ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής & Πολυμέσων

Πτυχιακή Εργασία Με Τίτλο

"Ανάλυση συχνοτήτων των Cognitive Radio Networks πάνω από TV White Spaces και υλοποίηση Γενετικού Αλγορίθμου για βέλτιστη κατανομή φάσματος"

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: **Καραμπουρνιώτης Αντώνης**

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: **14/03/2011**

ΕΙΣΗΓΗΤΉΣ: **Δρ. Πάλλης Ευάγγελος**

Περιγραφή Πτυχιακής Εργασίας

Τα ασύρματα δίκτυα μέχρι σήμερα λειτουργούνσαν αξιοποιώντας με στατική κατανομή τους διαθέσιμους πόρους του φάσματος. Αν και η πολιτική εκχώρησης φάσματος με αυτόν τον τρόπο εφαρμόστηκε πολύ στο παρελθόν, πρόσφατα η απαίτηση για παροχή ετερογενών υπηρεσιών χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα αυξήθηκε κατακόρυφα. Δημιουργήθηκε έτσι η ανάγκη για νέες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη βελτίωση της αξιοποίησης του φάσματος. Οι ερευνητικές αυτές προσπάθειες έχουν στόχο την εξεύρεση λύσεων οι οποίες βασίζονται στην εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος φάσματος με τη χρήση μοντέλων της μικροοικονομίας. Στα πλαίσια αυτά και δεδομένης της συνεχούς απαίτησης για πολλαπλές υπηρεσίες, τα παραδοσιακά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την χρήση μηχανισμών δυναμικής διαχείρισης φάσματος ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των τελικών χρηστών. Με αυτό τον τρόπο το διαθέσιμο φάσμα ασύρματης επικοινωνίας θα αξιοποιηθεί αποτελεσματικότερα**.** Το πρόβλημα αυτό αποτελεί αντικείμενο του τομέα της δυναμικής διαχείρισης φάσματος και των δικτύων Cognitive Radio (CR). Για την βελτιστοποίηση προτείνονται πρωτοποριακοί μηχανισμοί, οι οποίοι βασίζονται σε οικονομικά μοντέλα.

Στα πλαίσια αυτά η πτυχιακή αυτή εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση των συχνοτήτων TV White Spaces οι οποίες θα αξιοποιηθούν σε δίκτυα CR καθώς και στον καθορισμό των σεναρίων χρήσης τους. Οι προτεινόμενες μέχρι σήμερα ερευνητικές λύσεις (state of the art) εισάγουν τους όρους spectrum sharing και spectrum trading που βρίσκουν εφαρμογή στα δίκτυα CR. Συγκεκριμένα, με τις προσπάθειες αυτές επιδιώκεται η εύρεση πιο αποτελεσματικών λύσεων για τη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος με δυναμικούς μηχανισμούς οι οποίοι βασίζονται στις θεωρίες της οικονομίας. Στόχος είναι η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων των ασυρμάτων δικτύων και το ελάχιστο κόστος.

Στα επόμενα κεφάλαια θα αναπτυχθούν τα στοιχεία των CR, όπως η ιδέα των CR, ο ρόλος των συστημάτων και οι υποχρεώσεις τους και η αποδοτική εκμετάλλευση του ράδιο-φάσματος και των spectrum sensing, spectrum sharing και spectrum trading. Τέλος θα αναφερθεί η προσωπική μου συνεισφορά καθώς και το συμπέρασμα μου όσον αφορά στην ανάπτυξη και εφαρμογή των CRN στην επίλυση του προβλήματος κατανομής του διαθέσιμου φάσματος με την βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Ιστορία Ασυρμάτων Δικτύων

Ο Heinrich Rudolf Hertz ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε και παρήγαγε ράδιο-κύματα το 1888 και μέχρι το 1894 ο σύγχρονος, τότε, τρόπος μετάδοσης μηνυμάτων ήταν μέσω τηλεγράφου. Ο Gulielmo Marconi κατάφερε να στείλει και να λάβει μηνύματα, χρησιμοποιώντας ράδιο-κύματα, σε μια απόσταση 2 μιλίων. Το 1899, ο Marconi έστειλε μήνυμα σε απόσταση εννέα μιλίων κατά μήκος του καναλιού του Bristol και σε 31 μίλια κατά μήκος των Αγγλικών καναλιών προς την Γαλλία. Το 1901 ήταν σε θέση να μεταδώσει πέρα από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Εκτοτε ο Marconi έμεινε γνωστός ως ο "*πατέρας του ασυρμάτου*".

Κατά την διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, πρώτος ο στρατός των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποίησε ράδιο-σήματα για μετάδοση δεδομένων. Αυτό ενέπνευσε μια ομάδα ερευνητών το 1971 στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης και έτσι δημιουργήθηκε το πρώτο δίκτυο επικοινωνιών βασισμένο σε πακέτα, το επονομαζόμενο ALOHANET. Το ALOHANET ήταν το πρώτο ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network - WLAN) που ανήκει στην οικογένεια των 802.11 προτύπων. Αυτό το πρώτο WLAN αποτελούταν από 7 υπολογιστές, οι οποίοι βρίσκονταν σε 4 διαφορετικά νησιά, και χρησιμοποιώντας ερασιτεχνικούς ραδιοσταθμούς είχαν την δυνατότητα να επικοινωνούν μέσω αμφίδρομης τοπολογίας αστέρα.

Τα πρώτα WLAN χρησιμοποιούσαν μια unlicensed ζώνη συχνοτήτων (902-928 MHz), η οποία αργότερα γέμισε με παρεμβολές από μικρές συσκευές και βιομηχανικά μηχανήματα, με αποτέλεσμα να επιστρατευθεί η τεχνική διάχυσης φάσματος για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές αυτές. Τα WLAN δεύτερης γενιάς, καθώς και τα τρίτης γενιάς, ήταν τέσσερις φορές πιο γρήγορα σε σχέση με τα αρχικά, με ρυθμό μετάδοσης έως και 2 mbps. [1]

Το 1990, η IEEE 802 εκτελεστική επιτροπή θέσπισε το 802.11 working group για να δημιουργήσει ένα πρότυπο WLAN, το οποίο καθιέρωσε την συχνότητα λειτουργίας στα 2.4GHz. Το 1997 το group αυτό ενέκρινε το IEEE 802.11 ως το πρώτο WLAN που λειτουργεί σε ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 mbps.

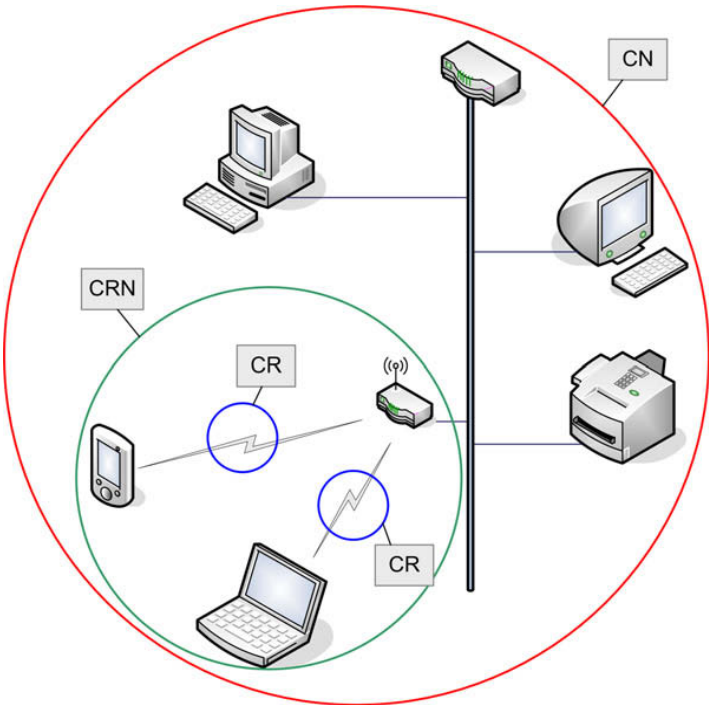
Από τότε μέχρι σήμερα έχουν θεσπιστεί και άλλα πρότυπα όπως τα WPAN, WRAN κτλ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Cognitive Radio και εφαρμογές

2.1. - Cognitive Radio Networks

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για νέες ασύρματες υπηρεσίες και εφαρμογές, καθώς και την αύξηση του αριθμού των ασύρματων χρηστών, το διαθέσιμο ράδιο-φάσμα καθίσταται ολοένα και πιο σπάνιο. Ως αποτέλεσμα, η ομοσπονδιακή επιτροπή επικοινωνιών (FCC) της Αμερικής αναζήτησε νέους τρόπους για τη αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την εισαγωγή του Cognitive Network, το οποίο είναι σύμφωνα με τον ορισμό της FCC (2003): ***"A radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which it operates. This interaction may involve active negotiation or communications with other spectrum users and/or passive sensing and decision making within the radio"***

Η διαφορά μεταξύ cognitive network (CN), cognitive radio (CR) και cognitive radio network (CRN) αφορά μόνο στο πεδίο εφαρμογής τους (Εικ. 1). Το CR εκτείνεται μόνο στο πεδίο της ασύρματης σύνδεσης ενώ το CRN εκτείνεται σε όλο το ασύρματο δίκτυο και σε όλα τα επίπεδα πρωτοκόλλου.

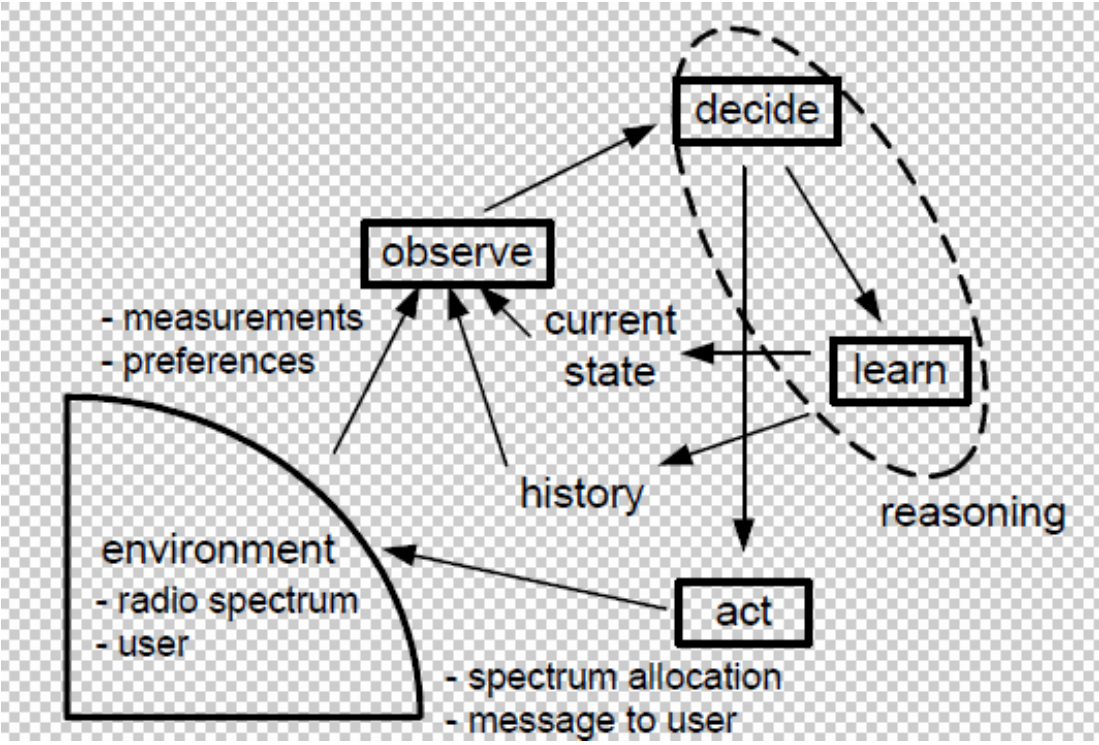


Εικόνα 1. Απεικόνιση του πεδίου εφαρμογής του CR, CRN και CN στο LAN τμήμα ασυρμάτου δικτύου

Το CRN μπορεί να περιγραφεί ως δίκτυο των CR. Τέλος το CN είναι πιο γενικό και εκτείνεται σε ολόκληρο το σύστημα επικοινωνίας μαζί με το κεντρικό δίκτυο. Στο CN, οι αποφάσεις

παίρνονται προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις του δικτύου ως σύνολο, και όχι για τις επιμέρους συνιστώσες του δικτύου.

Το CN ορίζεται ως το δίκτυο με γνωστική ικανότητα που αισθάνεται το περιβάλλον, σχεδιάζει την δράση του σύμφωνα με τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και αποφασίσει για το σενάριο χρήσης που πρέπει να ακολουθήσει. Το σύστημα μαθάινει απο τις προηγούμενες πράξεις του και όλα αυτά ακολουθώντας τον προκαθορισμένο τελικό στόχο.



Εικόνα 2. Κύκλος γνωστικής διαδικασίας του Cognitive Radio

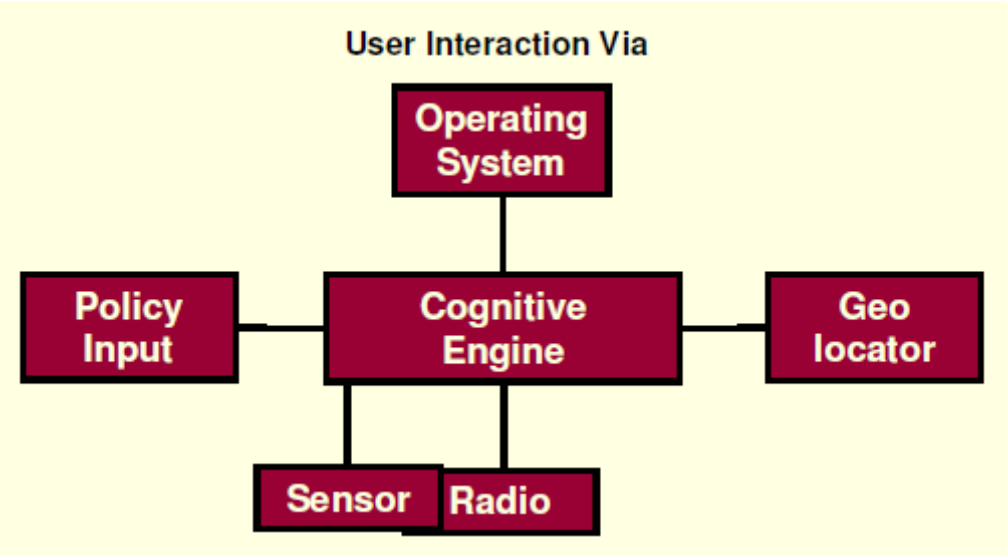
Ο ρόλος του CR μπορεί να περιγραφεί ως μοντέλο με το οποίο ελέγχεται η συμπεριφορά καναλιού επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων (Εικ. 1) με χρήση του γνωστικού κύκλου και της προσαρμογής με ανάδραση (Εικ. 2). Μπορεί δηλαδή να αντιληφθεί πότε ένα ιδιαίτερο τμήμα του ραδιοφάσματος είναι σε χρήση, και να μεταπηδήσει σε άλλο προσωρινά αχρησιμοποίητο χωρίς να παρεμβάλλεται στην εκπομπή άλλων εξουσιοδοτημένων χρηστών. Η τεχνολογία CR είναι μια καινοτόμα φιλοσοφία σχεδιασμού στην διαχείριση ράδιο-κυμάτων. Ο στόχος της είναι να αυξήσει τη χρησιμοποίηση του φάσματος με την αξιοποίηση αχρησιμοποίητου και υπό-χρησιμοποιημένου φάσματος σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η έννοια του CR εισήχθη για τη βελτίωση της χρήσης του φάσματος συχνοτήτων σε ασύρματα δίκτυα. Η βασική ιδέα είναι να επιτραπεί στους χρήστες χωρίς άδεια (unlicensed users) να κάνουν χρήση αδειοδοτημένων (licensed) συχνοτήτων, υπό την προϋπόθεση ότι μπορεί να εξασφαλιστεί η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τους πρωταρχικούς χρήστες. Ωστόσο, αφήνοντας περιθώριο για ευκαιριακή χρήση του ασύρματου φάσματος δημιουργούνται

νέα προβλήματα, όπως η αρμονική συνύπαρξη με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, καθώς και η κατανόηση του μεγέθους της επίδρασης των παρεμβολών τις οποίες κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα μπορεί να δημιουργήσει στους αρχικούς χρήστες [2].
Το CRN έχει την ικανότητα να προσαρμόζει τις παραμέτρους της εκπομπής (π.χ. την ισχύ εκπομπής και την ραδιοσυχνότητα) βάσει της διαδραστικότητας (awareness) με το ραδιο-περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί με δύο κύριους στόχους: την υψηλή πιστότητα της ραδιοεπικοινωνίας και την αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Η awareness αναφέρεται στους μηχανισμούς που κάνουν ικανό το CRN να γνωρίζει τα διαθέσιμα επικοινωνιακά μέσα σε δεδομένο τόπο και χρονική στιγμή. Τα μέσα αυτά περιλαμβάνουν την γεωγραφική τοποθεσία, τα τοπικά δίκτυα και τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Τα κύρια χαρακτηριστικά της ικανότητας αυτής του CRN που κάνουν την τεχνολογία του awareness να ξεχωρίζει είναι δύο[3]:

a. **Cognitive Capability:** Αναφέρεται στην ικανότητα των CRN να αισθάνονται και να συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον στο οποίο εργάζονται. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν στην ανίχνευση των spectrum holes (spectrum sensing), στη δυνατότητα διαμοιρασμού του φάσματος (spectrum sharing) και στον εντοπισμό άλλων πηγών εκπομπής και δικτύων (location identification). Αυτή η δυνατότητα του δικτύου δεν μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή μέσω της παρακολούθησης της ισχύος στο ορισμένο εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει, αλλά απαιτούνται πιο εξεζητημένες τεχνικές προκειμένου να γίνει αισθητή η χωρική και χρονική διαφοροποίηση ώστε να αποφευχθούν παρεμβολές σε άλλα συστήματα. Μέσω αυτής της ικανότητας μπορούν να αναγνωρισθούν τα τμήματα του φάσματος που δεν χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένο χώρο και σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια αναγνωρίζονται οι ευκαιρίες σε ραδιοσυχνότητες σε συνάρτηση του χώρου και του χρόνου. Κατά συνέπεια, κάθε στιγμή και σε κάθε τόπο μπορεί να επιλεχθεί το καταλληλότερο τμήμα του φάσματος (ευκαιριακή χρήση ραδιοσυχνοτήρων) σε συνεργασία με τις κατάλληλες παραμέτρους που ορίζει το κάθε πρωταρχικό σύστημα.

b. **Reconfigurability:** Βάσει της Cognitive Capability, με την οποία αναγνωρίζονται οι ευκαιρίες φάσματος, η Reconfigurability επιτρέπει στο ράδιο-φάσμα να είναι δυναμικά προγραμματιζόμενο σύμφωνα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί όπως, π. χ., να επιλέγει την κατάλληλη συχνότητα λειτουργίας και να αποφεύγει εκπομπή στις συχνότητες που χρησιμοποιούνται από άλλα δίκτυα. Το CRN είναι προγραμματισμένο έτσι ώστε να μπορεί να εκπέμπει και να λαμβάνει σε μια ποικιλία συχνοτήτων καθώς επίσης και να μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνολογίες μετάδοσης, στο μέτρο που υπάρχει η αντίστοιχη υποστήριξη από το hardware του. Ο προγραμματισμός αυτός ακολουθεί ορισμένους κανόνες λειτουργίας (standards) για το τι του επιτρέπεται και τι δεν του επιτρέπεται να κάνει.

