

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”

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Καρδίτσης Ηλίας

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Πάλλης Ευάγγελος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου, τους συμφοιτητές μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους.

Περιγραφή Πτυχιακής Εργασίας:

Τα ασύρματα δίκτυα μέχρι σήμερα λειτουργούσαν αξιοποιώντας την στατική κατανομή των διαθέσιμων πόρων του φάσματος. Αν και η πολιτική εκχώρησης φάσματος με αυτόν τον τρόπο αξιοποιήθηκε αρκετά στο παρελθόν, η απαίτηση για παροχή ετερογενών υπηρεσιών χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα, αυξήθηκε δραματικά και δημιουργήθηκε η ανάγκη για νέες ερευνητικές προσπάθειες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη βελτίωση της αξιοποίησης του φάσματος. Οι ερευνητικές προσπάθειες αυτές έχουν σαν 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, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς δυναμικής διαχείρισης φάσματος ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των τελικών χρηστών αξιοποιώντας με αυτό τον τρόπο πιο αποτελεσματικά το διαθέσιμο ασύρματο φάσμα. Αυτό το πρόβλημα διευθετείται από τον ερευνητικό τομέα της δυναμικής διαχείρισης φάσματος και των δικτύων Cognitive Radio (CR) προτείνοντας πρωτοποριακούς μηχανισμούς, 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 και αξιοποιούνται στα δίκτυα CR. Όλες οι ερευνητικές προσπάθειες αυτές υπόσχονται πιο αποτελεσματικές λύσεις για τη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος με δυναμικούς μηχανισμούς, οι οποίοι βασίζονται στις θεωρίες της οικονομίας συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο προς τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων των ασυρμάτων δικτύων.

Στα επόμενα κεφάλαια θα αναπτυχθούν όλα τα components των CR, όπως η ιδέα των CR, ο ρόλος των συστημάτων και οι υποχρεώσεις τους, τρόποι σωστής εκμετάλλευσης του ράδιο-φάσματος, spectrum sensing, spectrum sharing και spectrum trading. Επίσης θα αναφερθεί η προσωπική μου συνεισφορά καθώς και το συμπέρασμα μου όσον αφορά στην ανάπτυξη και εφαρμογή των CRN στην πραγματικότητα.

Ακρωνύμια

CR	Cognitive radio
CRN	Cognitive Radio Network
CSMA	Carrier sense multiple access
CSMA/CA	CSMA Collision Avoidance
CSMA/CD	CSMA Collision Detection
FCC	Federal Communications Committee
TVWS	TV White Spaces
TDMA	Time Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
LAN	Local Area Network
MAC	Medium Access Control
PHY	Physical
AP	Access Point

HD	High Definition
DSO	Digital Switchover
PCM	Public Commons Model
EUM	Exclusive Usage Model
PrCM	Private Commons model
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
BS	Base station
DTV	Digital Television
DTT	Digital Terrestrial Television
BSS	Base Station Services
ISM	Industrial Scientific and Medical
IEEE	Institute of Electronics and Electrical Engineers
MAC	Medium Access Control
CMAC	Cipher Medium Access Control

SS	Spectrum Sensing
TVBD	TV Band Device
SNR	Signal to Noise Ratio
IF	Intermediate Frequency
COTS	Commercial off-the-self
KNOWS	Kognitiv Networking over White Spaces
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
BWA	Broadband Wireless Access
UWB	Ultra Wide-Band
RTS	Request to Send
CTS	Clear to Send
DTS	Data Transmission reservation

Figures

Fig. 1	Spectrum Utilization
--------	----------------------

Fig. 2	Διάγραμμα διαθεσιμότητας White Spaces για Fixed Devices
Fig. 3	Διάγραμμα διαθεσιμότητας White Spaces για Portable Devices
Fig. 4	Κατανομή φάσματος σε μια ευρωπαϊκή χώρα
Fig. 5	Λειτουργία του TDMA αλγόριθμου
Fig. 6	Αρχιτεκτονική του sensing ability των CRN
Fig. 7	Αρχιτεκτονική του spectrum sensing των CRN με την βοήθεια του CVBSSA
Fig. 8	Λειτουργία spectrum trading
Fig. 9	Διάγραμμα ροής του Simulating Annealing Algorithm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 – Ιστορία 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 Marconi κατάφερε να στείλει και να λάβει μηνύματα, χρησιμοποιώντας ράδιο-κύματα, σε μια απόσταση 2 μιλίων. Μέχρι το 1899, ο Marconi έστειλε μήνυμα εννέα μίλια κατά μήκος του καναλιού του Bristol και 31 μίλια κατά μήκος των Αγγλικών καναλιών προς την Γαλλία. Το 1901 ήταν σε θέση να μεταδώσει πέρα από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Για την συμβολή του την ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας ο Marconi έμεινε γνωστός ως ο *“πατέρας του ασυρμάτου”*.

Κατά την διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, ο στρατός των Ηνωμένων Πολιτειών πρώτος 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 (WLAN), όπου ανήκει στην οικογένεια των 802.11 προτύπων. Αυτό το πρώτο WLAN αποτελούταν από 7 υπολογιστές, οι οποίοι βρίσκονταν σε 4 διαφορετικά νησιά, και 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 διάχυση φάσματος με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές αυτές. Τα WLAN δεύτερης γενιάς, καθώς και αυτά της 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.

1.2 Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι ένας σημαντικός οικονομικός πόρος στις μέρες μας. Χαρακτηρίζεται από το εύρος ζώνης του, την απαιτούμενη ισχύ συστήματος για να γίνει η μετάδοση καθώς και από τις παρεμβολές από τις οποίες υποφέρει. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι πολλές και ευρέως διαδεδομένες στις μέρες μας. Παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών είναι το GPS, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, η αναλογική και ψηφιακή τηλεόραση και τα δίκτυα Wi-Fi

Η διαχείριση λοιπόν του φασματικού πόρου είναι αναγκαία για την εύρυθμη και σωστή λειτουργία των υπηρεσιών που προσφέρονται. Μια σειρά οργάνων και ομάδων προτυποποίησης είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση αυτή. Τέτοια όργανα είναι:

- Η διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU)
- Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI)
- Ευρωπαϊκή διάσκεψη Αρχών Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (CEPT)
- Οι κατά τόπους ρυθμιστικές αρχές όπως η FCC στις ΗΠΑ, ΕΕΤΤ στην Ελλάδα

Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι των παραπάνω οργάνων είναι:

- Οικονομική Αποδοτικότητα, δηλαδή μεγιστοποίηση της αξίας που παράγεται από τη χρήση του φάσματος
- Μεγιστοποίηση της χρήσης του φάσματος
- Αποτροπή των παρεμβολών
- Εφαρμογή Προκαθορισμένης Πολιτικής

Για την επίτευξη λοιπόν αυτών των στόχων το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων έχει χωρισθεί στις εξής ζώνες:

- Αδειοδοτημένες ζώνες για αποκλειστική χρήση για συγκεκριμένες υπηρεσίες
- Αδειοδοτημένες ζώνες για αποκλειστική χρήση
- Μη αδειοδοτημένες ζώνες με κοινή χρήση

Στην πρώτη κατηγορία ζωνών ανήκουν τα κανάλια τα οποία διατίθενται για συγκεκριμένες υπηρεσίες (Primary Services) σε αυτήν την κατηγορία ανήκει η αναλογική και η ψηφιακή τηλεόραση. Στην δεύτερη κατηγορία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη θα εκπέμψει αρκεί να τηρεί κάποιες προϋποθέσεις όπως ότι δεν θα παρεμβάλει στα γειτονικά κανάλια και δεν θα παρεμποδίζει τις υπηρεσίες που προσφέρονται από γείτονες προς αυτόν χρήστες. Στην τρίτη κατηγορία ανήκει το μη αδειοδοτημένο φάσμα, δηλαδή οι φασματικές ζώνες που είναι ελεύθερες για κάθε χρήση. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το 802.11b ή Wi-Fi που λειτουργεί στα 2,4GHz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1.1 - Cognitive Radio Networks

Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, η όλο και αυξανόμενη ανάγκη για επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, εξαιτίας ασύρματων ευζωνικών συνδέσεων, αλλά και η «συμφόρηση» υπηρεσιών σε συγκεκριμένες φασματικές ζώνες έχει οδηγήσει στη αύξηση ζήτησης εύρους ζώνης αλλά και στον ανταγωνισμό μεταξύ δημόσιων, ιδιωτικών και στρατιωτικών φορέων για την κατοχή φάσματος. δεδομένου όμως ότι το εύρος ζώνης είναι ένας πεπερασμένος πόρος το πρόβλημα που ανακύπτει είναι η διαφαινόμενη εξάντλησή του, καθώς και το πώς θα γίνει βέλτιστη εκμετάλλευσή του. Παρολαυτα μελέτες που έχουν γίνει στο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων δείχνουν ότι σε ορισμένες αδειοδοτημένες περιοχές η αξιοποίηση τους δεν είναι η βέλτιστη . Ως αποτέλεσμα, η ομοσπονδιακή επιτροπή επικοινωνιών της Αμερικής (FCC) ερευνούσε νέους τρόπους για τη διαχείριση των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων. Η CR τεχνολογία είναι μια καινοτόμα φιλοσοφία σχεδιασμού ράδιο-κυμάτων που έχει ως στόχο την αύξηση της εκμετάλλευσης του διαθέσιμου φάσματος με την αξιοποίηση αχρησιμοποίητου και υπό-χρησιμοποιημένου φάσματος σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον.

