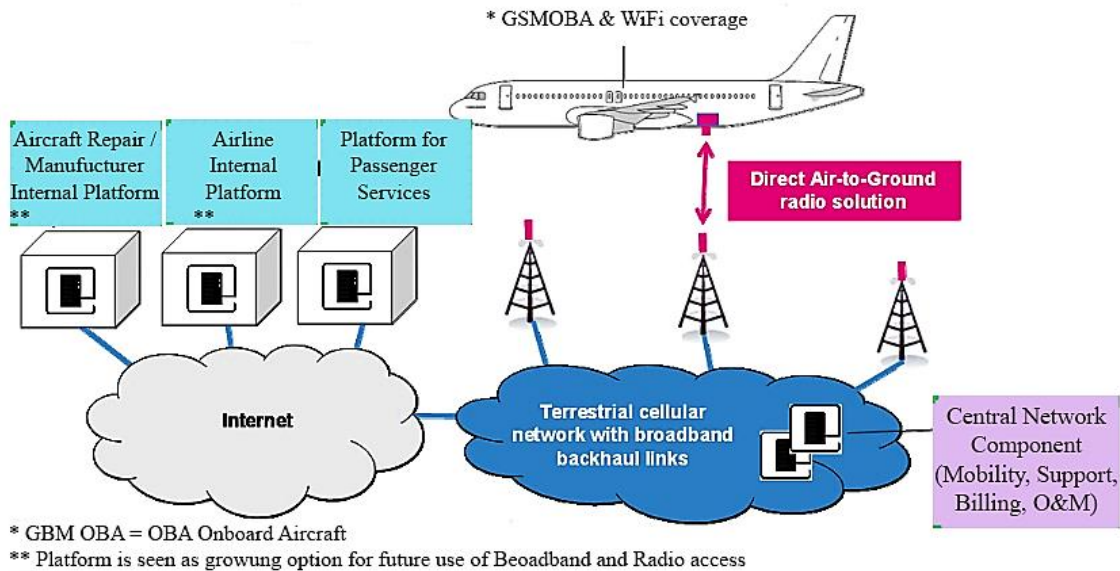
3.4 Γενική Αρχιτεκτονική Συστήματος ATG σε Αεροσκάφη

Σύμφωνα με τον Ying [81], η κάλυψη του δικτύου στον τομέα παροχής Ίντερνετ σε αεροπλάνα υστερεί σημαντικά παρόλη την εξέλιξη της κυψελωτής τεχνολογίας και την μετάβαση στις τεχνολογίες 4G και σταδιακά στην 5G, οι οποίες προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες στο διαδίκτυο. Οι Tadayon *et al.* [51] και Luo *et al.* [52] αναφέρουν ότι τα σύγχρονα δίκτυα 4G (LTE) έχουν ξεπεράσει τα προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τα μέσα μεταφοράς τα οποία κινούνται με ταχύτητες 350 km/h (π.χ. σε τρένα υψηλής ταχύτητας). Συγκεκριμένα, τέτοια προβλήματα αποτελούν τα handover (ή handoff) και η χαμηλή ποιότητα συνδεσιμότητας λόγω του φαινομένου Doppler (Doppler Frequency Shift).

Ωστόσο, τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα όσον αφορά ένα αεροσκάφος αερογραμμών (commercial airplane), το οποίο κινείται συνήθως με ταχύτητα (cruise speed) 800 km/h (η οποία μπορεί να φτάσει 1200 km/h) [81][92] και σε ύψος 9.5-12 km (31,000 - 38,000 feet) [97]. Σε αυτές τις συνθήκες, ένας συνηθισμένος σταθμός βάσης (BS) κυψελωτού δικτύου δε μπορεί να ανταπεξέλθει λόγω της μικρής εμβέλειας που διαθέτει, η οποία θα οδηγούσε σε συνεχή handover και υποβάθμιση της συνδεσιμότητας. Επίσης, η υψηλή ταχύτητα, όπως η ταχύτητα πτήσης (800 km/h) ενός αεροσκάφους των αερογραμμών, μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο σύστημα συνδεσιμότητας εν πτήση λόγω της μετατόπισης συχνότητας που οφείλεται στο φαινόμενο Doppler [51][81][92].

Η παροχή ευρυζωνικού Ίντερνετ σε πτήσεις βασίζεται σε ένα υβριδικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει την συνεργασία *δορυφορικής κάλυψης* και ενός ειδικά διαμορφωμένου

κυβελωτού δικτύου (*Air-To-Ground system*) [2]. Όπως αναφέρει ο Ying [81], ένα κυβελωτό δίκτυο σύνδεσης αεροσκαφών στο Ίντερνετ (ATG) διαθέτει παρεμφερή αρχιτεκτονική με αυτήν ενός επίγειου κυβελωτού δικτύου.



Εικόνα 3.3 Γενική Αρχιτεκτονική του Συστήματος Air-To-Ground [93]

Σύμφωνα με τους Lin *et al.* [92], ένα σύστημα αέρος-εδάφους (*Air-To-Ground System*) για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη (Εικόνα 3.3):

- Το Επίγειο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (Σταθμοί Βάσης) (GS - Ground Station) στο οποίο συνδέεται το αεροσκάφος
- Το Κύριο Δίκτυο (Core Network) το οποίο είναι υπεύθυνο για την διαχείριση των πακέτων συνδεσιμότητας με εξωτερικά δίκτυα.
- Τον Εναέριο Εξοπλισμό, δηλαδή τον σταθμό του αεροσκάφους (AS - Aircraft station) ο οποίος εξασφαλίζει την επικοινωνία με το επίγειο δίκτυο σταθμών

Η συνεργασία των παραπάνω μερών του δικτύου ATG (Air-To-Ground Network), είναι απαραίτητη για την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο σε αεροπλάνα.

3.4.1 Επίγειο Δίκτυο Σταθμών Βάσης Αέρος-Εδάφους (ATG)

Η κάλυψη ευρυζωνικότητας για παροχή Ίντερνετ στα αεροσκάφη βασίζεται σε ένα συνεργατικό υβριδικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει ένα ειδικά διαμορφωμένο επίγειο κυψελωτό δίκτυο αέρος-εδάφους 4G LTE (Air-To-Ground system / ATG) [2][92] και επίσης, δορυφορική κάλυψη (satellite coverage - SATCOM) [2]. Το δορυφορικό δίκτυο είναι πιο κατάλληλο για διηπειρωτικές πτήσεις πάνω από ωκεανούς, ενώ το κυψελωτό δίκτυο αέρος-εδάφους 4G (Air-To-Ground system) είναι πιο κατάλληλο σε ηπειρωτικές διαδρομές, λόγω μεγαλύτερης χωρητικότητας και μικρότερης χρονικής καθυστέρησης.

Σύμφωνα με τους Lin *et al.* [92], το δίκτυο αέρος - εδάφους (ATG) αποτελείται από ένα σύνολο ειδικά σχεδιασμένων επίγειων σταθμών βάσης (Ground BSs), οι οποίοι διαθέτουν μεγαλύτερες κεραιές από τις κλασσικές που εξυπηρετούν την συνδεσιμότητα στα επίγεια κυψελωτά δίκτυα. Οι κεραιές τους διαθέτουν κλίση προς τον ουρανό (up-tilt), σε αντίθεση με την κλίση προς το έδαφος (down-tilt) των κεραιών των σταθμών βάσης των επίγειων κυψελωτών δικτύων.

Επίσης, οι ειδικά σχεδιασμένοι επίγειοι σταθμοί βάσης του δικτύου αέρος-εδάφους (ATG) βρίσκονται τοποθετημένοι σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους (Inter-site distances ISD) και διαθέτουν μεγαλύτερη εμβέλεια, η οποία είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποφυγή συχνών handover (handoff) [51][81][95].

Στο σύστημα Air-To-Ground (ATG) με τεχνολογία LTE, το οποίο παρουσιάστηκε το 2016, οι ειδικά διαμορφωμένοι σταθμοί βάσης (BSs) διαθέτουν μεγάλη ακτίνα εμβέλειας (100-150 km) για να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις λόγω ύψους πτήσης και ταχύτητας [98]. Όπως αναφέρουν οι Tadayon *et al.* [51], οι σταθμοί βάσης του συγκεκριμένου συστήματος εγκαθιστούνται σε απόσταση 50-100 χιλιομέτρων μεταξύ τους, κατά μήκος μεγάλων αεροδιαδρόμων, παρέχοντας κάλυψη σε ύψη έως 45.000 πόδια (13.700 km).



(α)



(β)



(γ)

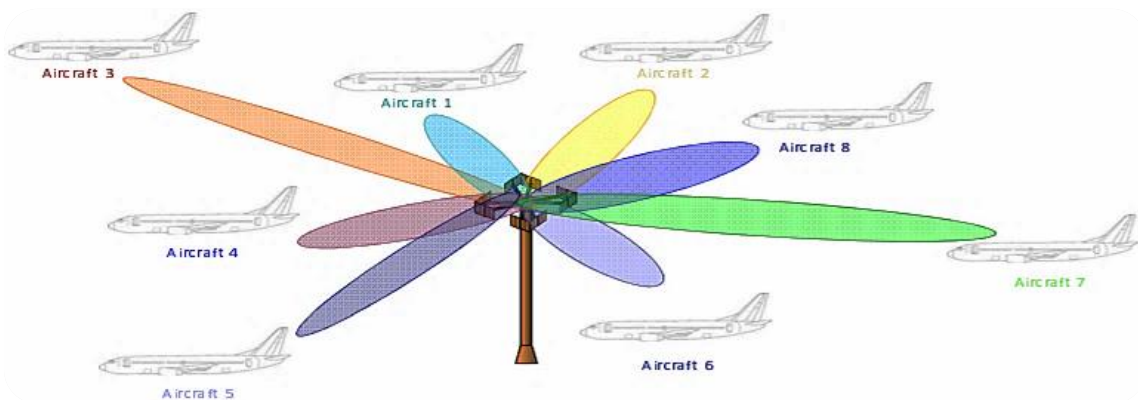
Εικόνα 3.4 Αμερική - α) Ιστός Σταθμού Βάσης ATG *Gogo*, β) Εγκατάσταση κεραιών στον ιστό Σταθμού Βάσης *Gogo*, γ) Ιστός Σταθμού Βάσης ATG *Airsky* (πηγή: βίντεο) [95][149]

Η εταιρεία Gogo το 2022 άρχισε την εγκατάσταση ενός δικτύου επίγειων σταθμών ATG (τεχνολογίας 5G) όπου 109 από τους 150 σταθμούς ήταν ήδη ενεργοί το 2022 (Εικόνα 3.4α) και ολοκληρώθηκε η εγκατάστασή τους το 2023. Οι σταθμοί αυτοί έχουν αρκετά μεγάλες κεραιές (Εικόνα 3.4β) για να μπορούν να διαθέτουν μεγάλο κέρδος ώστε να δίνεται η δυνατότητα η κεραία του αεροσκάφους να διαθέτει μικρότερες διαστάσεις και

συνεπώς να αναπληρώνεται το μικρότερο κέρδος της. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί καλύπτουν περιοχές με διάμετρο περίπου 150 - 200 μίλια.

Επίσης, η εταιρεία Airsky [95] διαθέτει ένα δίκτυο ATG στην Αμερική το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο small cells τεχνολογίας LTE. Κάθε σταθμός βάσης καλύπτει 60-200 km και αποτελείται από έναν eNodeB και μια κεραία, ειδικά διαμορφωμένα για χρήση στην επικοινωνία αέρος - εδάφους (Εικόνα 3.4γ). Καλύπτει τρεις (3) ή έξι (6) οριζόντιους τομείς (συνολικά 360°), καθώς επίσης και έναν τομέα κάθετα πάνω από την κεραία. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η δυνατότητα να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου όταν απαιτείται, με την εγκατάσταση επιπλέον σταθμών βάσης (densification). Μάλιστα, εξασφαλίζει σωστή λειτουργία για ταχύτητες αεροσκαφών οι οποίες φτάνουν τα 1500 km/hr.

Οι Lin *et al.* [92] αναφέρουν ότι το δίκτυο Ασύρματης πρόσβασης NG-RAN του νέου 5G αέρος-εδάφους (ATG) διαθέτει σταθμούς βάσης, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε μεγαλύτερες αποστάσεις (ISD) μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, διαθέτουν ISD το οποίο κυμαίνεται ανάμεσα στα 80-100 km αλλά μπορεί να φτάσει τα 300 km σε μερικές περιπτώσεις, όπως σε παράκτιους σταθμούς βάσης οι οποίοι εξυπηρετούν εγγύς αεροδιαδρόμους.



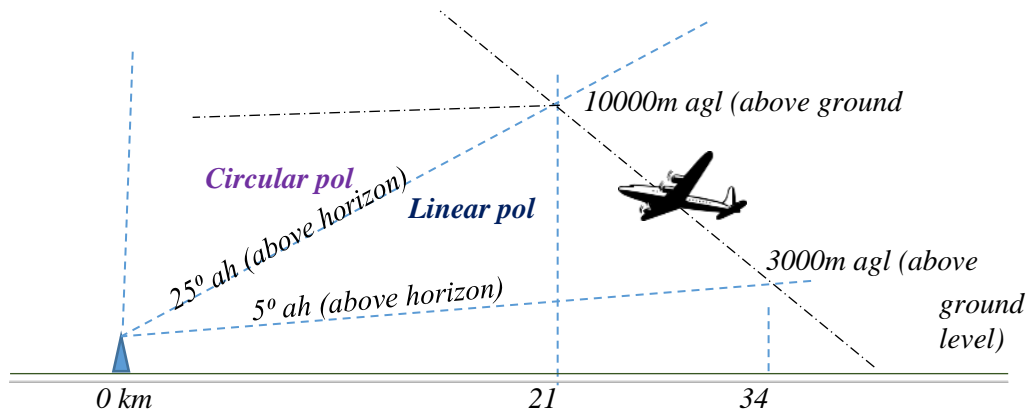
Εικόνα 3.5 Κάλυψη τεσσάρων τεταρτημώριων από πομποδέκτες ενός σταθμού βάσης αέρος-εδάφους [96]

Σύμφωνα με τεχνική αναφορά ETSI TR 101 599 V1.1.3 (2012-09) [96], οι επίγειοι σταθμοί βάσης αέρος-εδάφους (ATG) διαθέτουν πολλαπλούς (4) πομποδέκτες (Transceivers) για την κάλυψη της γωνίας ανύψωσης (elevation) και των αζιμούθιων (azimuths) στα τέσσερα τεταρτημόρια (quadrants) του εναέριου χώρου (Εικόνα 3.5). Η γωνία ανύψωσης είναι η γωνία στρέψης του κατόπτρου της κεραίας κάθετα στο επίπεδο της γης, δηλαδή, το κάτοπτρο της κεραίας στρέφεται κάθετα στη νοητή ευθεία που το συνδέει με το αεροσκάφος το οποίο στοχεύει στον ορίζοντα.

Το αζιμούθιο (οριζόντια κάλυψη) είναι η γωνία στρέψης του κατόπτρου της κεραίας γύρω από τον άξονα της, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο της γης. Εξ ορισμού, θεωρείται ότι ο Βοράς, η Ανατολή, ο Νότος και η Δύση έχουν αζιμούθιο 0° , 90° , 180° και 270° μοίρες αντίστοιχα. Το αζιμούθιο καλύπτει ουσιαστικά το οριζόντιο επίπεδο του ορίζοντα από 0° έως 360° . Κάθε πομποδέκτης αποτελείται από μια συστοιχία κεραίων η οποία διαθέτει 4 κεραίες (4-element arrays) ανά τεταρτημόριο με δυνατότητα Beamforming για τέσσερις (4) ακτίνες ανά τεταρτημόριο, και γίνεται χρήση τόσο διαμόρφωσης TDMA όσο και FDMA.

Η κάλυψη από τον επίγειο σταθμό βάσης είναι κωνικής μορφής (CONUS) όπου σε μερικές περιπτώσεις, όπως αυτή της εταιρείας Smartsky [143], το δίκτυο μπορεί να διαμορφώνει έως και 20.000 δέσμες συνολικά. Ουσιαστικά, διατίθεται μια δέσμη σε κάθε αεροσκάφος. Η διάθεση αρκετών δεσμών εξασφαλίζει την διαθεσιμότητα αρκετού εύρους (Bandwidth) το οποίο θα διατίθεται στα αεροσκάφη, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερη ρυθμαπόδοση (throughput) αμφίδρομα ανάμεσα στον επίγειο σταθμό βάσης και το αεροσκάφος.

Η σύνδεση ανάμεσα στο αεροσκάφος και τον επίγειο σταθμό βάσης είναι ασύμμετρη (asymmetric connection), αφού η χωρητικότητα (ουσιαστικά η ταχύτητα μετάδοσης) ανάμεσα στην καθοδική (ευθεία) και την ανοδική (αντίστροφη) ζεύξη (DL ή Forward και UL ή Return) μπορεί να κυμαίνεται από 60/40 έως 90/10 αντίστοιχα, με προτεραιότητα πάντα στην καθοδική ζεύξη (επίγειος σταθμός βάσης προς αεροσκάφος). Η αύξηση της χωρητικότητας της ανοδικής ζεύξης βελτιώνει την ποιότητα υπηρεσιών όπως, η περιήγηση στο διαδίκτυο, η μετάδοση ροών δεδομένων (streaming) και η μεταφόρτωση αρχείων.

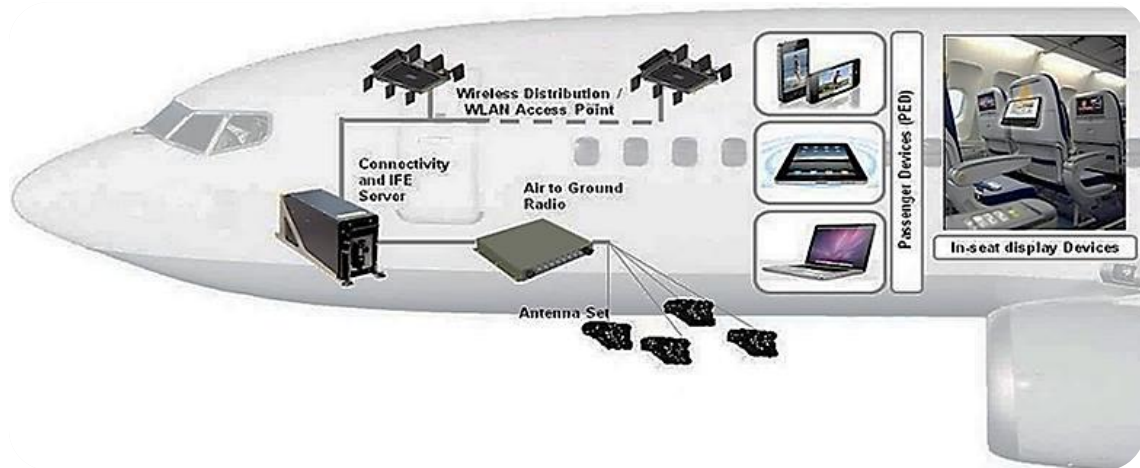


Εικόνα 3.6 Διαφοροποίηση του μοτίβου εκπομπής των κεραιών του Επίγειου Σταθμού και του Σταθμού Αεροσκάφους ανάλογα με την γωνία ανύψωσης πάνω από τον ορίζοντα [162]

Σύμφωνα με την τεχνική αναφορά APT/AWG/REP-95 [162] της APT, για τη σωστή λειτουργία της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης του διερχόμενου αεροσκάφους με τον Επίγειο Σταθμό Βάσης κατά την προσέγγιση ή την απομάκρυνση του από έναν σταθμό για όλες τις κατευθύνσεις του ορίζοντα, το μοτίβο εκπομπής των κεραιών του Επίγειου Σταθμού και του Σταθμού Αεροσκάφους (antenna illumination pattern) οφείλει να διαφοροποιείται ανάλογα με την γωνία ανύψωσης πάνω από τον ορίζοντα (elevation above horizon). Ουσιαστικά, η πολικότητα (polarization) και το κέρδος (gain) διαφοροποιούνται ανάλογα με την γωνία ανύψωσης ως εξής (Εικόνα 3.6):

- Για χαμηλή ανύψωση (elevation) $5^\circ - 25^\circ$ πάνω από τον ορίζοντα (ah): Το κέρδος να είναι υψηλότερο (gain) και η πολικότητα κάθετη (vertical / linear)
- Για υψηλότερη ανύψωση (elevation) $25^\circ - 90^\circ$ πάνω από τον ορίζοντα (ah): Το κέρδος (gain) να είναι μικρότερο και η πολικότητα κυκλική (circular)

3.4.2 Εναέριος Εξοπλισμός Δικτύου Air-To-Ground



Εικόνα 3.7 Ο εξοπλισμός της καμπίνας του αεροσκάφους για τη διασύνδεση στο διαδίκτυο [96]

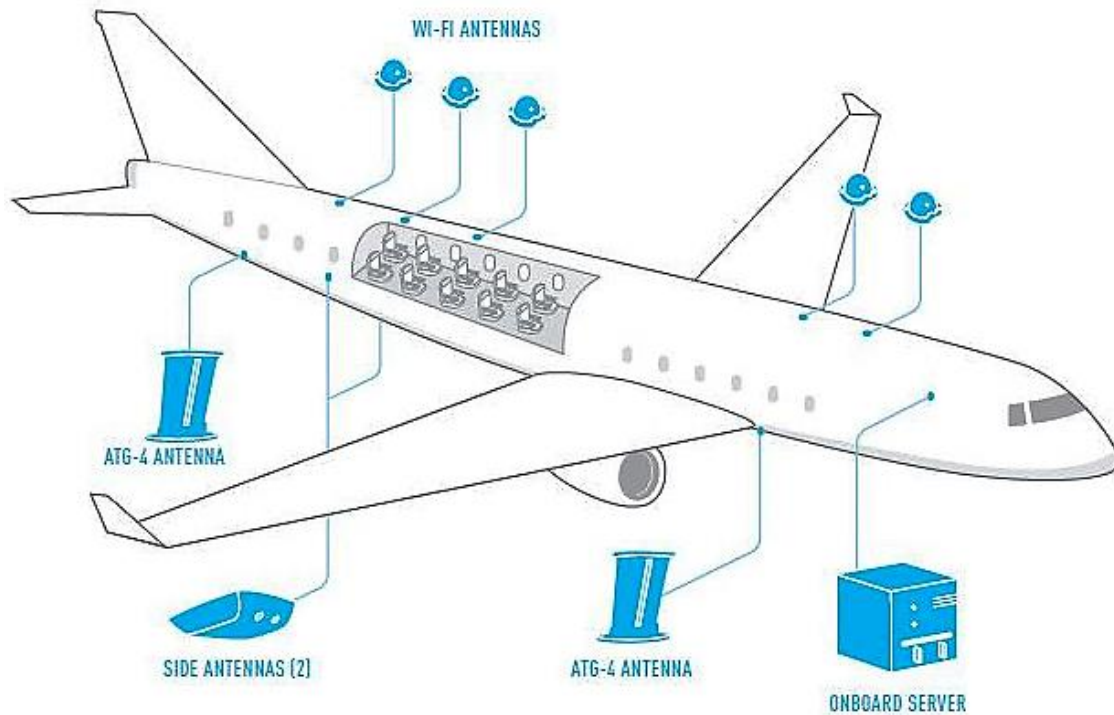
Ο εξοπλισμός της καμπίνας επιτρέπει τη σύνδεση του αεροσκάφους με το Επίγειο Δίκτυο Σταθμών ATG. Όπως αναφέρεται στην τεχνική αναφορά ETSI TR 101 599 V1.1.3 (2012-09) [96], τα βασικά μέρη του εναέριου εξοπλισμού το δικτύου Air-To-Ground είναι τα εξής (Εικόνα 3.7):

- Η ράδιο-μονάδα αέρος - εδάφους (Air-to-Ground Radio)
- Οι ειδικά διαμορφωμένες κεραίες εγκατεστημένες στην άτρακτο του αεροπλάνου
- Ο διακομιστής (server)
- Σημεία πρόσβασης Wi-Fi στο εσωτερικό της καμπίνας

Η ράδιο-μονάδα (*Air-to-Ground Radio*) η οποία βρίσκεται στην καμπίνα του αεροσκάφους παρέχει την διασύνδεση με το επίγειο δίκτυο σταθμών (Εικόνα 3.7). Είναι συνδεδεμένη με τις ειδικά διαμορφωμένες κεραίες του αεροπλάνου, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την λήψη και μετάδοση των σημάτων.