Η εικόνα 3 δείχνει την αρχιτεκτονική των κύριων λειτουργικών συστημάτων ενός CR [4]. Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει την γνωστική λειτουργία (cognitive engine) με την οποία εντοπίζονται οι χρήστες του φάσματος (Geolocation) και αναγνωρίζεται το ραδιο-περιβάλλον καθώς και οι ιδιότητες των καναλιών επικοινωνίας με την χρήση αισθητήρων (sensors), αναλύονται τα δεδομένα και δρα έτσι ώστε να πετύχει συγκεκριμένη εφαρμογή ακολουθώντας δεδομένους κανόνες λειτουργίας .



Εικόνα 3. Αρχιτεκτονική λειτουργικών συστημάτων ενός CR

Συνοψίζοντας:

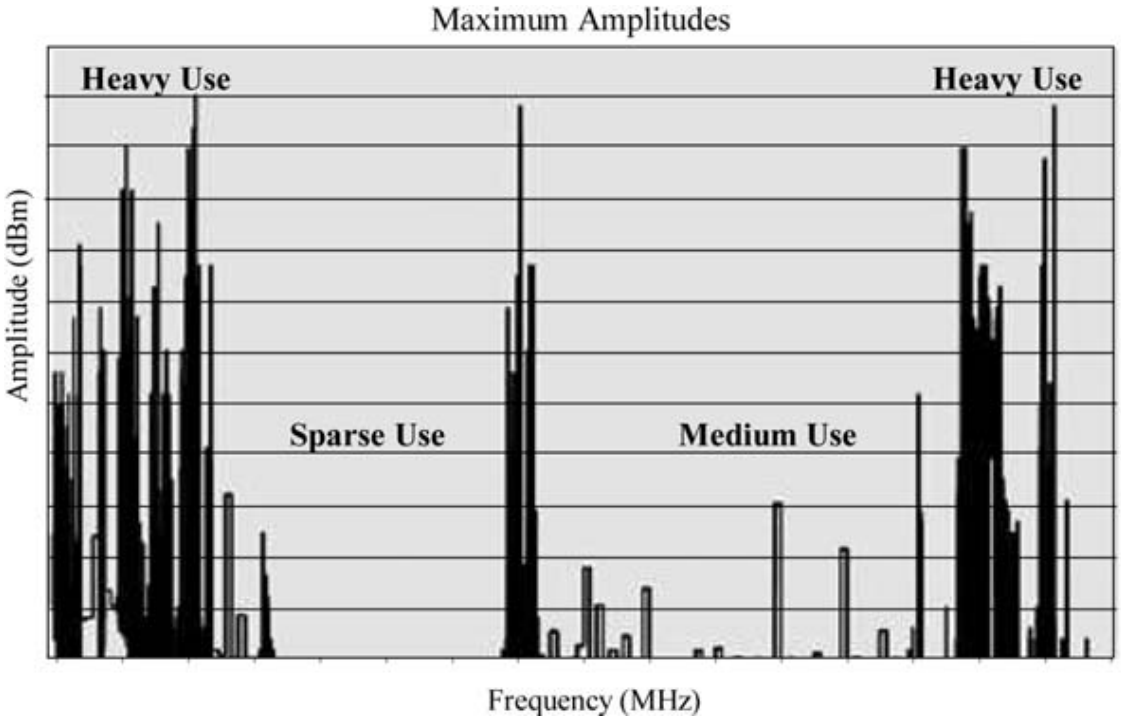
Το Cognitive Radio Network είναι ευλύγιστο ασύρματο δίκτυο με γνωστική ικανότητα που μπορεί να:

- Αισθάνεται το ραδιο-περιβάλλον λειτουργίας του.
- Προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά εκπομπής.
- Χρησιμοποιεί το ευκαιριακά διαθέσιμο φάσμα.

2.2. Σημαντικές εφαρμογές των CRN

Τον τελευταίο καιρό τα Cognitive Radio Networks (CRN) είναι στο επίκεντρο των ερευνών και των εξελίξεων ως η τεχνολογία που επιτρέπει την πρόσβαση στα ονομαζόμενα TV White Spaces (TVWS). Τα τμήματα αυτά χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα σποραδικά όπως φαίνεται στην εικόνα 4 που δίνει την κατανομή ισχύος του σήματος σε μεγάλο τμήμα του

ασύρματου φάσματος [3]. Δηλαδή, η χρήση του φάσματος επικεντρωνόταν σε ορισμένα τμήματα, ενώ σημαντική ποσότητα φάσματος παρέμενε αχρησιμοποίητη.



Εικόνα 4. Χρήση ασύρματου φάσματος βάσει της κατανομής ισχύος σήματος σε μεγάλο τμήμα του φάσματος

Μία άλλη σημαντική εφαρμογή των CRN είναι η παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband wireless access, BWA) σε licensed ζώνες συχνοτήτων σε δευτερεύουσα (secondary) βάση πρόσβασης. Οι ζώνες αυτές χρησιμοποιούνται για την τηλεοπτική μετάδοση. Αυτή η έννοια είναι υπό εξέταση προκειμένου να διαπιστωθεί κάτω από ποιες συνθήκες η BWA θα μπορούσε να είναι βιώσιμη [5].

Μερικές απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές απαιτούν επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, τις οποίες τα CR μπορεί να μην είναι σε θέση να υποστηρίξουν με επαρκές δευτερεύον φάσμα συχνοτήτων. Οι αστικές περιοχές έχουν διαθέσιμο λιγότερο φάσμα, με αποτέλεσμα το BWA να μπορεί να εκπέμπει σε μικρότερες αποστάσεις με μεγαλύτερη χωρική επαναχρησιμοποίηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χωρικής επαναχρησιμοποίησης είναι η επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων στις κινητές τηλεπικοινωνίες.

Με απόφασή της, στις 4 Νοεμβρίου 2008, η FCC επέβαλε μια σημαντική προϋπόθεση, ότι οι white space ασύρματες συσκευές δεν πρέπει να παρεμβαίνουν σε κατεστημένους φορείς, συμπεριλαμβανομένων των τηλεοπτικών εκπομπών και ασύρματης μετάδοσης μικρόφωνα. Η πρόσφατη πρόταση της FCC στην Αμερική δημιουργεί την προοπτική της αποκλειστικής πρόσβασης σε πολύτιμο ράδιο-φάσμα. Ακολουθώντας και η Ευρωπαική Ένωση εξέδωσε αναγγελία και χρονοδιάγραμμα στις χώρες-μέλη της για την ψηφιακή μετάβαση. Τόσο στις

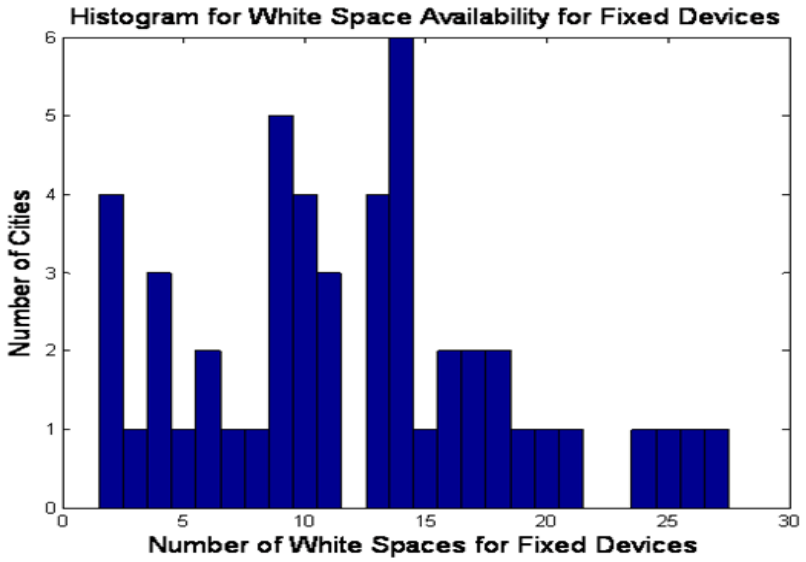
ΗΠΑ, όσο και στην Ευρώπη, οι ρυθμιστικές αρχές ήδη έχουν δώσει υπό όρους έγκριση σε αυτόν τον νέο τρόπο πρόσβασης.

Προφανώς δεν είναι όλα ευνοϊκά όσον αφορά στα CRN, καθώς συναντώνται δυσκολίες και εγείρονται προκλήσεις στο sensing κομμάτι των δικτύων, καθώς και στον σχεδιασμό των MAC και PHY επιπέδων (layers).

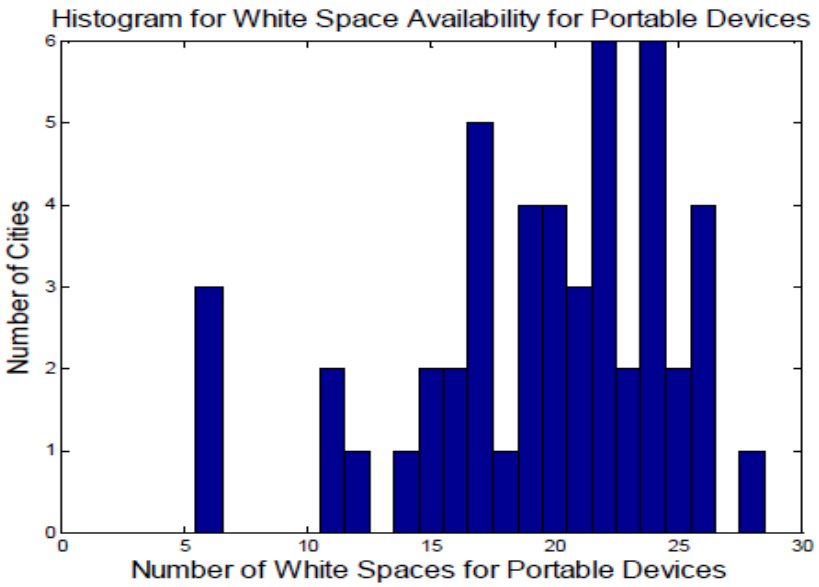
Οι συσκευές που λειτουργούν σε αυτό το πεδίο συχνοτήτων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε σταθερές (fixed) και φορητές (portable) συσκευές. Στις fixed συσκευές έχει επιτραπεί η εκπομπή με μέγιστη ισχύ 30 dBm, ενώ στις portable έως 20 dBm (Σημείωση). Είναι δηλαδή εφαρμογές μικρής ισχύος.Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο είναι τα Very High Frequency (VHF) κανάλια 2-13 καθώς και τα Ultra High Frequency (UHF) κανάλια 14-51. Παρ' όλα αυτά δεν είναι όλα τα κανάλια διαθέσιμα για όλων των ειδών τις συσκευές (Εικόνες 5 και 6) [6].

Σημείωση

Το dBm ή dBmW είναι συντόμευση που εκφράζει την ισχύ εκπομπής σε σχέση με τα milliWatt.
Τα decibels (dB) είναι ένας τρόπος με τον οποίο εκφράζονται λόγοι ισχύος σε συμπυκνωμένη μορφή. Αν P1 είναι η μετρούμενη ισχύς και P2 η ισχύς αναφοράς, τότε η εξίσωση για τα decibels είναι
dB = 10×log10(P1/P2).
Δηλαδή dB είναι 10 φορές ο δεκαδικός λογάριθμος του λόγου P1/P2, όπου οι ισχύεις P1 και P2 εκφράζονται στις ίδιες μονάδες, π.χ., W ή mW.
Όταν η ισχύς αναφοράς P2 είναι 1 W, τότε μιλούμε για έκφραση ισχύος σε dBW:
ισχύς σε dBW = 10×log10(P1/1 W).
Όταν η ισχύς αναφοράς P2 είναι 1 mW, τότε μιλούμε για έκφραση ισχύος σε dBm :
ισχύς σε dBm = 10×log10(P1/1 mW).
Για παράδειγμα, αν P1 = 0.015 mW = 0.000015 mW = 15·10-6 mW, τότε η ισχύς P1 σε dBm είναι:
10×log10(0.000015/1) = 10×log10(0.000015/1) = 10×(-4.824) = -48.2 dBm.
Αν μας δίνεται ότι η ισχύς σε dBm είναι -30dBm, τότε η P1 είναι X mW, όπου
-30 = 10×log10(X /1) ή -3 = log10(X) ή 10-3 = X, άρα P1 = 10-3 mW = 1μW.



Εικόνα 5. Ιστόγραμμα διαθεσιμότητας WS για λειτουργία σταθερών συσκευών



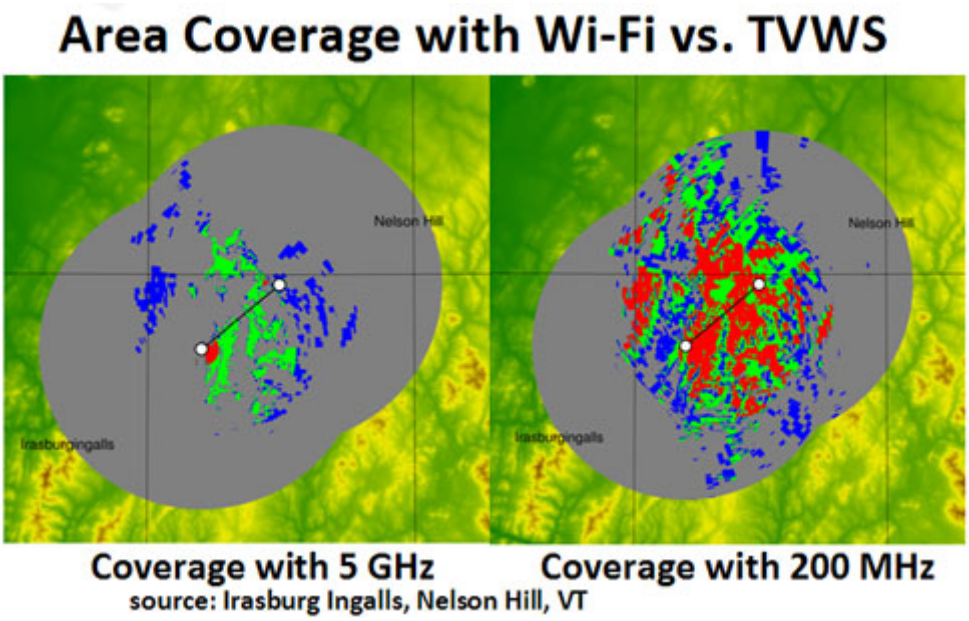
Εικόνα 6. Ιστόγραμμα διαθεσιμότητας WS για λειτουργία φορητών συσκευών

2.3. TV White Spaces

Η τηλεόραση χρησιμοποιεί φάσμα το οποίο είναι βασισμένο σε ένα προτύπο που θεσπίστηκε πριν 60 χρόνια, όταν υπήρχαν πολύ λίγες εναλλακτικές δυνατότητες χρήσης αυτών των συχνοτήτων. Από τότε υπήρξαν σημαντικές καινοτομίες, όπως η έγχρωμη τηλεόραση και η κινητή τηλεφωνία.

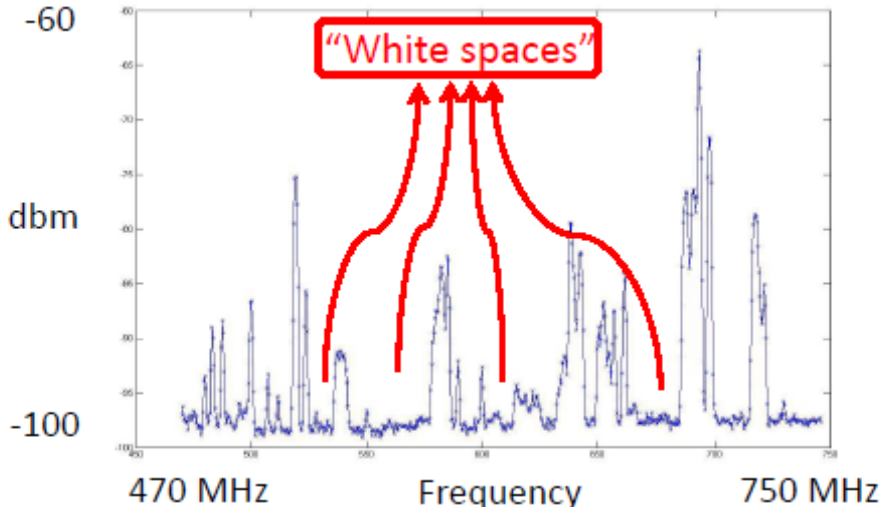
Εντούτοις αυτό το σημαντικό φάσμα χρησιμοποιείται ακόμα σύμφωνα με σχέδιο που εφαρμόστηκε προς το τέλος της δεκαετίας του '50. Το φάσμα αυτό στην ζώνη μεταξύ 470-863 MHZ (UHF band) χρησιμοποιούταν ευρέως για την μετάδοση της τηλεόρασης λόγω της ευρύτερης και καλύτερης κάλυψης.

Τα χαρακτηριστικά διάδοσης των UHF επιτρέπουν μια σχετικά καλή εμβέλεια εκπομπής σε συγκριτικά χαμηλή ισχύ. Για παράδειγμα, με ισχύ εκπομπής 100mW, σήμα στην UHF θα μπορούσαν να ληφθεί σε 100m, ενώ στη συχνότητα των 2.4 GHz η εμβέλεια περιορίζεται σε 50 m, και στα 5 GHz περιορίζεται σε 30 μέτρα. Αυτό σημαίνει ότι για την δικτυακή κάλυψη μικρών κοινοτήτων, όπως στις αγροτικές περιοχές, είναι προτιμότερη η χρήση White Spaces στην περιοχή των UHF (Εικόνα 7). Η λύση αυτή είναι λιγότερο δαπανηρή και περισσότερο αποδοτική ενεργειακά, από ό, τι σε υψηλότερες συχνότητες.



Εικόνα 7. Διαφορά μεταξύ 5GHz και 200MHz στην κάλυψη περιοχής

Πρόσφατα (2008) η FCC επέτρεψε την χρήση των white spaces για τηλεοπτική εκπομπή σε unlicensed users. Σήμερα που η ζήτηση για ραδιοφάσμα είναι εξαιρετικά μεγάλη, τα White spaces είναι σημαντικός πόρος φάσματος για τηλεοπτική μετάδοση (TV White Spaces) στην περιοχή των UHF, η οποία παραμένει εντούτοις σε σημαντικό βαθμό αναξιοποίητη. Παράδειγμα αναποτελεσματικής χρήσης του licensed spectrum δίνεται στην Εικόνα 8 [7].