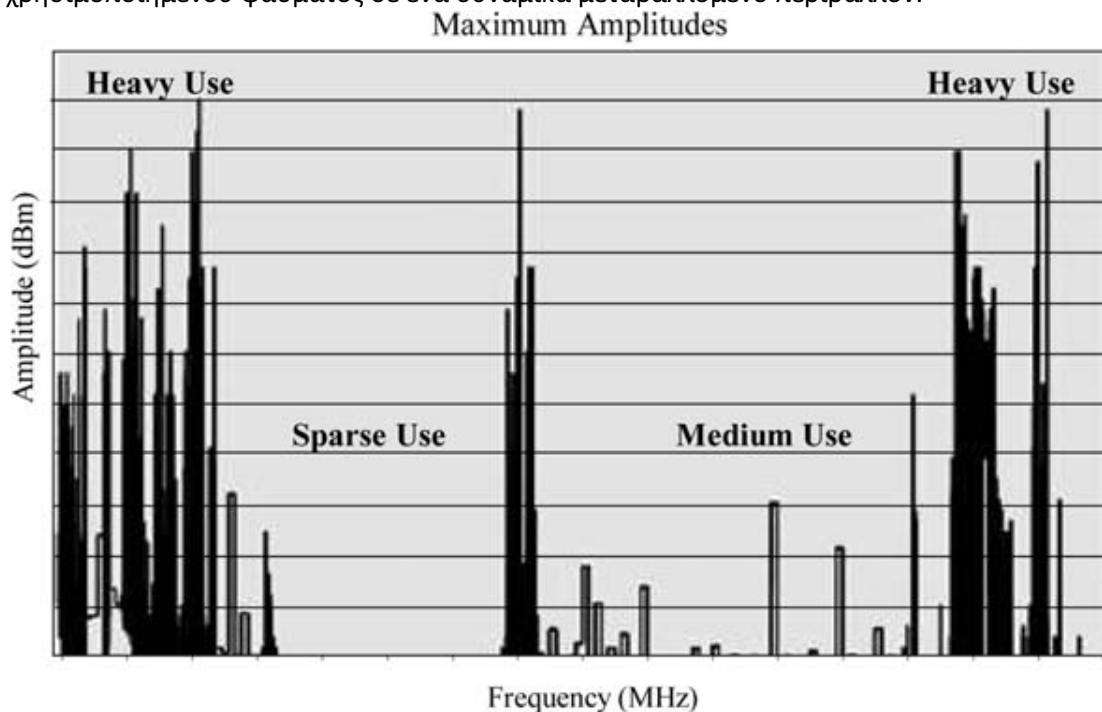


Fig.1 Spectrum Utilization

Η έννοια του CR εισήχθη για τη βελτίωση της χρήσης του φάσματος συχνοτήτων σε ασύρματα δίκτυα. Η βασική ιδέα είναι να επιτρέπουμε σε χρήστες χωρίς άδεια (unlicensed

users) να κάνουν χρήση licensed συχνοτήτων, υπό την προϋπόθεση ότι μπορεί να εγγυηθεί η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τους πρωταρχικούς χρήστες. Ωστόσο, αφήνοντας περιθώριο για καιροσκοπική χρήση του ασύρματου φάσματος δημιουργούνται νέα προβλήματα, όπως η ειρηνική συνύπαρξη με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, καθώς και κατανόηση της επίδρασης των παρεμβολών, τις οποίες κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα μπορεί να δημιουργήσει. [4]

Τον τελευταίο καιρό τα Cognitive Radio Networks είναι στο επίκεντρο των ερευνών και των εξελίξεων ως η τεχνολογία που επιτρέπει την πρόσβαση στα επικαλούμενα TV White Spaces (TVWS), τα οποία είναι μεγάλα τμήματα του φάσματος στον χώρο των Ultra High Frequency/ Very High Frequency (UHF/VHF), τα οποία καθίστανται διαθέσιμα κατά γεωγραφική βάση, μετά την επιβαλλόμενη ψηφιακή μετάβαση. Την χρήση αυτής της μπάντας συχνοτήτων μας την επιτρέπει η επέλαση της ψηφιακής τηλεόρασης και η ελευθέρωση δεσμευμένων συχνοτήτων λόγω αναλογικής μετάδοσης.

Το Cognitive Radio Network, είναι ένα δίκτυο το οποίο έχει την ικανότητα να αλλάζει τις παραμέτρους της εκπομπής βάσει διαδραστικότητας με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί. Από αυτή την ικανότητα όμως βγαίνουν δύο κύρια χαρακτηριστικά που κάνουν αυτή την τεχνολογία να ξεχωρίζει. [15]

- 1. Cognitive Capability:** Αναφέρεται στην ικανότητα των Cognitive Radio Networks να συλλέγουν ή να αισθάνονται τις μεταδιδόμενες πληροφορίες από το περιβάλλον στο οποίο εργάζονται. Αυτή η δυνατότητα του δικτύου δεν μπορεί απλώς να γίνει αντιληπτή μέσω της παρακολούθησης της ισχύος σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει, αλλά απαιτούνται πιο εξεζητημένες τεχνικές προκειμένου να συλληφθεί η χρονική και χωρική διαφοροποίηση και να αποφευχθούν παρεμβολές σε άλλους χρήστες/συστήματα. Μέσω αυτής της ικανότητας, τα τμήματα του φάσματος που δεν χρησιμοποιούνται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή συγκεκριμένο χώρο, μπορούν να αναγνωρισθούν. Κατά συνέπεια μπορεί να γίνει η καλύτερη επιλογή φάσματος σε συνεργασία με τις καταλληλότερες λειτουργικές παραμέτρους.
- 2. Reconfigurability:** Η Cognitive Capability παρέχει spectrum awareness όπου το Reconfigurability επιτρέπει στο ράδιο-φάσμα να είναι δυναμικά προγραμματισμένο σύμφωνα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί. Μάλιστα 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, όσο φυσικά υποστηρίζεται από το hardware του.

Μία άλλη σημαντική εφαρμογή των Cognitive Radio Networks είναι η παροχή ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband wireless access, BWA) σε licensed ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην τηλεόραση, σε δευτερεύουσα (secondary) βάση πρόσβασης. Αυτή η έννοια είναι υπό εξέταση προκειμένου να διαπιστωθεί κάτω από ποιες συνθήκες η BWA θα μπορούσε να είναι βιώσιμη. [2]

Μερικές απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές απαιτούν επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, τις οποίες τα CRN 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 πρέπει να χρησιμοποιεί μικρότερες αποστάσεις με μεγαλύτερη χωρική επαναχρησιμοποίηση.

Με απόφασή της, στις 4 Νοεμβρίου 2008, η FCC επέβαλε μια σημαντική προϋπόθεση ότι οι white space ασύρματες συσκευές δεν πρέπει να παρεμβαίνουν με κατεστημένους φορείς, συμπεριλαμβανομένων των τηλεοπτικών εκπομπών και τα μικρόφωνα ασύρματης μετάδοσης. Η πρόσφατη πρόταση της FCC στην Αμερική προσφέρει την ελπίδα της μοναδικής πρόσβασης σε πολύτιμο ράδιο-φάσμα. Ακολουθώντας και η ΕΕ, εξέδωσε αναγγελία και χρονοδιάγραμμα στις χώρες-μέλη 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 ρόδινα όσον αφορά στα CRN, καθώς συναντώνται δυσκολίες και προκλήσεις στο sensing κομμάτι των δικτύων, καθώς και στον σχεδιασμό των MAC και PHY επιπέδων.

Οι συσκευές που λειτουργούν σε αυτό το πεδίο συχνοτήτων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε fixed και portable συσκευές. Στις fixed συσκευές έχει επιτραπεί η εκπομπή με μέγιστη ισχύ 30 dBm, ενώ στις portable έως 20 dBm. 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. [16]