Μετά την λήψη τους, τα σήματα από τους επίγειους σταθμούς (BSs) τροφοδοτούνται σε ένα server, για την διανομή τους τόσο στα εσωτερικά σημεία σύνδεσης Wi-Fi, όσο και στο

σύστημα ψυχαγωγίας (IFE - In Flight Entertainment) π.χ. οθόνες στις πλάτες των καθισμάτων.



Εικόνα 3.8 Η Gogo διαθέτει τέσσερις κεραίες στην άτρακτο για πολλαπλή συνδεσιμότητα με επίγειους σταθμούς του συστήματος αέρος-εδάφους [87]

Σε πιο σύγχρονες τεχνολογίες, όπως αυτή του ATG-4 της Gogo [87], ένα αεροσκάφος διαθέτει τέσσερις (4) εξωτερικές πανκατευθυντικές (omnidirectional) κεραίες λήψης και μετάδοσης των σημάτων (Εικόνα 3.8) - δυο στο κατώτερο μέρος της ατράκτου και δυο πλευρικές, οι οποίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη σύνδεση σε πολλούς επίγειους σταθμούς.

Μια πανκατευθυντική κεραία εκπέμπει και λαμβάνει σήματα στον ορίζοντα 360⁰ και είναι πιο οικονομική και εύκολη στην χρήση. Επίσης, η εταιρεία Gogo έχει διαθέσιμες νεότερες πλατφόρμες εναέριου εξοπλισμού οι οποίες στηρίζονται σε διάφορες τεχνολογίες (4G/3G). Παράλληλα, εργάζεται όπως και η Ευρωπαϊκή EAN να εγκαταστήσει το δίκτυο 5G.

AVANCE L5



The platform-based, Gogo Biz 4G powerhouse that lets you do it all during flight.

(α)

AVANCE L3



The 3G Wi-Fi experience that keeps lighter passenger loads connected to their world.

(β)

ATG



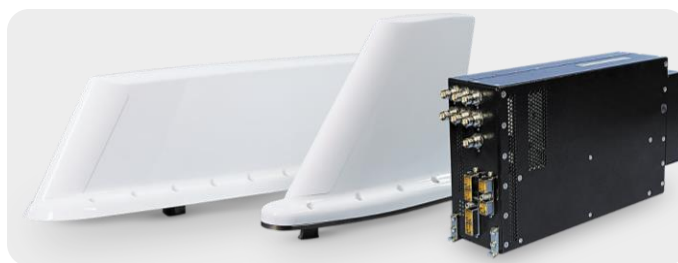
The reliable ATG 5000/4000 Gogo Biz network system that revolutionized inflight internet.

(γ)

Εικόνα 3.9 Οι εναέριας πλατφόρμες επεξεργασίας σήματος της Gogo: α) Avance L5, β) Avance L3, γ) ATG [121]

Η Gogo με τη σειρά της έχει αναπτύξει διάφορες πλατφόρμες εναέριας εξοπλισμού οι οποίες περιλαμβάνουν (Εικόνα 3.9):

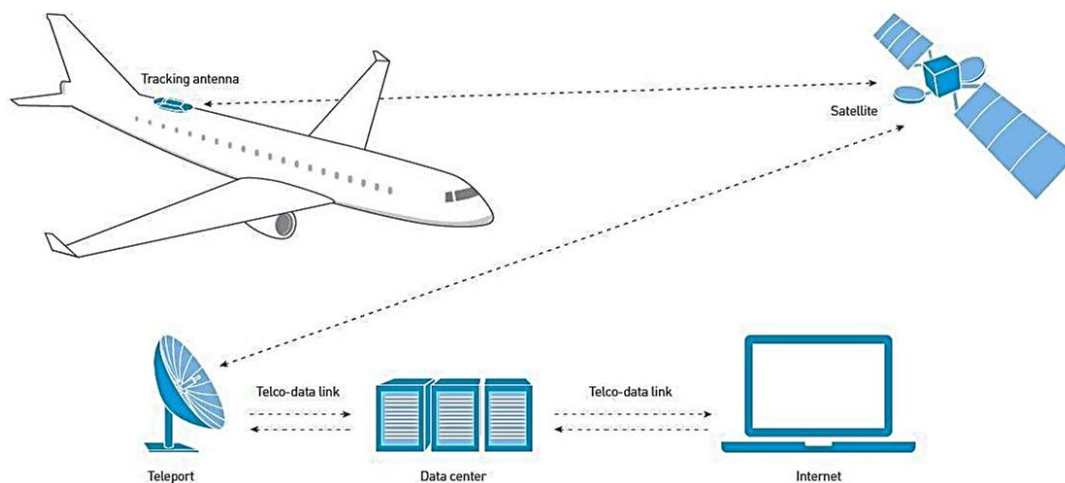
- Gogo Avance L5 (βασισμένη σε τεχνολογία 4G)
- Gogo Avance L3 (βασισμένη σε τεχνολογία 3G)
- ATG (5000/4000)



Εικόνα 3.10 Η πλατφόρμα συνδεσιμότητας ATG της SmartSky [146]

Μια άλλη προηγμένη πλατφόρμα ανήκει στην SmartSky, η οποία χρησιμοποιεί την συχνότητα 2.4GHz της μπάντας ISM (Industrial Scientific Medical Band). Σύμφωνα με την εταιρεία, η πλατφόρμα του σταθμού βάσης του αεροσκάφους συνδυάζει δυο κεραίες τύπου πτερύγιου (blade), μια ραδιο-μονάδα και ένα δρομολογητή (router) (Εικόνα 3.10).

3.5 Δορυφορική Σύνδεση Αεροσκάφους για Παροχή Ίντερνετ (ATS)

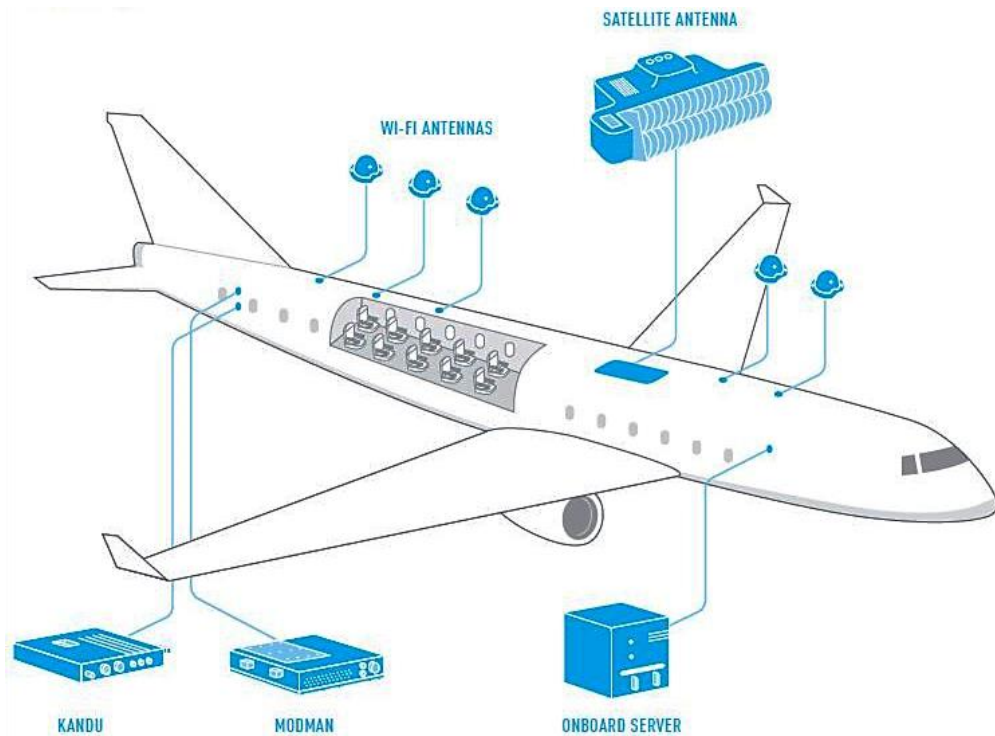


Εικόνα 3.11 Δορυφορική σύνδεση για παροχή Wi-Fi στο αεροσκάφος [105]

Κατά τη διάρκεια διηπειρωτικών πτήσεων όπου το αεροσκάφος διασχίζει μεγάλες αποστάσεις πάνω από ωκεανούς ή πάνω από απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης επίγειου δικτύου σταθμών βάσης ATG, η παροχή σύνδεσης του

αεροσκάφους στο Ίντερνετ επιτυγχάνεται αποκλειστικά μέσω δορυφόρων, η οποία αποκαλείται σύνδεση Αέρος - Δορυφόρου ATS (Air-To-Satellite) (Εικόνα 3.11).

Σύμφωνα με τον Frenzel [48], την καλύτερη λύση για την δορυφορική συνδεσιμότητα (ATS) προσφέρουν οι γεωστατικοί δορυφόροι, οι οποίοι βρίσκονται συνήθως σε ύψος 35,888 km (22,300 miles). Οι δορυφόροι αυτοί κινούνται στο επίπεδο του Ισημερινού με την ίδια ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η Γη γύρω από τον άξονά της και συνεπώς, βρίσκονται σταθερά πάνω από το ίδιο σημείο στην Γη και παραμένουν σταθερά στο ίδιο σημείο σε άμεση και συνεχή επαφή με την σταθερή κεραία ενός επίγειου σταθμού.



Εικόνα 3.12 Ο εξοπλισμός της Gogo για δορυφορική σύνδεση του αεροσκάφους (ATS) [105]

Η δυνατότητα δορυφορικής συνδεσιμότητας του αεροσκάφους (ATS) επιτυγχάνεται μέσω μιας κεραίας, η οποία βρίσκεται τοποθετημένη στην οροφή της ατράκτου σε ειδικά διαμορφωμένο θόλο (Εικόνες 3.11 & 3.12). Με αυτόν τον τρόπο, επικοινωνεί τα δεδομένα

προς τον δορυφόρο και έπειτα σε ένα επίγειο σταθμό και αντίστροφα. Στην εικόνα 3.12 απεικονίζεται το σύστημα ATS της εταιρείας Gogo. Πέρα από την δορυφορική κεραία, τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi και τον server, η Gogo χρησιμοποιεί τις δυο επιπλέον μονάδες:

- KANDU
- MODMAN

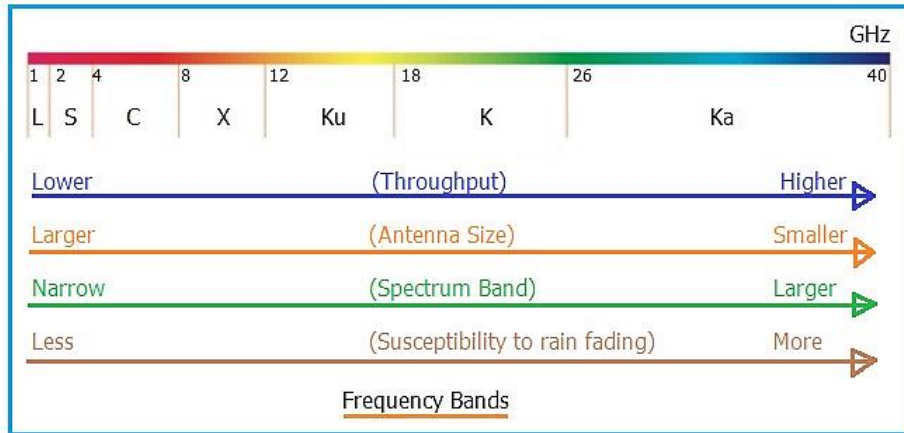
Όπως αναφέρεται, η μονάδα KANDU (Ku/Ka Aircraft Networking Data Unit) [105][107] αποτελεί τη μονάδα επεξεργασίας του δικτύου του αεροσκάφους για τις δορυφορικές μάντες Ku και Ka. Είναι υπεύθυνο για την διασύνδεση του αεροσκάφους με τον δορυφόρο και επίσης συνεργάζεται με το σύστημα πλοήγησης του αεροσκάφους για τον έλεγχο της δορυφορικής κεραίας.

Η μονάδα MODMAN (Modem and Manager) συνδέει την δορυφορική κεραία με τον server στο αεροπλάνο για την μετατροπή και τροφοδοσία των δεδομένων από τον δορυφόρο στη καμπίνα.



Εικόνα 3.13 Κεραία 2Ku radome για ATS σύνδεση [110]

Η κεραία είναι επίσης πολύ σημαντική. Η Gogo χρησιμοποιεί την νέα συμμετρική 2Ku Radome της Intelsat (Εικόνα 3.13) με μεγαλύτερη επιφάνεια και μετατόπιση φάσης (phased-array) χωρίς μηχανικά μέρη tilt. Σε σχέση με παλαιότερες κεραίες τύπου Gimbal radome και λόγω της μεγαλύτερης συμμετρικής επιφάνειας το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερο throughput, εισάγει μεγαλύτερες ταχύτητες και χωρητικότητα στην σύνδεση ATS, ενώ παράλληλα αυξάνει η αξιοπιστία της κεραίας λόγω έλλειψης μηχανικών εξαρτημάτων.



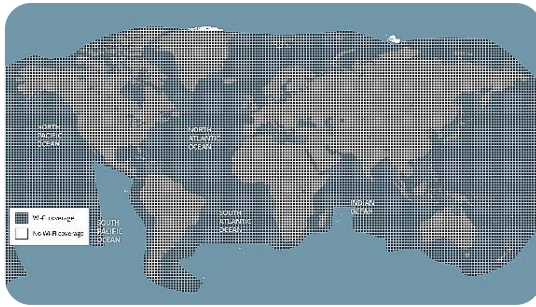
Εικόνα 3.14 Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων (Satellite frequency bands) [106]

Για την επίτευξη της σύνδεσης των αεροσκαφών με δορυφόρους, χρησιμοποιείται ένα σύνολο από ειδικές ζώνες συχνοτήτων στην μικροκυματική περιοχή (mmWave). Πρόκειται για τις δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων L, S, C, X, Ku, και Ka-band (Εικόνα 3.14). Αναλυτικότερα αυτές αντιστοιχούν στις παρακάτω συχνότητες:

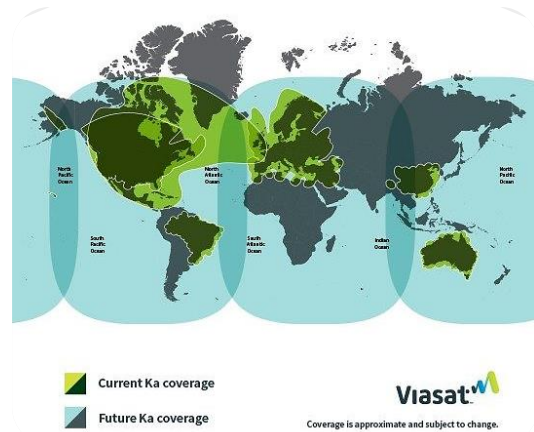
- L-band ...1 - 2 GHz
- S-band ...2 - 4 GHz
- C-band ...4 - 8 GHz
- X-band.....8 - 12 GHz
- Ku-band ...12 - 18 GHz
- Ka-band ...26 - 40 GHz

Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις σύνδεσης ATS (Aircraft-To-Satellite) είναι οι μπάντες S (2 – 4 GHz), Ku (12 – 18 GHz) and Ka (26.5–40 GHz) Το Ευρωπαϊκό δίκτυο EAN επιτυγχάνει την δορυφορική σύνδεση ATS (Air-to-Satellite) του αεροσκάφους για παροχή Ίντερνετ, χρησιμοποιώντας δορυφόρους της Inmarsat στην S-Band.

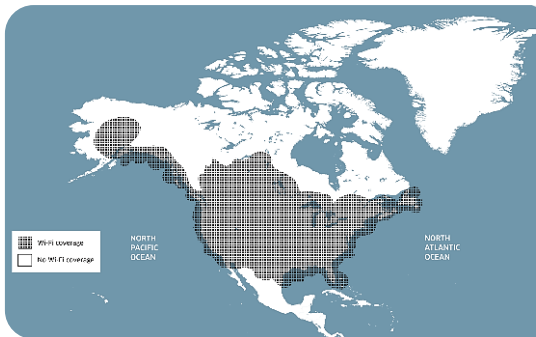
Γενικά, ισχύει ότι όσο πιο υψηλή η ζώνη συχνοτήτων, τόσο περισσότερο αυξάνει το παρεχόμενο εύρος συχνοτήτων (BW). Παρ' όλα αυτά, οι υψηλές συχνότητες έχουν το μειονέκτημα της εξασθένησης λόγω της απορρόφησης τους από ατμοσφαιρικούς παράγοντες όπως η βροχή, το χιόνι ή ο πάγος.



(α)



(β)



(γ)

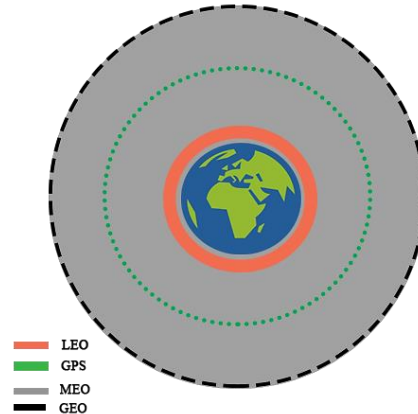


(δ)

Εικόνα 3.15 Χάρτες Δορυφορικής Συνδεσιμότητας ATS (Satellite Inflight Coverage Map): (α) Panasonic [103], β) ViaSat [104], γ) Gogo Βόρεια Αμερική [103], δ) Κάλυψη δικτύου ATG της Intelsat [21]

Η εικόνα 3.15 απεικονίζει την παγκόσμια δορυφορική κάλυψη για συνδεσιμότητα αεροσκαφών στο Ίντερνετ (Satellite Inflight Coverage Map) των εταιρειών: (α) *Panasonic* [103] και (δ) *Intelsat* [21].

Επίσης, απεικονίζεται η μερική δορυφορική κάλυψη που προσφέρουν οι εταιρείες: (β) *ViaSat* για την Αμερική, Ευρώπη, Νότιο-ανατολική Ασία και Αυστραλία [104] και (δ) η *Gogo* για την Αμερική και τμήματα του Καναδά και της Αλάσκας [103].



Εικόνα 3.16 Τρεις τύποι δορυφόρων σύμφωνα με το ύψος της τροχιάς τους γύρω από την Γη καθώς και οι δορυφόροι GPS

Υπάρχουν τρεις τύποι δορυφόρων οι οποίοι παρέχουν σύνδεση ATS, ανάλογα με την τροχιά στην οποία βρίσκονται γύρω από την Γη [163]:

- α. Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO)
- β. Δορυφόροι μεσαίας τροχιάς (Medium Earth Orbit - MEO)
- γ. Γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Earth Orbit - GEO)

Οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (LEO) βρίσκονται σε ύψος 500-2000 km (Εικόνα 3.16) και λόγω της εγγύτητάς τους στην επιφάνεια της γης παρέχουν χαμηλότερο latency αφού ο χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (Round-Trip-Time / RTT) είναι 30 ms. Το σύστημα Iridium αποτελείται από 66 δορυφόρους LEO. Οι δορυφόροι μεσαίας τροχιάς (MEO) βρίσκονται σε ύψος 5000–20000 km και παρουσιάζουν μεγαλύτερο latency και συνεπώς ο χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT) είναι πολύ μεγαλύτερος στα 100 ms. Το πλεονέκτημά τους είναι η μεγαλύτερη κάλυψη.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι (GEO) βρίσκονται σε ύψος άνω των 36000 km και συνεπώς διαθέτουν τον υψηλότερο χρόνο μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT = 250 ms) αλλά μικρότερο throughput σε σχέση με του δορυφόρους LEO. Ένα σύστημα GEO είναι το σύστημα Inmarsat (International Maritime Satellite) που διαθέτει 10 δορυφόρους GEO.

Το μειονέκτημα της δορυφορικής συνδεσιμότητας, όπως είδαμε, ότι υπαισέρχεται μεγάλη καθυστέρηση round-trip delay (RTT η οποία φτάνει τα 260 ms [48] μεγάλη απόσταση την οποία πρέπει να διανύσει, με αποτέλεσμα να. Κατά τους Tadayon *et al.* [51], η καθυστέρηση (latency) μπορεί να ξεπεράσει τα 250 ms, και παράλληλα λόγω της χαμηλής ταχύτητας και του περιορισμένου εύρους (bandwidth-limited), η δορυφορική σύνδεση είναι δύσκολο να διατεθεί για ευρυζωνική σύνδεση.

Ωστόσο, πρόσφατες εξελίξεις έχουν βελτιώσει την δορυφορική συνδεσιμότητα ATS. Μια περίπτωση είναι οι νέοι δορυφόροι *Epic* της Intelsat, οι οποίοι λειτουργούν στις ζώνες C, Ku και Ka με χρήση ευρείας κάλυψης (wide beam) και εστιασμένης (spot beam), καθώς και με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (frequency reuse) για αυξημένο throughput (high-throughput) [100]. Επίσης, στην Intelsat πολλαπλοί δορυφόροι σχηματίζουν ένα δίκτυο όπου επικαλύπτουν ο ένας τον άλλο, ώστε να αυξήσουν το παρεχόμενο εύρος συχνοτήτων (BW) και την αξιοπιστία σε περίπτωση δυσλειτουργίας ενός δορυφόρου [101].

Μια άλλη περίπτωση αποτελούν οι νέοι εγκατεστημένοι δορυφόροι της ViaSat (ViaSat-3) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για παγκόσμια κάλυψη (παγκόσμια εμβέλεια) αυξάνουν την χωρητικότητα στα 1TB και επιτυγχάνουν ταχύτητες μικρότερες από 100 Mbps ή 1 Gbps ανά αεροσκάφος, με χαμηλή καθυστέρηση (latency) περίπου 1ms [104].

Parameters	LEO	MEO	GEO
Height	500-2000 km	5000-20000 km	36000 km
Orbital Periods	90 min	2-12 hour	24 hour
RTT	30 ms	100 ms	250 ms
Path Loss	Least	High	Highest
Orbit Type	Circular	Circular	Circular
Handover Number	High	Medium	None
Number of Satellites	40-70	10-12	3
Energy Requirement	Low	Medium	High
Antenna Size	Small	Medium	Large

Εικόνα 3.17 Συνοπτική σύγκριση των τριών τύπων δορυφόρων [163]

Γενικότερα, στην εικόνα 3.17 παρατηρούμε μια συγκριτική σύνοψη των παραμέτρων που αφορούν στους τρεις τύπους δορυφόρων. Παρατηρούμε το πολύ χαμηλότερο RTT των

γεωστατικών δορυφόρων σε σχέση με τους υπόλοιπους, την μικρότερη κεραία που απαιτούν για σύνδεση καθώς και το χαμηλό Path Loss. Στα αρνητικά τους κατατάσσονται ο υψηλός αριθμός handover.