Εικόνα 8. Παράδειγμα αναποτελεσματικής χρήσης του licensed spectrum

Η πλέον άμεση δυνητικά εφαρμογή των White spaces είναι η επέκταση της ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο. Τα TVWS είναι τα τηλεοπτικά κανάλια σε κάθε γεωγραφική περιοχή που είναι αχρησιμοποίητα ή που χρησιμοποιούνται αναποτελεσματικά. Η χρήση των TVWS έγινε δυνατή μετά την επέλαση της ψηφιακής τηλεόρασης και την απελευθέρωση συχνοτήτων που ήταν δεσμευμένες από τους κανονισμούς που ίσχυαν για την αναλογική μετάδοση. Τα TVWS γίνονται διαθέσιμα κατά γεωγραφική βάση, μετά την επιβαλλόμενη μετάβαση από αναλογική σε ψηφιακή τηλεόραση.

Τα TVWS αποτελούνται από μεγάλα τμήματα του φάσματος στον χώρο των Very High Frequency/Ultra High Frequency/ (VHF/UHF). Η φασματική κατανομή τους δίνεται στον πίνακα 1.

TV White Space Spectrum Allocation		
TV Channels (1)	**Spectrum** (2)	**Band**
2, 3, 4	54 – 72 MHz	VHF – Low-band
5, 6	76 – 88 MHz	VHF – Low-band
7 – 13	174 – 216 MHz	VHF – High-band
14 – 51	470 – 698 MHz	UHF band

Πίνακας 1. Κατανομή του ραδιοφάσματος των TV White Spaces

Κάθε διαθέσιμο τηλεοπτικό κανάλι παρέχει φάσμα με εύρος ζώνης 6 MHz που είναι επαρκές για ευρυζωνικές εφαρμογές, και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στις αγροτικές περιοχές.

Τα TV White Spaces είναι επίσης γνωστά και ως interleaved spectrum, διότι δεν γίνεται πλήρης χρήση του συγκεκριμένου εύρους φάσματος αλλά παρεμβάλλονται κενά εφόσον χρησιμοποιείται για την επίγεια ψηφιακή τηλεόραση σε συγκεκριμένη γεωγραφική

τοποθεσία. Ως εκ τούτου υπάρχει διαθέσιμο ένα εύρος συχνοτήτων του φάσματος για άλλες υπηρεσίες με μία κοινή ή interleaved βάση. Σε σύγκριση με άλλες μπάντες συχνοτήτων, η περιοχή του φάσματος που περιέχει τα TVWS έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες για αξιόπιστες επικοινωνίες δεδομένων [8].

Σκοπός της ύπαρξης των φασματικών κενών στην interleaved βάση είναι η πρόληψη διακαναλικών παρεμβολών για την σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου. Τα κενά αυτά είναι κομμάτια φάσματος, τεμαχισμένα εξ ορισμού και σκόρπια μέσα στην ζώνη συχνοτήτων (Πίνακας 1 και Εικ. 9).

Εικόνα 9. Το διαθέσιμο VHF και UHF TV φάσμα στην Αγγλία μετά την ψηφιακή μετάβαση (Source: Ofcom Consultation, Feb. 16 2009)

2.4. Συστήματα – Τεχνικές

2.4.1. Συστήματα

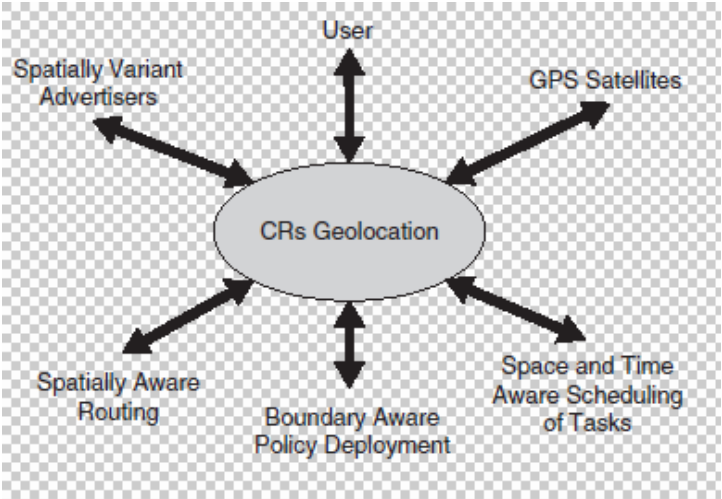
Τα σημερινά ασύρματα συστήματα, ή αλλιώς χρήστες, ακολουθούν μια σταθερή πολιτική εκχώρησης φάσματος που οδηγεί τελικά σε αναποτελεσματική χρήση του._Λόγω των αναδυόμενων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και του μεγάλου αριθμού των χρηστών με ακόμη υψηλότερες απαιτήσεις χωρητικότητας, η έλλειψη φάσματος είναι ζήτημα που απασχολεί τους φορείς εκμετάλλευσης. Η αναποτελεσματικότητα και η ανεπάρκεια στη χρήση του ράδιο-φάσματος απαιτεί ένα νέο πρότυπο για τις επικοινωνίες, όπως η δυνατότητα ευκαιριακής χρήσης του διαθέσιμου φάσματος.

Τα Cognitive Radio είναι μια τεχνολογία ευρείας διάδοσης που έχει την δυνατότητα από την μια να αυξήσει τη χρησιμοποίηση του ράδιο-φάσματος και από την άλλη να παρέχει την επιθυμητή προστασία έναντι των παρεμβολών σε αδειοδοτημένα συστήματα. Τα μη αδειοδοτημένα συστήματα πρέπει να εξυπηρετηθούν εξίσου, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανόνες χρήσεως. Τα Cognitive Radio Networks είναι ευρέως αποδεκτά ως μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση για την επίλυση των προβλημάτων του φάσματος, καθώς έχουν προταθεί πολλά MAC (Medium Access Control) πρωτόκολλα για τα secondary συστήματα, έτσι ώστε να επωφελούνται από τα αχρησιμοποίητα κανάλια που δεν καταλαμβάνονται από τους primary χρήστες όσον αφορά στα δίκτυα εκείνα που είναι βασισμένα σε TDMA (time division multiple access). Στα CRN τα συστήματα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες: τα αδειοδοτημένα συστήματα και τα μη-αδειοδοτημένα συστήματα. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες έχει διαφορετικές υποχρεώσεις και διαφορετικά δικαιώματα.

Σε πρόσφατη πρότασή της η FCC συζητά τρείς πιθανές τεχνικές έτσι ώστε οι unlicensed χρήστες/συστήματα να μπορούν να διαπιστώσουν αν μέρος των White Spaces είναι προς χρήση για δεδομένη θέση στο φάσμα [9].

1. **Passive sensing ("listen-before-talk")**: Τεχνική για την ανίχνευση τυχόν παρουσίας τηλεοπτικού σήματος. Πρακτικά, ανιχνεύει το κανάλι μετάδοσης και εφόσον δεν είναι κατειλημμένο, το δεσμεύει προς χρήση.

2. **Geolocation:** Για την αναγνώριση των δεσμευμένων συχνοτήτων χρησιμοποιούμε την GPS (Εικόνα 10) ή άλλη τεχνολογία εντοπισμού, ενώ παράλληλα γίνεται έλεγχος στις βάσεις δεδομένων.

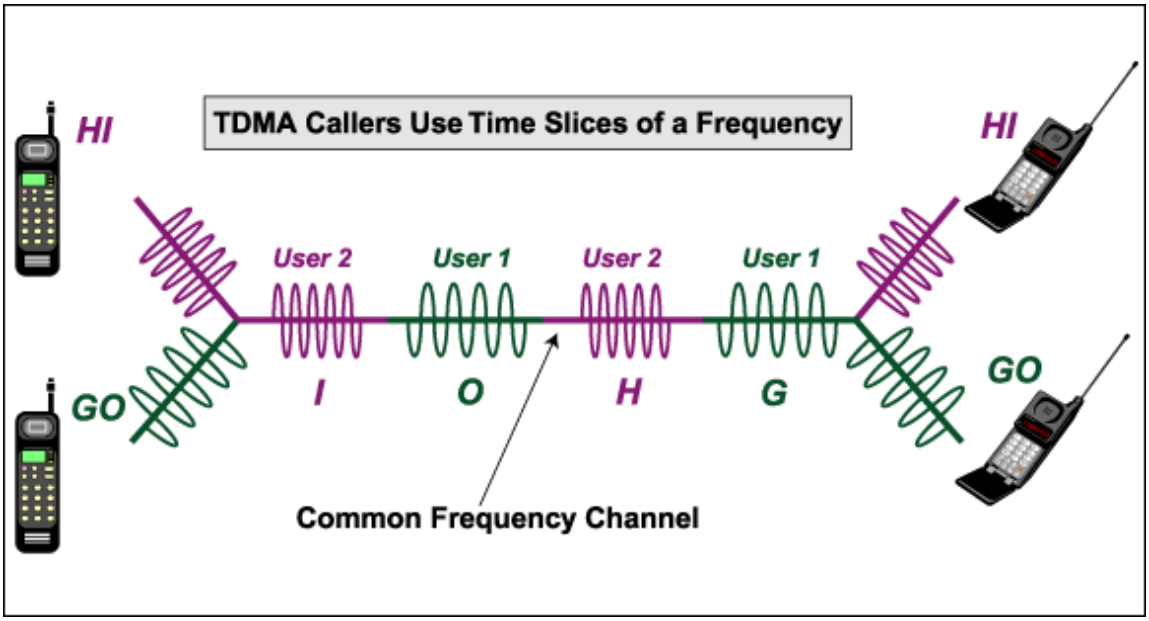


Εικόνα 10. Εφαρμογή του CR για geolocation μέσω αντίδρασης με το ραδιο-περιβάλλον

3. **Use of separate beacon:** Με την βοήθεια ενός ξεχωριστού πομπού, αναγνωρίζουμε τις συχνότητες εν χρήση. Ο πομπός αυτός επισημαίνει ποιό μέρος του φάσματος είναι διαθέσιμο σε μια τοπική περιοχή.

2.4.2. Τεχνική TDMA

Το TDMA είναι μια μέθοδος πρόσβασης καναλιών, η οποία επιτρέπει σε πολλά συστήματα, ή χρήστες, να μοιράζονται το ίδιο κανάλι συχνοτήτων διαιρώντας το σήμα και τοποθετώντας το σε διαφορετικές χρονοθυρίδες. Σε κάθε χρήστη αντιστοιχεί μία χρονοθυρίδα κατά την διάρκεια της οποίας του επιτρέπεται να μεταδίδει. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο διαμοιρασμός του ίδιου μέσου μετάδοσης από πολλούς χρήστες, καθώς επίσης και η πλήρης εκμετάλλευση χωρητικότητας ορισμένου τμήματος του φάσματος. Η τεχνική TDMA έγινε ευρέως γνωστή από την χρήση της στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς, όπως το GSM (Global System for Mobile Communications). Επίσης βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα δορυφορικά συστήματα. Παρόμοια τεχνική χρησιμοποιεί και η τεχνική FDMA, διαιρώντας την συχνότητα αντί να διαιρείται ο χρόνος.

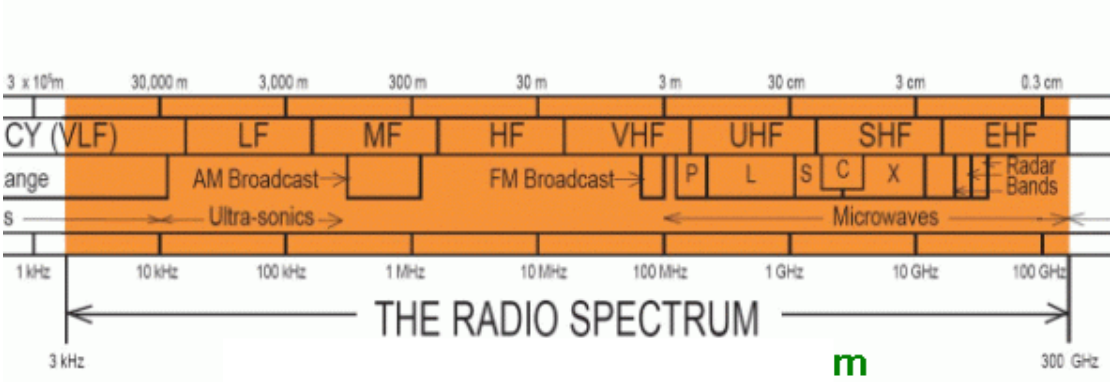


Εικόνα 11. Παράδειγμα αρχής λειτουργίας της TDMA τεχνικής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Διαχείριση ραδιοφάσματος

3.1. Ραδιοφάσμα

Όταν αναφερόμαστε στο ράδιο-φάσμα, αναφερόμαστε στο κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αντιστοιχεί στις ράδιο-συχνότητες, δηλαδή στις συχνότητες που βρίσκονται κάτω από τα 300GHz (Εικ. 12). Αντίστοιχα και ισοδύναμα αναφερόμαστε σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1mm.



Εικόνα 12. Το φάσμα συχνοτήτων για τις ασύρματες επικοινωνίες εκτείνεται από 3 kHz μέχρι 300 MHz

Διάφορετικά μέρη του ράδιο-φάσματος χρησιμοποιούνται για διαφορετικές τεχνολογίες μετάδοσης και για διαφορετικές εφαρμογές. Τυπικά το ράδιο-φάσμα, σε αναπτυγμένες χώρες, ρυθμίζεται από την κυβέρνηση ή πιο συγκεκριμένα από κυβερνητικές ομάδες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις πωλείται ή αδειοδοτείται σε φορείς ιδιωτικής μετάδοσης, όπως είναι οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας ή οι τηλεοπτικοί σταθμοί [10].

Το Cognitive Radio έχει ευρέως οριστεί ως ένα σύστημα το οποίο: αισθάνεται το περιβάλλον λειτουργίας του, έχει την δυνατότητα εκμάθησης και αυτόματα προσαρμόζει τις συνθήκες ή τις παραμέτρους εκπομπής με ανάδραση. Η λειτουργία αυτή γίνεται σε συνεργασία με ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Από μια απλή συσκευή εκπομπής μέχρι τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας επόμενης γενίας, η έννοια του Cognitive Radio υιοθετήθηκε ως σύμβολο της χρήσης του ράδιο-φάσματος και της ευκολίας του χρήστη [11].

Ένα παράδειγμα συμβατού ασύρματου Cognitive Radio τοπικού δικτύου (WLAN), το οποίο χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας, είναι το IEEE 802.11 a/b/g. Με την επιλογή του καταλληλότερου γειτονικού διαθέσιμου φάσματος υπάρχει η δυνατότητα να παρέχεται στους χρήστες αυτόματα συνεχής σύνδεση στο διαδίκτυο χωρίς διακοπές. Αυτό γίνεται χωρίς την παρέμβαση του χρήστη και χωρίς να είναι υποχρεωμένος να γνωρίζει τα περιβάλλοντα γειτονικά ραδιο-συστήματα (δίκτυα).

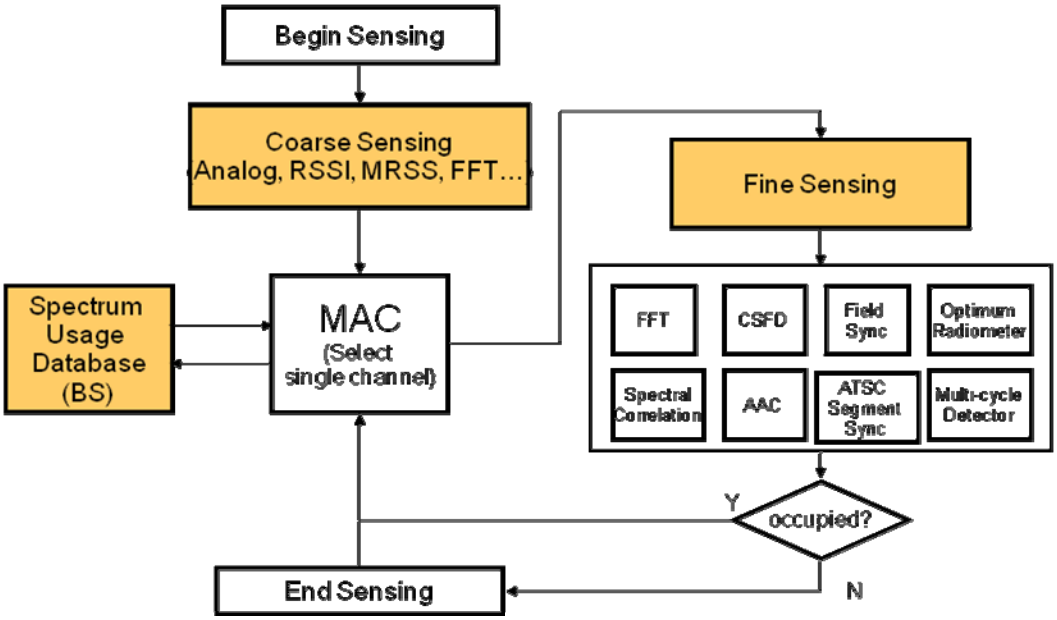
3.2. Spectrum Sensing

Με την αύξηση του ενδιαφέροντος των καταναλωτών, όσον αφορά στις ασύρματες υπηρεσίες, αυξήθηκε κατακόρυφα και η ανάγκη για ράδιο-φάσμα. Επιπλέον με την κυκλοφορία διαφόρων συσκευών και εφαρμογών που κάνουν χρήση της ασύρματης τεχνολογίας καθώς επίσης και λόγω της επιτακτικής ανάγκης για ευρυζωνική ασύρματη σύνδεση, η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί και στο άμμεσο μέλλον.

Η συμβατική προσέγγιση της διαχείρισης του φάσματος είναι πολύ ανελαστική, με την έννοια ότι σε κάθε φορέα εκμετάλλευσης έχει χορηγηθεί αποκλειστική άδεια χρήσεως σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Παρόλα αυτά με την πλειονότητα του φάσματος ήδη υπό κατάληψη καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο να βρεθούν κενά, έτσι ώστε να ευνοηθεί η ανάπτυξη νέων υπηρεσιών ή να ενισχυθούν οι ήδη υπάρχουσες.

Από την άλλη πλευρά, όπως αποδεικνύεται από πρόσφατες μετρήσεις, το εκχωρημένο φάσμα σπάνια χρησιμοποιείται στο μέγιστο μέσα στον χρόνο και τον χώρο. Το σχετικά χαμηλό ποσοστό χρήσης του εκχωρημένου φάσματος υποδεικνύει πως ή έλλειψη του, όπως γίνεται αντιληπτό σήμερα, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αναποτελεσματική χρήση του φάσματος λόγω σταθερής κατανομής και όχι στην φυσική έλλειψη του [12].

Εξαιτίας των συνθηκών αυτών εισάγεται η έννοια της ανίχνευσης φάσματος (Spectrum sensing). Ο κύριος ρόλος της spectrum sensing είναι η ανίχνευση του αχρησιμοποίητου ράδιο-φάσματος και ο διαμοιρασμός του σε άλλους χρήστες δίχως επιζήμιες παρεμβολές με τα primary δίκτυα. Η ανίχνευση του φάσματος από κοινού με την ανίχνευση των primary συστημάτων, τα οποία αποτελούν σημαντική απαίτηση των Cognitive Radio Networks, είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την ανίχνευση κενών στο ράδιο-φάσμα [13]. Στην εικόνα 13 δίνεται δυνατή στρατηγική που ακολουθείται για Spectrum sensing και η αντίστοιχη αρχιτεκτονική της σύμφωνα με [14].