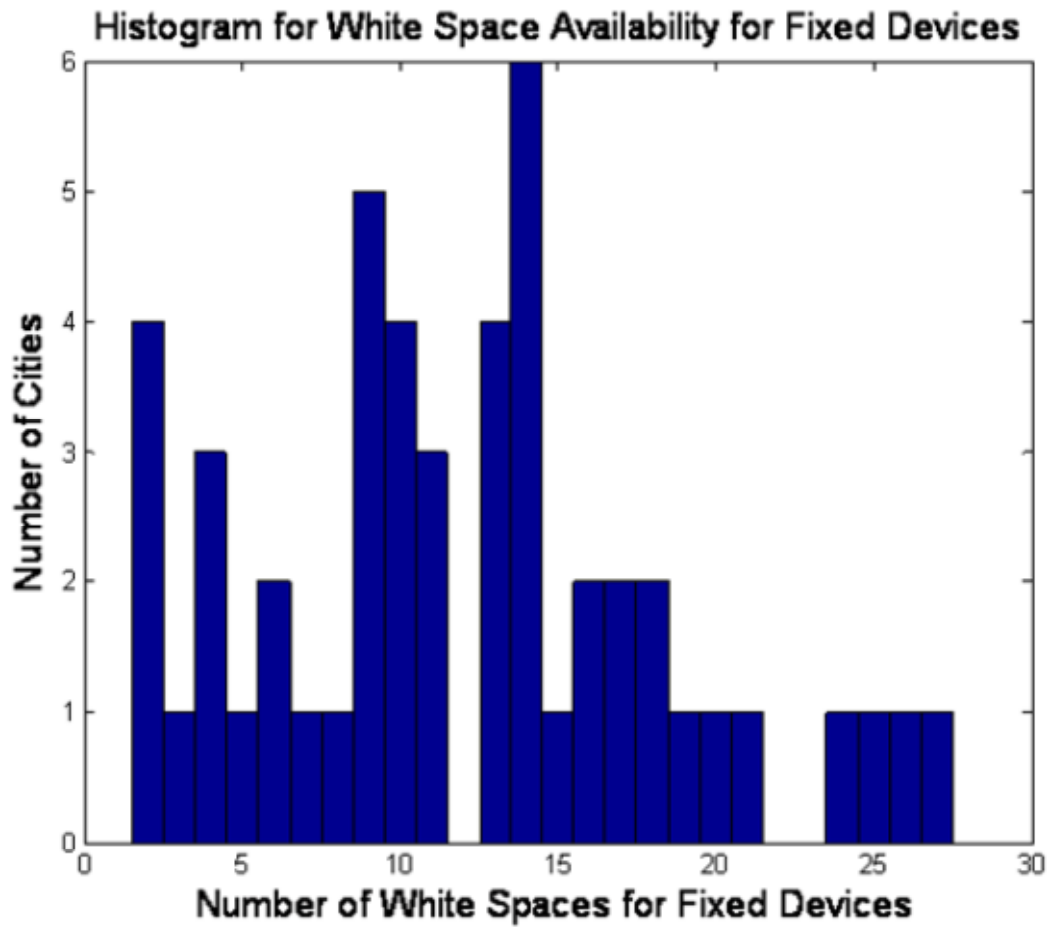


Fig.2 Διάγραμμα διαθεσιμότητας White Spaces για Fixed Devices

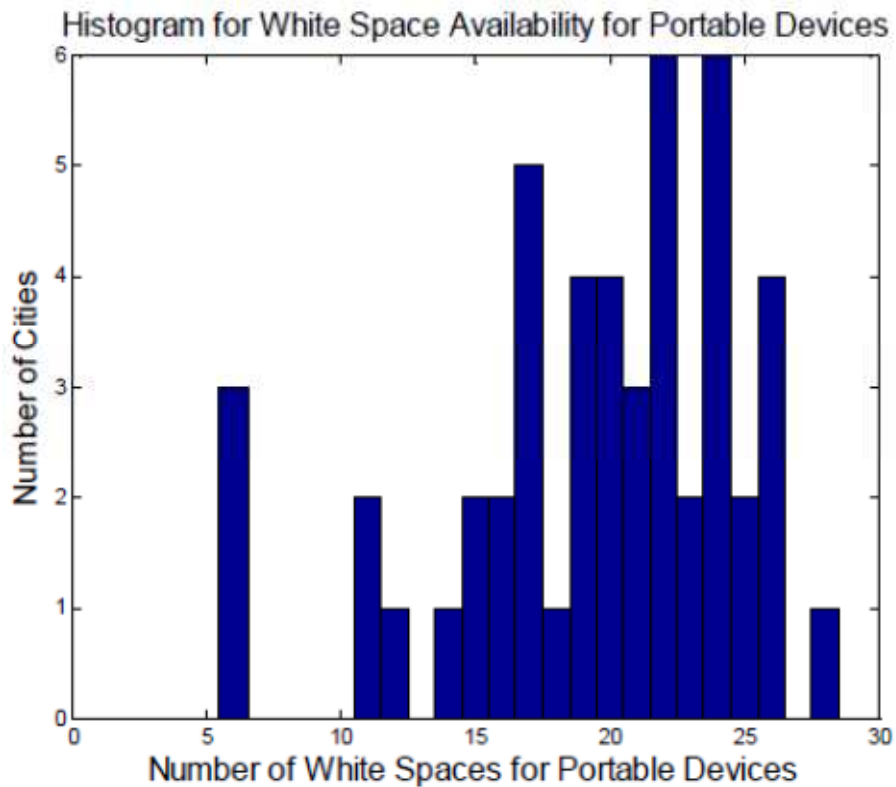


Fig.3 Διάγραμμα διαθεσιμότητας White Spaces για Portable Devices

2.1.2 – TV White spaces

Η τηλεόραση χρησιμοποιεί το φάσμα το οποίο είναι βασισμένο σε ένα πρότυπο 50 χρόνων, την εποχή όπου υπήρχαν πολύ λίγες εναλλακτικές χρήσεις αυτών των συχνοτήτων. Έχουν θεσπιστεί διάφορες σημαντικές καινοτομίες από τότε, όπως η έγχρωμη τηλεόραση και η κινητή τηλεφωνία, εντούτοις αυτό το σημαντικό κομμάτι του φάσματος χρησιμοποιείται ακόμα σύμφωνα με ένα σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του '50, με αποτέλεσμα την λανθασμένη αδειοδοτημένη χρήση του. Το φάσμα στην ζώνη μεταξύ 470-863 MHz χρησιμοποιούταν ευρέως για την ραδιοφωνική μετάδοση της τηλεόρασης λόγω της ευρύτερης και καλύτερης κάλυψης.

Τα TV White Spaces είναι επίσης γνωστά ως interleaved spectrum, διότι δεν γίνεται χρήση του φάσματος σε κάποια συγκεκριμένη χωροταξική τοποθεσία, εφόσον χρησιμοποιείται για την επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, έτσι υπάρχει ένα διαθέσιμο εύρος φάσματος για άλλες υπηρεσίες με μία κοινή, ή interleaved, βάση. Σε σύγκριση με άλλες μπάντες συχνοτήτων, η περιοχή του φάσματος που περιέχει τα TV White Spaces, έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες για αξιόπιστες επικοινωνίες δεδομένων. [10]

Σκοπός της ύπαρξης αυτών των κενών σε μία interleaved βάση είναι η αποφυγή διακαναλικών παρεμβολών για την σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου. Τα κενά αυτά είναι κομμάτια φάσματος, τεμαχισμένα εξ ορισμού και στρατηγικά σκορπισμένα μέσα στην ζώνη συχνοτήτων.

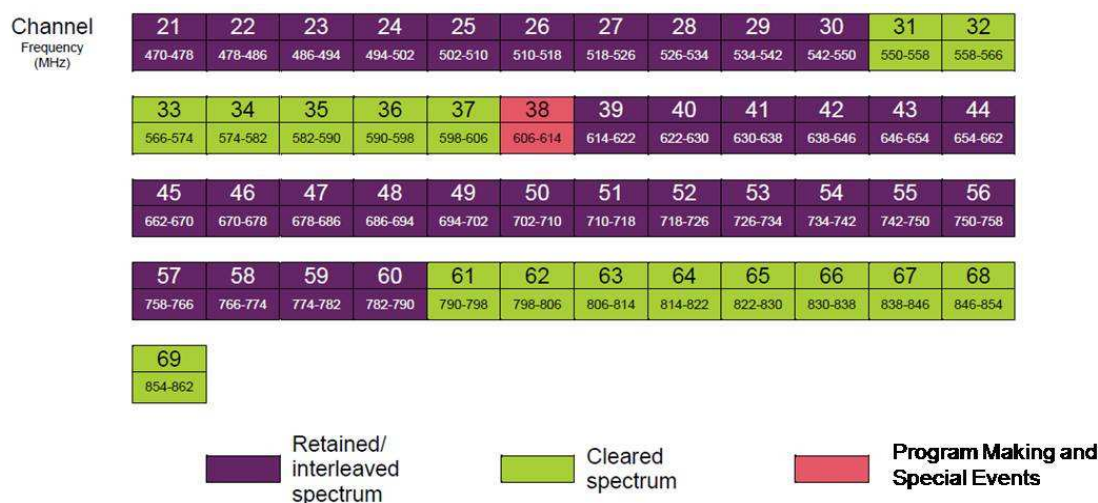


Fig.4 Κατανομή φάσματος στην Ευρωπαϊκή Ένωση

2.2 - Συστήματα

Τα σημερινά ασύρματα συστήματα, ή αλλιώς χρήστες, ακολουθούν μια σταθερή πολιτική εκχώρησης φάσματος που οδηγεί τελικά σε αναποτελεσματική χρήση αυτού. Η έλλειψη φάσματος είναι ένα ζήτημα που απασχολεί τους φορείς εκμετάλλευσης για τις

αναδυόμενες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και του μεγάλου αριθμού των χρηστών με ακόμη υψηλότερες απαιτήσεις χωρητικότητας. Αυτή η αναποτελεσματικότητα και η ανεπάρκεια στη χρήση του ράδιο-φάσματος απαιτεί ένα νέο πρότυπο για τις επικοινωνίες, όπως η χρήση διαθέσιμου φάσματος καιροσκοπικά. Τα Cognitive Radio είναι μια τεχνολογία ευρείας διάδοσης που έχει δυνατότητες να αυξήσει τη χρησιμοποίηση του ράδιο-φάσματος και να παρέχει επιθυμητή προστασία έναντι των παρεμβολών σε αδειοδοτημένα συστήματα με έναν ευκαιριακό τρόπο. Τα μη αδειοδοτημένα συστήματα πρέπει να εξυπηρετηθούν εξίσου, υπό όρους. [5]

Τα CRN 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 βασισμένα σε TDMA (time division multiple access). Καθώς αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, στα Cognitive Radio Networks τα συστήματα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, οι οποίες είναι 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 τρεις πιθανές τεχνικές έτσι ώστε οι unlicensed χρήστες/συστήματα να μπορούν να διαπιστώσουν αν μέρος των White Spaces είναι ελεύθερα προς χρήση για μια δεδομένη θέση. [17]

1. **Passive sensing (“listen-before-talk”)**: Τεχνική για να μπορέσει να ανιχνεύσει τυχόν παρουσία τηλεοπτικού σήματος. Ουσιαστικά, ανιχνεύει το κανάλι μετάδοσης και εφόσον δεν μεταδίδεται καμία πληροφορία, το καταλαμβάνει προς χρήση.
2. **Geolocation**: Με την χρήση GPS ή κάποιας άλλης τεχνολογίας εντοπισμού, καθώς επίσης και με έναν έλεγχο στις βάσεις δεδομένων για τον καθορισμό των συχνοτήτων εν χρήση.
3. **Use of separate beacon**: Με την βοήθεια ενός ξεχωριστού πομπού, ο οποίος θα επισημαίνει τι φάσμα είναι διαθέσιμο σε μια τοπική περιοχή.