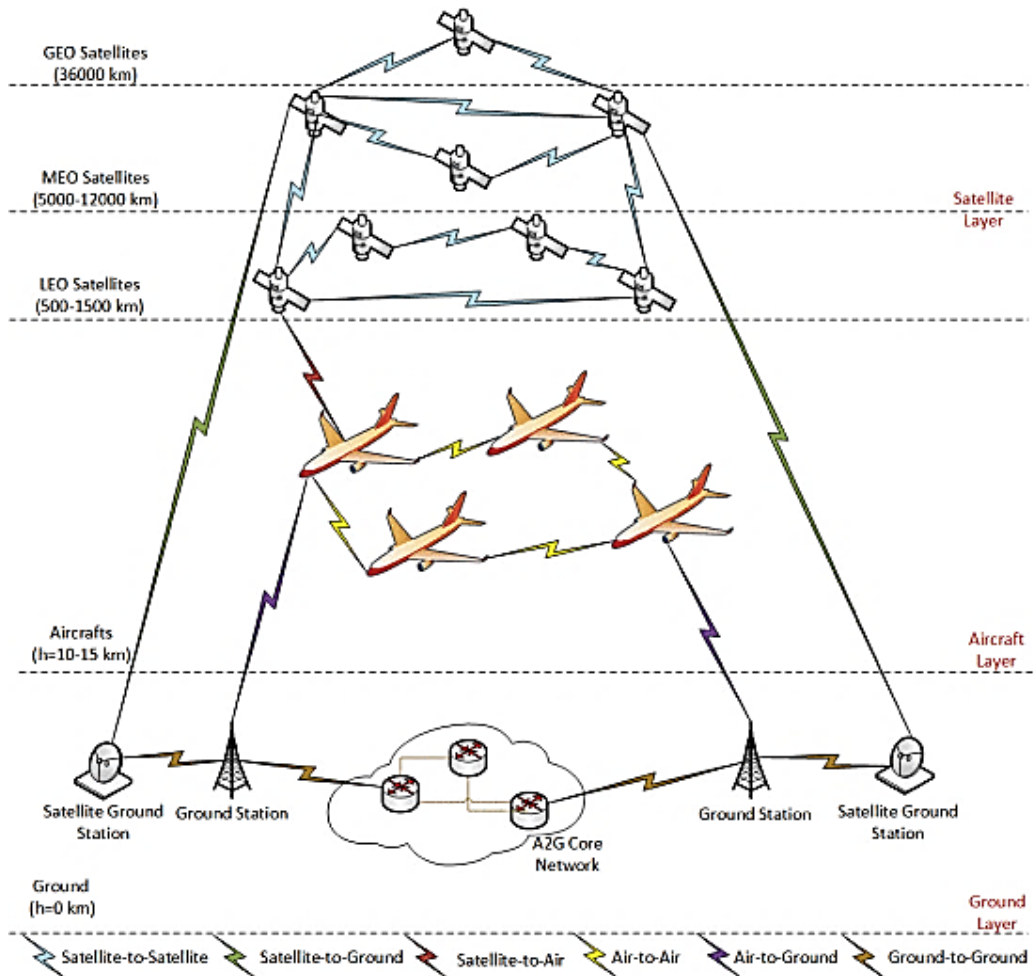
3.5.1 Σύγκριση Δικτύων ATG και ATS

Parameter	A2G Network	Satellite
Latency	Low	High
Coverage	Low	High
Cost/Equipment cost	Low	High
Installation Time	Short	Long
Transmission Path	Short	Long
Throughput	High	Limited
Available Spectrum	Limited	High

Εικόνα 3.18 Σύγκριση των δύο τύπων δικτύων - A2G & ATS [163]

Σχετικά με τις προηγούμενες ενότητες 3.4 και 3.5, η εικόνα 3.18 παρουσιάζει μια συνοπτική σύγκριση ανάμεσα στους τύπους σύνδεσης A2G & ATS. Παρατηρούμε την υπεροχή του συστήματος ATG σχετικά με τον χρόνο μετάδοσης (Latency), το υψηλότερο throughput και το χαμηλότερο κόστος έναντι του συστήματος ATS. Επίσης, οι Lin *et al.* [92], υποστηρίζουν ότι το επίγειο δίκτυο συνδεσιμότητας σε αεροσκάφη ATG υπερτερεί από το αντίστοιχο δορυφορικό ATS το οποίο έχει δυο εγγενή προβλήματα: τη μικρή χωρητικότητα και την υψηλή καθυστέρηση μετάδοσης (latency).

3.6 Αεροναυτικά Ad-hoc Δίκτυα (AANETs - Aeronautical Ad-hoc Networks / Air-To-Air) [163]



Εικόνα 3.19 Τοπολογία δικτύου AANET [163]

Στα δίκτυα AANET (Εικόνα 3.19) η σύνδεση των αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας στο διαδίκτυο ακολουθεί μια διαφορετική προσέγγιση από τα δυο προηγούμενα συστήματα σύνδεσης (ATG & ATS). Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω ζεύξεων ανάμεσα σε αεροσκάφη τα οποία τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή βρίσκονται σε εγγύτητα και σχηματίζουν ένα εικονικό σμήνος. Κυριολεκτικά δημιουργούνται συνδέσεις Air-To-

Air, ανάμεσα στα αεροσκάφη του συγκεκριμένου σμήνους / clusters, δηλαδή σχηματίζεται ένα προσωρινό εναέριο δίκτυο μεταφοράς πακέτων δεδομένων ανάμεσα τους.

Η δημιουργία των συνδέσμων Air-To-Air βασίζεται στην εγγύτητα των αεροσκαφών. Ουσιαστικά, κάθε σταθμός αεροσκάφους λειτουργεί ως router. Για την επίτευξη μιας σύνδεσης ανάμεσα στους σταθμούς δυο αεροσκαφών απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί να βρίσκονται εντός του εύρους μετάδοσης τους (transmission range). Οι σύνδεσμοι Air-To-Air πραγματοποιούνται με κανάλια U/VHF, τα οποία διαθέτουν φάσμα 119–137 MHz.

Η τοπολογία του δικτύου συνδυάζει τρία επίπεδα (Εικόνα 3.18):

- Ανώτερο επίπεδο (Top layer) - Επίπεδο Δορυφορικής Σύνδεσης (ATS)
- Μεσαίο επίπεδο (Middle layer) - Επίπεδο Σταθμού Αεροσκάφους (AS)
- Κατώτερο επίπεδο (Bottom layer) - Επίπεδο Σύνδεσης με Επίγειο Σταθμό (ATG)

Το συγκεκριμένο δίκτυο συνδυάζει τις συνδέσεις ATG και ATS για την πρόσβαση στο διαδίκτυο, καθώς μέσω αυτών ένα από τα αεροσκάφη του σμήνους συνδέεται με το Ίντερνετ. Συνεπώς αεροσκάφη τα οποία βρίσκονται μακριά από Επίγειους Σταθμούς ATG μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο Ίντερνετ.

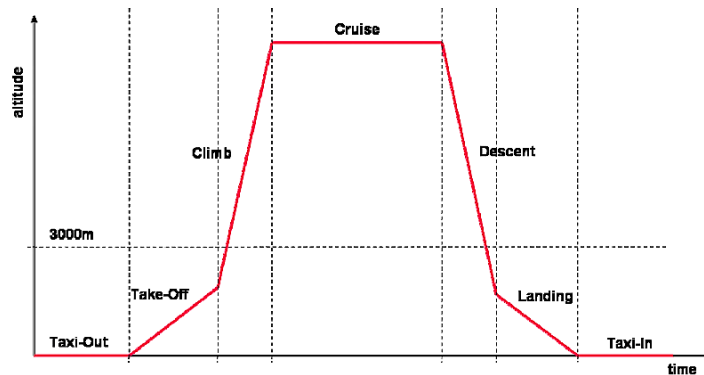
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μελέτη Συνδεσιμότητας Αεροσκάφους στο Ίντερνετ

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε γενική αναφορά τόσο στους τύπους των δικτύων αέρος - εδάφους (air-to-ground) για παροχή Ίντερνετ σε αεροσκάφη, όσο και στην αρχιτεκτονική τους για την επίτευξη της σύνδεσης των αεροσκαφών στο Ίντερνετ σε επίπεδο uplink και downlink. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται διερεύνηση σχετικά με τα υπάρχοντα συστήματα συνδεσιμότητας αεροσκαφών στο Ίντερνετ.

Υπάρχουν πολλές προκλήσεις στον σχεδιασμό των συστημάτων αέρος - εδάφους καθώς ένα σύνολο παραμέτρων πρέπει να ληφθούν υπόψιν, όπως το μεγάλο υψόμετρο πτήσης, η διαφοροποίηση του υψομέτρου πτήσης του αεροσκάφους κατά την απογείωση και την προσγείωση, η χρυσή τομή ανάμεσα στην χρήση συχνοτήτων, ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και κάλυψη απόστασης, το φαινόμενο Doppler.



Εικόνα 4.1 Το προφίλ μιας τυπικής εμπορικής πτήσης [93]

Η εικόνα 4.1 απεικονίζει το προφίλ μια τυπικής εμπορικής πτήσης όπου παρατηρούμε ότι την ανάβαση (climb), την πλεύση (cruise) και την κατάβαση (descent). Το ύψος της πλεύσης (cruise) βρίσκεται άνω των 3 km, συνήθως περίπου στα 10 km. Λόγω των αποστάσεων και του ύψους πτήσης, οι συχνότητες που βρίσκουν εφαρμογή σε ένα

σύστημα ATG για την πρόσβαση στο Ίντερνετ πρέπει να βρίσκονται στην περιοχή κάτω των 6 GHz δηλαδή στην περιοχή του φάσματος sub-7. Αυτό επιτρέπει τον έλεγχο φαινομένων που συμβαίνουν σε αυτό το φάσμα.

Ένας φαινόμενο που σχετίζεται με τη συχνότητα αποτελεί η εξασθένηση του σήματος λόγω απορρόφησης των συχνοτήτων εξαιτίας των ατμοσφαιρικών συνθηκών (διαφορετική πυκνότητα ανάλογα το ύψος, η θερμοκρασία και οι καιρικές συνθήκες, οι υδρατμοί [93]).

Ο συντελεστής Path Loss FSPL = $\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$ μειώνεται στις χαμηλές συχνότητες αφού ο παρονομαστής (μήκος κύματος λ) αυξάνει, ενώ στις υψηλότερες συχνότητες που το μήκος κύματος μειώνεται, οδηγεί σε μείωση του παρονομαστή λ , και συνεπώς σε αύξηση του Path Loss. Συνεπώς, συχνότητες άνω των 6 GHz οδηγούν σε πολύ υψηλό Path loss και κατά συνέπεια σε υψηλότερη εξασθένηση του σήματος.

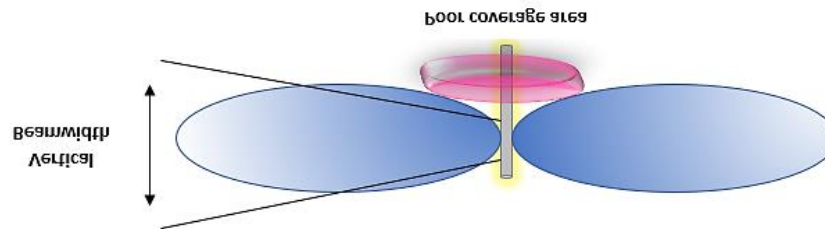
Η εξασθένηση του σήματος στις υψηλότερες συχνότητες οδηγεί επίσης σε μείωση του λόγου σήματος - θορύβου SNR (signal-to-noise ratio) και τελικά σε μείωση του data throughput [93]. Ουσιαστικά, όσο μειώνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, τόσο μειώνεται το Path loss και αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR). Οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερες αποστάσεις με μικρότερη απορρόφηση αλλά επίσης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένη ισχύς στους πομπούς ώστε να επιτυγχάνεται συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (throughput) [108].

Παράλληλα, ένας άλλος λόγος επιλογής των συχνοτήτων του φάσματος sub-7 είναι το φαινόμενο Doppler, καθώς για τις συχνότητες πάνω από το φάσμα sub-7, το φαινόμενο αυξάνει λόγω των υψηλών ταχυτήτων του αεροσκάφους [51][52]. Επίσης, ένα πρόβλημα που προκύπτει με την χρήση συχνοτήτων στο φάσμα sub-7) είναι το μέγεθος της κεραίας που χρησιμοποιείται τόσο στον επίγειο σταθμό (GS) όσο και στον σταθμό του αεροσκάφους (AS). Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3, οι κεραίες του επίγειου σταθμού βάσης είναι συστοιχίες κεραιοστοιχείων.

Ο κανόνας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή συστοιχιών κεραιών είναι τα κεραιοστοιχεία να απέχουν κατά $\lambda/2$. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος της κεραίας αυξάνει όσο μειώνεται η συχνότητα. Το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο για τον σταθμό του αεροσκάφους (AS) όπου η κεραία ATG βρίσκεται στην κοιλιά του αεροσκάφους και

πρέπει να τηρεί διαστάσεις και βάρος που να μην επηρεάζουν την ασφάλεια της πτήσης. Το μεγάλο μέγεθος των πάνελ κεραιών των επίγειων σταθμών των συστημάτων ATG (Ενότητα 3.3.1) επιτρέπει την αναπλήρωση του κέρδους της μικρότερης σε μέγεθος κεραιάς του σταθμού του αεροσκάφους.

Στον σταθμό του αεροσκάφους χρησιμοποιούνται πανκατευθυντικές κεραιές (omnidirectional antenna) MIMO λόγω του μικρού μεγέθους τους, της πολύ καλής λήψης που διαθέτουν και της δυνατότητας τους για Beamforming. Συνήθως είναι τύπου Blade για αεροδυναμικούς λόγους, με τον αριθμό τους να ποικίλει ανάμεσα σε μία (1), δυο (2) και τέσσερις (4) (Ενότητες 2.3 και 3.4.2).



Εικόνα 4.2 Πλάγια όψη: η περιοχή μη-κάλυψης κάτω από την Πανκατευθυντική κεραία (Βασισμένο στο [161])

Η πολικότητα της πανκατευθυντική κεραία, συνήθως είναι κάθετη (vertical polarization) αλλά υπάρχουν επίσης διπλής πολικότητας (ενότητα 2.3). Διαθέτει οριζόντια κάλυψη 360° έχοντας την δυνατότητα να διαφοροποιεί την κάλυψή στον κατακόρυφο άξονα. Αυτά τα χαρακτηριστικά την κάνουν ιδανική για λήψη και εκπομπή σημάτων στον σταθμό βάσης του αεροσκάφους σε συνθήκες πτήσης. Ωστόσο, υπάρχει ένα όριο στην κάλυψη αυτού του τύπου κεραιάς στον κατακόρυφο άξονα καθώς δημιουργείται ένα κενό κάλυψης στην περιοχή της κεραιάς κάτω από τον άξονα της (Εικόνα 4.2). [161]

Όπως και η κεραία του αεροσκάφους, έτσι και ο επίγειος σταθμός διαθέτει Beamforming. Η διαφορά είναι ότι οι κεραιές των επίγειων σταθμών (GB) είναι πολύ πιο κατευθυντικές και η ακτινοβολία τους περιορίζεται για την οριζόντια κάλυψη (horizontal pattern) σε τιμές ανάμεσα σε 30° - 90° και με τυπική τιμή 65° , καλύπτοντας μόνο ένα μέρος του χώρου

(sector antennas). Έτσι, διαθέτουν στενότερους λοβούς για υψηλότερο κέρδος και καλύτερη στόχευση, διοχετεύοντας την ενέργεια της ακτινοβολίας προς μια κατεύθυνση.

4.2 Δίκτυα Air-To-Ground (ATG)

Η κάλυψη ευρυζωνικότητας για παροχή Ίντερνετ στα αεροσκάφη είναι μια πραγματικότητα. Δίκτυα σταθμών βάσης Αέρος-Εδάφους (ATG) όπως το Ευρωπαϊκό EAN (European Aviation Network), το Αμερικανικό της Gogo καθώς και του Κινεζικού της ZTE βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ παράλληλα η μετάβαση στο επόμενο στάδιο τεχνολογίας 5G βρίσκεται σε εξέλιξη.

Όλες οι τεχνολογίες έχουν μια συγκεκριμένη υποδομή, όπως έχουμε δει μέχρι τώρα, και χρησιμοποιούν ένα εύρος συχνοτήτων και ένα σύνολο τεχνολογιών για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας τους. Σε αυτή την ενότητα γίνεται η παρουσίαση των γενικών προδιαγραφών των τριών παραπάνω συστημάτων Αέρος-Εδάφους (ATG), ξεκινώντας με το Ευρωπαϊκό σύστημα, το οποίο θα παρουσιαστεί πιο αναλυτικά.

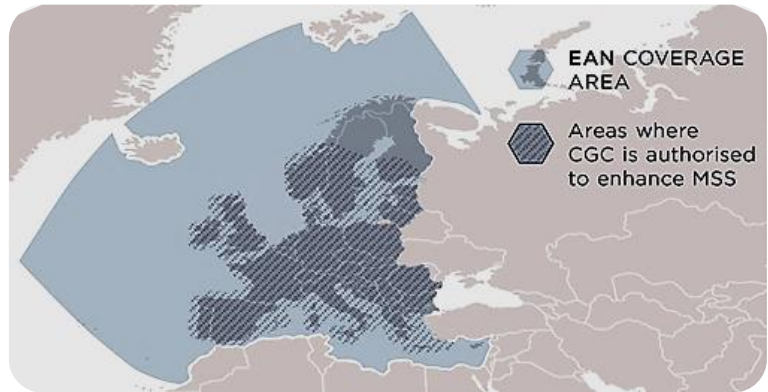
Το σημερινό Ευρωπαϊκό δίκτυο EAN (European Aviation Network) ATG είναι τεχνολογίας LTE, και βρίσκεται σε διαδικασία αναβάθμισης σε 5G. Το δίκτυο έχει αναπτύξει 300 επίγειους σταθμούς βάσης (Ground Base Stations) με εμβέλεια 150 km που εξυπηρετούν 30 Ευρωπαϊκές χώρες

4.2.1 European Aviation Network (EAN) [1][[92][166]

Το Ευρωπαϊκό δίκτυο EAN (European Aviation Network) είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας των εταιρειών Inmarsat, Deutsche Telekom και της SkyFive (πρώην Nokia). Στηρίζεται στην τεχνολογία 4G LTE, αλλά όπως και με τα ευρυζωνικά δίκτυα της κινητής τηλεφωνίας, βρίσκεται σε διαδικασία αναβάθμισης στο δίκτυο 5G. Η μετάβαση στο επόμενο δίκτυο 5G πραγματοποιείται σε δυο στάδια:

- α. Υβριδικό σύστημα τεχνολογίας 4G LTE και 5G (Non-Standalone - NSA)
- β. Σύστημα βασιζόμενο αποκλειστικά στην τεχνολογία 5G (Standalone - SA)

Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται με τη σύνδεση των δυο τεχνολογιών 4G LTE και 5G στο EPC (Evolved Packet Core) του υπάρχοντος 4G LTE συστήματος, παρέχοντας συμβατότητα σε κινητά και σε δίκτυα 4G ήδη εγκατεστημένα σε αεροσκάφη. Το δεύτερο στάδιο σηματοδοτεί τη μετάβαση στο πλήρες 5G δίκτυο ATG για αεροπλάνα.



(α)

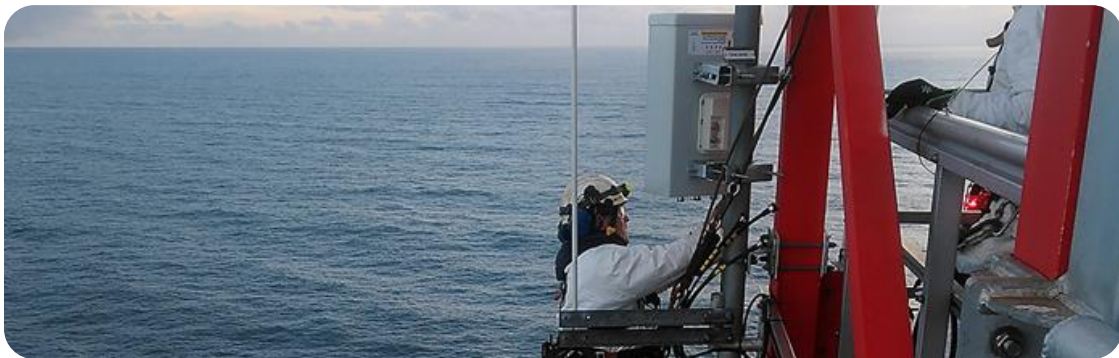


(β)

Εικόνα 4.3 α) Κάλυψη Δικτύου EAN: Επίγειο δίκτυο Σταθμών Βάσης (CGC-Complementary Ground Components) και Δορυφορικές υπηρεσίες [167], β) Το επίγειο δίκτυο Βάσης Σταθμών του EAN (ground network component): 300 LTE BS [44]

Όπως αναφέρεται στην Deutsche Telekom [3], το Ευρωπαϊκό δίκτυο (EAN) αέρος-εδάφους (ATG) παρέχει Ίντερνετ στους επιβάτες αεροσκαφών πανευρωπαϊκά (Εικόνα 4.3α). Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, έχουν αναπτυχθεί 300 επίγειοι Σταθμοί Βάσης (Ground Base Stations) τεχνολογίας LTE για να εξυπηρετούν 30 Ευρωπαϊκές χώρες (Εικόνα 4.3β). Η εμβέλεια κάθε σταθμού βάσης είναι 150 km (ακτίνα ίση με 75 km [92]) για την παροχή κάλυψης και την αποφυγή πολλαπλών handover.

Το 2022, η Deutsche Telekom, η Inmarsat και η Tampnet εγκατέστησαν επιπλέον οκτώ Σταθμούς Βάσης ATG σε περιοχές της Βόρειας θάλασσας. Στόχος ήταν η ενίσχυση της αυξανόμενης ζήτησης για συνδεσιμότητα αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας στο Ίντερνετ στην Βόρεια Ευρώπη (Ην. Βασίλειο, Ολλανδία, Δανία και Νορβηγία).



Εικόνα 4.4 Εγκατάσταση Επίγειων Σταθμών ATG σε πλατφόρμα παραγωγής στη Βόρεια θάλασσα [166]

Οι νέοι Σταθμοί Βάσης ATG εκμεταλλεύονται το υπάρχον δίκτυο οπτικών ινών της εταιρείας Tampnet, υπεράκτιες πλατφόρμες παραγωγής (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου & φυσικού αερίου, υπεράκτιες ανεμογεννήτριες) καθώς και πλοία (Εικόνα 4.4). Πιο συγκεκριμένα, πέντε (5) Σταθμοί Βάσης ATG εγκαταστάθηκαν σε πλωτές υπεράκτιες πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου & φυσικού αερίου, δυο (2) σε υπεράκτιες ανεμογεννήτριες και ένας Σταθμός Βάσης (1) σε παράκτια περιοχή της Νορβηγίας.



Εικόνα 4.5 Δεξιά: Η LTE κεραία (δεξιά) του σταθμού αεροσκάφους για το επίγειο δίκτυο EAN ACGC (Aviation Complementary Ground Component), Αριστερά: Η δορυφορική κεραία του αεροσκάφους για το EAN Mobile Satellite Services (MSS) S-band [91]

Στην εικόνα 4.5 (δεξιά) φαίνεται η LTE κεραία του σταθμού του αεροσκάφους που του επιτρέπει να επικοινωνεί με το επίγειο δίκτυο EAN ACGC (Aviation Complementary Ground Component). Το μέγεθός της είναι ιδιαίτερα μικρό και τοποθετείται στο κάτω μέρος της ατράκτους του αεροσκάφους.

Στο δίκτυο EAN έχουν διερευνηθεί διάφορα πρότυπα συστημάτων που στηρίζονται σε προδιαγραφές του εναρμονισμένου Ευρωπαϊκού προτύπου φάσματος συχνοτήτων DA2G ή ATG (Harmonised European Standard of DA2G / ATG). Ακολουθεί ανάλυση των προτύπων.

➤ Διερευνημένα Πρότυπα Συστημάτων ATG του δικτύου EAN

Πριν την δημιουργία του Ευρωπαϊκού Δικτύου EAN, ερευνήθηκαν διάφορα πρότυπα συστημάτων DA2G ή ATG που στηρίχτηκαν σε προδιαγραφές του εναρμονισμένου Ευρωπαϊκού προτύπου φάσματος συχνοτήτων DA2G ή ATG (Harmonised European Standard of DA2G / ATG). Οι προδιαγραφές αυτές γενικότερα καθορίζονται από τον Ευρωπαϊκό οργανισμό προτύπων ETSI. Τα συγκεκριμένα πρότυπα παραθέτονται και αναλύονται παρακάτω. Μερικές από τις συχνότητες που μελετήθηκαν είναι: **1900-1920 MHz, 2010-2025 MHz, 2400-2483.5 MHz, 3400-3600 MHz**, και **5855-5875 MHz** [92].

Τελικά όπως θα δούμε παρακάτω, αποσύρθηκε η χρήση του φάσματος **1900-1920 MHz** για χρήση στο σύστημα ATG, με την απόφαση ECC/DEC/(18)01 [5] της Electronic

Communications Committee (ECC) στις 06 Ιουλίου 2018. Επίσης, δεν στηρίχθηκε η χρήση του φάσματος 2,4 GHz για χρήση DA2G, καθώς, η χρήση της βρίσκεται σε ένα μεγάλο αριθμό εμπορικών συσκευών που κάνουν χρήση του WiFi και Bluetooth και συνεπώς θα υπήρχαν προβλήματα παρεμβολών [96].