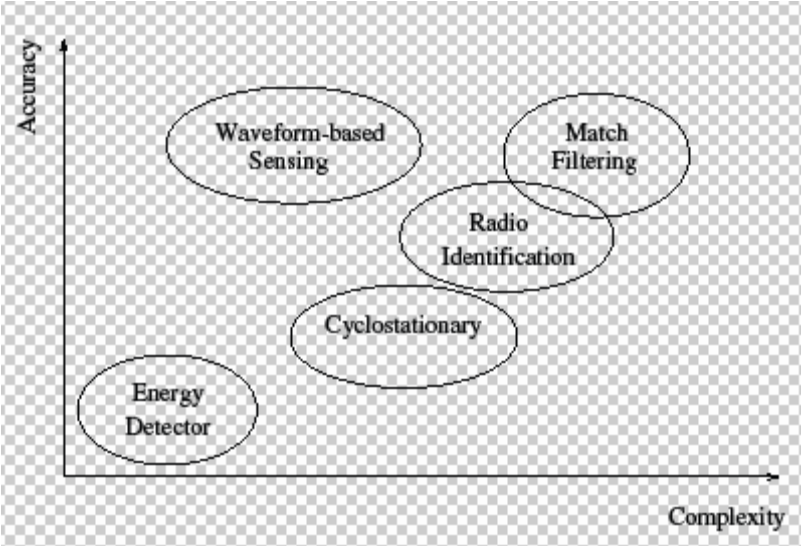
Εικόνα 13. Στρατηγική και συστήματα για ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing)

Ειδικότερα, οι τεχνικές για την ανίχνευση των κενών του φάσματος μπορούν να χωριστούν σε τρείς κατηγορίες (Εικ. 14):

1. ***Ανίχνευση πομπού:*** Τα CR πρέπει να έχουν την δυνατότητα να μπορούν να καθορίσουν εάν το σήμα από τον primary πομπό, ο οποίος είναι τοπικά εγκατεστημένος, είναι εν ενεργεία. Την δυνατότητα αυτή τους την προσφέρουν τα:
   - *Matched Filter Detection*
   - *Energy Detection*
   - *Cyclostanionary Feature Detection*

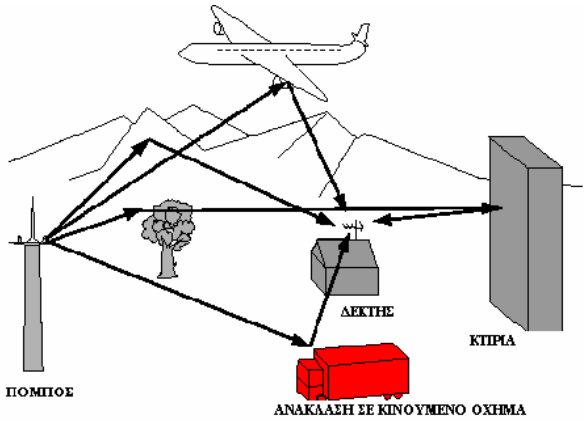
2. ***Συνεταιρική ανίχνευση (cooperative sensing):*** Αναφέρεται στις μεθόδους ανίχνευσης του φάσματος, όπου οι πληροφορίες που προέρχονται από πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες ενσωματώνονται σε ενιαίο σύνολο για να ανιχνευθούν οι πρωταρχικοί χρήστες.

3. ***Ανίχνευση βάσει παρεμβολών***



Εικόνα 14. Κύριες μέθοδοι ανίχνευσης φάσματος σε συνάρτηση της ακρίβειας (accuracy) στην ανίχνευση και της πολυπλοκότητας (complexity) στην τεχνική ανίχευσης

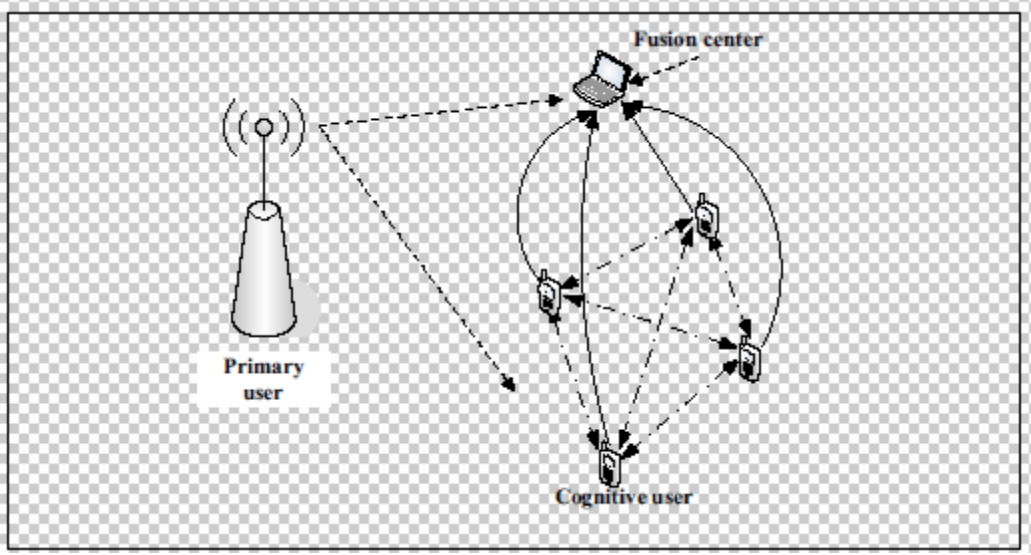
Όπως προαναφέρθηκε, το Spectrum Sensing είναι μια βασική λειτουργία των Cognitive Radio Networks. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τις παρεμβολές που δημιουργούνται από τα κανάλια πολλαπλών διαδρομών λόγω ανακλάσεων κτλ (Εικ. 15), οι τεχνικές του Spectrum Sensing που εφαρμόζονται στον δέκτη πρέπει να παρέχουν και να εγγυώνται την ασφάλεια και την προστασία των συστημάτων από παρεμβολές [11].



Εικόνα 15. Παράδειγμα παρεμβολών από κανάλια πολλαπλών διαδρομών

Σύμφωνα με την FCC, η κυριότερη απαίτηση για να είναι εφικτό το Spectrum Sensing (SS) είναι πως οι fixed και portable συσκευές, όπου με μια λέξη ονομάζονται TVBD (TV Band Device), θα πρέπει να είναι σε θέση να μπορούν να ανιχνεύσουν την παρουσία ψηφιακών ή αναλογικών τηλεοπτικών σημάτων και σημάτων από ασύρματα μικρόφωνα σε ένα επίπεδο ισχύος λήψης της τάξεως των -114 dBm. Καθώς ο θόρυβος σε ένα κανάλι των 6 MHz είναι συνήθως περίπου -100 dBm, πολλές φορές η ισχύς λήψης σε SNR (Signal to Noise Ratio) είναι γύρω στα -15 dBm. Αυτό το σενάριο ισχύει όταν έχουμε μόνο μια TVBD εν ενεργεία.

Όταν πολλές συσκευές τέτοιου τύπου συνδέονται για να σχηματίσουν ένα δίκτυο εγείρονται διάφορα ζητήματα. Ένα τέτοιας φύσεως ζήτημα είναι το λεγόμενο collaborative sensing κατά το οποίο επιδιώκεται η συνεφαρμογή ιδεών από distributed detection σε συνδυασμό με data fusion (Εικ. 16).



Εικόνα 16. Σχήμα δικτύου για συνεταιρική ανίχνευση. Οι πληροφορίες που προέρχονται από πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες ενσωματώνονται σε ενιαίο σύνολο και μεταβιβάζονται στο fusion center

Στην συνέχεια με την από κοινού επεξεργασία επιτυγχάνονται τα στατιστικά στοιχεία για Spectrum Sensing από πολλαπλά TVBD. Εφόσον γίνει σωστή αξιοποίηση της πολυμορφίας, η οποία είναι απόρροια των κατανεμημένων παρατηρήσεων, τότε επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση αξιοποίησης του φάσματος και της ανίχνευσης του [6].

Συνεχίζοντας, το σημαντικότερο πρόβλημα που προκύπτει από την χρήση των TVBD στα white spaces είναι οι παρεμβολές. Η διευθέτηση των παρεμβολών μεταξύ κόμβων του ιδίου δικτύου είναι ένα πρόβλημα με πολλές πτυχές, το οποίο γίνεται πιο δύσκολο όταν αυτές οι συσκευές ανήκουν σε ετερογενή δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικές διεπαφές.

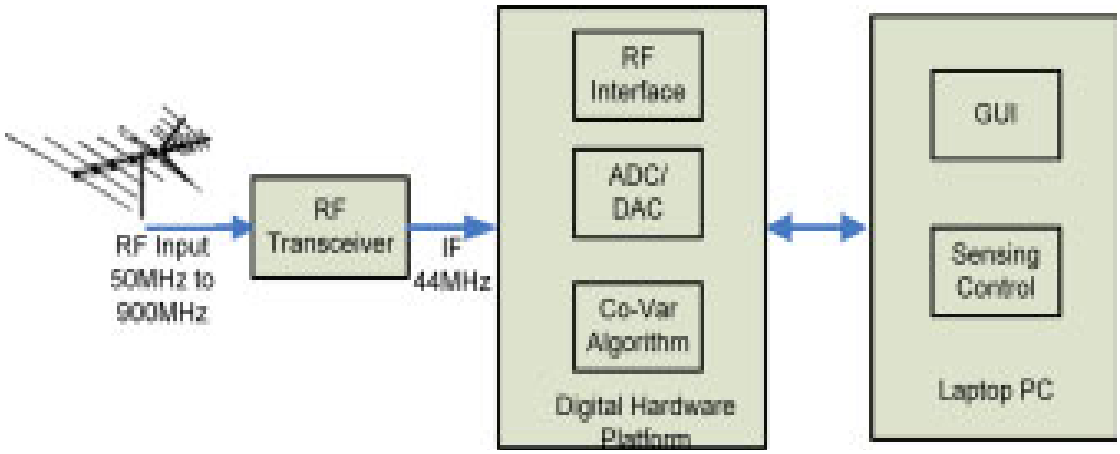
3.2.1 Co-Variance-Based Spectrum-Sensing Algorithm

Σε αυτό το σημείο δίνουμε το παράδειγμα συγκεκριμένου Spectrum Sensing αλγόριθμου. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται Co-Variance-Based Spectrum-sensing algorithm.

Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται σε αυτόνομα Hardware Prototypes. Το prototype, μια συσκευή που μπορεί να «αισθάνεται» (sensing) τα white spaces, ενεργοποιείται για τον προσδιορισμό κατάληψης κάποιου καναλιού, είτε ψηφιακής τηλεόρασης είτε ασυρμάτων μικροφώνων ή άλλων πρωτογενών μεταδόσεων. Σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι η ανεξαρτησία του από τον τύπο μετάδοσης με τον οποίο έχει καταληφθεί το

κανάλι. Η ουσία είναι ότι αλγόριθμος αυτός μπορεί να ανιχνεύσει κενά συχνοτήτων στο ράδιο-φάσμα.

Στην συνέχεια ένα βιομηχανικό πρότυπο ονόματι Commercial off-the-self (COTS) μετατρέπει το εύρος που χρησιμοποιείται στην τηλεόραση στην περιοχή συχνοτήτων RF, από 50 μέχρι και 1000 MHz, ανά 44MHz αναλογικών ενδιάμεσων συχνοτήτων (Intermediate Frequency, IF). Στη συνέχεια η διαδικασία του sensing γίνεται στις IF, οπότε με χρήση κατάλληλων φίλτρων το τρέχον prototype μπορεί να ανιχνεύσει κανάλια με εύρος ζώνης 6MHz. Με αλλαγές στις ιδιότητες των φίλτρων "καναλοποίησης", μπορούμε να πετύχουμε ανίχνευση στα 7 και 8MHz. Οι αναλογικές IF ψηφιοποιούνται και μετατρέπονται περαιτέρω σε ψηφιακές IF μέσω μιας ψηφιακής πλατφόρμας. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης και ο έλεγχος του τίθενται επίσης σε εφαρμογή στο COTS.
Εφόσον η ανίχνευση ενός καναλιού αρχικοποιηθεί σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του αλγόριθμου, στο GUI (Graphical Unit Interface), ο δέκτης προσαρμόζεται στο συγκεκριμένο κανάλι. Στην συνέχεια λαμβάνει χώρα η ψηφιοποίηση των ενδιάμεσων συχνοτήτων [15]. Τέλος οι λειτουργίες ανίχνευσης ελέχγονται και συντονίζονται από τον sensing controller. Το διάγραμμα λειτουργίας του spectrum sensing των CRN με την βοήθεια του CVBSSA δίνεται στην εικόνα 17.

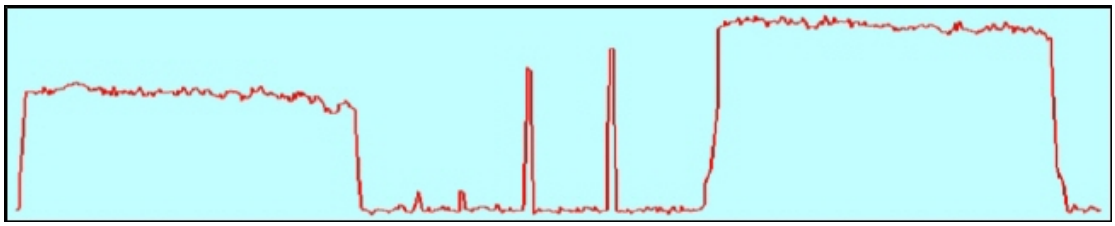


Εικόνα 17. Διάγραμμα τεχνικής spectrum sensing των CRN με χρήση του CVBSSA

3.3 Spectrum Sharing

Το ράδιο-φάσμα δεν είναι πλήρως αξιοποιημένο λόγω της πολύπλοκης και χρονοβόρας διαδικασίας ρύθμισης του από προτάσεις της FCC. Τα CRN λειτουργούν σε ένα περιβάλλον συχνοτήτων το οποίο προοριζόταν για συστήματα παροχής υπηρεσιών, όπως κινητή τηλεφωνία. Σκοπός των CRN είναι η ανεύρεση αχρησιμοποίητων πόρων του

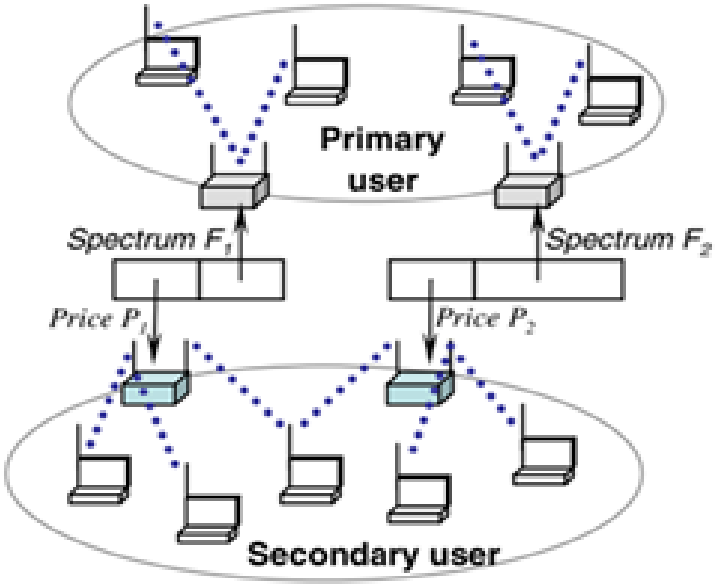
ραδιοφάσματος και η ευκαιριακή χρήση τους σε συγκεκριμένο χρόνο και σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση , χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία των primary συστημάτων/χρηστών.



Εικόνα 18. Παράδειγμα spectrum sharing με αποφυγή παρεμβολών: λειτουργία ασυρμάτων μικροφώνων σε προσωρινά αχρησιμοποίητες ραδιοσυχνότητες μεταξύ επίγειων DVB channels

Παράδειγμα του spectrum sharing με παράλληλη αποφυγή παρεμβολών δίνεται στην εικόνα 18. Όπως στα συστήματα έτσι και στο spectrum sharing υπάρχουν διάφορα μοντέλα όπως:

Public Commons Model (PCM): Σε αυτό το μοντέλο (Εικ. 19) το φάσμα είναι ανοιχτό σε όλους για πρόσβαση με ίσα δικαιώματα και χωρίς να προκαλούν ο ένας στον άλλο παρεμβολές. Το μοντέλο "Spectrum commons" δεν χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς της εμπορίας ως εργαλείο για την κατανομή φάσματος μεταξύ χρηστών. Το εν λόγω μοντέλο ισχύει μέχρι και σήμερα για όλα τα ασύρματα πρότυπα (π.χ., WiFi και Bluetooth).



Εικόνα 19. Μοντέλο συστήματος για Spectrum Sharing στο PCM. Στο παράδειγμα ο κάθε ένας primary χρήστης εξυπηρετεί μία τοπική σύνδεση

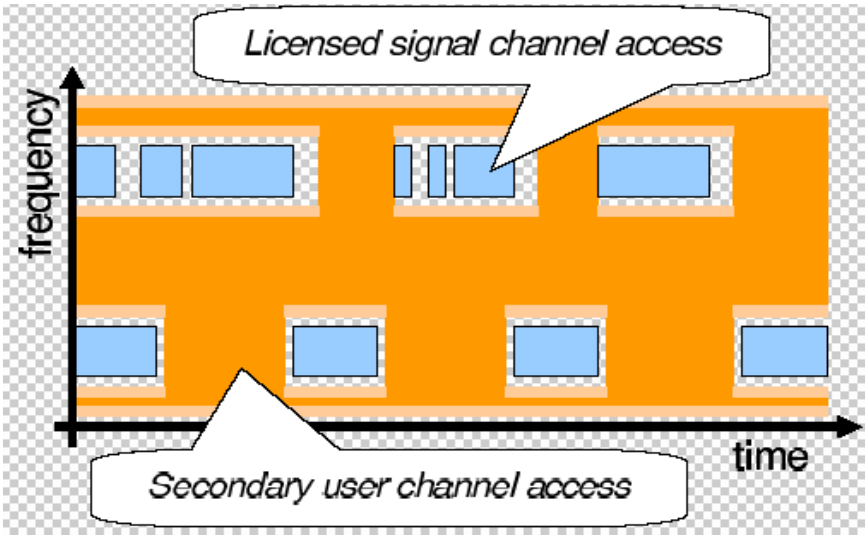
Exclusive Usage Model (EUM): Το φάσμα θα μπορεί να παραχωρεί άδεια αποκλειστικά σε ένα συγκεκριμένο χρήστη. Ωστόσο η χρησιμοποίηση του φάσματος μπορεί να βελτιωθεί

περαιτέρω, επιτρέποντας δυναμική κατανομή φάσματος και spectrum trading με τον ιδιοκτήτη του φάσματος.