2.2.1 – TDMA

Το TDMA είναι μια μέθοδος πρόσβασης καναλιών, το οποίο 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 ενός τμήματος της χωρητικότητας του φάσματος. Η TDMA τεχνική έγινε ευρέως γνωστή από την χρήση της στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς, όπως το GSM (Global System for Mobile Telecommunications). Επίσης βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα δορυφορικά συστήματα. Παρόμοια τεχνική χρησιμοποιεί και η FDMA τεχνική, διαιρώντας την συχνότητα αντί του χρόνου. Ο συνδυασμός της TDMA και της FDMA τεχνικής αποφέρει μεγάλα κέρδη στις

εταιρίες κινητής τηλεφωνίας και άλλων υπηρεσιών, καθώς επίσης επιτυγχάνεται σωστή αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.

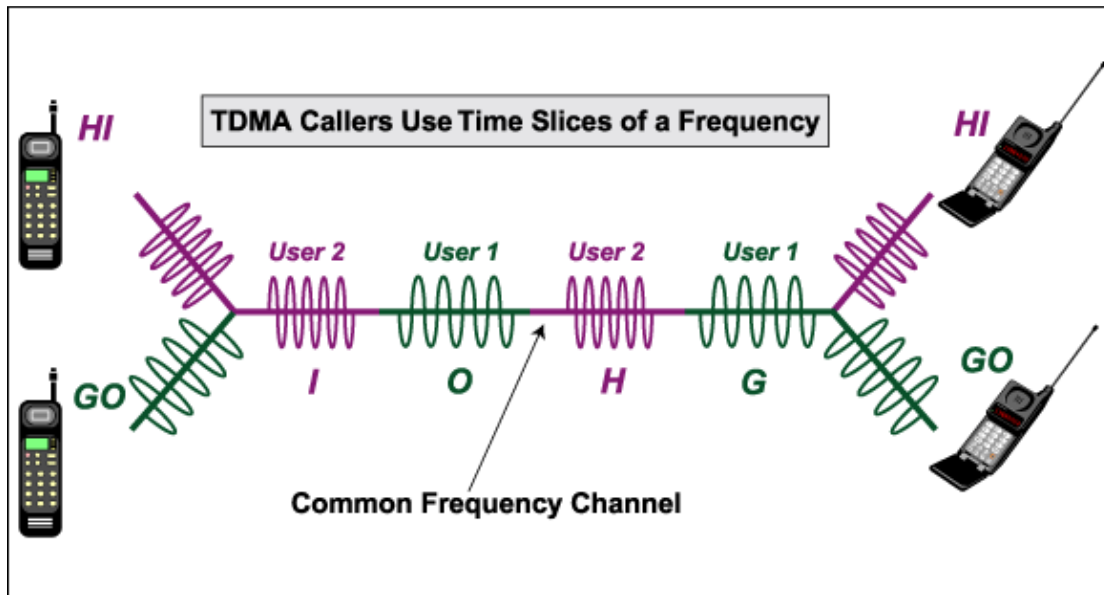


Fig.5 Λειτουργία του TDMA αλγόριθμου

2.3 – Ράδιο-φάσμα

Όταν αναφερόμαστε στο ράδιο-φάσμα, αναφερόμαστε σε ένα κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, το οποίο αντιστοιχεί στις ράδιο-συχνότητες, δηλαδή στις συχνότητες που βρίσκονται κάτω από περίπου 300GHz. Αντίστοιχα και ισοδύναμα αναφερόμαστε σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1nm.

Διαφορετικά 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 σταθμοί τηλεόρασης [12].

Το Cognitive Radio έχει ευρέως οριστεί ως ένα σύστημα το οποίο αισθάνεται το περιβάλλον λειτουργίας του και αυτόματα προσαρμόζει τις συνθήκες εκπομπής του, ή τις παραμέτρους, σε συνεργασία με ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Από μια συσκευή εκπομπής μέχρι την επόμενη γενιά ασύρματων σύστημα επικοινωνίας, η έννοια του Cognitive Radio υιοθετήθηκε ως σύμβολο της χρήσης του ράδιο-φάσματος και της ευκολίας του χρήστη [7].

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 αδιάκοπα σύνδεση στο διαδίκτυο, χωρίς ο χρήστης να αναγκάζεται να κάνει το στιδήςποτε, καθώς επίσης και χωρίς να είναι αναγκασμένος να γνωρίζει τα περιβάλλοντα συστήματα σε αυτόν.

2.3.1 – Spectrum Sensing

Οδηγημένοι από το αυξανόμενο ενδιαφέρον των καταναλωτών, όσον αφορά στις ασύρματες υπηρεσίες, η ανάγκη για ράδιο-φάσμα έχει αυξηθεί δραματικά. 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 συνεχίσει κατά τα προσεχή έτη.

Η συμβατική προσέγγιση της διαχείρισης του φάσματος είναι πολύ ανελαστική, με την έννοια ότι κάθε φορέας εκμετάλλευσης έχει χορηγηθεί αποκλειστική άδεια εκμετάλλευσης σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Παρόλα αυτά με το περισσότερο φάσμα ήδη εν ενεργεία καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο να βρεθούν κενά έτσι ώστε να μπορέσει 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 σταθερή κατανομή του φάσματος και όχι στην φυσική έλλειψη του [9].

Sensing architecture and strategy

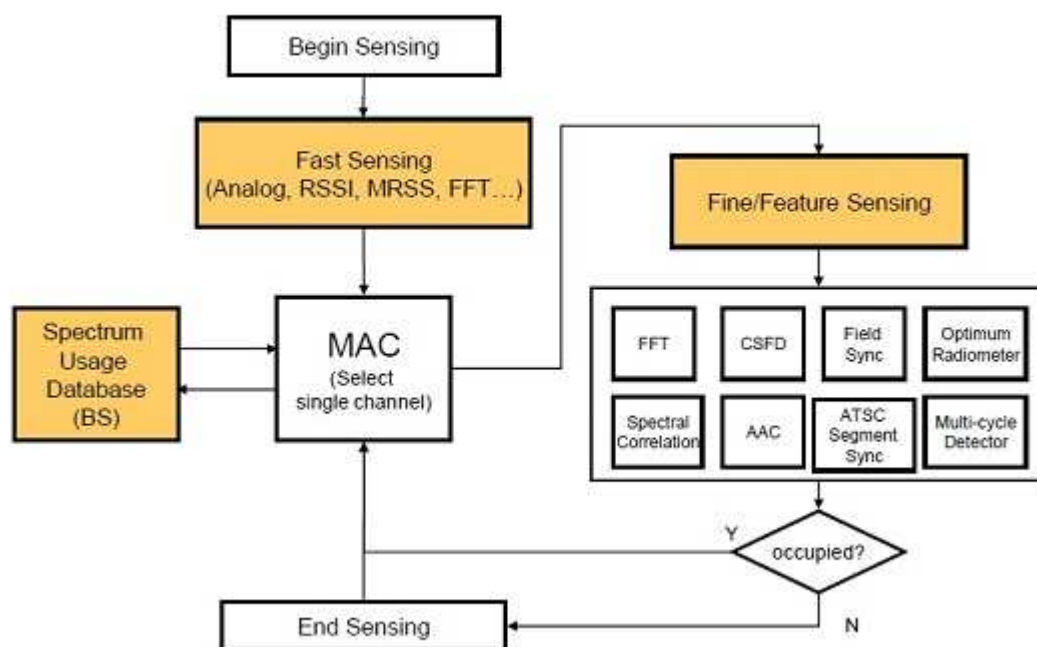


Fig.6 Αρχιτεκτονική του sensing ability των CRN

Υπό αυτές τις συνθήκες εισάγεται η έννοια της ανίχνευσης φάσματος, του οποίου ο ρόλος είναι να ανιχνεύει το αχρησιμοποίητο ράδιο-φάσμα και να το μοιράζει χωρίς επιζήμιες παρεμβολές στους άλλους χρήστες. Η ανίχνευση του φάσματος, καθώς επίσης και η

ανίχνευση των primary συστημάτων, τα οποία αποτελούν μια σημαντική απαίτηση των Cognitive Radio Networks, είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την ανίχνευση κενών στο ράδιο-φάσμα [8].

Οι τεχνικές για την ανίχνευση του φάσματος μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες:

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
- Cyclostationary Feature Detection

2- **Συνεταιρική ανίχνευση:** Αναφέρεται στις μεθόδους ανίχνευσης του φάσματος, όπου οι πληροφορίες από πολλαπλούς χρήστες ενσωματώνονται για ανίχνευση πρωταρχικών χρηστών

3- **Ανίχνευση βάσει παρεμβολών**

Όπως προαναφέρθηκε λοιπόν, το Spectrum Sensing είναι μια βασική λειτουργία των Cognitive Radio Networks. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τα χαρακτηριστικά των καναλιών πολλαπλών διαδρομών, οι τεχνικές του Spectrum Sensing που εφαρμόζονται στον δέκτη πρέπει να παρέχουν και να εγγυώνται την ασφάλεια και την προστασία των συστημάτων [7].