Το τελικό δίκτυο ATG της EAN δημιουργήθηκε το 2018 βασισμένο στην τεχνολογία LTE στη μπάντα συχνοτήτων “**LTE band 65**”, δηλαδή στα **2.1 GHz (2100 MHz)** [147][92]. Η συγκεκριμένη μπάντα περιλαμβάνει τις συχνότητες 1920-2010 MHz για το UL και 2110-2200 MHz για το DL και το σύστημα λειτουργεί με αμφιδρόμηση FDD. Η ταχύτητα μετάδοσης είναι 20 Mbps και 75 Mbps για το UL και DL αντίστοιχα, 100 GBPS χωρητικότητας σε κάθε αεροσκάφος. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα δίκτυο το οποίο συνδυάζει δορυφορική σύνδεση στην S-band (Inmarsat / δορυφόροι GEO - Geostationary Earth Orbit) και σύνδεση ATG. Παρακάτω γίνεται αναλυτική αναφορά στα συγκεκριμένα πρότυπα που μελετήθηκαν για το δίκτυο του EAN, στα πλαίσια συνδεσιμότητα αέρος - εδάφους (ATG).

- **Πρότυπο ETSI TR 103 054 (2010) [92][93]**

Αναφέρεται έρευνα για ένα σύστημα αέρος-εδάφους (ATG) βασισμένο στην τεχνολογία LTE. Το συγκεκριμένο σύστημα δοκιμάστηκε στην Γερμανία προτείνοντας το φάσμα συχνοτήτων **2.6 GHz** με κανάλια εύρους 2×10 MHz για το UL και το DL, και χρήση FDD (Frequency Division Duplex), δηλαδή paired spectrum. Η ταχύτητα μετάδοσης έφτανε τα 30 Mbps και 17 Mbps για το DL και UL αντίστοιχα.

Επίσης, γίνεται αναφορά στην μέγιστη ισχύ του πομπού του Σταθμού Βάσης (BS) τύπου E-UTRAN (eNB), η οποία για τα κανάλια εύρους 10 MHz πρέπει να βρίσκεται στα 40 W ώστε να ανταπεξέρχεται το υψηλό path loss. Στην συγκεκριμένη έρευνα, γίνεται αντιστοίχιση του συγκεκριμένου προς διερεύνηση Ευρωπαϊκού συστήματος με το ATG σύστημα “CDMA2000 EVDO Rev A technology” της Αμερικάνικης εταιρείας GOGO, το οποίο λειτουργεί η Aircell στην Αμερική, στο φάσμα των 800 MHz αλλά με μικρότερα κανάλια εύρους $2 \times 1,5$ MHz.

- **Πρότυπο ETSI TR 101 599 (2012) [96]**

Αναφέρεται σε ένα σύστημα αέρος-εδάφους (ATG) για τα φάσματα συχνοτήτων **2400 – 2483.5 MHz** και **5855–5875 MHz**. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση **OFDM** και υλοποιεί κανάλια 2×10 MHz FDD ή 20 MHz TDD με συχνότητα φέροντος (carrier frequency) 5865 MHz. Στο συγκεκριμένο πρότυπο παρουσιάζονται αναλυτικά αρκετά στοιχεία των προδιαγραφών τόσο του Επίγειου Σταθμού Βάσης (GBS) όσο και του Σταθμού του Αεροσκάφους (AS).

Αναλυτικότερα, στο συγκεκριμένο σύστημα κάθε Επίγειος Σταθμός Βάσης (GBS) χρησιμοποιεί τέσσερις κεραιές (συστοιχίες) φασικής μετατόπισης (phased array) – μια για κάθε τεταρτημόριο – καθεμία από τις οποίες αποτελείται από τέσσερα κεραιοστοιχεία. Οι συγκεκριμένες κεραιές εφαρμόζουν προσαρμοστικό Beamforming (Adaptive Beamforming) και κάθε κεραία επιτρέπει την δημιουργία δυο δεσμών για την κάλυψη ενός τεταρτημρίου.

Επίγειος Σταθμός (GBS)				
Συνολικός Αριθμός Κεραιών (συστοιχίες) Σταθμού	Αριθμός Κεραιών (συστοιχίες) ανά Τεταρτημόριο	Κεραιοστοιχεία ανά κεραία	Δέσμες ανά Κεραία (συστοιχία)	Δέσμες ανά Σταθμό
4	1	4	2	8
4	1	8	4	16

Εικόνα 4.6 Προδιαγραφές κεραιών στο πρότυπο ETSI TR 101 599 (2012) [96] για τον Επίγειο Σταθμό (GS)

Συνολικά, ο Επίγειος Σταθμός Βάσης (GBS) παράγει οκτώ δέσμες που καλύπτουν τα τέσσερα τεταρτημόρια (τομείς) (Εικόνα 4.6). Ωστόσο, σε περίπτωση κεραιών με 8 στοιχεία, ο αριθμός των δεσμών μπορεί να ανέλθει σε 4 ανά τεταρτημόριο (για κάθε κεραία) ή σε 16 συνολικά για τον σταθμό (δηλαδή για τις τέσσερις κεραιές του σταθμού).

Ισχύς Εκπομπής:

Ισχύς Εκπομπής			
		Μέγιστη Ισχύς Εκπομπής (Maximum Transmit Power - Tx output) κάθε δέσμης (dBm)	EIRP (Ενεργή Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς) (dBm)
Επίγειος Σταθμός Βάσης (GBS)		25	45
Max Αριθμός Antenna arrays Επίγειου Σταθμού: 4	Max Αριθμός Δεσμών ανά Antenna Array: 4		
Σταθμός Αεροσκάφους (AS)		28	45

Εικόνα 4.7 Εκπομπή Ισχύος στο πρότυπο ETSI TR 101 599 (2012)
[96] για τον Επίγειο Σταθμό και τον Σταθμό Αεροσκάφους

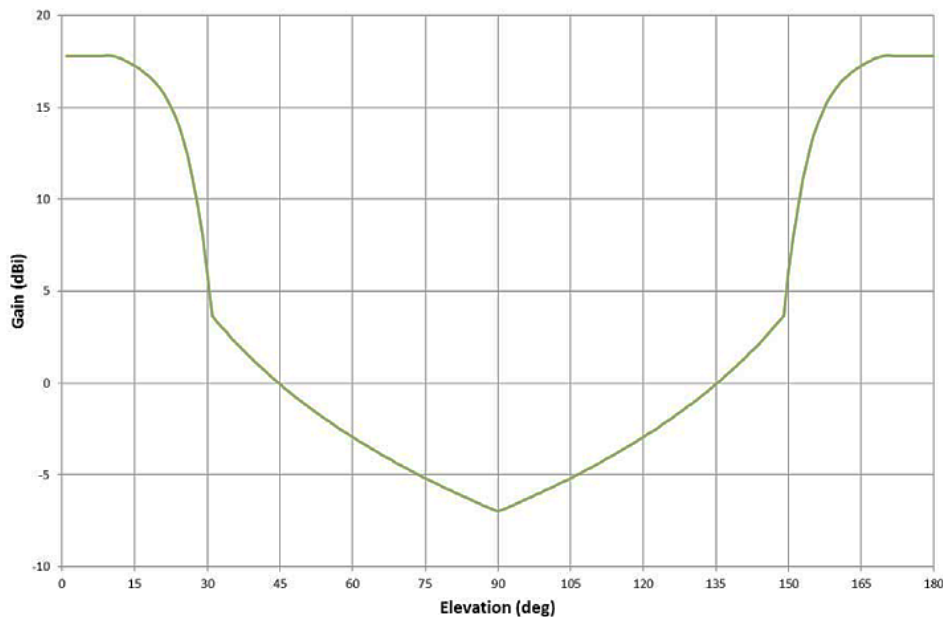
Αντίστοιχα, στην εικόνα 4.7 παρατηρούμε τις προδιαγραφές σχετικά με την **ισχύ εκπομπής** του Επίγειου Σταθμού Βάσης (GBS) και του αντίστοιχου Σταθμού του Αεροσκάφους (AS). Η τιμή της EIRP πρέπει να παραμένει στα 45 dBm τόσο για τον Επίγειο Σταθμό (GBS) όσο και για τον Σταθμό του Αεροσκάφους (AS). Στην περίπτωση του Επίγειου Σταθμού η ισχύς αναφέρεται σε μια εκπεμπόμενη δέσμη.

Ground station peak gain using 4 antenna array (dBi)	20
Ground station peak gain using 8 antenna array (dBi)	23
Aircraft peak gain using 4 antenna array (dBi)	10
Maximum Aircraft peak gain using > 4 antenna array (dBi)	17
NOTE: The Ground Station peak gains given above are for a single antenna array.	

Εικόνα 4.8 Κέρδος (peak gain) επίγειας κεραίας (GBS) &
σταθμού αεροσκάφους (AS) ETSI TR 101 599 (2012) [96]

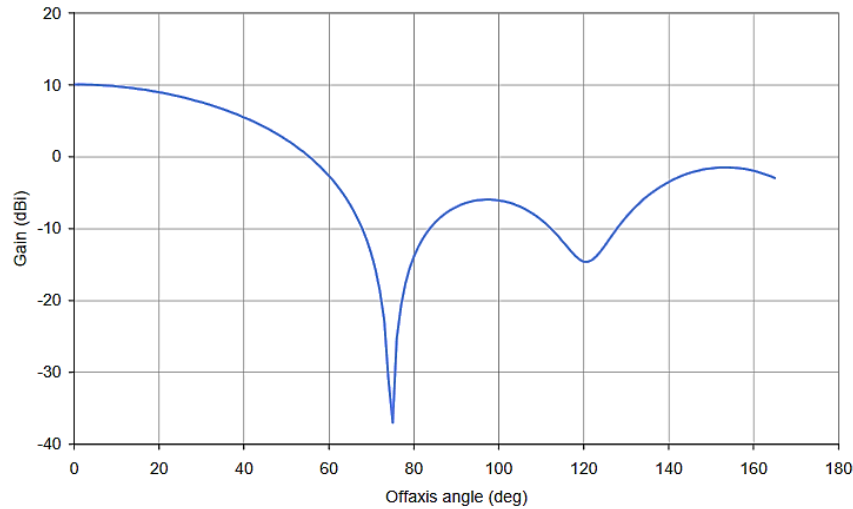
Επίσης, η τεχνική αναφορά δίνει πληροφορίες σχετικά με την υψηλότερη τιμή κέρδους (peak gain) της συστοιχίας κεραίας του επίγειου Σταθμού Βάσης (GBS) καθώς και του αεροσκάφους (AS) (Εικόνα 4.8) με χρήση τεσσάρων κεραιών και στις δυο περιπτώσεις.

Τελικά, οι εταιρίες *Cisco Systems Belgium*, *CSR*, *Broadcom Corporation*, *Research in Motion UK Limited*, *BIPT* και *Qualcomm UK Ltd*, δεν στήριζαν την χρήση του φάσματος **2,4 GHz** για χρήση DA2G, καθώς όπως αναφέρει το πρότυπο, η χρήση της βρίσκεται σε ένα μεγάλο αριθμό εμπορικών συσκευών που κάνουν χρήση του WiFi και Bluetooth και συνεπώς θα υπήρχαν προβλήματα παρεμβολών.

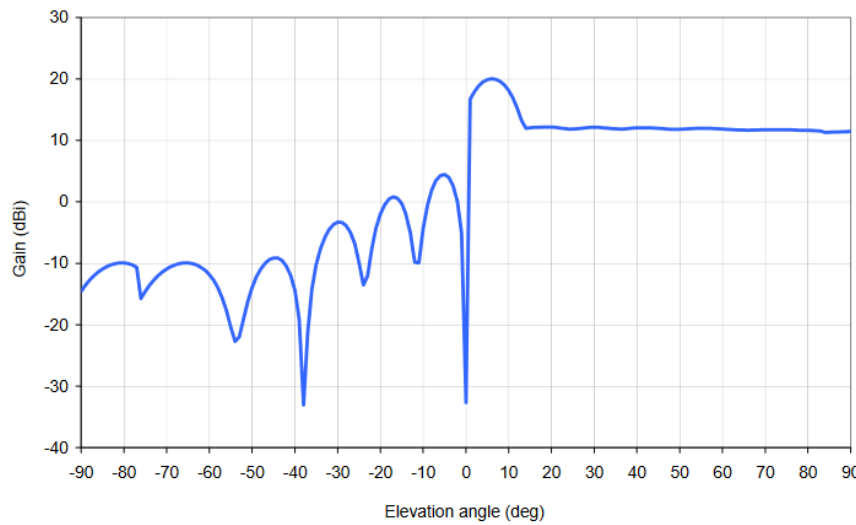


Εικόνα 4.9 Κέρδος Σταθμού Αεροσκάφους (AS) σε σχέση με την ανύψωση (Elevation) ETSI TR 101 599 (2012) [96]

Παρατηρούμε ότι η κεραία του σταθμού του αεροσκάφους παρουσιάζει μέγιστη τιμή 17,8 dBi για γωνίες ανύψωσης $0^0 \leq \Theta \leq 8^0$, ενώ όταν η γωνία αυξάνει $31^0 < \Theta \leq 90^0$, δηλαδή το αεροσκάφος πλησιάζει ή βρίσκεται πάνω από τον επίγειο σταθμό, το κέρδος μειώνεται κάτω από -5 dBi.



(α)

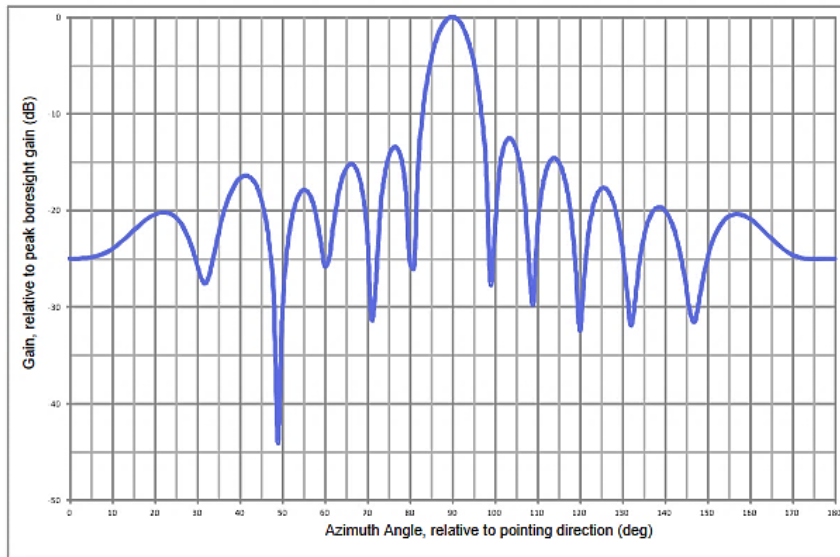


(β)

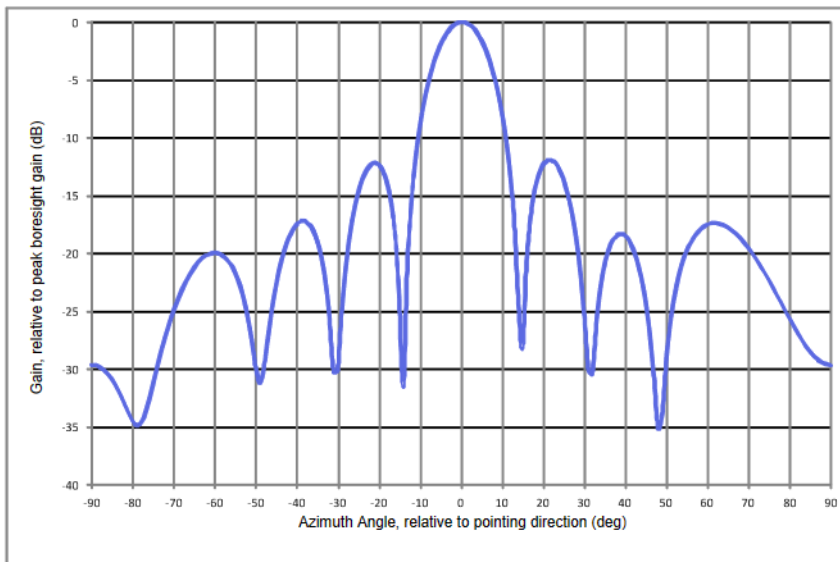
Εικόνα 4.10 Σύγκριση κέρδους κεραιών αεροσκάφους και σταθμού βάσης για antenna arrays με 4 στοιχεία: α) Elevation Σταθμού Αεροσκάφους (AS), β) Elevation Επίγειου Σταθμού (GS) [96]

Η δέσμη που παράγεται από τον σταθμό του αεροσκάφους ελέγχεται τόσο κατά το αζιμούθιο όσο και στην ανύψωση (elevation). Σχετικά με την ανύψωση (elevation), ο σταθμός του αεροσκάφους παρουσιάζει το μεγαλύτερο κέρδος (10 dBi) για γωνίες $0^\circ \leq \Theta \leq 20^\circ$ (Εικόνα 4.10α). Αντίστοιχα ο σταθμός εδάφους παρουσιάζει το μεγαλύτερο κέρδος 20dBi για γωνίες $3^\circ \leq \Theta \leq 10^\circ$, δηλαδή στο επίπεδο που στοχεύει το αεροσκάφος από

μακριά, ενώ παρουσιάζει σταθερό κέρδος αλλά πιο μειωμένο περίπου 12dBi για $\Theta \leq 14^0 - 90^0$ (Εικόνα 4.10β).



(α)



(β)

Εικόνα 4.11 Αζιμουθιακό (Οριζόντιο) μοτίβο α) Κεραίας σταθμού αεροσκάφους (AS) - συστοιχία (array) με 16 κεραίες β) Κεραίας σταθμού αεροσκάφους (AS) - συστοιχία (array) με 16 κεραίες [96]

Σχετικά με το αζιμούθιο, οι εικόνες 4.11α & β δείχνουν ότι οι κεραίες τόσο του σταθμού του αεροσκάφους όσο και του επίγειου σταθμού έχουν μέγιστο στο boresight (0^0) του

αζιμούθιου με στενό κύριο λοβό και χαμηλότερης ισχύος πλευρικούς λοβούς. Ο στενός λοβός της κεραίας του αεροσκάφους εξασφαλίζει ότι το μέγιστο της ισχύος κατευθύνεται προς τον επίγειο σταθμό που ακολουθεί.

- **Πρότυπο ETSI TR 103 108 (2013) [90]**

Γίνεται αναφορά σε σύστημα αέρος-εδάφους (ATG) βασισμένο σε τεχνολογία **3G UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System) η οποία βασίζεται στην διαμόρφωση CDMA. Υλοποιείται στο φάσμα συχνοτήτων **5855–5875 MHz** με αμφιδρόμηση τύπου TDD και εύρος καναλιού 5 MHz ή 10 MHz. Ερευνώνται διάφοροι τύποι κεραιών όπως πανκατευθυντικές (omni-directional), sector antennas, καθώς και κατευθυντικές (directional) με διαμόρφωση πλάτους δέσμης (Amplitude Beamforming).

Parameter	Unit	Value
Bandwidth	MHz	5 or 10
Transmitter Mean Output Power (GS)	dBm	38
Transmitter Mean Output Power (AS)	dBm	36
Transmitter feeder loss (GS)	dB	2
Transmitter feeder loss (AS)	dB	4
Transmitter Mean EIRP (GS)	dBm	60 (for directional antenna) 51 (for sector antenna) 43 (for omnidirectional antenna)
Transmitter Mean EIRP (AS)	dBm	39
Transmitter Duty Cycle Factor	dB	3
Minimum Transmit Power Control (GS) Range	dB	3
Minimum Transmit Power Control (AS) Range	dB	50

Εικόνα 4.12 DA2GC Χαρακτηριστικά Πομπού GBS & AS
(Transmitter Characteristics) ETSI TR 103 108 (2013) [90]

Στην εικόνα 4.12 παρατηρούμε τη μέση EIRP για τον επίγειο σταθμό βάσης (60 dBm ή 51 για κάθε κεραία τομέα) και 39 dBm για τον σταθμό του αεροσκάφους (AS), ανεξάρτητα από το αν γίνεται χρήση διαφορετικού εύρους συχνοτήτων (5 ή 10 MHz). Σύμφωνα με την συγκεκριμένη τεχνική αναφορά, η κεραία του αεροσκάφους τοποθετείται στην χαμηλότερη επιφάνεια της ατράκτου, κάτω από το διαμέρισμα φορτίου / αποσκευών (cargo compartment).

- **ETSI 303 316 V1.2.1 (2018) [108]**

Το συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρει έρευνα σχετική με το φάσμα συχνοτήτων **5855-5875 MHz** και το πλέον αποκλεισμένο φάσμα **1900-1920 MHz**. Περιλαμβάνει λεπτομέρειες σχετικά με τις προδιαγραφές των επίγειων σταθμών βάσης (GS) και των σταθμών του αεροσκάφους (AS).

Επίγειος Σταθμός Βάσης (GS):

- Διαθέτει τέσσερεις πομποδέκτες/κεραίες φασικής μετατόπιση (transceivers / phased array antenna assemblies) ώστε να καλύπτουν τον ορίζοντα σε όλα τα αζιμούθια
- Διαμόρφωσης Δέσμης (Beamforming) στο επίπεδο του σταθμού βάσης εδάφους (GS)
- Μπορεί να παρακολουθεί ένα αριθμό αεροσκαφών με τις κεραίες συστοιχιών

Επίγειος Σταθμός Βάσης (GS) και Σταθμός Αεροσκάφους (AS):

- Διαμόρφωση OFDM και Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Χρόνου TDD (Time Division Duplexing)
- Αυτόματο Έλεγχος Ισχύος της μετάδοσης για σταθερό επίπεδο σήματος στους δέκτες του σταθμού βάση εδάφους και αεροσκάφους
- Κεραίες Φασικής Μετατόπισης (phased array antennas) για δυναμική διαμόρφωση ακτίνας εκπομπή και καθοδήγηση της
- Χρήση Ειδικών Αλγορίθμων στην τεχνολογία Beamforming για τον εντοπισμό και κατάπνιξη παρεμβολών

Το σύστημα στο σταθμό αεροσκάφους (AS) διαθέτει τεχνολογία Detect-and-Avoid (DAA) για τις συχνότητες **5855 MHz - 5875 MHz** ώστε να αποφεύγεται η είσοδος του συστήματος επικοινωνίας αέρος-εδάφους (ATG) στο ευρυζωνικό δίκτυο της σταθερής ασύρματης τηλεφωνίας (Fixed Wireless Access). Συγκεκριμένα, γίνεται μελέτη της αποτελεσματικότητας του συστήματος Detect-and-Avoid (DAA).

Ισχύς Εκπομπής:

	EIRP	
	Επίγειος Σταθμός Βάσης (GS) (ανά δέσμη)	Σταθμός Αεροσκάφους (AS)
Συχνότητα		
1900 MHz - 1920 MHz	≤ 50 dBm/MHz	≤ 34 dBm/MHz
5850 MHz - 5875 MHz	≤ 32 dBm/MHz	Βλέπε παρακάτω πίνακα

Εικόνα 4.13 Μέγιστα προτεινόμενα επίπεδα EIRP σύμφωνα με το πρότυπο EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) της ETSI [108]

Στο συγκεκριμένο σύστημα ορίζεται η Ενεργή Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος EIRP (Effective/Equivalent Isotropic Radiated Power) (ή Φασματική Πυκνότητα - Spectral Density για τις συχνότητες προς μελέτη (Εικόνα 4.13), δηλαδή για το φάσμα συχνοτήτων **5850 - 5875 MHz**, καθώς και το πλέον αποκλεισμένο φάσμα συχνοτήτων 1900 - 1920 MHz.

Για τον Επίγειο Σταθμό Βάσης (GS) και για το φάσμα συχνοτήτων **1900 MHz - 1920 MHz** (Transmit - Receive) με ονομαστική συχνότητα **1910 MHz**, η ETSI [108] προτείνει το μέγιστο επίπεδο της Ενεργής Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος / Φασματικής Πυκνότητας EIRP να μην υπερβαίνει τα **50 dBm/MHz** για κάθε δέσμη εκπομπής από τις κεραιές. Αντίστοιχα, για το φάσμα συχνοτήτων **5850 - 5875 MHz** (Transmit - Receive) με ονομαστική κεντρική συχνότητα **5865 MHz**, και κανάλια 20 MHz δεν πρέπει να υπερβαίνει τα **32 dBm/MHz**.