Private commons model (PrCM): Κάθε χρήστης σε CR δίκτυο (π.χ., primary, secondary, tertiary, quaternary χρήστες), μπορεί να έχει διαφορετική προτεραιότητα στο μερίδιο του φάσματος. Οι secondary χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο φάσμα χρησιμοποιώντας προσέγγιση υποστρώματος ή επικάλυψης. Στο προσέγγιση υποστρώματος ο secondary χρήστης μεταδίδει τα δεδομένα μέσω ενός μεγάλου εύρους ζώνης που χρησιμοποιεί μικρή ισχύ μετάδοσης (π.χ., ultra-wideband [UWB] μετάδοση). Στην προσέγγιση επικάλυψης, ο secondary χρήστης έχει πρόσβαση στο φάσμα στην περιοχή συχνότητας ή χρόνου. Ενώ ο έλεγχος ισχύος είναι ζωτικής σημασίας για την πρόσβαση υποστρώματος (underlay), η αναγνώριση του φάσματος ευκαιριακής χρήσης (spectrum opportunity) και ο συγχρονισμός τους είναι σημαντικός για την πρόσβαση επικάλυψης.

3.3.1 Dynamic Spectrum Sharing

Η καινοτομία και από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των CRN είναι η δυναμική κατανομή φάσματος, καθώς επίσης και η δυνατότητα των secondary χρηστών να έχουν πρόσβαση στο ασύρματο δίκτυο από κοινού και συγχρόνως με τους primary χρήστες (Εικ. 20).



Εικόνα 20. Dynamic spectrum sharing με αξιοποίηση των white spaces. Ταυτόχρονη παράλληλη λειτουργία licensed (primary) και secondary χρηστών είναι δυνατή σε διαφορετικές συχνότητες

Τα κύρια πλεονεκτήματα της dynamic spectrum sharing είναι η αποφυγή παρεμβολών, η συνεχής χρονική πρόσβαση στο φάσμα και η κατά παραγγελία χρήση ραδιοσυχνοτήτων.

Με την δυναμική κατανομή του φάσματος δίδεται η ευκαιρία στους χρήστες να μπορούν να επιλέξουν ανάμεσα σε κεντρικοποιημένη ή κατανεμημένη αρχιτεκτονική [17]. Ανάλογα με τις λειτουργίες των φορέων, θα πρέπει να γίνει η σωστή επιλογή της αρχιτεκτονικής, αν και ως επί το πλείστον ο καθορισμός αυτός γίνεται αυτόματα.

Παρακάτω αναφέρονται μερικές βασικές αρχές που ακολουθούνται κατά την δυναμική κατανομή φάσματος [16]:

1. **Link adaptation**
2. **Bandwidth management**
3. **Multi-user MIMO**
4. **Pre-cancelation of estimated interference**
5. **Combining unused channels (not pre-allocated) for a single user**

Μερικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην δυναμική κατανομή φάσματος είναι τα εξής [17]:

1. **Centralized cooperative dynamic spectrum access:** Σε αυτό το μοντέλο υπάρχει ένας κεντρικός ελεγκτής ο οποίος συλλέγει δεδομένα από όλη την κίνηση του δικτύου και έπειτα αναλύοντας την κίνηση αυτή λαμβάνει αποφάσεις με σκοπό την εξυπηρέτηση των στόχων όλων των φορέων.
2. **Centralized noncooperative dynamic spectrum access:** Στο μοντέλο αυτό κάνοντας χρήση των πληροφοριών από την αποθηκευμένη κίνηση, έχουμε την δυνατότητα να εξακριβώσουμε αν όντως οι στόχοι των φορέων ικανοποιούνται.
3. **Distributed cooperative dynamic spectrum access:** Σε μια κατανεμημένη συνεργατική δυναμική φασματική πρόσβαση δεν υφίσταται η έννοια ενός κεντρικού controller. Έτσι κάθε φορέας λαμβάνει αποφάσεις μόνο βάσει της τοπικής κίνησης. Θεσπίζοντας ένα συνεργατικό περιβάλλον, οι φορείς μπορούν να βελτιώσουν στα μέγιστα την αποτελεσματικότητα του περιβάλλοντός τους.
4. **Distributed noncooperative dynamic spectrum access:** Αυτό το μοντέλο κατανεμημένης μη-συνεργατικής δυναμικής φασματικής πρόσβασης είναι κοινό στα Cognitive Radio συστήματα, τα οποία δεν λαμβάνουν πληροφόρηση από τους φορείς.

Εφόσον επιτευχθεί σωστή κατανομή φάσματος και αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των δυνατών επικοινωνιών για δεδομένο εύρος φάσματος, τότε νέες τεχνολογίες ασυρμάτων υπηρεσιών και νέα προϊόντα μπορούν να αναπτυχθούν. Μερικές από τις δυνατές εφαρμογές είναι:

- Επέκταση ευρυζωνικών εφαρμογών σε αγροτικές περιοχές.
- Εκπαιδευτικές και επιχειρηματικές τηλεδιασκέψεις.
- Προσωπικές εφαρμογές σε καταναλωτικά προϊόντα.
- Τοπικές υπηρεσίες ασφαλείας.
- Ενίσχυση τοπικής κάλυψης και τοπικών επικοινωνιών.
- Δικτύωση εμπορικών επιχειρήσεων.

3.4 Spectrum Trading

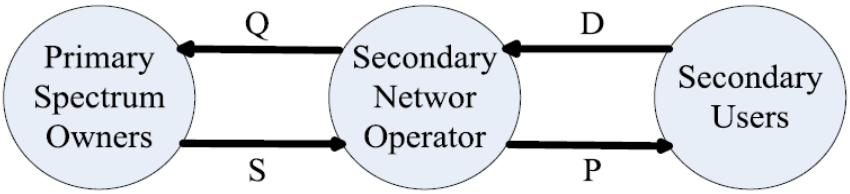
Χρησιμοποιούμε τον όρο spectrum trading (εμπορία φάσματος) για να αναφερθούμε στη διαδικασία της πώλησης και αγοράς των ραδιοεπικοινωνιακών πόρων του ραδιοφάσματος (radio resources). Η μεταπώληση ραδιοφάσματος επιτρέπει στον αρχικό αγοραστή την ανταλλαγή του ραδιοφάσματος που κατέχει και την παραχώρηση του σε τελικούς χρήστες.
Η εξερεύνηση του φάσματος και η αξιοποίηση των δυνατοτήτων του είναι τα δύο πρώτα σημαντικά βήματα για την αύξηση της απόδοσης χρήσης του και την επωφελή εκμετάλλευση του. Οι στόχοι της εξερεύνησης του φάσματος είναι να ανακαλύψει και να διατηρήσει τα στατιστικά στοιχεία χρήσης και να εντοπίσει τα spectrum opportunities. Τοποθετείται ένας transceiver (πομποδέκτης, transmitter + receiver), ο οποίος κάνει sniffing, δηλαδή παρακολουθεί τις κινήσεις που γίνονται στα κανάλια και κρατάει πληροφορίες και στατιστικά στοιχεία χρήσης. Στο επίπεδο της εκμετάλλευσης τοποθετείται ένας transceiver με σκοπό την λήψη αποφάσεων για το αν γίνεται σωστή χρήση και εκμετάλλευση αυτών των επισημασμένων spectrum opportunities.

Ανάλογα με το μοντέλο κατανομής φάσματος, η πρόσβαση στη χρήση του φάσματος ενδέχεται να απαιτήσει ρητή άδεια από τον ιδιοκτήτη ή συνεργασία με τον primary χρήστη, ή μπορεί να γίνει και αυθαίρετα όπως στο PCM. Καθορίζεται τότε η βέλτιστη παράμετρος μετάδοσης ώστε να επιτύχουμε την αποτελεσματική πρόσβαση στο φάσμα κατά τη διάρκεια της φάσης της εκμετάλλευσης και της βελτιστοποίησης καθώς και της απόφασης για το ποία τεχνική θεωρία πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Το Spectrum Trading (ST) βρίσκεται μεταξύ της εξερεύνησης φάσματος και της εκμετάλλευσης του. Μετά τον καθορισμό των spectrum opportunities, οι ραδιοσυχνότητες πωλούνται στους χρήστες, όπου τότε και μόνο τότε προβαίνουν στην χρήση το ραδιοφάσματος.

Η διαπραγμάτευση μεταξύ του ιδιοκτήτη του φάσματος (primary spectrum owner) και του αγοραστή-χρήστη (secondary network operator) για την αποκλειστική χρήση του μοντέλου μπορεί να γίνει πριν από την κατανομή του φάσματος και ο τελικός χρήστης έχει πρόσβαση με χρονική καθυστέρηση (Εικ. 21). Αντίθετα, η διαπραγμάτευση μεταξύ ενός primary και secondary χρήστη σε private commons model μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο. Το

επίπεδο MAC ή/και το επίπεδο δικτύου που υποστηρίζουν την διαπραγμάτευση για την ανταλλαγή του φάσματος υποχρεούνται να διευκολύνουν την πρόσβαση στο φάσμα και την δυναμική κατανομή του.

Στη εμπορική διαδικασία, ο primary φορέας παροχής υπηρεσιών και αρχικός κάτοχος (owner) του ραδιοφάσματος θεωρείται ο πωλητής του φάσματος, ενώ secondary πάροχος της υπηρεσίας είναι ο αγοραστής του φάσματος (SNO).



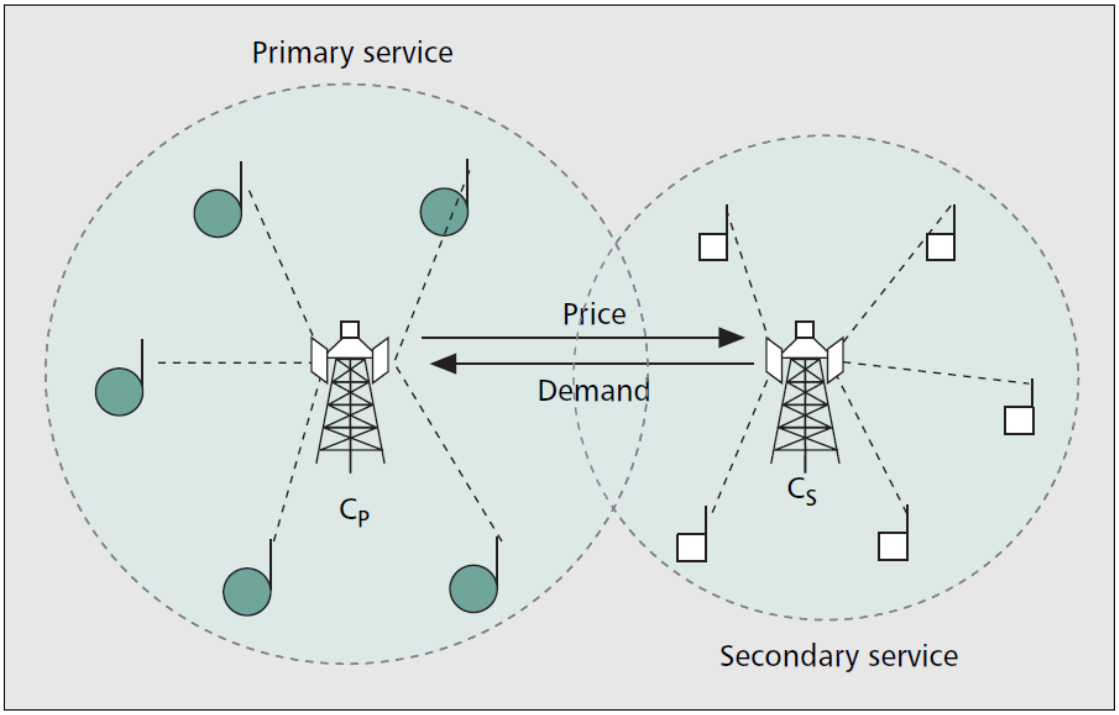
Q: Ποσότητα εύρους ζώνης που αγοράστηκε από SNO
D: Ζήτηση από secondary users
S: Χονδρική τιμή πώλησης φάσματος
P: Λιανική τιμή πώλησης φάσματος

Εικόνα 21. Σχέσεις εμπορίας φάσματος (spectrum trading) μεταξύ primary και secondary φορέων και secondary χρηστών

Οι primary χρήστες συνδέονται με έναν primary ελεγκτή υπηρεσίας, C_p (Εικ. 22). Τα τελικά έσοδα (E_{final}) από την παροχή φάσματος προέρχονται από τα έσοδα που προκύπτουν από τις εν εξελίξει συνδέσεις ($E_{current\ connections}$), μείον το κόστος που οφείλεται στην υποβάθμιση των επιδόσεων ($C_{perfomance\ degradation}$) όταν το φάσμα μοιράζεται από κοινού με την secondary υπηρεσία. Είναι δηλαδή

$$E_{final} = E_{current\ connections} - C_{perfomance\ degradation}$$

Ομοίως, οι secondary χρήστες συνδέονται με ένα secondary ελεγκτή υπηρεσίας, C_s.



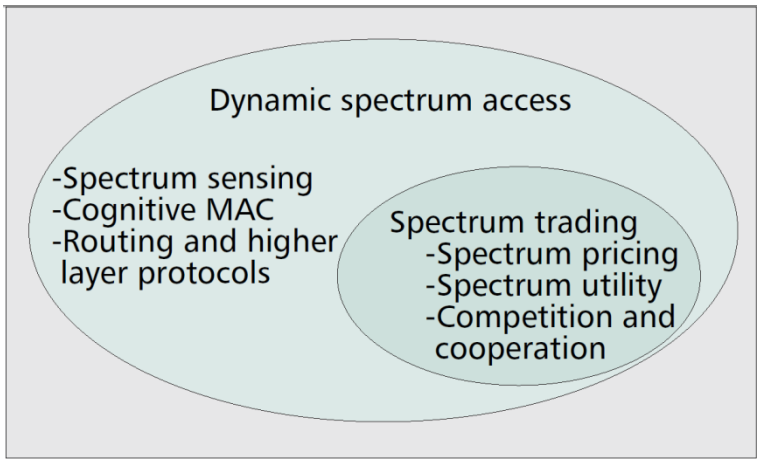
Εικόνα 22. Μοντέλο spectrum trading μεταξύ primary and secondary service

Αυτός ο secondary ελεγκτής υπηρεσίας αγοράζει τα spectrum opportunities από τον primary ελεγκτή υπηρεσίας C_p. Η ζήτηση φάσματος προκύπτει με βάση την ικανοποίηση των πελατειακών απαιτήσεων (π.χ., χρησιμότητα φάσματος) των secondary χρηστών και την τιμή που χρεώνεται από την κύρια υπηρεσία.

Με το σκεπτικό ότι ο αριθμός των real time συνδέσεων δεν παραμένει σταθερός, αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο, η παροχή φάσματος θα πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθεί τις αλλαγές αυτές. Στην αντίθετη περίπτωση, οι αγοραστές θα παρατηρούν διακοπές στη λήψη φάσματος. Οι αλλαγές δηλαδή των συνδέσεων επηρεάζουν άμεσα την προσφορά με αποτέλεσμα να αλλάζει και η τιμή των παρεχόμενων υπηρεσιών.

3.4.1 Σχετικά ζητήματα

Η δυναμική διαχείριση φάσματος περιλαμβάνει τις τεχνικές λειτουργίες του δικτύου, όπως spectrum sensing και medium access control (MAC). Η εμπορία του ραδιοφάσματος (spectrum trading) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα συστατικά της δυναμικής πρόσβασης που ασχολείται με τις οικονομικές πτυχές της (Εικ. 23).



Εικόνα 23. Παράγοντες που επηρεάζουν την δυναμική πρόσβαση στο ραδιοφάσμα [18]

Τα ζητήματα που εμφανίζονται στο Spectrum Trading είναι η τιμολόγηση των υπηρεσιών (Spectrum Pricing), η προσφορά και το κόστος του διαμοιρασμένου φάσματος (Spectrum Supply and Cost of Spectrum Sharing), η ζήτηση φάσματος και οι απαιτήσεις χρήσης του (Utility Function and Spectrum Demand) καθώς και ο ανταγωνισμός και η συνεργασία μεταξύ πωλητών και αγοραστών φάσματος (Competition and Cooperation in Spectrum Sharing). Προκύπτουν επίσης θέματα βελτιστοποίησης παροχών υπηρεσιών, fair play, πλειστηριασμοί καθώς και διάφορα άλλα.

Spectrum Pricing: Η τιμή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εμπορία του φάσματος, δεδομένου ότι αποτελεί ένδειξη της εμπορικής αξίας του αυτού, τόσο για τον πωλητή και όσο και για τον αγοραστή. Για τον αγοραστή, η τιμή που καταβάλλεται στον πωλητή του φάσματος θα εξαρτηθεί από το επίπεδο των υπηρεσιών που του παρέχονται μέσω της χρήσης του εν λόγω φάσματος. Για τον πωλητή του φάσματος, η τιμή καθορίζει τα έσοδα του, επομένως το κέρδος. Αν το τίμημα του φάσματος είναι υψηλό, η ικανοποίηση του αγοραστή είναι μειωμένη, ενώ τα έσοδα του πωλητή αυξάνονται. Η τιμή φάσματος καθορίζεται με βάση το φάσμα που ζητείται απο τον αγοραστή και της προσφοράς που είναι διατεθιμένος να κάνει ο πωλητής. Εν τέλει, ο ανταγωνισμός μεταξύ αγοραστών ή μεταξύ των πωλητών έχει επίσης αντίκτυπο στον καθορισμό των τιμών. Παραδείγματα χορήγησης και τιμολόγησης φάσματος στα CR δίκτυα μπορούν να βρεθούν στο [19].

Spectrum Supply and Cost of Spectrum Sharing: Στην μικροοικονομική θεωρία για μια δεδομένη τιμή η λειτουργία της προσφοράς καθορίζει το ποσό των πόρων που θα πωλείται από τον πωλητή. Ομοίως, στην εμπορία φάσματος για μια δεδομένη τιμή το προσφερόμενο φάσμα καθορίζει τις παραμέτρους μετάδοσης προς τον αγοραστή. Σε ένα wireless cognitive σύστημα η προσφορά φάσματος περιλαμβάνει τον αριθμό των καναλιών (π.χ., FDMA συστήματα), τον διαθέσιμο χρόνο (π.χ., TDMA συστήματα), ή την ισχύ μετάδοσης (π.χ., CDMA συστήματα). Η προσφορά φάσματος προκύπτει με βάση την μεγιστοποίηση του κέρδους, το οποίο ορίζεται ως έσοδα μείον το κόστος (ή ζημίες που προκύπτουν λόγω

επιμερισμού του φάσματος). Υπάρχουν δύο είδη κόστους: σταθερό και μεταβλητό. Ενώ το σταθερό κόστος προέρχεται από τις επενδύσεις σε υποδομές, η μεταβολή κόστους προέρχεται από την υποβάθμιση των επιδόσεων προκύπτει από την ανταλλαγή/πώληση του φάσματος (π.χ. υψηλότερη καθυστέρηση ή υψηλότερο επίπεδο παρεμβολών).