Σύμφωνα λοιπόν με την FCC, η κυριότερη απαίτηση για Spectrum Sensing (SS) είναι πως οι fixed και portable συσκευές, στις οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω και οι οποίες με μια λέξη ονομάζονται TVBD (TeleVision Band Device) θα πρέπει να είναι σε θέση να μπορούν να ανιχνεύσουν την παρουσία ψηφιακών ή αναλογικών τηλεοπτικών σημάτων και σημάτων ασύρματων μικροφώνων 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 μεταφράζεται σε SNR (Signal to Noise Ratio) γύρω στα -15 dB. Αυτό το σενάριο αναφέρεται όταν έχουμε μόνο μια TVBD εν ενεργεία.

Διάφορα ζητήματα εγείρονται όταν πολλές συσκευές τέτοιου τύπου συνδέονται για να σχηματίσουν ένα δίκτυο. Ένα τέτοιας φύσεως ζήτημα είναι το λεγόμενο collaborative sensing, κατά το οποίο επιδιώκεται η εφαρμογή ιδεών από distributed detection σε συνδυασμό με data fusion, όπου με από κοινού επεξεργασία επιτυγχάνονται τα στατιστικά στοιχεία για Spectrum Sensing από πολλαπλές TVBD. Εφόσον γίνει σωστή αξιοποίηση της πολυμορφίας, απόρρια των κατανεμημένων παρατηρήσεων, θα οδηγηθούμε σε σημαντική βελτίωση αξιοποίησης του φάσματος και της ανιχνευσής αυτού [16].

Συνεχίζοντας, ίσως 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.

2.3.1.2 – Co-Variance-Based Spectrum-Sensing Algorithm (CVBSSA)

Σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να αναφερθούμε σε έναν Spectrum Sensing αλγόριθμο. 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, μπαίνει σε χρήση για τον προσδιορισμό κατάληψης κάποιου καναλιού, είτε ψηφιακής τηλεόρασης είτε ασυρμάτων μικροφώνων ή άλλων πρωτογενών μεταδόσεων. Ένα σημαντικό θετικό σημείο στον αλγόριθμο αυτόν είναι πως είναι ανεξάρτητος του τύπου μετάδοσης που έχει κάνει κατάληψη στο κανάλι. Η ουσία του αλγορίθμου αυτού είναι ότι μπορεί να ανιχνεύσει κενά στο ράδιο-φάσμα.

Στην συνέχεια ένα βιομηχανικό πρότυπο, ονόματι Commercial off-the-self (COTS) μετατρέπει το εύρος που χρησιμοποιείται στην τηλεόραση στην περιοχή συχνοτήτων από 50 μέχρι και 1000 MHz, ανά 44MHz αναλογικών ενδιάμεσων συχνοτήτων (Intermediate Frequency, IF). Έπειτα η διαδικασία του sensing γίνεται στα IF και 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 ενδιάμεσες συχνότητες (IF) ψηφιοποιούνται και μετατρέπονται περαιτέρω σε ψηφιακές ενδιάμεσες συχνότητες σε ψηφιακή πλατφόρμα. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης και ο έλεγχος του τίθενται επίσης σε εφαρμογή στο COTS.

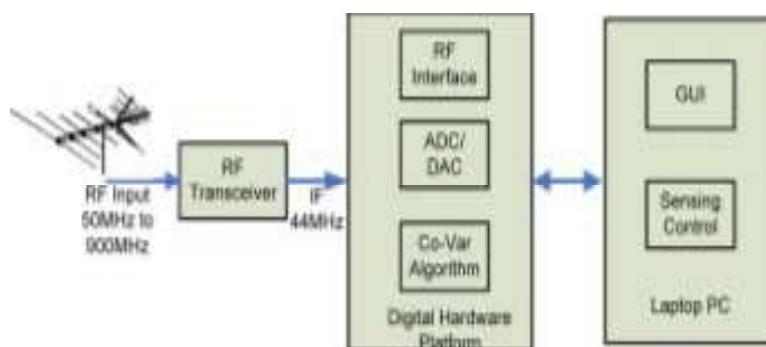


Fig.7 Αρχιτεκτονική του spectrum sensing των CRN με την βοήθεια του CVBSSA

Εφόσον η ανίχνευση ενός καναλιού αρχικοποιηθεί σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του αλγόριθμου, στο GUI, ο δέκτης προσαρμόζεται στο συγκεκριμένο κανάλι. Έπεται η ψηφιοποίηση των ενδιάμεσων συχνοτήτων [11].

2.3.2 – 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 αυτών, χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία των primary συστημάτων.

Εφόσον επιτευχθεί σωστή κατανομή φάσματος, νέες τεχνολογίες έχουν την δυνατότητα να αναπτυχθούν. Τεχνολογίες οι οποίες θα βελτιώσουν την ζωή μας , την ασφάλεια μας, την υγεία μας καθώς και το εργασιακό μας περιβάλλον.

Όπως στα συστήματα, έτσι και στο spectrum sharing, υπάρχουν διάφορα μοντέλα όπως:

Public Commons Model (PCM): Σε αυτό το μοντέλο το φάσμα είναι ανοιχτό σε όλους για πρόσβαση με ίσα δικαιώματα. Το εν λόγω μοντέλο ισχύει μέχρι και σήμερα για τα όλα ασύρματα πρότυπα (π.χ., WiFi και Bluetooth).

Exclusive Usage Model (EUM): Το φάσμα θα μπορεί να διαθέτει άδεια αποκλειστικά σε ένα συγκεκριμένο χρήστη, ωστόσο η χρησιμοποίηση του φάσματος μπορεί να βελτιωθεί επιτρέποντας δυναμική κατανομή φάσματος και spectrum trading με τον ιδιοκτήτη του φάσματος.

Private commons model (PrCM): Κάθε χρήστης σε CR δίκτυα (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 ευκαιρίας (spectrum opportunity) και ο συγχρονισμός τους είναι σημαντικός για την πρόσβαση επικάλυψης.

2.3.2.1 – Dynamic Spectrum Sharing

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

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

Μερικές βασικές αρχές που ακολουθούνται κατά την δυναμική κατανομή φάσματος είναι [14]:

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 [13]:

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 κίνηση. Θεσπίζοντας ένα συνεργατικό περιβάλλον, οι φορείς μπορούν να βελτιώσουν στα μέγιστα την αποτελεσματικότητα του περιβάλλοντος 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 των φορέων.

2.3.3 – Spectrum Trading

Χρησιμοποιούμε τον όρο spectrum trading για να αναφερθούμε στη διαδικασία της πώλησης και αγοράς των radio resources, σημαντικών στοιχείων του ραδιοφάσματος.

Επίσης δύο σημαντικά βήματα στην κοινή χρήση φάσματος είναι η εξερεύνηση του φάσματος και η εκμετάλλευση του. Οι στόχοι της εξερεύνησης του φάσματος είναι να ανακαλύψει και να διατηρήσει τα στατιστικά στοιχεία χρήσης, και να εντοπίσει τα spectrum opportunities (ευκαιρίες φάσματος.). Τοποθετείται ένας transceiver, ο οποίος κάνει sniffing, δηλαδή παρακολουθεί της κινήσεις που γίνονται στο δίκτυο 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 spectrum opportunities.

Ανάλογα με το μοντέλο κατανομής φάσματος, η πρόσβαση στο φάσμα ενδέχεται να απαιτήσει ρητή άδεια από τον ιδιοκτήτη ή συνεργασία από τον primary χρήστη, ή μπορεί και αυθαίρετα όπως στο δημόσιο μοντέλο commons. Για να καθορίσουν την βέλτιστη παράμετρο μετάδοσης ώστε να επιτύχουν την αποτελεσματική πρόσβαση στο φάσμα κατά τη διάρκεια της φάσης της εκμετάλλευσης, της βελτιστοποίησης και της απόφασης για το πια τεχνική θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το Spectrum Trading βρίσκεται μεταξύ της εξερεύνησης φάσματος και της εκμετάλλευσης αυτού. Αφού καθοριστούν οι spectrum

opportunities, πωλούνται στους χρήστες, όπου τότε και μόνο τότε προβαίνουν στην χρήση το ραδιοφάσματος.

Η απόφαση σχετικά με spectrum trading μπορεί να καθοριστεί μία σύνδεση ή μόδας. Για παράδειγμα, η διαπραγμάτευση μεταξύ του ιδιοκτήτη του φάσματος και του χρήστη στην αποκλειστική χρήση του μοντέλου μπορεί να γίνει πριν από την κατανομή του φάσματος και έχει πρόσβαση με καθυστέρηση. Αντίθετα, μια διαπραγμάτευση μεταξύ ενός primary και secondary χρηστών σε private commons model μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο. Η MAC ή/και τα επιπέδου δικτύου που υποστηρίζουν την διαπραγμάτευση για το ανταλλαγή φάσματος υποχρεούνται να διευκολύνουν την πρόσβαση στο φάσμα και την δυναμική κατανομή του.