Αναφορικά με τον Σταθμό του αεροσκάφους (AS) η τιμή της EIRP παρατηρούμε ότι προτείνεται να μην ξεπερνάει τα **34 dBm/MHz** για το φάσμα **1900 MHz - 1920 MHz**. Για το φάσμα συχνοτήτων **5850 - 5875 MHz** το επίπεδο της EIRP αναλύεται παρακάτω. Γενικότερα, η Ενεργή Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος για εύρος ζώνης (BW) 20 MHz, για μια δέσμη τόσο του επίγειου σταθμού βάσης (GS) αλλά και για την δέσμη του σταθμού του αεροσκάφους υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$EIRP(dBm/MHz) = P - G_r - (10 \log(BW)) + P_L \quad 4.1$$

όπου:

G_r: κέρδος σκόπευσης (boresight) της διαβαθμισμένης (calibrated) κεραίας λήψης σε dBi

P: μετρήσιμη τιμή ισχύος σε dBm

BW: εύρος συχνοτήτων του σήματος σε MHz (20 MHz)

P_L: FSPL σε dB ανάμεσα στην κεραία του επίγειου σταθμού βάσης (GS antenna) και την κεραία μέτρησης (ή την κεραία του σταθμού βάσης του αεροσκάφους - AS antenna - και την κεραία μέτρησης)

Elevation Angle	Average EIRP level (dBm/MHz)
< 2°	4,3
2° to 16°	24,3
> 16°	16,3

NOTE: These average EIRP levels represent the sum of the powers generated by all beams of the DA2GC Ground Station in any given direction.

Εικόνα 4.14 Επίπεδο EIRP του Σταθμού Βάσης (GBS) ATG σε σχέση με την ανύψωση της κεραίας - ETSI / EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) [108]

Επίσης, λαμβάνονται υπόψιν η σχέση της μέσης τιμής της ισχύος εκπομπής σε σχέση με την γωνία ανύψωσης τόσο για τον Επίγειο Σταθμό Βάσης όσο και για τον Σταθμό του Αεροσκάφους. Συγκεκριμένα, στην εικόνα 4.14 παρατηρούμαι ότι για τον Σταθμό Βάσης οι υψηλότερες τιμές Ενεργής Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος (EIRP) επιτυγχάνονται για ανύψωση 2° - 16°.

Elevation at ground (degrees)	Aircraft EIRP (dBm/MHz)	Note
0 to 5	29,5 - C	
5 to 27	29,5 - C to 27,0 - C	Straight line interpolation
27 to 28	27,0 - C to 19,5 - C	Straight line interpolation
28 to 90	19,5 - C to 13,0 - C	Straight line interpolation

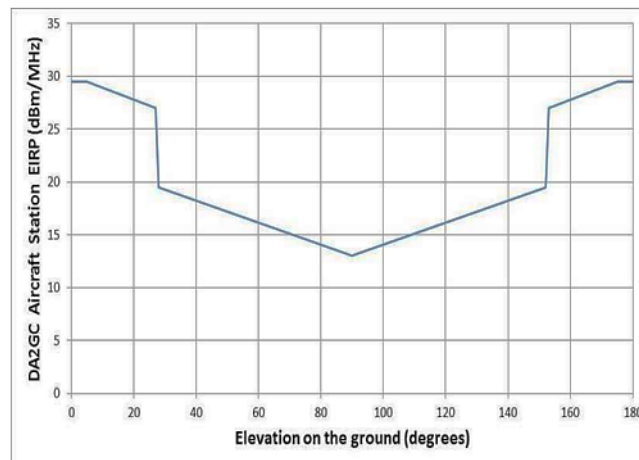
Where C = 20 x log(10 000 / h) and h = height above ground of the aircraft in metres.

Εικόνα 4.15 Επίπεδο EIRP του Σταθμού του Αεροσκάφους (AS) και η ανύψωση της κεραίας - ETSI / EN 303 316 V1.2.1 (2018-04) [108]

Στην εικόνα 4.15 βλέπουμε ότι για τον σταθμό του αεροσκάφους, οι υψηλότερες τιμές Ενεργής Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενης Ισχύος EIRP αντιστοιχούν σε ανύψωση 5° - 28° με μέγιστη τιμή EIRP στις 27° - 28° . Ωστόσο, φαίνεται ότι χρησιμοποιείται ένας συντελεστής C ο οποίος συνδέεται με το ύψος και περιγράφει την επίδρασή τους στο τελικό αποτέλεσμα EIRP.

$$C = 20 \log \frac{10000}{h}$$

Για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι για ύψος ίσο με 10.000m, έχουμε $C = 20 \log \frac{10000}{10000} = 0$ που σημαίνει ότι για ανύψωση 0-5 μοίρες έχουμε $EIRP = 29.5 - C = 29.5$ dBm/MHz. Δηλαδή, στο μέγιστο ύψος πτήσης και σε απόσταση από τον επίγειο σταθμό, αποκτά την μέγιστη τιμή της αφού ο σταθμός βάσης αεροσκάφους πρέπει να εκπέμπει μεγαλύτερη ισχύ για να καλύψει τις απώλειες. Αντίστοιχα, όταν το αεροσκάφος είναι πάνω από τον σταθμό σε γωνία 90° και σε υψόμετρο 10000m, το EIRP αποκτά την μικρότερη του τιμή αφού ισούται με $13 - C = 13 - 0 = 13$ dBm/MHz.



Εικόνα 4.16 Η μάσκα EIRP του Σταθμού του Αεροσκάφους (AS) σε σχέση με την ανύψωση της κεραίας για ύψος 10 km [108]

Στην εικόνα 4.16, παρατηρείται ότι για ύψος πτήσης 10 km όταν το αεροσκάφος βρίσκεται πάνω από τον σταθμό βάσης (δηλαδή $\Theta = 90^{\circ}$), απαιτείται η μικρότερη EIRP από την

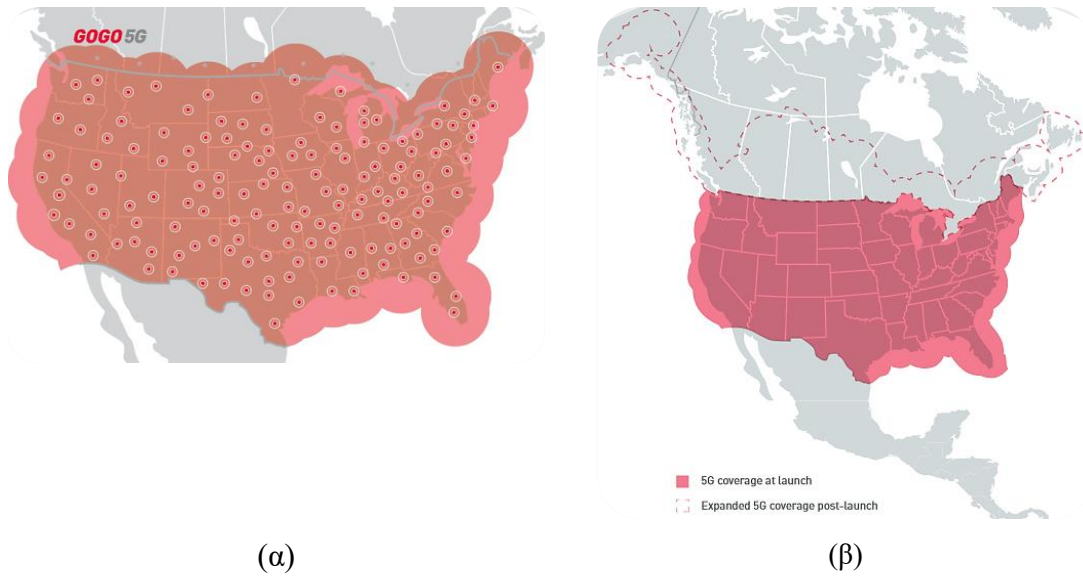
κεραία του αεροσκάφους, καθώς ο σταθμός αεροσκάφους και της επίγειας βάσης βρίσκονται πολύ κοντά κάθετα μεταξύ τους.

4.2.2 Δίκτυο Αέρος-Εδάφους (ATG) Gogo



Εικόνα 4.17 Κάλυψη του δικτύου Gogo για το σύστημα ATG (4G) – Το δίκτυο καλύπτει Ηνωμένες πολιτείες, Καναδά και μέρη της Αλάσκας [174]

Η Gogo, η Αμερικάνικη εταιρεία παροχής ευρυζωνικού Ίντερνετ σε αεροσκάφη, έχει αναπτύξει ένα δίκτυο αέρος-εδάφους (ATG), το οποίο όπως και το EAN βασίζεται στην τεχνολογία 4G. Διαθέτει 225 (+) επίγειους σταθμούς βάσης (GBS) εγκατεστημένους στην Αμερική, τον Καναδά και μέρη της Αλάσκας για την κάλυψη των περιοχών (Εικόνα 4.17) [170]. Το σύστημα έχει την δυνατότητα να παρέχει μετάδοση δεδομένων με ταχύτητα 9.8 Mbps. Το 2019, η Gogo ξεκίνησε την υλοποίηση του δικτύου ATG τεχνολογίας 5G μαζί με τους συνεργάτες της: την Cisco, την Airspan, και την FIRST RF [129].

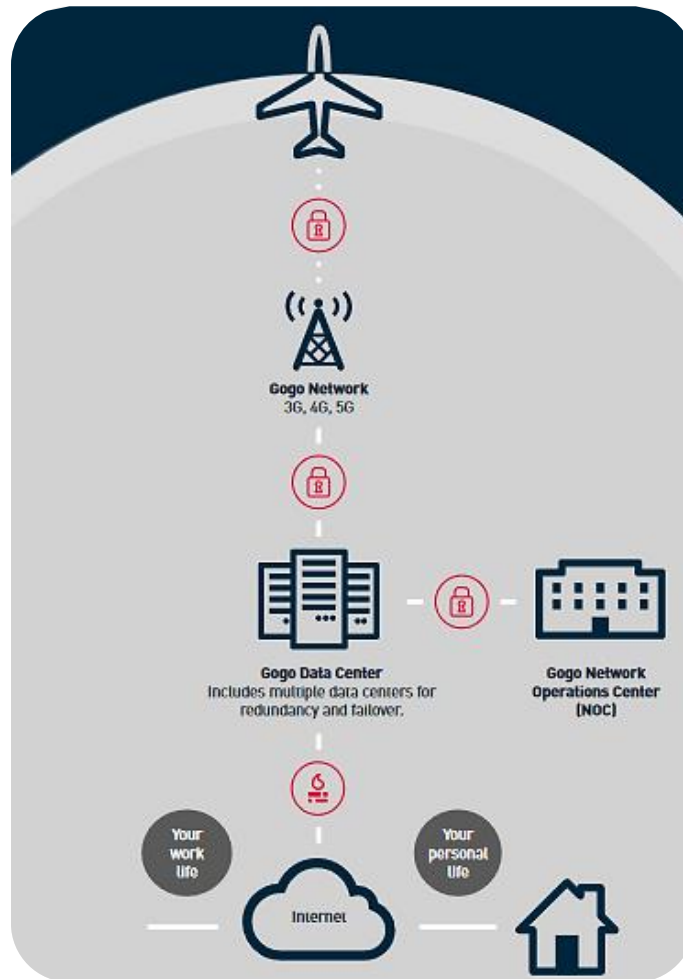


(α) Κάλυψη 5G με τη χρήση 150 επίγειων σταθμών βάσης ATG της Gogo [173], β) Μελλοντική κάλυψη 5G του Καναδά και τμημάτων της Αλάσκας [172]

Ήδη μέχρι το τέλος του 2021 ολοκλήρωσε 7 ειδικά κατασκευασμένους σταθμούς βάσης ATG 5G για την διεξαγωγή ερευνών και ελέγχων, ενώ ο στόχος ήταν να ολοκληρώσει την εγκατάσταση 150 συνολικά όμοιων σταθμών εντός του πρώτου εξαμήνου του 2022 [120]. Η εφαρμογή του 5G ATG δικτύου αναμενόταν να διαθέτει υψηλό throughput και πολύ χαμηλό latency, με ταχύτητες που θα φτάνουν τα 75-80 Mbps και μέσο όρο τα 25 Mbps. Πλέον, το 2023, η Gogo έχει ενεργοποιήσει και τους 150 επίγειους σταθμούς βάσης (ATG) [173] (Εικόνα 4.18α), ενώ αναμένεται εντός του ίδιου έτους να επεκτείνει την κάλυψη 5G στον Καναδά και την Αλάσκα (Εικόνα 4.18β). [111]

Ο κάθε συνεργάτης της Gogo εξειδικεύεται σε κάποιους τομείς του έργου. Συγκεκριμένα, για το 5G, η Gogo παρέχει τα συστήματα server AVANCE L5 αναβαθμισμένο με X3 (5G LRU - Line Replaceable Unit) και την υποδομή των επίγειων Σταθμών Βάσης (Ground Base Stations), η Cisco παρέχει την τεχνολογία Ultra 5G Cloud Core και Data Center Support, η Airspan παρέχει την τεχνολογία 5G RAN για τους σταθμούς βάσης εδάφους (Ground Base Stations) που περιλαμβάνει και την τεχνολογία MassiveMIMO Antenna

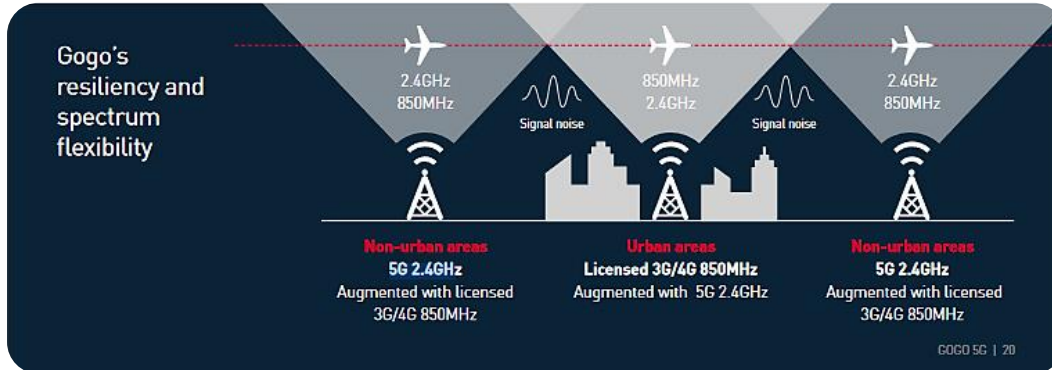
arrays και η FIRST RF παρέχει την ειδικά κατασκευασμένη αντένα 5G multiband τύπου blade για τα αεροσκάφη [170].



Εικόνα 4.19 Γραφική αναπαράσταση συστήματος παροχής Ίντερνετ αέρος-εδάφους της Gogo υποστηρίζει τεχνολογίες 3G, 4G και 5G [172]

Στην εικόνα 4.19 απεικονίζεται η υποδομή του δικτύου 5G αέρος-εδάφους (ATG) της Gogo. Όπως φαίνεται, οι επίγειοι σταθμοί βάσης ATG οι οποίοι αποτελούνται από συστήματα 3G, 4G και 5G, συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω των πολυάριθμων servers του Gogo Data center για την εξυπηρέτησή τους. Παράλληλα, το κέντρο Gogo Network

Operations Center (NOC) υποστηρίζει την επιτήρηση του δικτύου (monitoring and troubleshooting) εξασφαλίζοντας την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 4.20 Το φάσμα συχνοτήτων του δικτύου ATG 5G (2.4 GHz & 850 MHz)[168]

Το δίκτυο αέρος-εδάφους (ATG) της Gogo συνδυάζει συχνότητες από το πρώην δίκτυο 3G και το 4G στο φάσμα των **800 MHz (849-851 MHz / DL και 894-896 MHz / UL)** και στο φάσμα των **2.4 GHz (2.423 - 2.475 GHz)** (Εικόνα 4.20). Για τον εναέριο εξοπλισμό διαθέτει τρεις επιλογές σταθμών [121]: Gogo Avance L5 (βασισόμενη σε τεχνολογία 4G), Gogo Avance L5 σε συνδυασμό με το X3 (5G LRU - Line Replaceable Unit) για υποστήριξη 5G , Gogo Avance L3 (βασισόμενη σε τεχνολογία 3G) και τα παλαιότερα συστήματα ATG (5000/4000) (Εικόνα 3.9 - Ενότητα 3.4.2).



Type	13-inch, blade-style, multiband phased array antenna
Standard RF/coaxial interfaces that align with existing Gogo dual directional antenna interfaces	
Approximate dimensions	13" L x 8" H x 4" W
Antennas per aircraft	2

Εικόνα 4.21 Η κεραία ATG 5G (13" L =33.02cm) (2.4 GHz & 850 MHz) [168]

Το αεροσκάφος διαθέτει δυο κεραιές της FIRST RF ειδικά κατασκευασμένες για την άτρακτο του αεροσκάφους τύπου Blade (Εικόνα 4.21). Το σύστημα κεραιών είναι multiband και περιλαμβάνει [171]:

- 3 phased array apertures
- 2 omnidirectional antennas
- 1 cell antenna

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα νέα συστήματα της η Gogo χρησιμοποιεί τεχνολογία της Airspan στους επίγειους σταθμούς βάσης. Περιλαμβάνει σταθμούς βάσης τύπου macro της Airspan οι οποίοι χρησιμοποιούν το φάσμα συχνοτήτων κάτω από τα 6 GHz (Sub-6 GHz). Ουσιαστικά πρόκειται για σταθμούς eNodeB (LTE) βελτιστοποιημένους για δίκτυα ATG. Το σύστημα διαθέτει πλήρως εικονοποιημένες (virtualized) Κεντρικές Μονάδες (Centralized Unit) και Κατανεμημένες Μονάδες (Distributed Unit. Οι κεραιές διαθέτουν τεχνολογία massive MIMO. [169]

4.2.3 Δίκτυο Αέρος-Εδάφους (ATG) ZTE [81][85][89]

Το 2012, ξεκίνησε η δοκιμή στο φάσμα 1785–1805 MHz ενός συστήματος ATG στην Κίνα βασιζόμενο σε τεχνολογία CDMA με αμφιδρόμηση TDD [92]. Αργότερα το 2013, η εταιρεία ZTE πραγματοποίησε την πρώτη δοκιμή σχετικά με ένα κυψελωτό σύστημα παροχής Ίντερνετ σε αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας, με αμφιδρόμηση FDD (Frequency Division Duplex) και τεχνολογία LTE, το οποίο παρείχε ταχύτητα μεγαλύτερη από 12Mbps. Το 2014, η κατασκευή του πρώτου δικτύου αέρος-εδάφους (ATG) 4G LTE FDD είχε ολοκληρωθεί, προσφέροντας την δυνατότητα σύνδεσης στο ίντερνετ στους επιβάτες.

Η εταιρεία (ZTE) στο τέλος του 2021, μετά από έρευνα και δοκιμές, δημιούργησε ένα δίκτυο ATG τεχνολογίας 5G με εθνική κάλυψη. Ο Liu Weiwei, γενικός διευθυντής προϊόντων ATG της ZTE, αναφέρει ότι το δίκτυο υποστηρίζει ταχύτητες 150 Mbps/ 800 Mbps για Uplink/Downlink αντίστοιχα, με κύρια μπάντα την n79, δηλαδή τα 4.9 GHz.



Εικόνα 4.22 Το σύστημα 5G ATG της ZTE [81]

Επίσης, το νέο δίκτυο 5G ATG διαθέτει MassiveMIMO το οποίο αποτελείται από σταθμούς gNB κάθε σταθμός βάσης διαθέτει κάλυψη σε ακτίνα 300 km, τεχνολογία προσαρμογής του χρόνου εκπομπής PRACH (Physical Random Access Channel) καθώς και τεχνολογία HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) για τα Uplink/Downlink. Παράλληλα, ο εναέριος εξοπλισμός (CPE -Customer Premise Equipment) (Εικόνα 4.22) περιλαμβάνει όπως και σε άλλες περιπτώσεις έναν server, μια πανκατευθυντική κεραία τύπου Blade και Wi-Fi access points.

4.2.4 Ιαπωνικό Δίκτυο Αέρος-Εδάφους (ATG)

Το 2012 ξεκίνησαν δοκιμές στην Ιαπωνία για ένα δίκτυο ATG το οποίο λειτουργούσε στα χιλιοστομετρικά κύματα 40 GHz με αμφιδρόμηση FDD, όπου επιτεύχθηκαν ταχύτητες 141.7 Mbps για διαμόρφωση QPSK. Το 2017, έγινε δοκιμή ενός άλλου συστήματος ATG βασισμένο σε τεχνολογία LTE με αμφιδρόμηση TDD, στο φάσμα των VHF, όπου επιτεύχθηκαν ταχύτητες μετάδοσης στο DL 27 Mbps.

4.3 Μελέτη Απόδοσης Συστημάτων ATG βασισμένα σε 5G NR [92]

Έρευνα από τους Lin et al [92] με τη μορφή εξομοίωσης, σχετικά με την απόδοση (το throughput) ενός σύγχρονου συστήματος ATG βασισμένο σε τεχνολογία 5G NR, στη χαμηλή (Low band), στη μεσαία (Mid band) και υψηλή μπάντα (High band) για την παροχή Ίντερνετ έχει δείξει την ανάγκη για βελτιώσεις. Η έρευνα έγινε υπό τη μορφή εξομοίωσης και εντοπίζει τις δυνατότητες του συστήματος ATG NR 5G και παράλληλα βελτιώσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Η εξομοίωση εστίασε περισσότερο στην λειτουργία των επίγειων σταθμών βάσης ATG. Χρησιμοποιήθηκαν 19 σταθμών βάσης (GB) με διαφορετικές παραμέτρους για τις συστοιχίες κεραιών των σταθμών βάσης σχετικά με τη δυνατότητα τους για Beamforming, δηλαδή:

$(M, N, P) = (2, 2, 2)$ για τις χαμηλές συχνότητες

$(M, N, P) = (4, 4, 2)$ για τις μεσαίες συχνότητες

$(M, N, P) = (8, 8, 2)$ για τις υψηλές συχνότητες

όπου M = ο αριθμός των γραμμών της συστοιχίας (Rows), N = ο αριθμός των στηλών (Columns) και P = ο αριθμός των διαθέσιμων πολικωτήτων (Polarizations).

Οι συστοιχίες βρισκόταν σε ύψος 35 μέτρων με την επιφάνεια τους παράλληλα με τον ουρανό. Το αεροσκάφος στην εξομοίωση βρισκόταν σε ύψος 12 km. Η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης ήταν 80 W και αυτή του σταθμού του αεροσκάφους ήταν 0.2 W.

Λόγω της υψηλής ταχύτητας του αεροσκάφους (1200 km/h) είναι γνωστό ότι το φαινόμενο Doppler μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση συχνότητας σε μια συσκευή στο Downlink, η οποία φτάνει τα ± 0.78 kHz, ± 3.89 kHz, και ± 31.08 kHz σε συχνότητες 700 MHz, 3.5 GHz, και 28 GHz αντίστοιχα. Σύμφωνα με την έρευνα, η αντίστοιχη μετατόπιση στο Uplink είναι διπλάσια.

4.3.1 Δίκτυο ATG με τεχνολογία 5G NR στη χαμηλή μπάντα (Low band)

Στη μεσαία μπάντα (low band) χρησιμοποιήθηκαν σήμα 700 MHz με δύο κανάλια 2×10 MHz FDD. Οι επίγειοι σταθμοί ATG διαθέταν κεραιές με παραμέτρους $(M, N, P) = (2, 2,$

2), όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα (4.3). Εξετάστηκε το throughput για με βάση το υψηλό φορτίο στο Downlink – συνήθως το downlink είναι που υποφέρει από υψηλό φόρτο – και για χαμηλό φορτίο στο Uplink. Θεωρήθηκε ISD (Inter-site distance) = 80 km. Παρατηρήθηκαν τιμές throughput (για διάφορα επίπεδα χρήσης πηγών - RU (resource utilization) τα οποία ήταν παρεμφερή με τα επίπεδα του δικτύου LTE του Ευρωπαϊκού δικτύου EAN (75 Mbps στο downlink και 20 Mbps στο uplink).