Utility Function and Spectrum Demand: Για μια δεδομένη τιμή η λειτουργία της ζήτησης καθορίζει το ποσό των πόρων που θα αγοραστεί. Στην εμπορία φάσματος, η ζήτηση καθορίζει το ποσό του φάσματος στο οποίο θέλει να έχει πρόσβαση σε συγκεκριμένη τιμή ο αγοραστής, έτσι ώστε η εξυπηρετησή του να μεγιστοποιείται. Ανάλογα με την απαίτηση του αγοραστή μπορεί να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τύποι λειτουργίας κοινής ωφέλειας (π.χ., σε λογαριθμική ή sigmoid λειτουργία του ποσοστού μετάδοσης).

Competition and Cooperation in Spectrum Sharing: Όταν περισσότεροι του ενός φορείς εμπλέκονται στην εμπορία φάσματος (π.χ., πολλαπλοί πωλητές ή πολλαπλοί αγοραστές), οι φορείς αυτοί μπορούν να ανταγωνιστούν ή να συνεργαστούν μεταξύ τους για να επιτύχουν τους στόχους τους. Ο ανταγωνισμός προκύπτει επειδή καθένας από τους φορείς ενδιαφέρεται για την δική του πλευρά και προφανώς για την μεγιστοποίηση των οφελών του. Ανταγωνισμός μπορεί να υπάρξει επίσης μεταξύ πολλών πωλητών φάσματος προκειμένου να προσελκύσουν περισσότερους αγοραστές, ή μεταξύ των αγοραστών του φάσματος για την απόκτηση καλύτερης ποιότητας/ποσότητας του φάσματος με την χαμηλότερη δυνατή τιμή. Ωστόσο, ο ανταγωνισμός μπορεί να μην έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη λύση για τους φορείς που συμμετέχουν σε αυτόν, καθώς και μια τρίτη οντότητα εκτός του ανταγωνισμού μπορεί να έχει μεγαλύτερο όφελος από την αγορά του ραδιοφάσματος. Ας εξετάσουμε ένα διαγωνισμό μεταξύ πωλητών φάσματος όπου μειώνουν την τιμή του φάσματος για να προσελκύσουν περισσότερους αγοραστές. Με αυτή την μειωμένη τιμή λόγω ανταγωνισμού, ο πωλητής πάντα χάνει σε κέρδος, ενώ ο αγοραστής έχει το πλεονέκτημα χαμηλότερης τιμής. Συνεπώς, οι φορείς που εμπλέκονται στην εμπορία του φάσματος έχουν συμφέρον να επιλέξουν την συνεργασία ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη λύση. Στο παραπάνω παράδειγμα οι πωλητές μπορούν να συνεργαστούν για να αυξήσουν τις τιμές, ώστε να αποκομίσουν υψηλότερο κέρδος από ότι στην περίπτωση του ανταγωνισμού.

3.4.2 Οικονομικές προσεγγίσεις του Spectrum Trading

Microeconomic Approach: Η Μικροοικονομική Θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί στην εμπορία του φάσματος, όπου υπάρχουν δύο μεγάλες οντότητες, ο πωλητής και ο αγοραστής. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην ισορροπία της αγοράς κατά την οποία η ζήτηση φάσματος ισούται με την προσφορά φάσματος για συγκεκριμένη χαρακτηριστική τιμή. Στην ισορροπία αυτή τόσο το κέρδος του πωλητή όσο και η ικανοποίηση του αγοραστή μεγιστοποιείται. Ένα παράδειγμα αυτής της μικροοικονομικής προσέγγισης

συναλλαγών που αφορά στο φάσμα/εύρος ζώνης παρουσιάστηκε στο [20], όπου υπήρχε ιεραρχική κατανομή εύρους ζώνης σε ένα private commons μοντέλο. Σε αυτό το ιεραρχικό μοντέλο ένας primary χρήστης πωλεί το φάσμα σε έναν secondary χρήστη, και στη συνέχεια, ο secondary χρήστης μπορεί να πωλήσει το κατανεμημένου φάσμα σε έναν tertiary χρήστη. Η ισορροπία της αγοράς βασίζεται στην ζήτηση εύρους ζώνης και η λύση της στην παροχή. Επιπλέον, προτάθηκε ένας κατανεμημένος αλγόριθμος για το οποίο η λύση συγκλίνει προς την ισορροπία της αγοράς.

Classical Optimization Approach: Μια κλασική σύνθεση βελτιστοποίησης αποτελείται από ένα στόχο που μεγιστοποιείται / ελαχιστοποιείται και ένα σύνολο περιορισμών. Διάφορες τεχνικές (π.χ., γραμμικός προγραμματισμός) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξασφαλίσουμε την βέλτιστη λύση. Ένα κλασσικό πρόβλημα βελτιστοποίησης εμπορίας του φάσματος είναι αυτό που διατυπώνεται από τους φορείς ελέγχου (π.χ., ιδιοκτήτης του φάσματος) ώστε να μεγιστοποιηθεί το κέρδος του ιδιοκτήτη με προσαρμογή της τιμής του φάσματος. Ένας περιορισμός στη διατύπωση του προβλήματος είναι η διατήρηση της ποιότητα της μετάδοσης σε επιδιωκόμενο επίπεδο. Επίσης, το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί έτσι ώστε να επιζητείται να μεγιστοποιηθεί η χρήση των χρηστών cognitive (στο δημόσιο μοντέλο Commons) με την ανάλογη προσαρμογή της ισχύος εκπομπής. Ένα παράδειγμα αυτής της κλασικής προσέγγισης βελτιστοποίησης μπορεί να βρεθεί στο [21]. Στο σύστημα μοντέλου που θεωρείται στο [21], πολλαπλοί cognitive χρήστες ζητούν από τον ιδιοκτήτη του φάσματος, φάσμα το οποίο να βασίζεται στη τμηματική γραμμική ζήτηση τιμών (PLPD).Ο ιδιοκτήτης του φάσματος διαμορφώνει τότε την βελτιστοποίηση ώστε να μεγιστοποιήσει τα έσοδα βάσει του περιορισμού των παρεμβολών.

Non-cooperative Game: Η κλασσική προσέγγιση βελτιστοποίησης βασίζεται σε μια ενιαία λειτουργία όπου στο στόχος της είναι η βέλτιστη συνετή λύση για τις οντότητες που συμμετέχουν στο σύστημα. Ωστόσο, σε ένα non-cooperative περιβάλλον οι διάφορες οντότητες που εμπλέκονται και έχουν διαφορετικά (και πιθανόν αντικρουόμενα) συμφέροντα, αυτή η κατάσταση μπορεί να αναλυθεί με τη χρησιμοποίηση της θεωρίας των παιγνίων. Ένα τέτοιο παιγνίο αποτελείται από παίκτες (π.χ, cognitive radio entities), ενέργειες των παικτών, καθώς και πληρωμές των παίκτών για δεδομένες δράσεις. Για παράδειγμα, στο Spectrum trading συμμετέχουν πολλαπλοί primary χρήστες (παίκτες) με αντίστοιχες προσφορές τιμής (δράσεις) για την πώληση του φάσματος σε secondary.

Bargaining Game: Ένα παιχνίδι διαπραγμάτευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου οι παίκτες μπορούν να συνεργαστούν και κάθε παίκτης μπορεί να επηρεάσει τη δράση των άλλων παικτών στην εμπορία του φάσματος. Μέσα σε αυτό το παιχνίδι οι παίκτες μπορούν να διαπραγματεύονται μεταξύ τους. Μια γενική λύση των παιχνιδιών διαπραγμάτευσης είναι η λύση Nash, η οποία διασφαλίζει την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία. Παράδειγμα παιχνιδιού διαπραγμάτευσης για την κατανομή των εσόδων δίνεται στο [22].

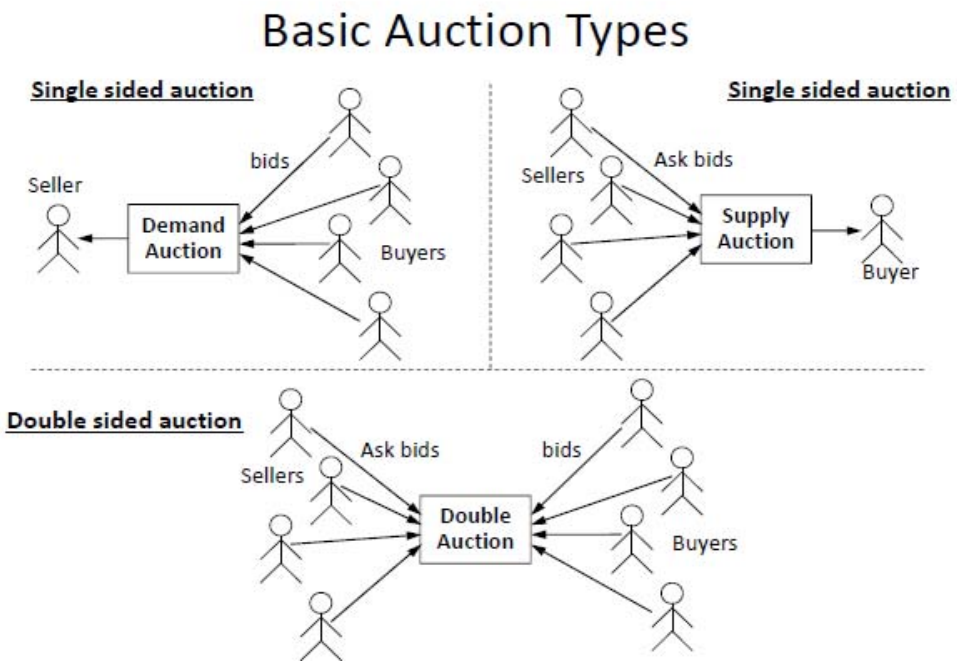
Κάθε radio access network (RAN) διαθέτει ένα φάσμα. Ωστόσο, σε μια δεδομένη στιγμή το διαθέσιμο φάσμα μπορεί να μην είναι αρκετό για να εξυπηρετήσει όλους τους χρήστες. Ως εκ τούτου, αυτό το RAN μπορεί να έλθει σε διαπραγμάτευση με άλλους για την μίσθωση πρόσθετου φάσματος.

Auction: Μια αποτελεσματική προσέγγιση στο spectrum trading είναι να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία πλειστηριασμού. Στη δημοπρασία αυτή οι αγοραστές υποβάλλουν τις προσφορές τους σε ένα πωλητή. Ο πωλητής αποφασίζει σε τι βαθμό και σε ποιον θα πωλήσει το φάσμα. Αυτή η δημοπρασία είναι κατάλληλη για μια κατάσταση όπου η τιμή των πόρων είναι απροσδιόριστη και είναι μεταβλητή ανάλογα με τις απαιτήσεις των αγοραστών. Για παράδειγμα, σε έναν πλειστηριασμό όλοι οι αγοραστές ταυτόχρονα υποβάλουν τις τιμές προσφοράς. Στη συνέχεια αγοραστής καθορίζεται αυτός που πληρώνει την υψηλότερη τιμή. Ένα παράδειγμα του πλειστηριασμού, στο πλαίσιο της εμπορίας του φάσματος μπορεί να βρεθεί στο [23], όπου προτάθηκε ένας μηχανισμός για τη δημοπρασία δυναμικής κατανομής φάσματος. Αυτή η κατανομή ήταν μεταξύ φορέων CDMA των οποίων οι προσφορές για το φάσμα γίνονται από ένα διαχειριστή του. Η τιμή προσφοράς κάθε φορέα καθορίζεται με βάση τη μεγιστοποίηση εισοδήματος λόγω δυναμικής κατανομής μεταξύ των χρηστών.

3.4.3 Δομές πλειστηριασμού

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πλειστηριασμού ανάλογα με το πλήθος των πωλητών και των αγοραστών (Εικ. 24).

Single Seller: *Μονοπώλιο*-- Η πιο απλή δομή της εμπορίας φάσματος προκύπτει όταν υπάρχει ένας μόνο πωλητής στο σύστημα. Δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένας πωλητής σε αυτή τη διάρθρωση της αγοράς, ο πωλητής μπορεί να βελτιστοποιήσει την εμπορία του φάσματος για την επίτευξη του υψηλότερου κέρδους με βάση τη ζήτηση από τους αγοραστές. Αυτή την διάρθρωση της αγοράς μπορεί να είναι είτε seller-driven είτε buyer-driven. Στην πρώτη περίπτωση, ο πωλητής καθορίζει την τιμή και μεταδίδει τις πληροφορίες του διαθέσιμου φάσματος. Ο αγοραστής καθορίζει την ζήτηση φάσματος και πληρώνει για να αγοράσει το φάσμα. Τα βήματα αυτά μπορούν να εκτελούνται είτε μονομιάς είτε επαναλαμβανόμενα. Στην πρώτη περίπτωση μετά τα αιτήματα αγοράς του φάσματος και την πληρωμή, η συναλλαγή έχει ολοκληρωθεί. Στην τελευταία περίπτωση, ο αγοραστής και ο πωλητής μπορεί να διαπραγματευθούν επανειλημμένα σχετικά με την τιμή για το ζητούμενο φάσμα έως ότου βρεθεί η επιθυμητή λύση και για τους δύο. Εναλλακτικά, η αγορά μπορεί να είναι buyer-driven όταν ο αγοραστής προτείνει την τιμή και προσδιορίζει το απαιτούμενο φάσμα. Ο πωλητής επιλέγει τους αγοραστές και στη συνέχεια κατανέμει το φάσμα αναλόγως. Πρόκειται για τον αποκαλούμενο πλειστηριασμό [24].



Εικόνα 24. Βασικοί τύποι πλειστηριασμού ραδιοφάσματος

Multiple Sellers: *Ολιγοπώλιο* -- Η δομή αυτής της αγοράς αποτελείται από μικρό αριθμό πωλητών οι οποίοι προσφέρουν φάσμα στην αγορά. Ο αγοραστής έχει την επιλογή να επιλέξει την καλύτερη προσφορά με τις υψηλότερες επιδόσεις και την καλύτερη τιμή. Η αγορά αυτή αναφέρεται ως ολιγοπώλιο. Δεδομένου ότι υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των πωλητών το κέρδος ενός πωλητή φάσματος είναι πάντα μικρότερο σε σχέση με το αν ήταν μοναδικός (μονοπώλιο).

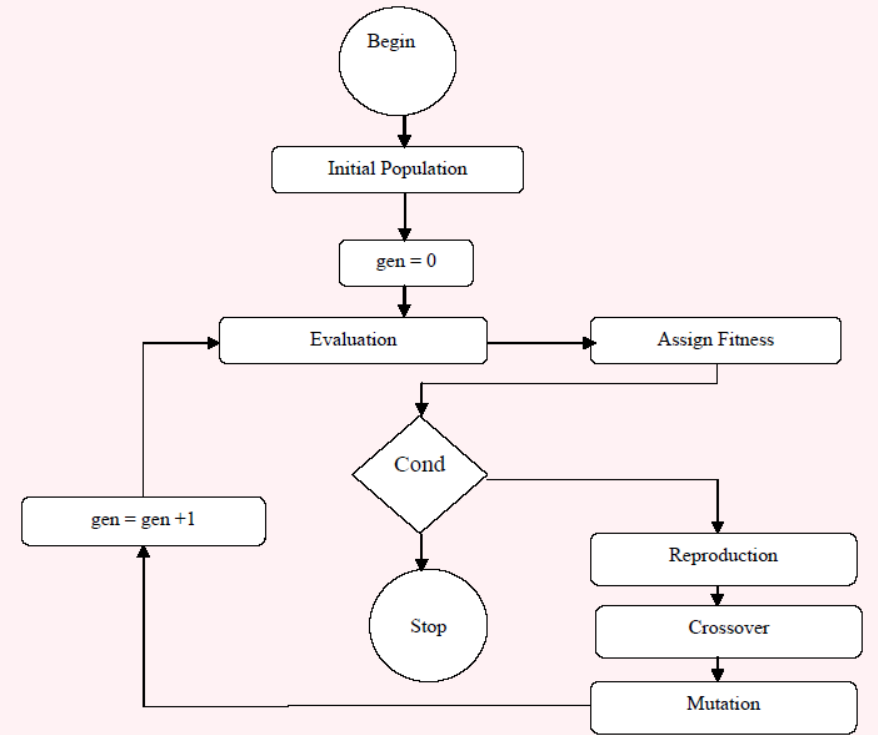
No Permanent Seller: Exchange Market -- Σε αυτή την δομή αγοράς δεν υπάρχει μόνιμος πωλητής φάσματος (όπως στο PCM), και όλοι οι χρήστες έχουν το δικαίωμα να έχουν πρόσβαση στο φάσμα. Ωστόσο, εάν ένας συγκεκριμένος χρήστης απαιτεί να έχει μεγαλύτερο μερίδιο φάσματος από κάποιον άλλο, τότε οι υπόλοιποι χρήστες θα πρέπει να αποζημιωθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Γενετικοί αλγόριθμοι και εφαρμογές

4.1. Genetic Algorithms

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms, GA) είναι αλγόριθμοι οι οποίοι κάνουν χρήση της ιεραρχικής δομής λύσεων, που μιμείται τη διαδικασία της φυσικής εξέλιξης. Αυτή η ευρηματική χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή χρήσιμων λύσεων και την βελτιστοποίηση λύσεων κατά την ανάλυση προβλημάτων, όπως στο πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής φάσματος. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των Εξελικτικών Αλγορίθμων (Evolutionary Algorithms, EA), οι οποίοι παράγουν λύσεις στα προβλήματα βελτιστοποίησης χρησιμοποιόντας τεχνικές που εμπνέονται από την φυσική εξέλιξη, όπως την κληρονομικότητα, την μετάλλαξη, την επιλογή και την διασταύρωση.