Ο primary φορέας παροχής υπηρεσιών θεωρείται ο πωλητής του φάσματος στη διαδικασία του εμπορίου ενώ secondary πάροχος της υπηρεσίας είναι ο αγοραστής του φάσματος. Οι κύριες συνδέσεις συνδέονται με έναν primary ελεγκτή υπηρεσίας, C_p . Η παροχή φάσματος προέρχεται από τα έσοδα που προκύπτουν από τις εν εξελίξει συνδέσεις, μείον το κόστος που οφείλεται στην υποβάθμιση των επιδόσεων όταν το φάσμα μοιράζεται από κοινού με την secondary υπηρεσία. Ομοίως, οι secondary συνδέσεις συνδέονται με ένα secondary ελεγκτή υπηρεσίας, C_s . Αυτός ο secondary ελεγκτής υπηρεσίας αγοράζει τα spectrum opportunities από τον primary ελεγκτή υπηρεσίας. Η ζήτηση φάσματος προκύπτει με βάση την ικανοποίηση (π.χ., χρησιμότητα) της secondary συνδέσεις και την τιμή που χρεώνεται από την κύρια υπηρεσία.

Με το σκεπτικό ότι ο αριθμός των real time συνδέσεων δεν παραμένει σταθερός, αλλά αυξομειώνεται καθώς ο χρόνος περνάει, η παροχή φάσματος θα πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθεί της αλλαγές αυτές και να συμβαδίζουν αλλιώς θα παρατηρούνται διακοπές απο τους αγοραστές. Οι αλλαγές των συνδέσεων επηρεάζουν άμεσα την προσφορά με αποτέλεσμα να αλλάζει και η τιμή των παρόχων.

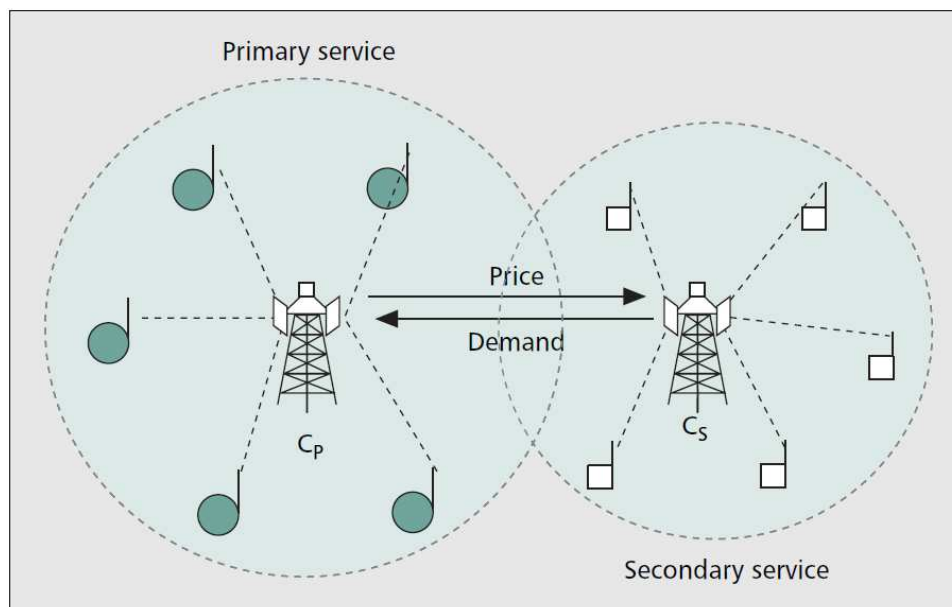


Fig.8 Λειτουργία spectrum trading

2.3.3.1 – Ζητήματα του Spectrum Trading

Ζητήματα που εμφανίζονται στο Spectrum Trading είναι η τιμολόγηση των υπηρεσιών, η παροχή υπηρεσιών, ο διαμοιρασμός του φάσματος, η απαίτηση φάσματος, ο συναγωνισμός και ανταγωνισμός παρόχων, θέματα βελτιστοποίησης παροχών, fair play, πλειστηριασμοί καθώς και διάφορα άλλα, τα οποία αναπτύσσονται στην συνέχεια.

Spectrum Pricing : Η τιμή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εμπορία του φάσματος, δεδομένου ότι δείχνει την αξία του φάσματος, τόσο για τον πωλητή και όσο και για τον αγοραστή. Για τον αγοραστή, η τιμή που καταβάλλεται στον πωλητή του φάσματος θα εξαρτηθεί από την ικανοποίηση που επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης του εν λόγω φάσματος. Για τον πωλητή του φάσματος, η τιμή καθορίζει τα έσοδα του, επομένως το κέρδος. Αν το φάσμα των τιμών είναι υψηλό, η ικανοποίηση του αγοραστή είναι μειωμένη, ενώ τα έσοδα του πωλητή είναι αυξημένα. Η τιμή φάσματος θα πρέπει να καθορίζεται με βάση το φάσμα ζήτησης του αγοραστή και της προσφοράς του φάσματος από τον πωλητή. Επίσης, ο ανταγωνισμός μεταξύ των αγοραστών / πωλητών θα αντίκτυπο καθορισμό των τιμών. Παραδείγματα φάσματος χορήγηση και την τιμολόγηση στα CR δίκτυα μπορούν να βρεθούν στο [20]

Spectrum Supply and Cost of Spectrum Sharing: Στην μικροοικονομική θεωρία, για μια δεδομένη τιμή, η λειτουργία της προσφοράς καθορίζει το ποσό πόρων που θα πωλείται από τον πωλητή. Ομοίως, στην εμπορία φάσματος, για μια δεδομένη τιμή, το φάσμα προσφοράς καθορίζει τις παραμέτρους μετάδοσης για τον αγοραστή φάσματος για να έχει πρόσβαση στο φάσμα. Σε ένα wireless cognitive σύστημα αυτή η προσφορά του φάσματος μπορεί να είναι από την άποψη του αριθμού των καναλιών συχνότητας (π.χ., frequency-division multiple access [FDMA] συστήματα), ο αριθμός του διαθέσιμου χρόνου (π.χ., με time-division multiple access [TDMA] συστήματα), ή δύναμη μετάδοσης (π.χ., code-division multiple access [CDMA] συστήματα) που η τιμή που χρεώνεται στον αγοραστή. Αυτή η προσφορά φάσματος μπορούν να προκύψει 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 γεννάται λόγω των επενδύσεων σε υποδομές, το μεταβλητό κόστος που υφίστανται λόγω της υποβάθμισης των επιδόσεων προκύπτει από την ανταλλαγή / πώληση του φάσματος (π.χ., υψηλότερη σύνδεση κλείδωμα πιθανότητα, 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 από τον αγοραστή. Στην εμπορία φάσματος, η ζήτηση του καθορίζει το ποσό του φάσματος που θέλει να έχει πρόσβαση σε συγκεκριμένη τιμή ο αγοραστής, έτσι ώστε η ικανοποίησή του μεγιστοποιείται. Ανάλογα με την απαίτηση του αγοραστή, διαφορετικοί τύποι λειτουργίας κοινής ωφέλειας (π.χ., σε λογαριθμική ή sigmoid λειτουργία του ποσοστού μετάδοσης) μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η λειτουργία της ζήτησης φάσματος μπορεί να προκύψει με βάση μεγιστοποίηση της χρησιμότητας των secondary χρηστών για μια δεδομένη τιμή.

Competition and Cooperation in Spectrum Sharing: Όταν είναι περισσότεροι του ενός φορείς εμπλέκονται στην εμπορία φάσματος (π.χ., πολλαπλή πωλητές ή πολλαπλές αγοραστές), οι φορείς αυτοί μπορούν να ανταγωνιστούν ή να συνεργαστούν μεταξύ τους για να επιτύχουν τους στόχους τους. Ο ανταγωνισμός που προκύπτει όταν καθένας από τους φορείς έχει το ενδιαφέρον για τον εαυτό του και είναι λογικό να ενδιαφέρεται για την μεγιστοποίηση των οφελών του. Ανταγωνισμός μπορεί να είναι μεταξύ πολλών πωλητών φάσματος για να προσελκύσει 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 συμμετέχουν στον ανταγωνισμό, καθώς και μια οντότητα εκτός του ανταγωνισμού μπορεί να έχει μεγαλύτερο όφελος. Ας εξετάσουμε ένα διαγωνισμό μεταξύ πωλητών φάσματος όπου μειώνουν την τιμή του φάσματος για να προσελκύσει περισσότερους αγοραστές. Με αυτή την τιμή λόγω ανταγωνισμού, ο πωλητής (δηλαδή, ο φορέας που συμμετέχει στον ανταγωνισμό), πάντα χάνει σε κέρδος, ενώ ο αγοραστής (δηλαδή, οντότητα εκτός του ανταγωνισμού) έχει πλεονέκτημα λόγω χαμηλότερης τιμής. Συνεπώς, οι φορείς που εμπλέκονται στην εμπορία του φάσματος μπορεί να έχουν επιλογή να συνεργαστούν ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη λύση. Στο παραπάνω παράδειγμα οι πωλητές μπορούν να συνεργαστούν για να αυξηθούν οι τιμές, ώστε να αποκομίσει κάποιο υψηλότερο κέρδος από ότι στην περίπτωση του ανταγωνισμού.