4.3.2 Δίκτυο ATG με τεχνολογία 5G NR στη μεσαία και χαμηλή μπάντα (Mid & Low band)

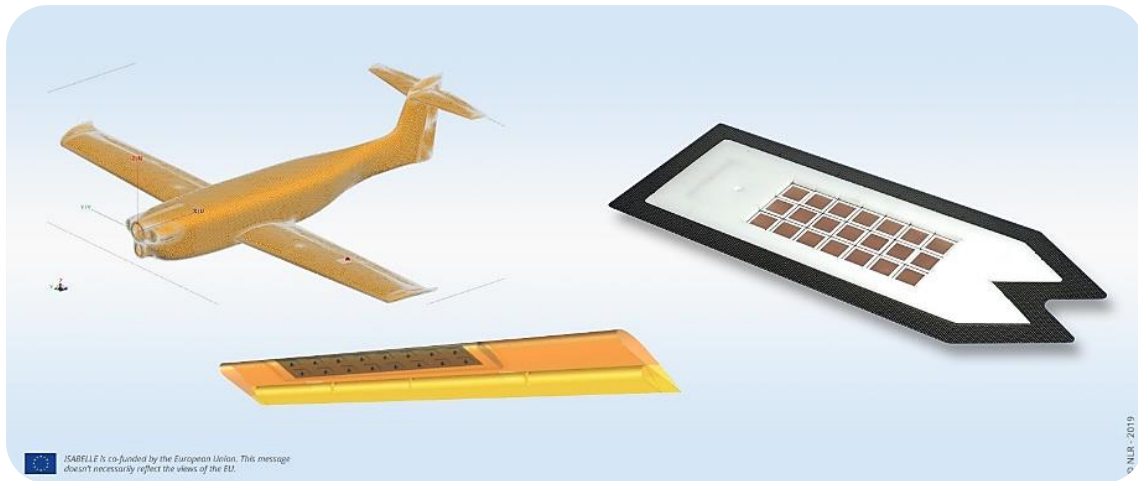
Στη μεσαία μπάντα (mid band) χρησιμοποιήθηκε σήμα 3.5 GHz με δύο κανάλια 2×100 MHz FDD. Οι επίγειοι σταθμοί ATG διαθέτουν κεραιές με παραμέτρους (M, N, P) = (2, 2, 2), όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα (4.3). Εξετάστηκε το throughput για με βάση το υψηλό φορτίο στο Downlink και για χαμηλό φορτίο στο Uplink. Θεωρήθηκε ISD (Inter-site distance) = 80 km. Παρατηρήθηκαν τιμές throughput (για διάφορα επίπεδα χρήσης πηγών - RU (resource utilization) πολύ υψηλότερες από την προηγούμενη περίπτωση και συγκεκριμένα για το downlink και το uplink ήταν 454.9 Mbps και 197.5 Mbps αντίστοιχα.

Αντίστοιχα στις υψηλές συχνότητες χρησιμοποιήθηκε φέρον 28 GHz με 2×400 MHz FDD κανάλια. Οι επίγειοι σταθμοί ATG διαθέτουν κεραιές με παραμέτρους (M, N, P) = (8, 8, 2). Εξετάστηκε το throughput για με βάση το υψηλό φορτίο στο Downlink και για χαμηλό φορτίο στο Uplink. Θεωρώντας ISD (Inter-site distance) = 80 km, παρατηρήθηκαν τιμές throughput (για διάφορα επίπεδα χρήσης πηγών - RU (resource utilization) κατάλληλες για ένα σύστημα ATGικανό να παρέχει ταχύτητες της τάξης Gbps τουλάχιστον στο downlink. Συγκεκριμένα, οι τιμές του throughput ήταν 1.5 Gbps και 563.9 Mbps για το downlink και το uplink, αντίστοιχα.

4.4 Σύγχρονη Έρευνα Συστημάτων Beamforming για Αεροσκάφη [135][141][142]

Η εξέλιξη κεραιών Beamforming για την επιφάνεια του αεροσκάφους αποτελεί πρόκληση για την ασύρματη σύνδεση ενός αεροσκάφους της πολιτικής αεροπορίας στο διαδίκτυο καθώς πρέπει να διαθέτουν αεροδυναμική και να επιδρούν λιγότερο στην κατανάλωση καυσίμου. Παράλληλα, πρέπει να καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο και να διαθέτουν αυξημένη λειτουργικότητα και απόδοση τόσο στο επίπεδο της διαμόρφωσης και κατευθυντικότητας της δέσμης (Beamforming) όσο και στο επίπεδο θερμομηχανικής.

Ωστόσο, το πλήθος της νέας έρευνας που διεξάγεται στον τομέα της ανάπτυξης κεραιών Beamforming για αεροσκάφη, αφορά συνήθως στην δορυφορική σύνδεση drones και Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (UAV) καθώς και στην ευελιξία τους ως προς το σημείο τοποθέτησης τους πάνω στο αεροσκάφος.



Εικόνα 4.23 Κεραία ενσωματωμένη στα φτερά ενός drone (Isabelle project) [135]

Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ISABELLE (ISABELLE Project), μελετάει την δυνατότητα ενσωμάτωσης κεραιών Beamforming στα φτερά του αεροσκάφους (Εικόνα 4.23). Σε αυτή τη φάση, η κεραία τοποθετείται σε ένα drone με σκοπό τη μελέτη και την εξέλιξη της

τεχνολογίας για μεγαλύτερα αεροσκάφη. Ένα άλλο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα, το ACASIAS (ACASIAS Project), ερευνά την δυνατότητα ενσωμάτωσης της κεραίας Beamforming στην άτρακτο του αεροσκάφους. Ως εκ τούτου, μελετάται η δυνατότητα χρήσης τμημάτων της ατράκτου ως κεραίες τύπου Beamforming.

Αναφορές στην ενσωμάτωση κεραιών Beamforming στα φτερά αεροσκάφους γίνονται επίσης σε παλαιότερες δημοσιεύσεις. Οι Ibrahim *et al.* [136] αναφέρουν την ενσωμάτωση επίπεδης κεραίας Beamforming στα φτερά UAV, ενώ οι Patrovsky και Sekora [137] κάνουν αναφορά στην ενσωμάτωση σύμμορφης κεραίας δακτυλιοειδούς τύπου (annular slot antenna) σε UAV.

Το εργαστήριο της NASA Glenn Research Center έχει δημιουργήσει την ειδική κεραία “Conformal, Lightweight, Aerogel-Based Antenna” για την δορυφορική σύνδεση ενός drone, η οποία χρησιμοποιεί το aerogel. Πρόκειται για ένα νέο υλικό χαμηλής πυκνότητας κατασκευασμένο από ένα πολυμερές, το πολυϊμίδιο (Polyimide Aerogel), το οποίο χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό υπόστρωμα στην κατασκευή κεραιών προσαρμοζόμενης φάσης (phased array).



Εικόνα 4.24 Διάφοροι τύποι polyimide aerogel που ανέπτυξε το εργαστήριο της NASA [142]

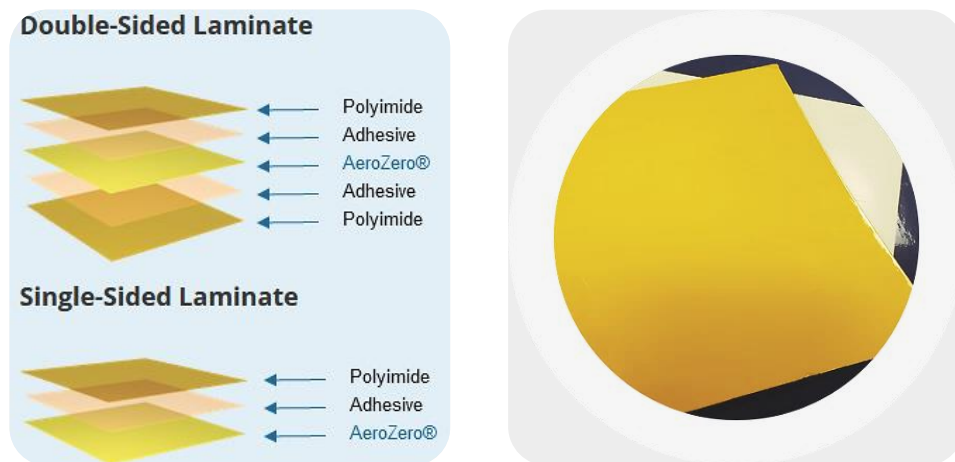
Το συγκεκριμένο υλικό (Εικόνα 4.24) διαθέτει ιδιότητες όπως ελαστικότητα, ευλυγισία, χαμηλό βάρος και χαμηλή διηλεκτρική σταθερά για την αποτροπή τω παρεμβολών των σημάτων των κεραιοστοιχείων και ως αποτέλεσμα, το εύρος και το κέρδος της κεραίας αυξάνεται. Τα πλεονεκτήματα αυτού του υλικού θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην

αντικατάσταση όλων των κεραιών του αεροσκάφους με κεραιές που διαθέτουν υπόστρωμα από πολυϊμίδιο (Polyimide Aerogel).

Έρευνα διεξάγεται επίσης στο πεδίο χρήσης οπτικών chips (Optical Beam Forming Network - OBFN) αντί της χρήσης των RF ηλεκτρονικών, για τον έλεγχο των σημάτων των κεραιών. Υπάρχει ελπίδα ότι αυτή η νέα τεχνολογία των οπτικών chips θα μειώσει το κόστος κατασκευής των συστημάτων ελέγχου κεραιών και θα αυξήσει την απόδοσή τους. Παράλληλα, το Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα SANDRA (SANDRA project) εξετάζει την οπτική διαμόρφωση δέσμης στην μπάντα Ku-band (optical beam forming).

4.4.1 Διηλεκτρικό υπόστρωμα PI nano-aerogel [150][151][152]

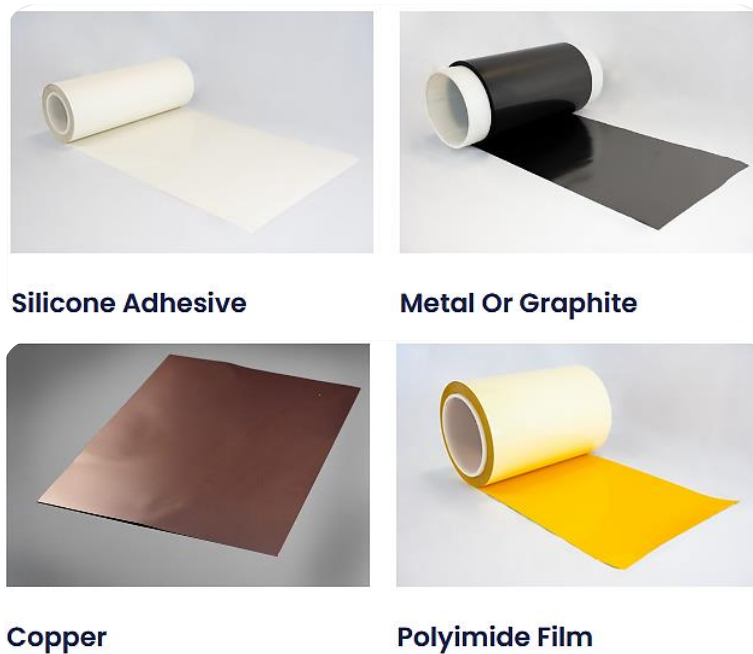
Η πιο συνηθισμένη πρακτική στην κατασκευή υποστρώματος στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων PCB (Printed Circuits Board) είναι η χρήση fiberglass. Ουσιαστικά, πρόκειται συνήθως για εποξικά φύλλα από fiberglass (fiberglass reinforced epoxy-laminated sheets), τα οποία είναι γνωστά και ως FR-4 (Flame Retardant). Γενικότερα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα σε κεραιές διαθέτουν διηλεκτρική σταθερά $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ [156]. Για παράδειγμα, το υλικό Teflon διαθέτει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 2.1 \approx 2.2$, ενώ το υλικό FR-4 διαθέτει $\epsilon_r = 4.4$.



Εικόνα 4.25 Υποστρώματα Κεραιών (Radome & Antenna Substrates): α) Μονής όψης β) Διπλής όψης - Blueshift [152]

Ωστόσο, η έρευνα έχει οδηγήσει στην κατασκευή υποστρωμάτων με την χρήση νέων υλικών όπως του aerogel (Ενότητα 4.4). Συγκεκριμένα, έχουν κατασκευαστεί νέα υποστρώματα πολυμερούς αεροτζέλ (polymer aerogel substrate), και πιο συγκεκριμένα πολυϊμίδια (PI - Polyimide Nano-aerogel) (Εικόνα 4.25). Πρόκειται για στερεά υλικά νανοδομικής πορώδους κατασκευής (nanostructured porous materials), δηλαδή διαθέτουν πόρους νανομετρικών διαστάσεων, τα οποία έχουν χαμηλή πυκνότητα. Η πυκνότητα του είναι της τάξης 0.27g/cm^3 καθώς αποτελείται κατά 80-85% από αέρα. Κυριολεκτικά, η χαμηλή διηλεκτρική του σταθερά $Dk = 1.45$ είναι μόλις κατά 0.45 υψηλότερη από αυτήν που διαθέτει ο αέρας.

Η χαμηλή διηλεκτρική σταθερά όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, εξασφαλίζει ότι τα σήματα από τα στοιχεία της συστοιχίας δεν θα παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Αυτό έχει σαν συνέπεια την αύξηση του εύρους και του κέρδους της κεραίας. Αυτές οι κατασκευαστικές ιδιότητες, προσδίδουν σε αυτά τα υποστρώματα υψηλότερες αντοχές τόσο σε χαμηλές όσο και υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να βρίσκουν εφαρμογή σε απαιτητικές συνθήκες όπως στην εξερεύνηση του διαστήματος.



Εικόνα 4.26 AeroZero® Polyimide Aerogel Laminates [164]

Η συγκεκριμένη τεχνολογία υποστρώματος χρησιμοποιείται από την εταιρεία Blueshift για την κατασκευή νέου τύπου (φύλλων) τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB), τα AeroZero® Polyimide Aerogel Laminates (Εικόνα 4.26). Τα συγκεκριμένα υποστρώματα έχουν διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες τα κάνουν κατάλληλα για εξειδικευμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, το φιλμ από πολυϊμίδιο (Polyimide Film) χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα για την κατασκευή κεραιών ενώ το επικαλυμμένο με χαλκό (Copper) υλικό χρησιμοποιείται στις τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT), σε τυπωμένα κυκλώματα που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και προσαρμοστικότητα.

Product Platform AeroZero® (AZ)	Single or Double Sided	Substrate	Adhesive	Substrate Thickness	Adhesive Thickness	Total Laminate Thickness
AZ + Silicone PSA	Single	None	Silicone PSA	N/A	1 Mil 25 μm	7.5 Mil 190 μm
AZ + Silicone PSA + AZ	Double	None	Silicone PSA	N/A	1 Mil 25 μm	15 Mil 380 μm
AZ + Metal	Single	Aluminum	Silicone PSA	2 Mil 50 μm	1 Mil 25 μm	9.5 Mil 240 μm
AZ + Graphite	Single	Graphite	Silicone PSA	2 Mil 50 μm	1 Mil 25 μm	9.5 Mil 240 μm
AZ + Copper	Double	Copper	Proprietary	0.7 Mil 18 μm	1 Mil 25 μm	9.9 Mil 250 μm
AZ + Polyimide	Single	Polyimide	FEP	1 Mil 25 μm	1 Mil 25 μm	8.5 Mil 220 μm
AZ + Polyimide	Double	Polyimide	FEP	1 Mil 25 μm	1 Mil 25 μm	10.5 Mil 270 μm

Εικόνα 4.27 Κατασκευαστικές ιδιότητες τυπωμένων φύλλων
AeroZero® Laminates - Blueshift [164]

Στην εικόνα 4.27 παρατηρήσουμε τις ιδιότητες των παραπάνω αναφερόμενων φύλλων AeroZero® με βάση το Aerogel. Ανάλογα με τον τύπο, το συνολικό πάχος του τυπωμένου φύλλου κυμαίνεται από 190 μm έως 270 μm, λόγω του εξαιρετικά λεπτού πάχους του υποστρώματος με τιμές πάχους 18 μm, 25 μm και 50 μm.

4.5 Συμπεράσματα

Δίκτυο	Κεντρική Συχνότητα	DL/UL	Τύπος Δικτύου	Ταχύτητα
GOGO	800 MHz	DL: 849-851 MHz UL: 894-896 MHz	4G LTE	Peak: 75-80 Mbps (Μέσος Όρος: 25 Mbps)
	2.4 GHz	DL: 2.423 GHz UL: 2.475 GHz	5G Business Aviation	
GOGO AVANCE L5	5 GHz & 2.4 GHz	-	4G	-
EAN (2021)	2100 MHz (n65)	DL: 2110-2200 MHz UL: 1920-2010 MHz	4G LTE	DL: 75 Mbps UL: 20 Mbps (peak: 75Mbps / cell)
ZTE (2021)	4.9 GHz (n79)	-	5G	DL: 80 Mbps UL: 150 Mbps

Πίνακας 4.1

Ξεκινώντας με την διαθέσιμη τεχνολογία σε κάθε δίκτυο, παρατηρούμε (πίνακας 4.1) ότι τα δίκτυα GOGO και ZTE διαθέτουν πλέον τεχνολογία 5G ενώ το Ευρωπαϊκό δίκτυο διαθέτει ακόμα τεχνολογία LTE 4G. Ωστόσο, το Αμερικανικό GOGO διατηρεί προηγούμενες τεχνολογίες όπως 3G και 4G (Avance L3, Avance L5), ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί τα 800 MHz από το φάσμα του 4G για να ενισχύσει τα 2.4 GHz του 5G.

Τα δίκτυα παρουσιάζουν διαφορές επίσης στον τομέα της ταχύτητας. Το δίκτυο με την υψηλότερη ταχύτητα είναι αυτό το Κινεζικό ZTE με ταχύτητα που φτάνει τα 150 Mbps / UL και παρόμοια με αυτήν των άλλων δυο δικτύων στην καθοδική ζεύξη, δηλαδή τα 80 Mbps / DL. Αντίστοιχα, το Ευρωπαϊκό EAN και το Αμερικανικό Gogo βρίσκονται πολύ κοντά με μέγιστη ταχύτητα (peak) 75-80 Mbps.

Εξετάζοντας την συχνότητα λειτουργίας των δικτύων, παρατηρούμε ότι τα δίκτυα 5G Gogo και ZTE χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες. Το Gogo χρησιμοποιεί χαμηλότερη συχνότητα στα 2.4 GHz ενώ το ZTE την υψηλότερη 4.9 GHz. Παράλληλα, το δίκτυο Gogo χρησιμοποιεί επιπλέον την συχνότητα 800 MHz. Το ευρωπαϊκό δίκτυο EAN χρησιμοποιεί την συχνότητα 2.1 GHz.

Δίκτυο	Τύπος Δικτύου	Αριθμός Επίγειων Σταθμών Βάσης	Κάλυψη (ISD / Inter-Site Distance)
GOGO	4G LTE	225 (+)	-
	5G Business Aviation (2023)	150 5G	-
EAN (2018)	4G LTE	300 LTE + 8 LTE (πλωτές πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου & φυσικού αερίου / υπεράκτιες ανεμογεννήτριες [166])	150 km [3]
ZTE (2021)	5G	<1000 NR / gNB	300 km

Πίνακας 4.2

Σχετικά με τον αριθμό επίγειων σταθμών που χρησιμοποιεί το κάθε δίκτυο, παρατηρούμε (πίνακας 4.2) ότι το Κινεζικό ZTE διαθέτει τους περισσότερους Επίγειους σταθμούς βάσης (περισσότεροι από 1000) οι οποίοι είναι τύπου gNB (5G) και ανήκουν στο New Radio.

Αντίστοιχα, το δίκτυο Gogo διαθέτει 150 σταθμούς 5G (MassiveMIMO) ο αριθμός των οποίων θα αυξηθεί καθώς αναμένεται κάλυψη 5G στον Καναδά και την Αλάσκα. Το ευρωπαϊκό δίκτυο EAN διαθέτει 300 + 8 επίγειους σταθμούς τεχνολογίας LTE. Σχετικά με την κάλυψη (ISD / Inter-Site Distance), το ZTE διαθέτει κάλυψη 300 Km, το EAN 150 km ενώ το Gogo δεν αναφέρει.

4.5 Μελλοντική Ερευνα

Η εξέλιξη των συστημάτων ATG έδωσε τη δυνατότητα στις αεροπορικές εταιρείες να κάνουν ακόμα ένα βήμα στην ψηφιοποίηση, καθώς πλέον τόσο τα αεροσκάφη όσο και οι επιβάτες αποκτούν πρόσβαση στο Ίντερνετ κατά την πτήση. Η τεχνολογία ATG έχει αναβαθμιστεί σε πολλές περιπτώσεις σε 5G αλλά κάποια δίκτυα ακόμα βασίζονται εν μέρει στην προηγούμενη τεχνολογία 4G LTE, όπως το δίκτυο ATG της EAN.

Επίσης οι κεραιές των επίγειων σταθμών έχουν αναβαθμιστεί ώστε να αποτελούν συστοιχίες που να μπορούν να εξυπηρετούν το νέο φάσμα συχνοτήτων που έχει πλέον εισαχθεί στο δίκτυο 5G. Ενώ πρόκειται για μεγάλες συστοιχίες κεραιών (phased arrays), η αντίστοιχη του σταθμού του αεροσκάφους παραμένει πανκατευθυντικού τύπου καθώς θεωρείται ότι διαθέτει υψηλότερες δυνατότητες λήψης σε σχέση με άλλους τύπους κάτω από συνθήκες πτήσης. Ωστόσο, διαθέτει λιγότερες δυνατότητες σε επίπεδο Beamforming σε σχέση με τις επίπεδες συστοιχίες των επίγειων σταθμών βάσης. Η ανάπτυξη μια ειδικής συστοιχίας κεραιών επίπεδου τύπου για τον σταθμό του αεροσκάφους αποτελεί πρόκληση και συνεπώς έναν σημαντικό τομέα έρευνας για βελτίωση της δυνατότητας Beamforming από πλευράς του σταθμού του αεροσκάφους.

Μια τέτοια κατεύθυνση έρευνας βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη όπως είδαμε στην ενότητα 4.4 και χρίζει περαιτέρω ανάπτυξης, όπου συστοιχίες Beamforming θα είναι ενσωματωμένες είτε στα φτερά του αεροσκάφους είτε στην άτρακτο, όπως ήδη συμβαίνει με τα Ευρωπαϊκά προγράμματα ISABELLE και ACASIAS. Μιας και ήδη έχει αναπτυχθεί από το NASA Glenn Research Center συστοιχία Beamforming για την δορυφορική σύνδεση drone με βάση το aerogel (πολυϊμίδιο -Polyimide Aerogel), θα ήταν πολύ πιο ενδιαφέρουσα η

ενσωμάτωση του νέου υλικού Aerogel στην ανάπτυξη των παραπάνω συστοιχιών Beamforming για αεροσκάφη σε επίπεδο Air-To-Ground.

Ένας άλλος τομέας έρευνας, όπως αναφέρουν οι Lin et al [92], αποτελεί η περίπτωση παρεμβολής των δεσμών Beamforming ανάμεσα τους σε περίπτωση διασταύρωσης τους. Η κίνηση αεροσκαφών στον ουρανό αυξάνει με ραγδαίους ρυθμούς. Πολλές φορές η πυκνότητα των αεροσκαφών σε μια εναέρια περιοχή αυξάνει σημαντικά ώστε πολλά αεροσκάφη παρευρίσκονται στην ίδια εγγύς περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει η πιθανότητα παρεμβολών που προκύπτει από την διασταύρωση δεσμών Beamforming. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα αλλά και στην αποσυμφόρηση των δικτύων ATG θα αποτελούσε η ανάπτυξη των αεροναυτικών δικτύων AANET (Aeronautical Ad-hoc Networks) όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.3.