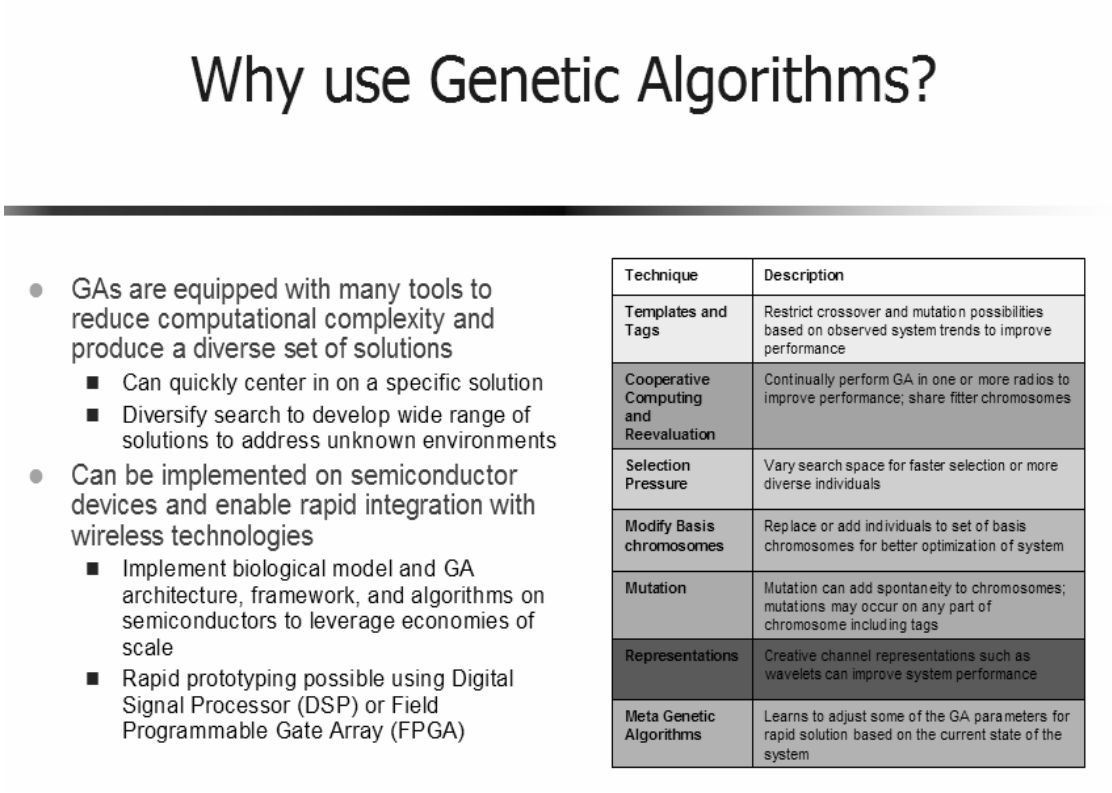
Οι GA ακολουθούν μια επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης. Αντί να επιδιώκεται μια ενιαία λύση σε κάθε επανάληψη, με τον GA αναζητείται σε κάθε επανάληψη αριθμός δυνατών λύσεων που είναι γνωστός ως πληθυσμός (population). Διάγραμμα ροής της αρχής λειτουργίας απλού GA παρουσιάζεται στην εικόνα 25.



Εικόνα 25. Διάγραμμα ροής της αρχής λειτουργίας απλού GA

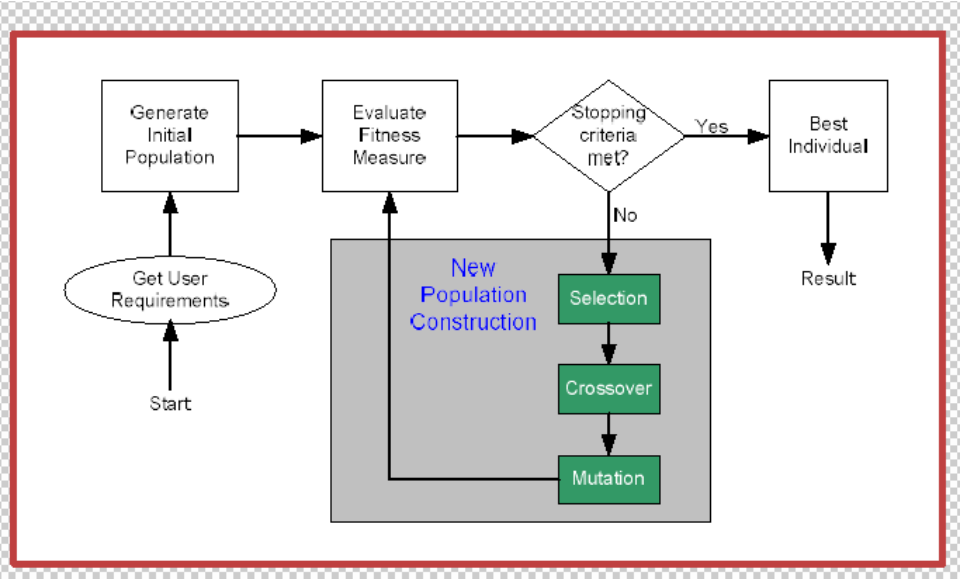
Οι γενετικοί αλγόριθμοι παράγουν διάφορες προσεγγίσεις που αποσκοπούν στη μείωση του χρόνου σύγκλισης ή/και τη βελτίωση των αποτελεσμάτων των γενετικών αλγορίθμων, που βασίζονται στην μηχανή αναζήτησης για Cognitive Radio Networks. Το συγκεκριμένο

περιλαμβάνει τεχνικές όπως την προσαρμογή του πληθυσμού, την κβαντοποίηση των μεταβλητών, την προσαρμογή των μεταβλητών και την χρήση γενετικών αλγορίθμων πολλαπλών στόχων. Σημειωτέον ότι ο χρόνος που απαιτείται για ένα γενετικό αλγόριθμο για να επιτευχθεί μια αποδεκτή λύση αυξάνει σημαντικά με την πολυπλοκότητα των συστημάτων, και, συνεπώς, νέες τεχνικές είναι απαραίτητες για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα [25].



Εικόνα 26. Προτερήματα χρήσης γενετικού αλγορίθμου στο CR [26]

Σε ένα γενετικό αλγόριθμο, ο πληθυσμός των χορδών (strings), που κωδικοποιούν λύσεις υποψήφιες για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, εξελίσσεται προς καλύτερες λύσεις. Παραδοσιακά σε GA με δυαδική κωδικοποίηση, οι λύσεις εκπροσωπούνται ως χορδές των 0s και 1s. Η εξέλιξη ξεκινά συνήθως από έναν πληθυσμό που δημιουργεί τυχαία άτομα και καταλήγει σε γενιές. Σε κάθε γενιά, η καταλληλότητα του κάθε ατόμου στον πληθυσμό αξιολογείται (fitness or evaluation function). Πολλαπλά άτομα επιλέγονται στοχαστικά από το υπάρχοντα πληθυσμό (με βάση την καταλληλότητά τους), και τροποποιούνται (ανασυσταθέντα και πιθανώς τυχαία μεταλλαγμένα) για να σχηματίσουν ένα νέο πληθυσμό. Ο νέος πληθυσμός χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου. Συνήθως, ο αλγόριθμος τερματίζει όταν είτε ο μέγιστος αριθμός των γενεών έχει παραχθεί, ή ένα ικανοποιητικό επίπεδο φυσικής κατάστασης έχει επιτευχθεί για τον πληθυσμό. Αν ο αλγόριθμος έχει τερματιστεί λόγω μεγίστου στον αριθμό των γενεών, μπορεί, ή όχι, να έχει επιτευχθεί μια ικανοποιητική λύση.



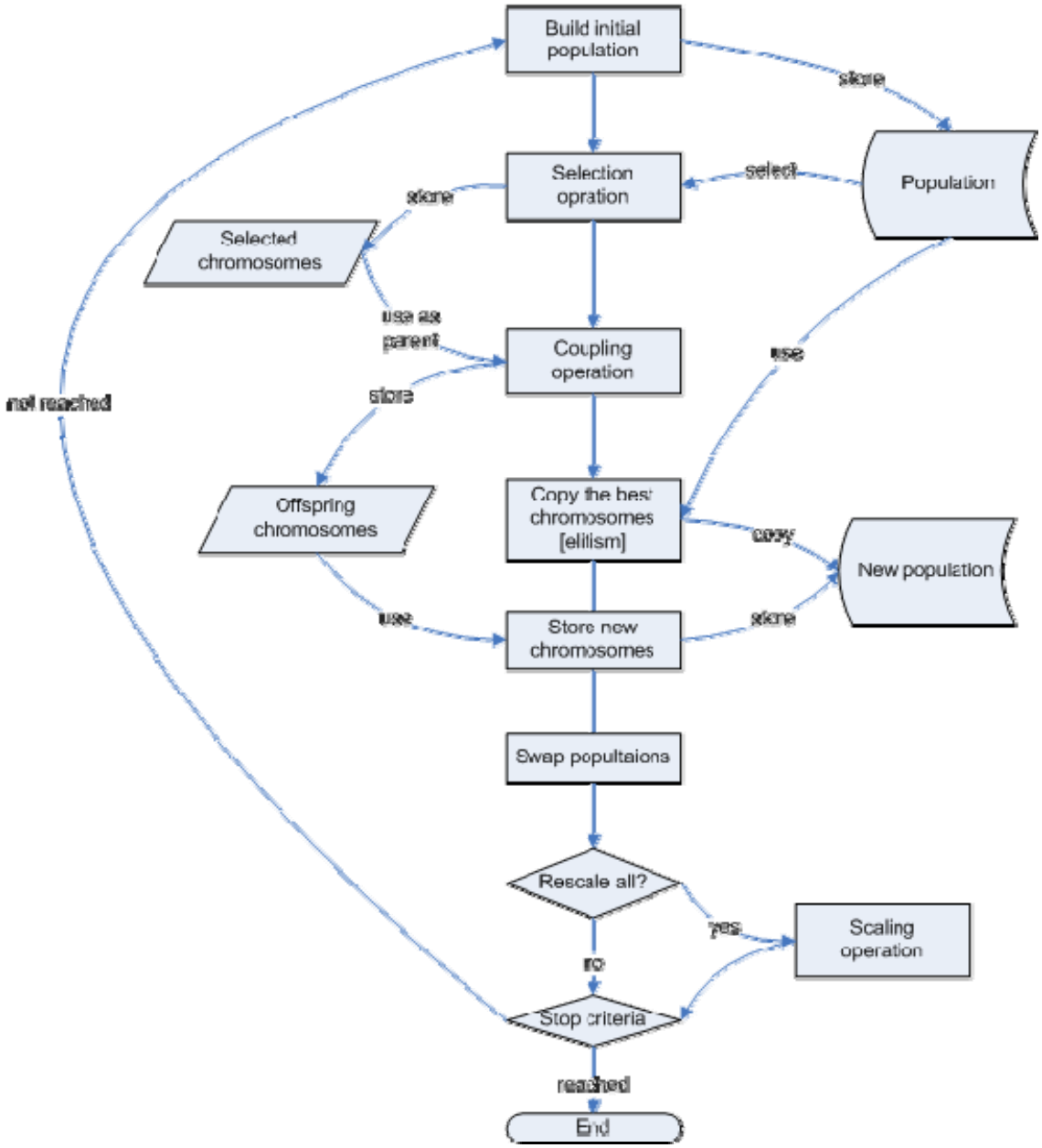
Εικόνα 27. Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου

Αρχικά εμφανίζονται πολλές μεμονωμένες λύσεις που δημιουργούνται τυχαία ώστε να σχηματιστεί ένας πρώτος πληθυσμός. Το μέγεθος του πληθυσμού εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, αλλά συνήθως περιέχει αρκετές εκατοντάδες ή χιλιάδες πιθανές λύσεις. Παραδοσιακά, ο πληθυσμός δημιουργείται τυχαία, καλύπτοντας όλο το φάσμα των πιθανών λύσεων. Περιστασιακά, οι λύσεις μπορεί να “ελοχεύουν" στις περιοχές όπου βέλτιστες λύσεις είναι πιθανό να βρεθούν.

Κατά τη διάρκεια κάθε γενιάς, ένα ποσοστό του υπάρχοντος πληθυσμού επιλέγεται για να αναπαραγάγει μια νέα γενιά. Οι μεμονωμένες λύσεις επιλέγονται βάσει κριτηρίων εγκυρότητας και καταλληλότητας, όταν καταλληλότερες λύσεις (όπως μετράται από μια συνάρτηση καταλληλότητας) είναι συνήθως πιο πιθανό να επιλεγούν. Κάποιες μεθόδοι επιλογής αξιολογούν την καταλληλότητα κάθε λύσης και επιλέγεται η καλύτερη. Άλλες μέθοδοι αξιολογούν μόνο ένα τυχαίο δείγμα του πληθυσμού, καθώς η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα.

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός πληθυσμού καταλληλότερου από τον αρχικό. Το κύριο συστατικό των αλγορίθμων αυτών, είναι η αναδρομικότητα των εαυτών τους. Αυτή η γενετική διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου μία κατάσταση τερματισμού έχει επέλθει. Τερματίζεται υπό τις εξής προυποθέσεις:

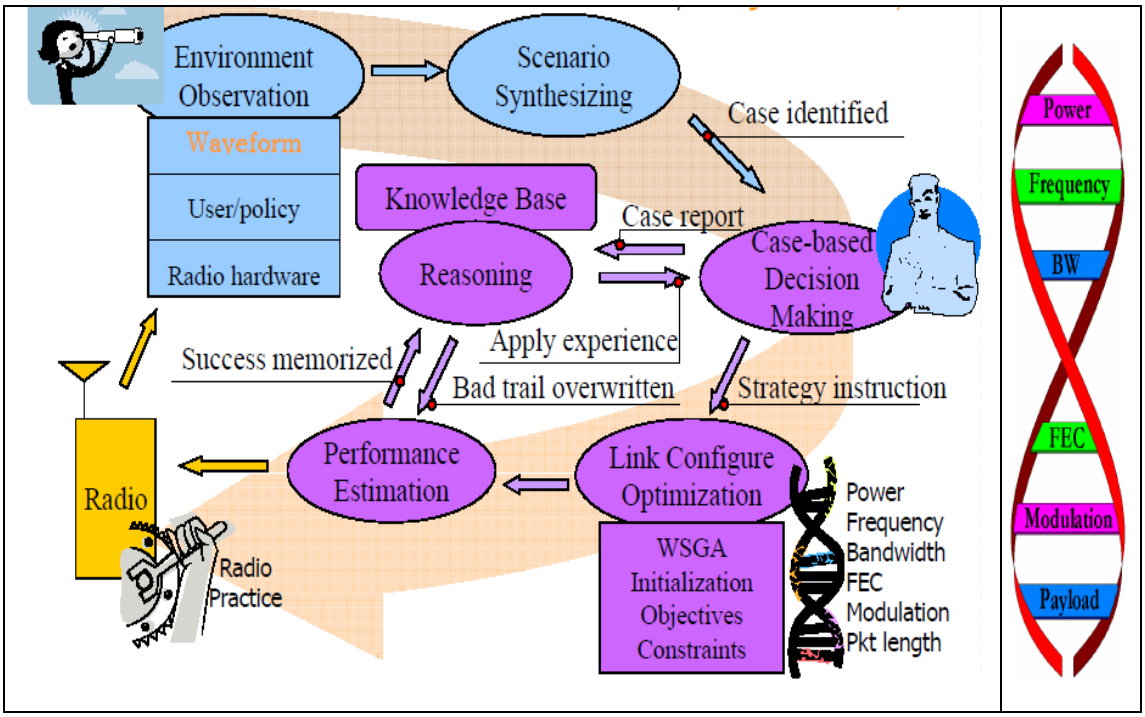
- Να βρεθεί λύση που ικανοποιεί τα ελάχιστα κριτήρια που έχουν τεθεί
- Ένας προκαθορισμένος αριθμός γενεών έχει δημιουργηθεί
- Κατανάλωση όλων των πόρων του συστήματος
- Χειροκίνητος τερματισμός
- Οποιοσδήποτε πιθανός συνδιασμός των παραπάνω



Εικόνα 28. Λεπτομέρειες δομής και εξελικτικής λειτουργίας γενετικού αλγόριθμου

4.2. Περιγραφή προγράμματος εφαρμογής GA

Λόγω της ψηφιακής μετάβασης ελευθερώνονται πολλά κανάλια στην περιοχή των UHF συχνοτήτων. Το πρόγραμμα αυτό επικεντρώνεται στην βέλτιστη κατανομή φάσματος με την βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων (Εικ. 29). Η κατανομή αυτή θα γίνει βάσει κριτηρίων που τίθενται απο φυσικούς περιορισμούς και απο περιορισμούς οι οποίοι τίθενται από τον χρήστη.



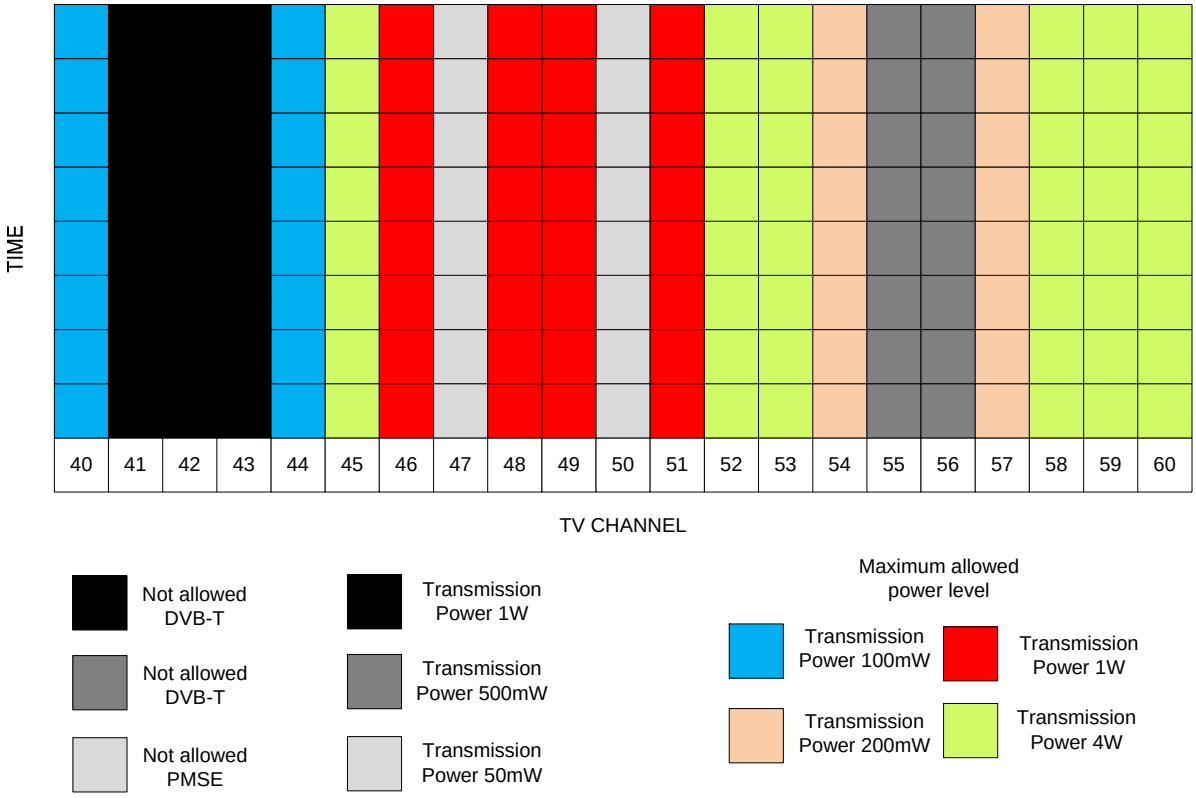
Εικόνα 29. Απεικόνιση του κύκλου λειτουργίας γνωστικής μηχανής (congnitive engine) και του συνδέσμου (link configure optimization) στον οποίο εφαρμόζεται ο GA για βελτιστοποίηση κατανομής φάσματος [27]

Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε μια βάση δεδομένων με 20 διαθέσιμα κανάλια, από το κανάλι 40 έως και το 60, τα οποία έχουν εύρος ζώνης (bandwidth-BW) ίσο με 8MHz το καθένα. Όπου υπάρχει διαθέσιμο φάσμα θα το εκμετελλευτούμε κάνοντας χρήση άλλων δευτερεύοντων συστημάτων όπως είναι τα Public Safety, LTE και WiFi. Τα κανάλια 41, 42, 43, 47, 50, 55 και 56 είναι ήδη δεσμευμένα για την εκπομπή PMSE (ασύρματα μικρόφωνα) και διάφορων Primary Systems (πρωταρχικών συστημάτων).