Microeconomic Approach: Η Μικροοικονομική Θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί στην εμπορία του φάσματος, όπου υπάρχουν δύο μεγάλες οντότητες ο πωλητής και ο αγοραστής. Η λύση της προσέγγισης αυτής, βασίζεται στην ισορροπία της αγοράς, που χαρακτηρίζει μια τιμή για την οποία, το φάσμα ζήτησης ισούται με την προσφορά φάσματος. Σύμφωνα με την ισορροπία της αγοράς, τόσο το κέρδος του πωλητή όσο και η ικανοποίηση αγοραστής μεγιστοποιείται. Ένα παράδειγμα αυτής μικροοικονομική προσέγγιση στο φάσμα /εύρος ζώνης συναλλαγών παρουσιάστηκε στο [8], 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. Η λύση είναι η 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 κλασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί από τους φορείς ελέγχου (π.χ., ιδιοκτήτης του φάσματος) για την εμπορία του φάσματος ώστε να μεγιστοποιηθεί το κέρδος του ιδιοκτήτη του προσαρμόζοντας την τιμή του φάσματος. Ένας περιορισμός σε αυτή διατύπωση θα ήταν να διατηρηθεί η ποιότητα της μετάδοσης στο επιδιωκόμενο επίπεδο. Επίσης, το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η χρήση των χρηστών cognitive (στο δημόσιο μοντέλο Commons) με την προσαρμόζοντας την ισχύ εκπομπής διαβιβάζει την εξουσία. Ένα παράδειγμα αυτής της κλασικής προσέγγισης βελτιστοποίησης για την εμπορία του φάσματος μπορεί να βρεθεί στο [21]. Στο σύστημα μοντέλου που θεωρείται στο [21], πολλαπλοί cognitive

χρήστες ζητούν φάσμα, το οποίο βασίζεται τμηματική γραμμική ζήτηση τιμών (PLPD), στον ιδιοκτήτη του φάσματος. Ο ιδιοκτήτης του φάσματος διαμορφώνει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για να μεγιστοποιήσει τα έσοδα βάσει του περιορισμού των παρεμβολών.

Non-cooperative Game: Η κλασική προσέγγιση βελτιστοποίησης βασίζεται σε μια ενιαία λειτουργία όπου στόχος είναι η λύση του οποίου είναι το σοφός-σύστημα βέλτιστη για μία οντότητα. Ωστόσο, σε ένα περιβάλλον non-cooperative 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. Σε γενικές γραμμές ένα αποτελείται από παίκτες (π.χ., γνωστικές οντότητες ραδιόφωνο), ενέργειες των παικτών, καθώς και η εξοφλήσεις των παικτες για δεδομένες δράσεις. Για παράδειγμα, το Spectrum trading, πολλαπλοί primary χρήστες (δηλαδή, παίκτες) προσφορές τιμής (δηλαδή, δράσεις) για την πώληση του φάσματος σε secondary χρήστες που προτίθενται να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους(εν μέσω πληρωμών).

Bargaining Game: Ένα παιχνίδι διαπραγμάτευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου οι παίκτες μπορούν να συνεργαστούν, και ένας παίκτης μπορεί να επηρεάσει τη δράση των άλλων παικτών στην εμπορία του φάσματος. Μέσα αυτό το παιχνίδι οι παίκτες μπορούν να διαπραγματεύονται μεταξύ τους. Μια γενική λύση των παιχνιδιών διαπραγμάτευσης είναι η λύση Nash, η οποία μπορεί διασφαλίζει την αποτελεσματικότητα και την δικαιοσύνη. Ένα παράδειγμα παιχνιδιού διαπραγμάτευσης για την κατανομή των εσόδων μπορεί να βρεθεί στο [22]. Κάθε radio access network (RAN), διαθέτει ένα φάσμα.Ωστόσο, σε μια δεδομένη στιγμή τα διαθέσιμο φάσμα μπορεί να μην είναι αρκετό για να εξυπηρετεί όλους τους χρήστες σε ένα συγκεκριμένο RAN. Ως εκ τούτου, αυτό το RAN μπορεί να διαπραγματευθεί με άλλους για την μίσθωση πρόσθετου φάσματος.

Auction: Μια αποτελεσματική προσέγγιση στο spectrum trading είναι να χρησιμοποιήσει τη διαδικασία πλειστηριασμού. Η δημοπρασία εκτελείται από τους αγοραστές οι οποίοι υποβάλλουν τις προσφορές τους σε ένα πωλητή. Ο πωλητής αποφασίζει σε ποιο 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 με απαιτήσεις των αγοραστών. Για παράδειγμα, σε έναν πλειστηριασμό, όλοι οι αγοραστές ταυτόχρονα υποβάλουν τις τιμές προσφοράς. Στη συνέχεια η νίκη του αγοραστή καθορίζεται από το ποιος πληρώνει την υψηλότερη τιμή. Ένα παράδειγμα του πλειστηριασμού, στο πλαίσιο της εμπορίας του φάσματος μπορεί να βρεθεί στο [5], 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 φάσματος. Η τιμή προσφοράς κάθε φορέα καθορίστηκε βασισμένη στη μεγιστοποίηση εισοδήματος λόγω δυναμικής κατανομής μεταξύ των χρηστών. Οι φορείς καταθέτουν προσφορά για αυτά τα κανάλια, και ο φορέας που νίκησε καταβάλλει την δεύτερη υψηλότερη τιμή (δηλαδή, η δεύτερη προσφορά τιμής) στον υπεύθυνο φάσματος.

2.3.3.2 – Δομή του Spectrum Trading

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. Με αυτή την διάρθρωση της αγοράς μπορεί να είναι είτε seller-driven ή buyer-driven. Στην πρώτη περίπτωση, ο πωλητής καθορίζει την τιμή και να μεταδίδει τις πληροφορίες για 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 και με 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 ο αγοραστής με το καλύτερο κίνητρο και συνέχεια κατανέμει το φάσμα αναλόγως. Πρόκειται για τον αποκαλούμενο πλειστηριασμό [19].

Multiple Sellers: Ολιγοπώλιο -- Η δομή αυτής της αγοράς αποτελείται από πολλούς πωλητές, οι οποίοι προσφέρουν φάσμα στην αγορά. Ο αγοραστής έχει την επιλογή να επιλέξει την καλύτερη προσφορά για να μεγιστοποιήσει την ικανοποίησή του τόσο όσον επιδόσεις όσο και την τιμή. Η αγορά αυτή είναι αναφέρεται ως ολιγοπώλιο, και ο πωλητής σε αυτή την αγορά ονομάζεται ολιγο-πωλητής . Δεδομένου ότι υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ αυτών των πωλητών, το κέρδος ενός πωλητή φάσματος είναι πάντα μικρότερο από ότι στον

Single Seller: Αν οι πληροφορίες σχετικά με όλους τους πωλητές είναι διαθέσιμες, η διαπραγμάτευση μπορεί να γίνει μονομιάς. Ωστόσο, εάν οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες (η οποία είναι η συνηθισμένη η περίπτωση), απαιτείται η διαπραγμάτευση μεταξύ ενός αγοραστή και ενός πωλητή για την επίτευξη της λύση (π.χ., ο πωλητής κερδίζει το υψηλότερο κέρδος και / ή ο αγοραστής λαμβάνει την υψηλότερη ικανοποίηση σε ένα ανταγωνιστικό σενάριο).

No Permanent Seller: Exchange Market -- Σε αυτή την δομή αγοράς δεν υπάρχει μόνιμος πωλητής φάσματος (όπως στο δημόσιο μοντέλο commons), 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 χρήστη οι άλλοι χρήστες θα πρέπει να αποζημιωθούν. Για παράδειγμα, ένας χρήστης που νοικιάζει ενδέχεται να αποτελέσει κίνητρο για έναν χρήστη leasing και να έχει πρόσβαση στο φάσμα, με ιδιαίτερα δικαιώματα (π.χ., ισχυρότερη από το μέσο μετάδοσης) για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Όταν ένας χρήστης που νοικιάζει μπαίνει στο φάσματος με ιδιαίτερα δικαιώματα, δίνεται credit στον leasing χρήστη. Κατόπιν, όταν είναι απαραίτητο, ο χρήστης leasing μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτό το credit ώστε να έχει πρόσβαση στο φάσμα ως ενοικιαστής χρήστης με ειδικά δικαιώματα, ενώ κάποιος άλλος χρήστης γίνεται leasing.

Κεφάλαιο Τρίτο

3.1) Simulated Annealing Algorithm

3.1.1) Simulated Annealing Background

Ο Simulated Annealing αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 από τον Scott Kirkpatrick και αρκετούς άλλους ερευνητές. Αρχικά αναπτύχθηκε για να βελτιστοποιήσει καλύτερα τον σχεδιασμό των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC) με προσομοίωση της πραγματικής διαδικασίας annealing . Annealing είναι η μεταλλουργική διαδικασία της θέρμανσης ενός στερεού και στη συνέχεια η αργή ψύξη του μέχρι να κρυσταλλώσει. Τα άτομα από τα προϊόντα αυτά έχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό δίνει στα άτομα μεγάλη ελευθερία στην ικανότητα τους να ανακατασκευάζουν τον εαυτό τους. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, τα επίπεδα ενέργειας του ατόμου μειώνονται . Εάν η διαδικασία ψύξης γίνεται πάρα πολύ γρήγορα, πολλές παρατυπίες και ελαττώματα θα φανούν στην κρυσταλλική δομή. Η διαδικασία της πολύ γρήγορης ψύξης ονομάζεται rapid quenching . Στην ιδανική περίπτωση, η θερμοκρασία πρέπει να μειώνεται με αργό ρυθμό για να επιτρέψει μια πιο συνεπή και σταθερή δομή κρυστάλλου να διαμορφωθεί, η οποία θα αυξήσει την αντοχή του μετάλλου. Ο Simulated annealing επιδιώκει να μιμηθεί αυτή τη διαδικασία. Ξεκινά σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, κατά την οποία οι τιμές εισόδου επιτρέπεται να αναλάβουν ένα ευρύ φάσμα

τυχαίων τιμών . Καθώς η εκπαίδευση προχωρά, η θερμοκρασία επιτρέπεται να μειωθεί, περιορίζοντας έτσι τους βαθμούς στους οποίους οι τιμές εισόδου επιτρέπεται να διαφέρουν. Αυτό συχνά οδηγεί τον simulated annealing αλγόριθμο σε μια καλύτερη λύση, όπως ένα μέταλλο επιτυγχάνει μια καλύτερη κρυσταλλική δομή μέσω της ίδιας τη διαδικασίας.