Βιβλιογραφία

- [1] “The European Aviation Network’s 5G Evolution.” European Aviation Network (EAN). Διαθέσιμο στο: <https://www.europeanaviationnetwork.com/en/news/european-aviation-network-5g-evolution.html> (Πρόσβαση: 04 Νοεμβρίου, 2022)
- [2] “European Aviation Network”. Inmarsat. Διαθέσιμο στο: <https://www.inmarsat.com/en/solutions-services/aviation/services/european-aviation-network.html> (Πρόσβαση: 04 Νοεμβρίου, 2022)
- [3] “Network Completed: Ean ready to take off!” Deutsche Telekom AG. EAN-Media. Διαθέσιμο στο: <https://inflight.telekom.net/ean> (Πρόσβαση: 04 Νοεμβρίου, 2022)
- [4] CEPT ECC Decision (15)03. (2015). “The harmonised use of broadband Direct Air-to-Ground Communications (DA2GC) systems in the frequency band 5855-5875 MHz”, <https://docdb.cept.org/document/446> (Πρόσβαση: 04 Νοεμβρίου, 2022)
- [5] CEPT ECC Decision (18)(01). (06 July, 2018). “ECC Decision on the withdrawal of ECC Decision (15)02 on ‘The harmonised use of broadband Direct Air-to-Ground Communications (DA2GC) systems in the frequency band 1900-1920 MHz.’ ” Διαθέσιμο στο: <https://docdb.cept.org/search/?searchString=DA2GC> (Πρόσβαση: 07 Νοεμβρίου, 2022)
- [6] S. Howard. “Everything You Need to Know About Gogo Inflight Internet.” Upgraded Points. Διαθέσιμο στο: <https://upgradedpoints.com/travel/gogo-inflight-internet/> (Πρόσβαση: 05 Ιανουαρίου, 2023)
- [7] E. Mazareanu. “Number of scheduled passengers boarded by the global airline industry from 2004 to 2022.” Statista. Διαθέσιμο στο:

- <https://www.statista.com/statistics/564717/airline-industry-passenger-traffic-globally/> (Πρόσβαση: 05 Ιανουαρίου, 2023)
- [8] “Passenger Confidence Tracker 2021”. Inmarsat. Διαθέσιμο στο: <https://www.inmarsat.com/en/insights/aviation/2021/passenger-confidence-tracker-2021.html>. (Πρόσβαση: 12 Νοεμβρίου, 2022)
- [9] M. Singleton. “The companies beyond inflight Wi-Fi and how it about to get way, way better. Inflight Wi-Fi is about to get a whole lot better.” D daily dot. (30 Μαΐου, 2014). Διαθέσιμο στο: <https://www.dailydot.com/debug/inflight-wifi-is-finally-getting-better/> (Πρόσβαση: 12 Νοεμβρίου, 2022)
- [10] E. Dinc, M. Vondra, and C. Cavdar, "Multi-User Beamforming and Ground Station Deployment for 5G Direct Air-to-Ground Communication," *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, pp. 1-7, DOI: [10.1109/GLOCOM.2017.8254571](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254571). (Πρόσβαση: 12 Νοεμβρίου, 2022)
- [11] “Airlines That Offer Inflight WiFi- The Definitive 2018 List”. Let’s Fly Cheaper. Διαθέσιμο στο: <https://www.letsflycheaper.com/blog/airlines-that-offer-inflight-wifi-the-definitive-2018-list/> - page-part (Πρόσβαση: 12 Νοεμβρίου, 2022)
- [12] “What's the Difference Between 5g vs 4g Speeds?” MySpeed. Διαθέσιμο στο: <https://gospeedcheck.com/article/what-is-the-difference-between-5g-vs-4g-speeds-420> (Πρόσβαση: 17 Νοεμβρίου, 2022)
- [13] “Gogo is where innovation takes flight”. Gogo Business Aviation. Διαθέσιμο στο: <https://www.gogoair.com/history-of-innovation/> (Πρόσβαση: 17 Νοεμβρίου, 2022)
- [14] A. Grous, “Sky High Economics - Chapter Three: Capitalising on changing passenger behaviour in a connected world”. *LSE The London School of Economics and Political Science*, September 2019, [Sky High Economics](#) -

Chapter Three: Capitalising on changing passenger behaviour in a connected world (lse.ac.uk) (Πρόσβαση: 17 Δεκεμβρίου, 2022)

- [15] “NPA 2014-14 Portable electronic devices II”. European Union Aviation Safety Agency (EASA), (24 Ιουνίου, 2014). Διαθέσιμο στο: <https://www.easa.europa.eu/document-library/notices-of-proposed-amendment/npa-2014-14> (Πρόσβαση: 20 Δεκεμβρίου, 2022)
- [16] “Press Release No: 62 - IATA Forecast Predicts 8.2 billion Air Travelers in 2037”. *IATA Pressroom*, 24 Οκτωβρίου 2018. Διαθέσιμο στο: <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2018-10-24-02/> (Πρόσβαση: 20 Νοεμβρίου, 2022)
- [17] D. Murph. “Delta Aims to Provide Free Inflight Wi-Fi in 1 or 2 Years”. *The Points Guy*. Διαθέσιμο στο: <https://thepointsguy.com/news/delta-says-wi-fi-in-1-2-years/> (Πρόσβαση: 20 Νοεμβρίου, 2022)
- [18] “What is the life cycle of a plane? Where do the disused planes go?” *That Aviation*. Διαθέσιμο στο: <https://that-aviation.com/en/blog/what-is-the-life-cycle-of-a-plane-where-do-the-disused-planes-go> (Πρόσβαση: 22 Νοεμβρίου, 2022)
- [19] T. Mofokeng, P. T. Mativenga, and A. Marnewick. 2020. “Analysis of aircraft maintenance processes and cost”. *Procedia CIRP*, Volume 90, 467-472. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.115>
- [20] “AMC & GM to Part-CAT - Issue 2 - Amendment 1 - Portable electronic devices II.” European Union Aviation Safety Agency (EASA), 24 Σεπτεμβρίου, 2014. Διαθέσιμο στο: [AMC & GM to Part-CAT - Issue 2 - Amendment 1 | EASA \(europa.eu\)](https://www.easa.europa.eu/en/air-traffic-management/air-traffic-collisions-prevention/air-traffic-collisions-prevention-amc-gm-to-part-cat-issue-2-amendment-1) (Πρόσβαση: 20 Δεκεμβρίου, 2022)
- [21] "Inflight Coverage Map." *INTELSAT - Resources*. Διαθέσιμο στο: <https://www.intelsat.com/resources/> (Πρόσβαση: 23 Νοεμβρίου, 2022)

- [22] M. Keenan. “The Evolution of Cellular Networks.” Avnet Abacus. Διαθέσιμο στο: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/resources/article/the-evolution-of-cellular-networks/> (Πρόσβαση: 31 Δεκεμβρίου, 2022)
- [23] “Ericsson Mobility Report November 2021”. erikson.com. Διαθέσιμο στο: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2021> (Πρόσβαση: 02 Ιανουαρίου, 2022)
- [24] A. Hussain. “Airplane Wi-Fi – How It Works, Airline Availability, Fees & More.” UpgradedPoints. Διαθέσιμο στο: <https://upgradedpoints.com/travel/airlines/how-airplane-wi-fi-works/> (Πρόσβαση: 19 Ιανουαρίου, 2023)
- [25] M. Attaran. 2021. The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing volume 14*, 5977–5993 (2023). Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02521-x>. (Πρόσβαση: 26 Νοεμβρίου, 2022)
- [26] “Release 15”. 3GPP - The Mobile Broadband Standard. (26 Απριλίου, 2019). Διαθέσιμο στο: <https://www.3gpp.org/release-15> (Πρόσβαση: 29 Νοεμβρίου, 2022)
- [27] “Release 16”. 3GPP - The Mobile Broadband Standard. (3 Ιουλίου, 2020). Διαθέσιμο στο: <https://www.3gpp.org/release-16>. (Πρόσβαση: 29 Νοεμβρίου, 2022)
- [28] L. Peterson, O. Sunay and B. Davie, *Private 5G: A Systems Approach*, Version 1.1-dev., 2019 & 2020. Διαθέσιμο στο: <https://5g.systemsapproach.org/arch.html> (Πρόσβαση: 04 Δεκεμβρίου, 2022)
- [29] 3G4G, YouTube. *Beginners: Different Types of RAN Architectures - Distributed, Centralized & Cloud*. (05 Ιουλίου, 2020). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=AskCWzIesFg> (Πρόσβαση: 06 Νοεμβρίου, 2022)

- [30] “What is Mobile Backhaul?” Mobile Backhaul. Διαθέσιμο στο: <https://mobilebackhaultech.tumblr.com/post/26814087511/what-is-mobile-backhaul> (Πρόσβαση: 04 Δεκεμβρίου, 2022)
- [31] “Mobile backhaul options – Spectrum analysis and recommendations.” GSMA. Διαθέσιμο στο: <https://www.gsma.com/spectrum/resources/mobile-backhaul-options/> (Πρόσβαση: 04 Δεκεμβρίου, 2022)
- [32] “Mobile Backhaul: An Overview.” Future Networks. Διαθέσιμο στο: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/mobile-backhaul-an-overview/> (Πρόσβαση: 05 Δεκεμβρίου, 2022)
- [33] “5G Frequency Bands & Spectrum Allocations - 5G Frequency bands: Spectrum Allocations for Next-Gen LTE.” CableFree 10+ Gigabit Wireless Networks. Διαθέσιμο στο: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/5g-frequency-bands-lte/> (Πρόσβαση: 06 Δεκεμβρίου, 2022)
- [34] G. Liidakis. Σημειώσεις Διάλεξης Μαθήματος. Θέμα: “4. Optical Technologies for Data Center Networking (DCN).” Photonics & Optical Communications. Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών - Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο. [PowerPoint Slides]. (2020-2021). Διαθέσιμο στο: <https://eclass.chania.hmu.gr/> (Πρόσβαση: 06 Νοεμβρίου, 2022)
- [35] Alantalkstech, YouTube. *Centralized or Cloud RAN (C-RAN)*. (26 Ιανουαρίου, 2021). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=eP297C5pn00> (Πρόσβαση: 06 Φεβρουαρίου, 2023)
- [36] “Chapter: 5G NSA for MME,” *MME Administration Guide, StarOS*, Release 21.9, Cisco, 10/08/2018, στο Device Report [Διαδίκτυο]. Διαθέσιμο στο: <https://device.report/m/69e2e5c56fec0660ef6a8f12d885e0078dc0b2d5375b4efde9e6cec0fd6f371> (Πρόσβαση: 09 Δεκεμβρίου, 2022)

- [37] “5G-NR Non-standalone access.” EventHelix. Διαθέσιμο στο: <https://www.eventhelix.com/5G/non-standalone-access-en-dc/> (Πρόσβαση: 09 Δεκεμβρίου, 2022)
- [38] “Learn 4G LTE Evolved Packet Core (EPC) for Beginners”. *Mobile Packet Core - Mobile Packet Core Engineer Guide*, 2021, Διαθέσιμο στο: <https://mobilepacketcore.com/learn-4g-lte-evolved-packet-core-epc-for-beginners/> (Πρόσβαση: 20 Δεκεμβρίου, 2022)
- [39] R. Pathak, “A Beginner’s Guide for 5G Core Network Architecture. 5G Core Network Architecture,” Rajarshi Pathak. Διαθέσιμο στο: <https://www.rajarshipathak.com/2020/01/beginners-guide-for-5g-core-network-architecture.html>. (Πρόσβαση: 10 Δεκεμβρίου, 2022)
- [40] R. Jain. Σημειώσεις Διάλεξης Μαθήματος. Θέμα: “Introduction to 5G.” CSE574S: Wireless and Mobile Networking. Washington University in St. Louis. USA. Fall 2018. [Διαδίκτυο].
Διαθέσιμο στο: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-16/> (Πρόσβαση: 10 Δεκεμβρίου, 2022)
- [41] “LTE tutorial | Tutorial on LTE Basics.” RF Wireless World. Διαθέσιμο στο: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LTE-tutorial.html> (Πρόσβαση: 15 Δεκεμβρίου, 2022)
- [42] “Spectrum explained.” Nokia. Διαθέσιμο στο: <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/spectrum-auctions-explained/> (Πρόσβαση: 13 Φεβρουαρίου, 2023)
- [43] A. Ghayas. “What is carrier aggregation in 4G LTE Advanced networks?” Διαθέσιμο στο: <https://commsbrief.com/what-is-carrier-aggregation-in-4g-lte-advanced-networks/> (Πρόσβαση: 08 Οκτώβριου, 2022)
- [44] “EAN LTE-based ground network.” Deutsche Telekom. Διαθέσιμο στο: <https://www.telekom.com/en/media/mediacenter/images/images-ean-first-flight> (Πρόσβαση: 18 Ιουνίου, 2023)

- [45] Ε. Κόκκινος. (2021). Σημειώσεις Διάλεξης Μαθήματος. Θέμα: “Ενότητα Α - Κινητές Επικοινωνίες.” TeleAutoS: Ασύρματα Δίκτυα & Κινητές Επικοινωνίες, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών - Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο (ΕΛΜΕΠΑ). [PowerPoint Slides]. Διαθέσιμο στο: <https://eclass.chania.hmu.gr/> (Πρόσβαση: 20 Δεκεμβρίου, 2022)
- [46] Brenner, D. “Global 5G spectrum update”. @qualcomm_tech, Ιούνιος 2020, Διαθέσιμο στο: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-spectrum-update-for-mipi-alliance.pdf> (Πρόσβαση: 09 Ιανουαρίου, 2022)
- [47] 3GPP Specification series, *3GPP - The Mobile Broadband Standard*, TS 38.300 V15.4.0 (2018-12). Διαθέσιμο στο: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm> (Πρόσβαση: 25 Δεκεμβρίου, 2022)
- [48] L. E. Frenzel Jr., *Principles of electronic communication systems*. 4th ed., McGraw-Hill Education, 2016
- [49] Nokia, “Using air-to-ground LTE for in-flight ultra-broadband - Opening the skies to new possibilities,” Strategic White Paper, 2018. [Διαδίκτυο]. Διαθέσιμο στο: <https://onestore.nokia.com/asset/185856> (Πρόσβαση: 07 Νοεμβρίου, 2022)
- [50] “Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN”. *Keysight Technologies, Inc*, 2000-2021. Διαθέσιμο στο: https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm (Πρόσβαση: 31 Δεκεμβρίου, 2022)
- [51] Tadayon, N., Kaddoum, G. and Noumeir, R. “Inflight Broadband Connectivity Using Cellular Networks.” *IEEE Access*, vol. 4, 2016, pp. 1595-1606. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2537648 (Πρόσβαση: 02 Ιανουαρίου, 2023)

- [52] Q. Luo, W. Fang, J. Wu, and Q. Chen, “Reliable broadband wireless communication for high-speed trains using baseband cloud.” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* no.1(285), 2012, <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-285> (Πρόσβαση: 02 Ιανουαρίου, 2023)
- [53] E. Mazareanu. “Annual growth in global air traffic passenger demand from 2006 to 2022.” Statista. (05 Οκτωβρίου 2021). Διαθέσιμο στο: <https://www.statista.com/statistics/193533/growth-of-global-air-traffic-passenger-demand/> (Πρόσβαση: 04 Ιανουαρίου, 2023)
- [54] S. Stein. “The Complete Guide To Airlines That Have Free Wi-Fi.” Pointme. Διαθέσιμο στο: <https://pointmetotheplane.boardingarea.com/airlines-free-wifi/> (Πρόσβαση: 04 Φεβρουαρίου, 2023)
- [55] 5G Mobile Communications, YouTube. *5G Core Architecture Part 1 Live Session*. (01 Φεβρουαρίου, 2022). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=Wj9tw0TGzls> (Πρόσβαση: 05 Ιανουαρίου, 2023)
- [56] The 3G4G Blog, YouTube. *Beginners: 5G Spectrum - Long Version*. (05 Ιουνίου, 2019). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/channel/UC27y5QRufBxQrpNIRyxQswA> (Πρόσβαση: 06 Ιανουαρίου, 2023)
- [57] A. Ghayas. “Difference between MIMO antenna technology and Massive MIMO.” Διαθέσιμο στο: <https://commsbrief.com/difference-between-mimo-antenna-technology-and-massive-mimo/> (Πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου, 2023)
- [58] Y. Bo. “Equipment in the LTE Network.” ITU & CAICT. [PowerPoint Slides]. Διαθέσιμο στο: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2016/Oct-CandI2016/CAICT2016/Session_6-4_Equipment_in_LTE_network_noNote%E6%9D%A8%E6%B3%A2-final.pdf (Πρόσβαση: 05 Δεκεμβρίου, 2022)

- [59] MathWorks. *What Is Massive MIMO?* [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.mathworks.com/videos/what-is-massive-mimo-1635232652649.html> (Πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου, 2023)
- [60] “5G Small Cells Basics | 5G Small Cell Types | Advantages, manufacturers.” RF Wireless World. Διαθέσιμο στο: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/5G-Small-Cells-Basics-and-Types.html> (Πρόσβαση: 12 Ιανουαρίου, 2023)
- [61] F. Pujol, C. Manero, B. Carle and S. Remis, “Quarterly Report 12, June 2021.” European 5G Observatory. Διαθέσιμο στο: <https://5gobservatory.eu/observatory-overview/observatory-reports/> (Πρόσβαση: 15 Ιανουαρίου, 2023)
- [62] “5G Spectrum Overview.” European 5G Observatory. Διαθέσιμο στο: <https://5gobservatory.eu/5g-spectrum/> (Πρόσβαση: 15 Ιανουαρίου, 2023)
- [63] “5G spectrum bands explained - low, mid and high band.” Nokia. Διαθέσιμο στο: <https://www.nokia.com/networks/insights/spectrum-bands-5g-world/> (Πρόσβαση: 15 Ιανουαρίου, 2023)
- [64] “Fly-Fi: Fast, Free Wi-Fi,” JetBlue. Διαθέσιμο στο: <https://www.jetblue.com/flying-with-us/wifi> (Πρόσβαση: 19 Ιανουαρίου, 2023)
- [65] “Portable Electronic Devices (PED) on board.” European Union Aviation Safety Agency (EASA). Διαθέσιμο στο: [Portable Electronic Devices \(PED\) on board | EASA \(europa.eu\)](https://www.easa.europa.eu/en/portable-electronic-devices-ped-on-board) (Πρόσβαση: 19 Ιανουαρίου, 2023)
- [66] “5G NR network interfaces-Xn, NG, E1, F1, F2 interface types in 5G.” RF Wireless World. Διαθέσιμο στο: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/5G-NR-network-interfaces.html> (Πρόσβαση: 30 Ιανουαρίου, 2023)

- [67] X.-Y. Li. “History of Wireless Networks,” in *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008, pp.3–16. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754722.002> (Πρόσβαση: 02 Φεβρουαρίου, 2023)
- [68] C. Weixiang. “Telecom: 5G New Radio (5G NR) Overview.” Alex’s Blog. Διαθέσιμο στο: <http://chenweixiang.github.io/2017/04/23/5gnr.html - timeline> (Πρόσβαση: 4 Φεβρουαρίου, 2023)
- [69] E. Mazareanu. “Projected size of the global in-flight Wi-Fi market from 2021 to 2031 in million U.S. dollars.” Statista. Διαθέσιμο στο: <https://www.statista.com/statistics/624184/inflight-wifi-market-size/> (Πρόσβαση: 04 Φεβρουαρίου, 2023)
- [70] E. Gordon. “The Electromagnetic Spectrum.” Chemistry Libretexts. CHM101: Chemistry and Global Awareness. Διαθέσιμο στο: [https://chem.libretexts.org/Courses/Furman_University/CHM101:_Chemistry_and_Global_Awareness_\(Gordon\)/05:_Basics_of_Nuclear_Science/5.02:_The_Electromagnetic_Spectrum](https://chem.libretexts.org/Courses/Furman_University/CHM101:_Chemistry_and_Global_Awareness_(Gordon)/05:_Basics_of_Nuclear_Science/5.02:_The_Electromagnetic_Spectrum) (Πρόσβαση: 05 Ιανουαρίου, 2023)
- [71] F. Khan. “C-RAN vs Cloud RAN vs vRAN vs O-RAN- A simple Guide!” Telco Cloud Bridge. Διαθέσιμο στο: <https://telcocloudbridge.com/blog/c-ran-vs-cloud-ran-vs-vran-vs-o-ran/> (Πρόσβαση: 05 Φεβρουαρίου, 2023)
- [72] LambdaGain, YouTube. *Mobile Fronthaul: Chapter 2 D-RAN*. (23, Οκτωβρίου, 2019). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: https://www.youtube.com/watch?v=NTI_v0IyqNs&t=85s (Πρόσβαση: 06 Φεβρουαρίου, 2023)
- [73] 3G4G. *High-level architecture of Mobile Cellular Networks from 2G to 5G*. [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.3g4g.co.uk/Training/intermediate0001.html> (Πρόσβαση: 06 Φεβρουαρίου, 2023)

- [74] L. Dahmen. “Telekom uses these 5G frequencies in Germany.” Deutsche Telekom. Διαθέσιμο στο: <https://www.telekom.com/en/company/details/5g-frequencies-everything-you-need-to-know-622934> (Πρόσβαση: 03 Μαρτίου, 2023)
- [75] “Sensor Systems' Products.” Sensor Systems Inc. Διαθέσιμο στο: <https://www.sensorantennas.com/products/mimo-antenna/> (Πρόσβαση: 08 Απριλίου, 2023)
- [76] “MIMO Antennas.” SWA Southwest Antennas. Διαθέσιμο στο: <https://www.southwestantennas.com/products/mimo-antennas> (Πρόσβαση: 30 Μαρτίου, 2023)
- [77] Φ. Κωνσταντίνου, Α. Κανάτας και Γ. Πάντος, *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2η Έκδοση, Αθήνα, Ελλάδα, 2013
- [78] “SDR >> I/Q Data for Dummies.” Whiteboard Web. Διαθέσιμο στο: <http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ> (Πρόσβαση: 12 Μαρτίου, 2023)
- [79] 5GMMWAVE. “5G mmWave: NSA or SA?” Διαθέσιμο στο: <https://www.5gmmwave.com/> (Πρόσβαση: 26 Φεβρουαρίου, 2023)
- [80] “Computers from check in to the flight deck.” Smithsonian National Air and Space Museum. Διαθέσιμο στο: <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/computers-check-flight-deck> (Πρόσβαση: 17 Ιανουαρίου, 2023)
- [81] H. Ying, “5G ATG Ushers in a New Era of 5G Air High-Speed Internet,” *ZTE Technologies*, Vol. 23, no.3, Issue 194, pp.35-37, Jun. 2021. Διαθέσιμο στο: <https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2021/3-en> (Πρόσβαση: 17 Ιανουαρίου, 2023)
- [82] “Inflight Systems.” Gogo. Διαθέσιμο στο: <http://w3.gogoair.com/commercial/inflight-systems/> (Πρόσβαση: 18 Οκτωβρίου, 2022)

- [83] C. Riley and J. Ataman. “Europe rolled out 5G without hurting aviation. Here’s how.” CNN Business. Διαθέσιμο στο: <https://edition.cnn.com/2022/01/19/business/5g-aviation-safety-europe/index.html> (Πρόσβαση: 18 Ιανουαρίου, 2023)
- [84] “Deutsche Telekom, Alcatel-Lucent and Airbus successfully test high-speed broadband for in-flight services.” Deutsche Telekom AG. Διαθέσιμο στο: <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/deutsche-telekom-alcatel-lucent-and-airbus-successfully-test-high-speed-broadband-for-in-flight-services-to-passengers-using-a-direct-air-to-ground-communication-system-based-on-lte-356416> (Πρόσβαση: 21 Ιανουαρίου, 2023)
- [85] “ZTE Completes World’s First LTE Civil Aviation Ground-Air Broadband Test.” ZTE, News. Διαθέσιμο στο: <https://www.zte.com.cn/global/about/news/391567.html> (Πρόσβαση: 21 Ιανουαρίου, 2023)
- [86] M. Biesialska, A. Derory and L. Hoinville, “Gogo WiFi flight internet challenge,” MS&E 238 Project, Stanford University, Summer 2014. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <https://web.stanford.edu/class/msande238/projects/2014/CharliesAngels.pdf> (Πρόσβαση: 22 Ιανουαρίου, 2023)
- [87] S. Carmichael. “Gogo ATG-4 - what is it, and how does it work?” Gogo. Διαθέσιμο στο: <https://concourse.gogoair.com/gogo-atg-4-work/> (Πρόσβαση: 22 Νοεμβρίου, 2022)
- [88] J. A. Shaw, "Radiometry and the Friis transmission equation", *American Journal of Physics*, 81, pp.33-37, 2013, <https://doi.org/10.1119/1.4755780>
- [89] K. Dyer. “China set for in-flight air-to-ground 5G launches.” TMN The Mobile Network. Διαθέσιμο στο: <https://the-mobile-network.com/2021/03/china-set-for-in-flight-air-to-ground-5g-launches/> (Πρόσβαση: 23 Ιανουαρίου, 2023)