Κάθε κανάλι έχει θέσει περιορισμούς όσον αφορά στην μέγιστη ισχύ μετάδοσης (Maximum Power Level), τους οποίους περιορισμούς κανένα δευτερεύον σύστημα δεν μπορεί να ξεπεράσει, διότι θα δημιουργηθούν παρεμβολές σε ορισμένα πρωταρχικά συστήματα.

Σημείωση

Ανοίγοντας το Netbeans IDE και επιλέγοντας *File -> Open Project -> GA FINAAAAL*, ανοίγει το εν λόγω project. Ξεδιπλώνοντας το *Source Packages* ανοίγει ένα μενού με μοναδική επιλογή το *ga*. Επιλέγω το πακέτο να ανοίξει εμφανίζοντας κάποια αρχεία .java και τρέχω το αρχείο με όνομα GUI.java.



Πίνακας 2. Διαθέσιμοι TVWS και οι περιορισμοί τους

Στο πρόγραμμα αυτό υλοποιείται ένας GA για την βέλτιστη κατανομή φάσματος στα Secondary Systems, τα οποία αιτούνται τα διαθέσιμα κανάλια στη βάση συγκεκριμένων περιορισμών. Στο προκείμενο σενάριο υλοποίησης τα δευτερεύοντα συστήματα μαζί με τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα 3.

Parameter/ Factor	**Use cases/ Secondary Systems**			
	Public Safety	**LTE 1**	**LTE 2**	**WiFi**
Min Power	1000mW	4000mW	4000mW	100mW
Bandwidth	1 MHz	5 MHz	10 MHz	22MHz
Number of contagious TVWS	Needs only one TVWS	LTE 1 needs only one TVWS	LTE 2 needs two contagious TVWS	Needs three contagious TVWS
Priority (additional adjustments)	High priority (1)	Medium priority (2)	Medium priority (2)	Low priority (3)

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά του φάσματος που διατίθεται στα δευτερεύοντα συστήματα

Η ελάχιστη εκπεμπόμενη ισχύς (minimum Power) για το Public Safety δευτερεύον σύστημα είναι στα 1000mW, των LTE συστημάτων στα 4000mW και του Wi-Fi είναι στα 100mW. Το εύρος ζώνης (Bw or Bd) για το Public Safety δευτερεύον σύστημα είναι στα 1MHz, του LTE 1 στα 5MHz, του LTE 2 είναι στα 10MHz και του Wi-Fi είναι στα 22MHz. Ο αριθμός των μεταδιδόμενων καναλιών (Number of Contagious TVWS) για το Public Safety είναι 1 κανάλι, για το LTE 1 είναι 1 κανάλι, για το LTE2 είναι 2 κανάλια και για το Wi-Fi είναι 3 κανάλια. Ο αριθμός των μεταδιδόμενων καναλιών υπολογίζεται ανάλογα με το εύρος ζώνης που κατέχει το κάθε κανάλι. Ο υπολογισμός των καναλιών αυτών γίνεται με το να διαιρούμε το εύρος ζώνης κάθε δευτερεύοντος καναλιού με το εύρος ζώνη που καταλαμβάνει το κάθε TVWS, δηλαδή

Number of Contagious TVWS = (Channel Bd) / (Secondary System Bd)

Παραδείγματος χάρην για το Wi-Fi δευτερεύον σύστημα, του οποίου το Bd φτάνει στα 22MHz, έχουμε 22/8 = 2,75 , όπου με στρογγυλοποίηση προς τα πάνω πάει στα 3 κανάλια. Το ίδιο ισχύει και με το LTE2 όπου 10/8 = 1,25 , αρα υπολογίζουμε 2 κανάλια. Σημειωτέον ότι τα κανάλια αυτά θα πρέπει να είναι συνεχόμενα.

Δημιουργώ δύο βάσεις δεδομένων όπου στην μία (Πίνακας 4) έχω τον πίνακα από τα δευτερεύοντα συστήματα και τα χαρακτηριστικά τους ενώ στην δεύτερη βάση (Πίνακας 5) έχω τον πίνακα με τα διαθέσιμα κανάλια και τα χαρακτηριστικά τους.

Copy of Table1

Name	Public Safety	LTE	LTE 2	WiFi
Bandwidth (MHz)	1	5	10	22
Min Power (mW)	1000	4000	4000	100
Number of Contagious TVWS	1	1	2	3
Priority	1	2	2	3

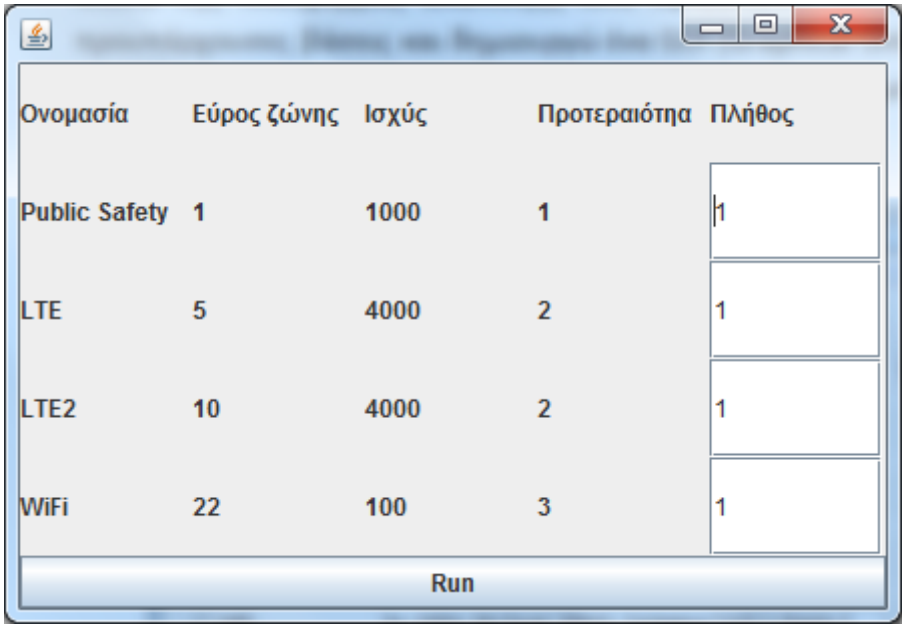
Πίνακας 4. Βάση δεδομένων για τα δευτερεύοντα συστήματα

Copy of Table1 | Table2

Frequency	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Bandwidth (MHz)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Max Trans Power (mW)	100	0	0	0	100	4000	1000	0	1000	1000	0	1000	4000	4000	200	0	0	200	4000	4000	4000

Πίνακας 5. Βάση δεδομένων για τα διαθέσιμα κανάλια

Μέσω της πλατφόρμας ανάπτυξης Java εφαρμογών, Netbeans IDE 6.9.1, συνδέω τις προυπάρχουσες βάσεις και δημιουργώ ένα GUI (Graphical Unit Interface) σε μορφή παραθύρου (Εικόνα 30), το οποίο με βοηθάει να επικοινωνώ με το πρόγραμμα.



Εικόνα 30. Προβολή Graphical Unit Interface (GUI)

Εμφανίζεται μία λίστα με όλα τα δευτερεύοντα συστήματα (Public Safety, LTE 1, LTE 2, WiFi), τα χαρακτηριστικά τους υπο το όνομα “Sec System’s Attributes”, καθώς επίσης και η επιλογή πόσων συστημάτων θέλουμε από το κάθε ένα. Μόλις πατηθεί το κουμπί “Run”, τότε και μόνο τότε, τίθεται σε εφαρμογή ο αλγόριθμος. Εφόσον τεθεί σε εφαρμογή ο αλγόριθμος αλλά δεν βρεθέι λύση, εμφανίζεται ένα παράθυρο με αναγραφόμενο μήνυμα “Δεν βρέθηκε λύση”. Σαν δικλείδα ασφαλείας έχω θέσει τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό γενεών να ισούται με εκατό. Το πρόγραμμα τρέχει ουσιαστικά παράγοντας μέχρι και την εκατοστή γενιά και αν δεν αποφέρει κανένα αποτέλεσμα, τότε εμφανίζεται στην οθόνη ένα μήνυμα που λέει “Φτάσατε τον μέγιστο αριθμό γενεών χωρίς αποτέλεσμα, παρακαλώ προσπαθήστε ξανά”.

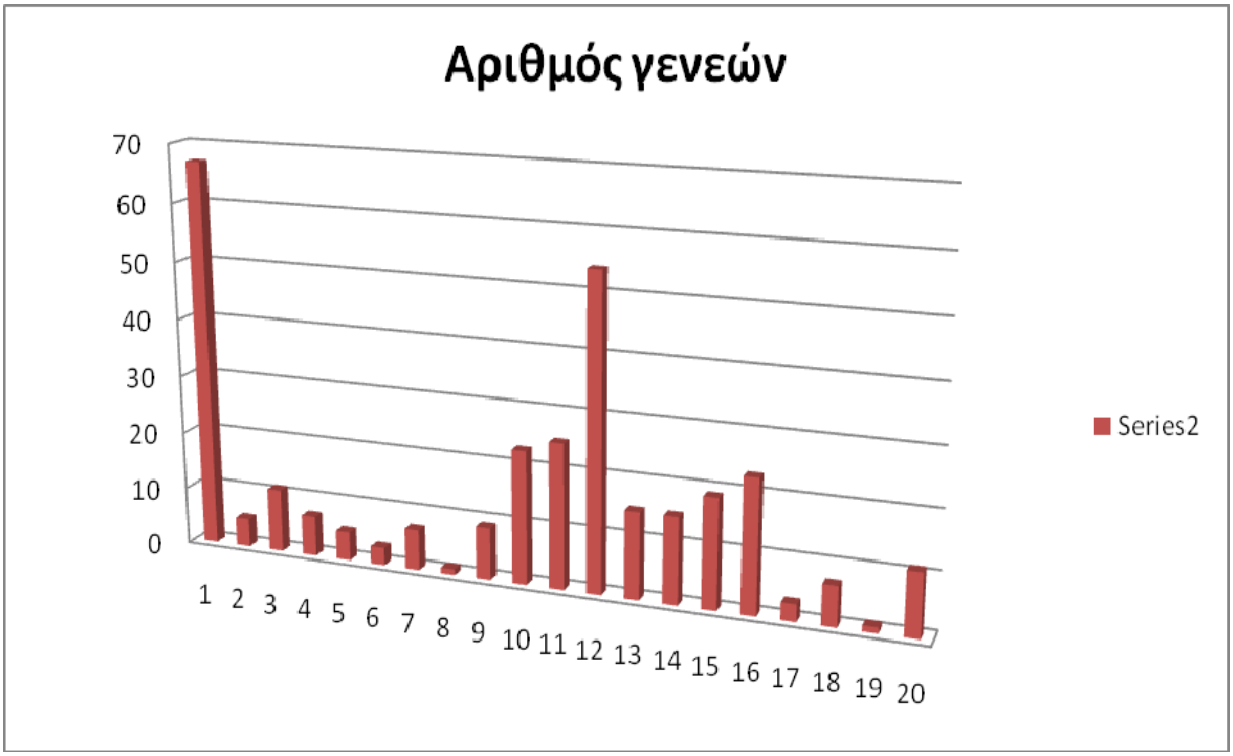
Η λειτουργία του αλγόριθμου έχει ως εξής. Πρώτα δημιουργεί έναν αρχικό πληθυσμό, ο οποίος είναι το πηλίκο όλων των δυνατών θέσεων για κάθε σύστημα. Κάθε σύστημα που εισέρχεται στον αλγόριθμο θα ελέγχεται από τις βάσεις και τα δυνατά κανάλια θα

αποθηκεύονται σε έναν buffer. Έπειτα γίνεται ένας έλεγχος των συνδιασμών αυτών, καθώς μπορεί διαφορετικά συστήματα να διεκδικούν ίδια κανάλια, οπότε αναγκαστικά γίνεται ένα ξεσκαρτάρισμα συνδιασμών. Θα πρέπει προγραμματιστικά με κάποιον τρόπο να γίνεται ένας έλεγχος στη βάση δεδομένων προκειμένου να κρατούνται σε buffers τα πιθανά κανάλια που θα μπορούν να χρησιμοποιούν τα κάθε συστήματα.

Με τον τρόπο αυτόν δημιουργούνται τόσα buffers, όσα δευτερεύοντα συστήματα έχουμε. Στην συνέχεια φιλτράρουμε όλες τις πιθανές λύσεις με το power level του κάθε συστήματος καθώς και των καναλίων στο buffer κάθε συστήματος. Αν παραδείγματος χάρην το LTE 1, το οποίο έχει min power 4000mW σύστημα προσπαθέι να εκπέμψει στο κανάλι 46, το οποίο έχει max power level 1000mW, θα πρέπει να εξαλειφθούν αυτές οι πιθανότητες. Κατα την επίτευξη αυτού του στόχου μειώνεται ο αρχικός πληθυσμός. Στο επόμενο βήμα λαμβάνεται υπόψη ο καινούριος, μειωμένος, πληθυσμός και όχι ο αρχικός. Με το ίδιο σκεπτικό προχωρούμε στα επόμενα βήματα.

Σειρά έχει το φιλτράρισμα του πληθυσμού βάσει προτεραιότητας (priority). Θα γίνει shorting όλου του πληθυσμού κατά σειρά προτεραιότητας. Με αυτόν τον τρόπο εγγυούμαστε την εξυπηρέτηση Public Safety (δημόσια ασφάλεια) του πιο σημαντικού δευτερεύοντος συστήματος. Προτιμώ μια λύση που μου δίνει κανάλι στο Public Safety μόνο που έχει High priority, παρά μια λύση που μου δίνει κανάλια ταυτόχρονα στο LTE και το WiFi. Σε αυτό το βήμα ή θα βρεθεί μία βέλτιστη λύση, ή θα βρεθούν περισσότερες, οπότε χρειαζόμαστε ένα Decision. Αν με αυτόν τον τρόπο βρεθεί βέλτιστη λύση τελειώνει ο αλγόριθμος, διαφορετικά αν υπάρχουν περισσότερες από μία λύσεις θα πρέπει να τεθεί νέος περιορισμός.

Θέτοντας δοκιμαστικά σε εφαρμογή τον αλγόριθμο είκοσι φορές και επεξεργάζοντας τα αποτελέσματα των παραγόμενων γενεών δημιουργείται ένας γράφος. Στον συγκεκριμένο γράφο [Εικόνα 31] ο άξονας των x αντιπροσωπεύει τις δοκιμαστικές εκτελέσεις του αλγόριθμου, ενώ ο άξονας y συμβολίζει τον αριθμό των παραγόμενων γενεών για κάθε μια από τις είκοσι εκτελέσεις. Όπως γίνεται αντιληπτό διακρίνεται μια τυχαιά σειρά γενεών ανα εκτέλεση. Κάτι τέτοι είναι επόμενο εφόσον οι γενετικοί αλγόριθμοι διακρίνονται για την τυχαία εύρεση λύσεων μέσω δοκιμών.



Εικόνα 31. Γραφική αναπαράσταση παραγόμενων γενεών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Βιβλιογραφία

[1] http://ezinearticles.com/?The-History-of-Wireless-Networking&id=2761612

[2] Emerging cognitive radio technology: Principles, challenges and opportunities {Lamia–Khalid, Alagan Anpalagan} WINCORE Laboratory, Ryerson University, Toronto, Canada.

[3] A survey of cognitive radio access to TV white spaces {Nekovee M.} 2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications and Workshops.

[4] Security Issues Related to Cognitive Radios and Dynamic Spectrum Access{ T. X. Brown}, University of Colorado, 11th Annual International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder, 2010.

[5] Can Cognitive Radio Support Broadband Wireless Access? {Timothy X Brown, Douglas C. Sicker} Interdisciplinary Telecommunications, University of Colorado.

[6] Technical Challenges for Cognitive Radio in the TV White Space Spectrum {S. J. Shellhammer, A. K. Sadek ,W. Zhang} Corporate Research and Development Qualcomm Incorporated, San Diego, CA 92121, USA, 2010.

[7] White Spaces and other Frontiers in Wireless Networking {T. Moscibroba}, Microsoft Research, Seminar October 2010.

[8] KNOWS: Kognitiv Networking over TVWS {Yuan Yuan, Paramvir Bahl, Ranveer Chandra, Philip A. Chou, John Ian Ferrell, Thomas Moscibroda, Srihari Narlanka, Yunnan Wu} Microsoft Research, Redmond USA.

[9] Unlicensed Cognitive Sharing of TV Spectrum : The controversy at the FCC { *Michael J. Marcus* }.

[10] http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum

[11] A CR platform for applications in TV Whites Space spectrum {Kim, Kim, Kim} Samsung Electro-Mechanics, Chungbuk National University, Hanbat National University.

[12] Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-offs {Amir Ghasemi, Elvino S. Sousa} University of Toronto, Canada

[13] http://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio#Main_functions

[14] Combine sensing results with incumbent database Cognitive Radio Communications and Networks {A. M. Wyglinski, M. Nekovee,Y.Hou} Elsevier, 2009.

[15] TV white-space sensing prototype {S. W. Oh, T. P. Cuong Le, W. Zhang, S. N. Altaf Ahmed, Y. Zeng and K. J. M. Kua } *Institute for Infocomm Research 1 Fusionopolis Way, Singapore*

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Spectrum_Management

[17] Cooperative Game Theory for Distributed Spectrum Sharing,{J. E. Suris}" *Proc. IEEE ICC*

[18] Spectrum trading in cognitive radio networks: a market-equilibrium-based approach **{**D. Niyato, E. Hossain} IEEE Wireless Communications, p. 71December 2008.

[19] Dynamic and Local Combined Pricing, Allocation and Billing System with Cognitive Radios {*C. Kloeck, H. Jaekel, and F. K. Jondral* } Proc. IEEE DySPAN '05

[20] D. Niyato and E. Hossain, "Hierarchical Spectrum Sharing in Cognitive Radio: A Microeconomic Approach," Proc. IEEE WCNC '07, Mar. 2007.

[21] Lipoff, S. (2002), 'Exploring the Feasibility of Sharing TV Band Spectrum

[22] Unlicensed RF Devices', FCC ET-Docket 02-380, 6: 3, p. 19

[23] V. Rodriguez, K. Moessner, and R. Tafazolli, "Auction Driven Dynamic Spectrum Allocation: Optimal Bidding, Pricing and Service Priorities for Multi-Rate, Multi-Class CDMA," *Proc. IEEE PIMRC '05*, vol. 3, Sept. 2005, pp. 1850–54.

[24] Cambridge Strategic Management Group (2008), 'Potential for more efficient user of spectrum by wireless microphones', p. 3, 4th November, CSMG, London. (A report prepared for Ofcom)

[25] Genetic Algorithm-Based Optimization for Cognitive Radio Networks {Si Chen* Timothy R. Newman† Joseph B. Evans‡ Alexander M. Wyglinski}

[26] Biologically Inspired Cognitive Radio Engine Model Utilizing Distributed Genetic Algorithms for Secure and Robust Wireless Communications and Networking, C. J. Rieser, Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2004.

[27] Cognitive Wireless Network Research at Virginia Tech, Jeffrey H. Reed