3.1.2) Εφαρμογή του Simulated Annealing Algorithm

Σχεδιάζοντας έναν simulated annealing αλγόριθμο σύμφωνα και με το διάγραμμα ροής τέσσερις παράμετροι πρέπει να οριστούν: Μια αρχική θερμοκρασία, ένας update κανόνας για τη θερμοκρασία, ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε βήμα, και ένα κριτήριο με το οποίο θα σταματάει το ψάξιμο

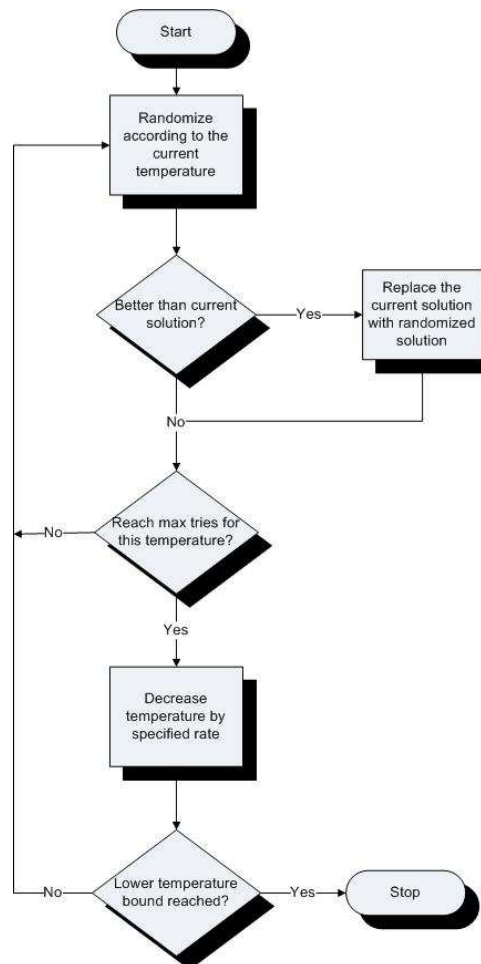


fig 9 Simulated Annealing Flowchart

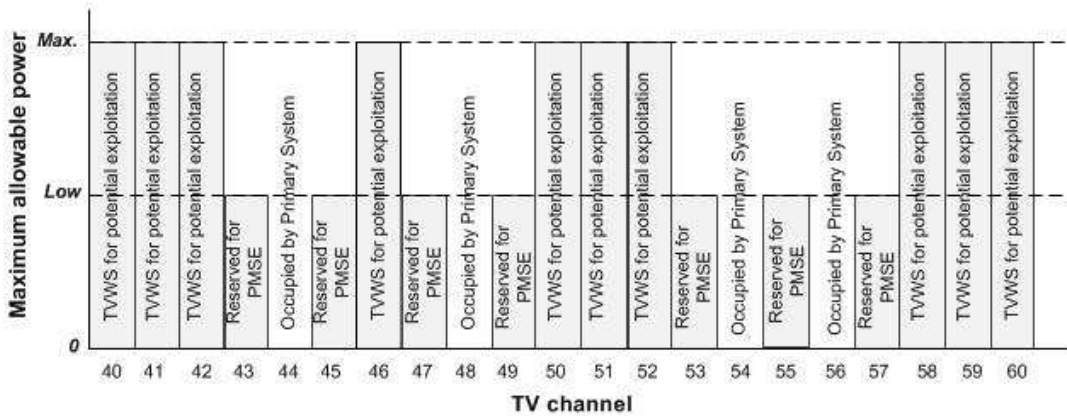
Στο σενάριο μας ορίζουμε τις παραμέτρους :

- Η αρχική θερμοκρασία είναι 100
- Η τελική θερμοκρασία είναι 2
- Ο αριθμός των επαναλήψεων σε κάθε βήμα είναι 1000

- Και ο update κανόνας για την μείωση της θερμοκρασίας είναι $step = \text{Math.exp}(\text{Math.log}(\text{stopTemperature}/\text{startTemperature})/(\text{cycles} - 1))$ ή

$$step = e^{\frac{\ln(\frac{s}{e})}{c-1}}$$

Το φάσμα που θα χρησιμοποιήσουμε για το allocation είναι 21 συχνοτήτων και παρουσιάζεται παρακάτω:



- Τα κανάλια 43,45,47,49,53,55,57 δέχονται συστήματα με transmit power μέχρι 2 watt.
- Τα κανάλια 40,41,42,46,50,51,52,58,59,60 είναι ελεύθερα για εκπομπή συστημάτων με 4 watt power.
- Ενώ τα κανάλια 44,48,54 και 56 είναι κατειλημμένα από DVB-T, οπότε και δεν τα πειράζουμε.

Το πινακάκι που ακολουθεί παρουσιάζει τα συστήματα που θέλουμε να κάνουμε allocation και τα χαρακτηριστικά τους

Service	Power	Bandwidth	Priority	Start Time	End Time
LTE FDD	4	5	2	1	10
LTE FDD	4	5	2	2	10
LTE FDD	4	5	2	3	10
LTE FDD	4	5	2	4	10
LTE FDD	4	5	2	5	10
LTE FDD	4	5	2	6	10
LTE FDD	4	5	2	7	10
LTE FDD	4	5	2	8	10

LTE FDD	4	5	2	9	10
LTE FDD	4	5	2	10	10

Το αποτέλεσμα του allocation είναι :

Round:	1					
System	Channel	Channel	Channel	Channel	Channel	Guard Interval
LTE UL	46 subid 0	46 subid 1	46 subid 2	46 subid 3	46 subid 4	46 subid 5
LTE DL	40 subid 0	40 subid 1	40 subid 2	40 subid 3	40 subid 4	40 subid 5
Fragmentation:	0,7731	Cost:	17975	Temperature:	93,5597	
Spectrum Utilization:	0,25	Bw exploited:	42	Time elapsed:	1.282779537E9(ns)	

Round:	2					
System	Channel	Channel	Channel	Channel	Channel	Guard Interval
LTE UL	58 subid 0	58 subid 1	58 subid 2	58 subid 3	58 subid 4	58 subid 5
LTE DL	52 subid 2	52 subid 3	52 subid 4	52 subid 5	52 subid 6	52 subid 7
Fragmentation:	0,8395	Cost:	4800	Temperature:	98,4458	
Spectrum Utilization:	0,3095	Bw exploited:	52	Time elapsed:	7.23741082E8 (ns)	

Το κάθε round δηλώνει την κάθε χρονική στιγμή στο παράδειγμα μας ο αλγόριθμος μπόρεσε να βρει λύση μόνο στα δυο πρώτα δίκτυα τα αλλά δεν βρίσκουν χώρο μέσα στο φάσμα.

Temperature: Η θερμοκρασία στην οποία βρέθηκε η βέλτιστη λύση

Cost: Ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση

Time elapsed: Ο χρόνος σε nanosecond από την εκτέλεση του προγράμματος μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση

REFERENCES

- [1] <http://ezinearticles.com/?The-History-of-Wireless-Networking&id=2761612>
- [2] Can Cognitive Radio Support Broadband Wireless Access? {Timothy X Brown, Douglas C. Sicker} Interdisciplinary Telecommunications University of Colorado.
- [3] A survey of cognitive radio access to TV white spaces {Nekovee M.} 2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications and Workshops.
- [4] Emerging cognitive radio technology: Principles, challenges and opportunities {Lamiaa Khalid, Alagan Anpalagan} WINCORE Laboratory, Ryerson University, Toronto, Canada.
- [5] Collaborative spectrum sensing for cognitive radio.
- [6] The End of Spectrum 'Scarcity': *Building on the TV Bands Database to Access Unused Public Airwaves*
- [7] A CR platform for applications in TV Whites Space spectrum {Kim, Kim, Kim} Samsung Electro-Mechanics, Chungbuk National University, Hanbat National University
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio#Main_functions
- [9] Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-offs {Amir Ghasemi, Elvino S. Sousa} University of Toronto, Canada
- [10] 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
- [11] 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*
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum
- [13] Cooperative Game Theory for Distributed Spectrum Sharing, {J. E. Suris}" *Proc. IEEE ICC*
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Spectrum_Management
- [15] NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey {Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran *, Shantidev Mohanty} *Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, United States*
- [16] Technical Challenges for Cognitive Radio in TV White Space Spectrum { *Stephen J. Shellhammer, Ahmed K. Sadek and Wenyi Zhang* } Corporate Research and Development Qualcomm Incorporated, San Diego
- [17] Unlicensed Cognitive Sharing of TV Spectrum : The controversy at the FCC { *Michael J. Marcus* }
- [18] IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard Based on Cognitive Radios {C. Cordeiro} *Proc. IEEE DySPAN '05, Nov. 2005*

[19] Auction Driven Dynamic Spectrum Allocation: Optimal Bidding, Pricing and Service Priorities for Multi-Rate, Multi-Class CDMA { *V. Rodriguez, K. Moessner, and R. Tafazolli* } Proc. IEEE PIMRC '05, vol. 3

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

[21] A General Framework for Wireless Spectrum Auctionsv {*S. Gandhi* } IEEE Proc. DySPAN'07

[22] A Novel Bargaining Based Dynamic Spectrum Management Scheme in Reconfigurable Systems {*M. Pan et al.*} Proc. IEEE ICSNC '06, Oct. 2006

[24] Introduction to Neural Networks with Java Second Edition by Jeff Heaton

[23] http://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_annealing