- [90] “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference document (SRdoc); Broadband Direct-Air-to-Ground Communications System operating in the 5,855 GHz to 5,875 GHz band using 3G technology.” ETSI TR 103 108 V1.1.1 (2013-07) [Technical Report].
Διαθέσιμο στο:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103100_103199/103108/01.01.01_60/tr_103108v010101p.pdf (Πρόσβαση: 28 Φεβρουαρίου, 2023)
- [91] “EAN terminal equipment.” Deutsche Telekom. Διαθέσιμο στο:
<https://www.telekom.com/en/media/mediacenter/images/images-ean-first-flight> (Πρόσβαση: 18 Ιουνίου, 2023)
- [92] X. Lin, A. Furuskär, O. Liberg and S. Euler, “Sky High 5G: New Radio for Air-to-Ground Communications,” in *5G and Beyond*, X. Lin and N Lee, (eds), Springer, Cham, 2021, pp. 503-515 https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8_17
- [93] “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference Document; Broadband Direct-Air-to-Ground Communications operating in part of the frequency range from 790 MHz to 5 150 MHz.” ETSI TR 103 054 V1.1.1 (2010-07). [Technical Report]
https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103000_103099/103054/01.01.01_60/tr_103054v010101p.pdf
- [94] “Aircraft to Ground Wireless Communication.” Fluidmesh Networks. Διαθέσιμο στο: <https://www.iqpc.com/media/1000981/39988.pdf>
(Πρόσβαση: 24 Ιανουαρίου, 2023)
- [95] Airspan. *Making high-performance, high-capacity inflight connectivity an affordable reality.* [Βίντεο & Ιστότοπος]. Διαθέσιμο στο: [AirSky A2G – Airspan.com](https://www.airspan.com) (Πρόσβαση: 10 Φεβρουαρίου, 2023)
- [96] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matters (ERM) System Reference Document (SRDoc); Broadband Direct-Air-to-Ground Communications System

- employing beamforming antennas, operating in the 2,4 GHz and 5,8 GHz bands.” Valbonne - Sophia Antipolis, France. ETSI TR 101 599 V1.1.3 (2012-09). Διαθέσιμο στο: [TR 101 599 - V1.1.3 - Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matters \(ERM\) System Reference Document \(SRDoc\); Broadband Direct-Air-to-Ground Communications System employing beamforming antennas, operating in the 2,4 GHz and 5,8 GHz bands \(etsi.org\)](#) (Πρόσβαση: 10 Φεβρουαρίου, 2023)
- [97] C. Hacopian. “Here's How High Planes Actually Fly, According to Experts.” Time. Διαθέσιμο στο: [How and Why Planes Have to Fly So High | Time](#) (Πρόσβαση: 24 Ιανουαρίου, 2023)
- [98] “Using air-to-ground LTE for in-flight ultra-broadband. Opening the skies to new possibilities,” Alcatel-Lucent, White Paper, 2015. Διαθέσιμο στο: https://www.tmcnet.com/tmc/whitepapers/documents/whitepapers/2015/1152_9-using-air-to-ground-lte-in-flight-ultra.pdf (Πρόσβαση: 24 Ιανουαρίου, 2023)
- [99] A. Gusarov, “Aircraft antenna array for seamless direct air-to-ground communication system,” M.S. thesis, Dept. Elect. Eng, Chalmers University of Technology, Stockholm, Sweden, 2016. DOI:[10.13140/RG.2.2.22189.90087](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22189.90087) (Πρόσβαση: 10 Φεβρουαρίου, 2023)
- [100] “Intelsat Epic.” Intelsat. Διαθέσιμο στο: <https://www.intelsat.com/global-network/satellite-network/> (Πρόσβαση: 30 Ιανουαρίου, 2023)
- [101] Intelsat. *5 Myths of Airline Connectivity*. (16 Σεπτεμβρίου, 2020). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.intelsat.com/solutions/aviation/> (Πρόσβαση: 01 Φεβρουαρίου, 2023)
- [102] G. Basilashvili, “Study of Spectral Efficiency for LTE Network,” *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, Vol. 29, pp.21-32, March 2017. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/323534897_Study_of_Spectral_Efficiency_for_LTE_Network (Πρόσβαση: 01 Σεπτεμβρίου, 2022)

- [103] “United Wi-Fi coverage maps.” United. Διαθέσιμο στο: <https://www.united.com/ual/en/us/fly/travel/inflight/wifi-coverage-maps.html> (Πρόσβαση: 30 Ιανουαρίου, 2023)
- [104] “Connectivity.” Viasat. Διαθέσιμο στο: <https://www.viasat.com/business-and-commercial/aviation/commercial/inflight-connectivity/> (Πρόσβαση: 30 Ιανουαρίου, 2023)
- [105] “Gogo International Ku-band satellite Internet – how does it work?” Gogo. Διαθέσιμο στο: <https://concourse.gogoair.com/gogo-international-ku-band-satellite-internet-work/> (Πρόσβαση: 30 Ιανουαρίου, 2023)
- [106] “Satellite Frequency Bands: L, S, C, X, Ku, Ka-band – UPSC”. Lotus Arise. Διαθέσιμο στο: <https://lotusarise.com/satellite-frequency-bands-upsc/> (Πρόσβαση: 01 Φεβρουαρίου, 2023)
- [107] “Gogo 2Ku Global Connectivity Solution.” Gogo. Διαθέσιμο στο: <http://w3.gogoair.com/learning-center/2ku-a-whitepaper/> (Πρόσβαση: 14 Φεβρουαρίου, 2023)
- [108] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). “Broadband Direct Air-to-Ground Communications; Equipment operating in the 1900 MHz to 1920 MHz and 5855 MHz to 5875 MHz frequency bands; Beamforming antennas; Harmonised Standard for access to radio spectrum”. Valbonne - Sophia Antipolis, France. ETSI EN 303 316 V1.2.1 (2018-04). Διαθέσιμο στο: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303300_303399/303316/01.02.01_60/en_303316v010201p.pdf (Πρόσβαση: 14 Φεβρουαρίου, 2023)
- [109] D. Swift. “How Does 5G Affect Airline Altimeters?” Apitech. Διαθέσιμο στο: <https://blog.apitech.com/blog/5g-aviation> (Πρόσβαση: 10 Φεβρουαρίου, 2023)
- [110] Intelsat. “In Aero Antenna Design, There's More Than Meets the Eye.” Διαθέσιμο στο: <https://www.intelsat.com/solution/aviation/commercial-aviation/aero-antenna-design/> (Πρόσβαση: 14 Φεβρουαρίου, 2023)

- [111] “Airspan Networks and Gogo Complete 5G Network Testbed of First 7 mMIMO sites for Gogo’s National 5G Air-to-Ground Network, Another Key Deployment Milestone.” Businesswire. 20 Ιανουαρίου 2022. Διαθέσιμο στο: <https://www.businesswire.com/news/home/20220120005353/en/> (Πρόσβαση: 16 Φεβρουαρίου, 2023)
- [112] M. Vondra, E. Dinc, M. Prytz, M. Frodigh, D. Schupke, M. Nilson, S. Hofmann and C. Cavdar. “Performance Study on Seamless DA2GC for Aircraft Passengers Toward 5G,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 11, pp. 194-201, Nov. 2017, doi: [10.1109/MCOM.2017.1700188](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700188) (Πρόσβαση: 16 Φεβρουαρίου, 2023)
- [113] Iain Explains Signals, Systems, and Digital Comms. *What is Beamforming? ("the best explanation I've ever heard")*. (29 Ιουνίου, 2020). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=A1n5Hhwtz78> (Πρόσβαση: 20 Απριλίου, 2023)
- [114] C. Wolff. “Effective Radiated Power.” Radartutorial.eu. Διαθέσιμο στο: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx57.en.html> (Πρόσβαση: 20 Φεβρουαρίου, 2023)
- [115] “Bit Error Rate (BER).” Timbercon-A Radial Company. Διαθέσιμο στο: <https://www.timbercon.com/resources/glossary/ber-bit-error-rate/> (Πρόσβαση: 20 Φεβρουαρίου, 2023)
- [116] “5G NR SINR Measurement and Its Mapping.” Techplayon. Διαθέσιμο στο: <https://www.techplayon.com/5g-nr-sinr-measurement-and-its-mapping/> (Πρόσβαση: 21 Φεβρουαρίου, 2023)
- [117] “Physics: Free-space path loss.” HandWiki - Physics Portal. Διαθέσιμο στο: https://handwiki.org/wiki/Physics:Free-space_path_loss (Πρόσβαση: 11 Οκτωβρίου, 2022)
- [118] J. C. Whitaker, *The Electronics Handbook*. CRC Press. p. 1321, 1996. (Πρόσβαση: 21 Φεβρουαρίου, 2023)

- [119] E. Bjornson, YouTube. *Signal-to-Noise Ratio in Wireless Communications - Video 1*. (25 Μαρτίου, 2019). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=OA4viERrlzA> (Πρόσβαση: 21 Φεβρουαρίου, 2023)
- [120] “Gogo’s Nationwide 5G Network Now Being Deployed.” Gogo Business Aviation. Διαθέσιμο στο: <https://business.gogoair.com/news/2021/01/5g-network-testbed-completed/> (Πρόσβαση: 01 Μαρτίου, 2023)
- [121] “The Gogo Wi-Fi Experience: a head-to-head comparison.” Διαθέσιμο στο: <https://business.gogoair.com/experience-comparison/> (Πρόσβαση: 01 Μαρτίου, 2023)
- [122] 5G Learning, YouTube. *A Detailed Introduction to Beamforming*. (06 Μαΐου, 2018). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=HKpQP8H4JRc> (Πρόσβαση: 07 Μαρτίου, 2023)
- [123] “5G Phased Array Technologies.” The MathWorks. [e-Book] Διαθέσιμο στο: <https://uk.mathworks.com/campaigns/offers/5g-phased-array-hybrid-beamforming-ebook.html> (Πρόσβαση: 07 Μαρτίου, 2023)
- [124] “5G Bands in South.” Διαθέσιμο στο: http://anisimoff.org/eng/5g/spectrum/5g_south_korea.html (Πρόσβαση: 07 Μαρτίου, 2023)
- [125] Mpirical, YouTube. *What is Beamforming (Massive MIMO)? Find Out with Mpirical*. (04 Ιανουαρίου, 2019). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: https://www.youtube.com/watch?v=pE_FsnHtTxc&t=122s (Πρόσβαση: 7 Μαρτίου, 2023)
- [126] “Massive MIMO?” MathWorks. Διαθέσιμο στο: https://www.mathworks.com/discovery/massive-mimo.html?s_tid=srchtitle_massive%20MIMO_1 (Πρόσβαση: 12 Μαρτίου 2023)

- [127] “Intro to Antenna Polarization.” Jem Engineering. Διαθέσιμο στο: <https://jemengineering.com/blog-intro-to-antenna-polarization/> (Πρόσβαση: 12 Μαρτίου, 2023)
- [128] “5G Massive MIMO Antenna Array, 5G NR Base Station Antenna Manufacturers.” RF Wireless World. Διαθέσιμο στο: <https://www.rfwireless-world.com/Vendors/5G-Massive-MIMO-Antenna-Array-manufacturers.html> (Πρόσβαση: 12 Μαρτίου, 2023)
- [129] “Gogo Announces Partners For 5G Network and Onboard Systems.” Cision. Διαθέσιμο στο: <https://www.prnewswire.com/news-releases/gogo-announces-partners-for-5g-network-and-onboard-systems-300941520.html> (Πρόσβαση: 20 Φεβρουαρίου, 2023)
- [130] E. Björnson. “3D Beamforming, is that massive MIMO?” Wireless Future. Διαθέσιμο στο: <http://ma-mimo.ellintech.se/2018/05/17/3d-beamforming-is-that-massive-mimo/> (Πρόσβαση: 12 Μαρτίου, 2023)
- [131] “Hybrid Beamforming basics | Hybrid Beamforming types.” RF Wireless World. Διαθέσιμο στο: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Hybrid-Beamforming-basics-and-Hybrid-Beamforming-types.html> (Πρόσβαση: 18 Μαρτίου, 2023)
- [132] A. Ghayas. “What is 5G Massive MIMO technology and how does it work?” Commsbrief. Διαθέσιμο στο: <https://commsbrief.com/what-is-5g-massive-mimo-technology-and-how-does-it-work/> (Πρόσβαση: 09 Απριλίου, 2023)
- [133] E. Björnson. 5G, Beyond 5G, News, Technical insights-A Closer Look at Massive MIMO From Ericsson. Wireless Future. Διαθέσιμο στο: <https://ma-mimo.ellintech.se/2021/10/14/a-closer-look-at-massive-mimo-from-ericsson/> (Πρόσβαση: 20 Μαρτίου, 2023)
- [134] “5G New Radio Design with MATLAB”. The MathWorks. Διαθέσιμο στο: <https://uk.mathworks.com/campaigns/offers/5g-technology-ebook.html> (Πρόσβαση: 20 Μαρτίου, 2023)

- [135] “Beamforming Antennas.” nlr. Διαθέσιμο στο: <https://www.nlr.org/article/beamforming-antennas/> (Πρόσβαση: 12 Αυγούστου, 2023)
- [136] M. Ibrahim, S. Deif and M. S. Sharawi, "A 14-element printed planar antenna array embedded within a UAV structure," *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, pp. 1-4, 2012, doi: 10.1109/LAPC.2012.6402996 (Πρόσβαση: 08 Απριλίου, 2023)
- [137] A. Patrovsky and R. Sekora, "Structural integration of a thin conformal annular slot antenna for UAV applications," *Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2010, pp. 229-232, doi: 10.1109/LAPC.2010.5666169
- [138] “Guide to 4G Antennas and MIMO.” Telco Antennas. Διαθέσιμο στο: <https://www.telcoantennas.com.au/buying/smart-guides/guide-to-4g-antennas-and-mimo/> (Πρόσβαση: 09 Απριλίου, 2023)
- [139] X. Qing., Z.N. Chen. “Omnidirectional Antennas” in Z. Chen (eds) *Handbook of Antenna Technologies*. Springer, Singapore, 2015 https://doi.org/10.1007/978-981-4560-75-7_52-1
- [140] “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.” Recommendation ITU-R M.2083-0. Geneva, 09/2015. Διαθέσιμο στο: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf (Πρόσβαση: 12 Απριλίου, 2023)
- [141] “Conformal, Lightweight, Aerogel-Based Antenna (LEW-TOPS-155). A Flexible Antenna for Active Aeronautical Satellite Communications.” NASA Technology Transfer Program. Διαθέσιμο στο: <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-155> (Πρόσβαση: 12 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [142] M. A. B. Meador and F. A. Miranda, “Design and Development of Aerogel-Based Antennas for Aerospace Applications: A Final Report to the NARI Seedling,” NASA Glenn Research Center Cleveland, Ohio, USA, Technical

- Mem. (TM)- 2014-218346, Aug. 1, 2014. Διαθέσιμο στο: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140017756> (Πρόσβαση: 12 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [143] D. Emery. “Network Characteristics: Coverage Footprint and Beamforming.” Smartsky Networks. Διαθέσιμο στο: <https://fly.smartskynetworks.com/blog/coverage-footprint-and-beamforming> (Πρόσβαση: 18 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [144] L. I. Balderas, A. Reyna, M. A. Panduro, C. Del Rio and A. R. Gutiérrez, “Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127486-127494, 2019, DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2939511](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939511)
- [145] A. Colpaert, E. Vinogradov and S. Pollin, “3D beamforming and handover analysis for UAV networks,” *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2020, pp. 1-6, DOI: [10.1109/GCWkshps50303.2020.9367570](https://doi.org/10.1109/GCWkshps50303.2020.9367570)
- [146] “Connectivity.” Smartsky Networks. Διαθέσιμο στο: <https://smartskynetworks.com/connectivity/> (Πρόσβαση: 18 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [147] Telekom Netz, YouTube. *Schnelles Internet im Flugzeug mit dem European Aviation Network*. (19 Δεκεμβρίου, 2017). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=m0H7ZXtztKM> (Πρόσβαση: 10 Μαρτίου, 2023)
- [148] “Radiation Pattern of Antenna.” Electronics desk. Διαθέσιμο στο: <https://electronicsdesk.com/radiation-pattern-of-antenna.html> (Πρόσβαση: 20 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [149] Gogo Business Aviation. *5G tower installation live stream and Q&A*. [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://business.gogoair.com/videos/5g-antenna-installation-interview/> (Πρόσβαση: 21 Σεπτεμβρίου, 2022)

- [150] “FR4: When Can You Use It and When Can You Not.” Millennium Circuits Limited. Διαθέσιμο στο: <https://www.mclpcb.com/blog/fr4-guide/> (Πρόσβαση: 22 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [151] B. Shi, B. Ma, C. Wang, H. He, L. Qu, B. Xu and Y. Chen, “Fabrication and applications of polyimide nano-aerogels,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 143, 2021, 106283, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106283>
- [152] “Polyimide Aerogel Laminates.” Blueshift. Διαθέσιμο στο: <https://www.blueshiftmaterials.com/polyimide-aerogel-laminates/> (Πρόσβαση: 23 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [153] Wireless Networks - Cisco CCNA Wirelees training - tutorangel, YouTube. *Modulation*. (29 Ιανουαρίου, 2014). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=mfSWO3TpGq4> (Πρόσβαση: 07 Μαΐου, 2023)
- [154] “5G NR Modulation and Coding.” Techplayon. Διαθέσιμο στο: <https://www.techplayon.com/5g-nr-modulation-and-coding-scheme-modulation-and-code-rate/> (Πρόσβαση: 23 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [155] E. Björnson. “5G, Beyond 5G, Commentary, Podcast, Technical Insights- Episode 8: Analog versus Digital Beamforming”. *Wireless Future*. (27 Ιανουαρίου, 2021). Διαθέσιμο στο: <http://ma-mimo.ellintech.se/2021/01/27/episode-8-analog-versus-digital-beamforming/> (Πρόσβαση: 02 Σεπτεμβρίου, 2022)
- [156] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th. Ed, Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2016
- [157] 5G Learning, YouTube. *An Introduction to 3D Beamforming*. [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=nT7z6MxdEQE> (Πρόσβαση: 25 Νοεμβρίου, 2022)

- [158] R. Austin, Unmanned Aircraft Systems UAVS Design, Development and Deployment, Wiley, 2010. Διαθέσιμο στο:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470664797.fmatter>
- [159] D. Zhang, Y. Wang, X. Li and W. Xiang, “Hybridly Connected Structure for Hybrid Beamforming in mmWave Massive MIMO Systems” in IEEE Transactions on Communications, vol. 66, no. 2, pp. 662-674, Feb. 2018, DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2756882 (Πρόσβαση: 02 Οκτωβρίου, 2022)
- [160] M. Reil and G. Lloyd, “Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Array Design Choices & Characterization,” Rohde & Schwarz, White Paper, 2016. [Διαδίκτυο]. Διαθέσιμο στο: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/millimeter-wave-beamforming-antenna-array-design-choices-characterization-white-paper_230854-325249.html (Πρόσβαση: 01 Οκτωβρίου, 2022)
- [161] “Omni Antenna vs. Directional Antenna,” Cisco. Διαθέσιμο στο: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/82068-omni-vs-direct.html> (Πρόσβαση: 01 Οκτωβρίου, 2022)
- [162] Asia-Pacific Telecommunity (APT), “APT/AWG/REP-95: APT Report on Broadband Wireless Air-To-Ground Communications Links with Passenger Aircraft,” APT Wireless Group (AWG) Recommendations, Reports and Opinions, Chaeng Watthana Road, Bangkok 10210, Thailand, 07/2019. [Online]. Διαθέσιμο στο: <https://www.apr.int/AWG-REPTS> (Πρόσβαση: 08 Οκτωβρίου, 2022)
- [163] T. Bilen, H. Ahmadi, B. Canberk and T. Q. Duong, "Aeronautical Networks for In-Flight Connectivity: A Tutorial of the State-of-the-Art and Survey of Research Challenges," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20053-20079, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3151658. [Online]. Διαθέσιμο στο: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9714288> (Πρόσβαση: 11 Οκτωβρίου, 2022)

- [164] “AeroZero® Laminates.” Blueshift. Διαθέσιμο στο:
<https://www.blueshiftmaterials.com/laminates-and-composite-structures/>
(Πρόσβαση: 14 Οκτωβρίου, 2022)
- [165] “DiClad® 870 and 880 Laminates.” Rogers Corporation. Διαθέσιμο στο:
https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/diclad-series-laminates/diclad-870_880-laminates (Πρόσβαση: 14 Οκτωβρίου, 2020)
- [166] “Deutsche Telekom and Inmarsat collaborate with Tampnet to strengthen European Aviation Network connectivity in North Sea.” European Aviation Network (EAN). Διαθέσιμο στο:
<https://www.europeanaviationnetwork.com/en/news/strengthen-ean-north-sea-deutsche-telekom-inmarsat-tampnet-collaborate.html> (Πρόσβαση: 15 Οκτωβρίου, 2020)
- [167] “Built for Europe.” European Aviation Network (EAN). Διαθέσιμο στο:
<https://www.europeanaviationnetwork.com/en/BUILT.html> (Πρόσβαση: 15 Οκτωβρίου, 2020)
- [168] “In-Flight Connectivity Demand for Business Jets Remain High During Pandemic.” Avionics International. Διαθέσιμο στο:
<https://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/june-july-2021/in-flight-connectivity-demand-for-business-jets-remain-high-during-pandemic/>
(Πρόσβαση: 27 Μαρτίου, 2023)
- [169] “AirSky A2G - Making high-performance, high-capacity inflight connectivity an affordable reality – AirSky A2G Brochure.” Airspan. Διαθέσιμο στο:
<https://www.airspan.com/airsky-a2g/> (Πρόσβαση: 27 Μαρτίου, 2023)
- [170] “Building the First Nationwide 5G Network for Aviation - Gogo and Cisco: A partnership with a proven history.” Cisco. Διαθέσιμο στο:
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/5g-transformation/gogo-5g-network-for-aviation.html> - ~working-together
(Πρόσβαση: 06 Απριλίου, 2023)

- [171] Gogo. *The Gogo 5G aircraft antenna*. [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.gogoair.com/videos/first-rf-gogo-5g-antenna/> (Πρόσβαση: 06 Απριλίου, 2023)
- [172] “Gogo ebook 5G.” Gogo. Διαθέσιμο στο: <https://www.gogoair.com/ebooks-whitepapers/gogo-5g-a-guide-to-the-next-generation-of-inflight/> (Πρόσβαση: 06 Απριλίου, 2023)
- [173] “The Gogo 5G network is complete.” Gogo. Διαθέσιμο στο: <https://www.gogoair.com/infographics/2022/gogo-5g-network-deployment/> (Πρόσβαση: 06 Απριλίου, 2023)
- [174] “ATG systems: ATG resources - Gogo ATG Brochure.” Gogo. Διαθέσιμο στο: <https://www.gogoair.com/atg/> (Πρόσβαση: 06 Απριλίου, 2023)
- [175] Captain Joe, YouTube. *How does Wi-Fi work on airopplanes? Explained by Captain Joe*. (12 Οκτωβρίου, 2017). [Βίντεο]. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=o9BaSDfEf5U> (Πρόσβαση: 07 Απριλίου, 2023)
- [176] “Resources – What is LTE?” Artiza Networks. Διαθέσιμο στο: https://www.artizanetworks.com/resources/tutorials/what_lte.html (Πρόσβαση: 07 Μαΐου, 2023)
- [177] K. Reis. “Modulation Schemes, Coding Rates, and 4G/5G Data Speeds.” Waveform. Διαθέσιμο στο: <https://www.waveform.com/a/b/guides/modulation-coding-speeds> (Πρόσβαση: 10 Μαΐου, 2023)
- [178] “Wireless spectrum is for sale ... but what is it?” The Conversation. Διαθέσιμο στο: <https://theconversation.com/wireless-spectrum-is-for-sale-but-what-is-it-11794> (Πρόσβαση: 10 Μαΐου, 2023)