

Δικτυακές Υποδομές

Δίκτυα 2G – 4G

Σημειώσεις

ΠΕΤΡΟΣ ΝΙΚΟΠΟΛΙΤΙΔΗΣ

Αν.Καθηγητής– Τμήμα Πληροφορικής Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΟΥΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ 2^{ης} ΓΕΝΙΑΣ (2G)	3
1. Εισαγωγή.....	3
2. Η κυψελοειδής αρχιτεκτονική	3
3. Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων	5
4. Παρεμβολές από κανάλια γειτονικά στη συχνότητα	9
5. Μέθοδοι αύξησης χωρητικότητας κυψέλης.....	9
5.1 Δανεισμός καναλιών	10
5.2 Διαίρεση κυψελών	10
5.3 Τομεοποίηση (sectorization)	11
6. Ενημέρωση θέσης και δρομολόγηση	12
7. Κανάλια δεδομένων και ελέγχου.....	13
8. Μεταπομπή.....	14
8.1 Κριτήρια για πραγματοποίηση μεταπομπής	14
8.2 Ποιότητα υπηρεσίας και μεταπομπές	15
8.3 Είδη μεταπομπών	16
9. Ανάθεση καναλιών σε κυψέλες.....	16
9.1 Σταθερή Ανάθεση Καναλιών (Fixed Channel Assignment-FCA).....	16
9.2 Σχήματα Δανεισμού Καναλιών	17
9.3 Δυναμική ανάθεση καναλιών	17
ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (2G)	19
1. Το σύστημα GSM.....	19
2. Κυψελοειδή δίκτυα 2.5G: General Packet Radio Service (GPRS).....	21
3. Κυψελοειδή δίκτυα 2.75G: Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE).....	21
ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (3G)	22

1. Διαμόρφωση Ευρέως Φάσματος Ευθείας Ακολουθίας	22
2. WCDMA rel.99.....	25
3. Τα επόμενα πρότυπα 3G: Γενιές 3.5G & 3.75G	25
ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΔΙΚΤΥΑ ΤΕΤΑΡΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (4G)	30
1 Γιατί OFDM;.....	30
2 OFDM & OFDMA	32
3 Καινοτομίες LTE	34
4 Καινοτομίες LTE Advanced.....	36

Ενότητα 1: Σχεδίαση δικτύων κυψελοειδούς τηλεφωνίας 2^{ης} Γενιάς (2G)

1. Εισαγωγή

Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας Δεύτερης Γενιάς (2G) είναι τύπου *Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας / Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Χρόνου* (*Frequency Division Multiplexing/Time Division Multiple Access, FDM/TDMA*). Αυτό με απλά λόγια σημαίνει ότι το διαθέσιμο στον πάροχο εύρος ζώνης χωρίζεται σε μια σειρά από μη επικαλυπτόμενα συχνοτικά κανάλια, καθένα από τα οποία διαμορφώνεται ψηφιακά και χωρίζεται στο χρόνο σε *χρονικές σχισμές* (*time slots*), με μια σχισμή να ανατίθεται σε κάθε τερματικό που μεταδίδει δεδομένα. Ένας αριθμός από M χρονικές σχισμές αποτελεί το *πλαίσιο* (*frame*) του συστήματος.

Κάθε κλήση σε ένα τέτοιο σύστημα έχει δύο κατευθύνσεις, και συνεπώς για κάθε κλήση χρειάζεται η εγκατάσταση δύο καναλιών, ενός *ανωφερούς* (*uplink*) από το *Κινητό Τερματικό* (*Mobile Station, MS*) προς το *Σταθμό Βάσης* (*Base Station, BS*) και ενός *κατωφερούς* (*downlink*) από το BS προς το MS. Ο τρόπος εγκατάστασης των δύο αυτών καναλιών ορίζεται από τη τεχνική *εναλλαγής* (*duplexing*) που χρησιμοποιείται. Στα συστήματα FDM/TDMA, η πιο κοινή τεχνική εναλλαγής είναι η *Εναλλαγή Διαίρεσης Συχνότητας* (*Frequency Division Duplexing, FDD*), κατά την οποία χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικά συχνοτικά κανάλια για τη μεταφορά της κίνησης στις δύο κατευθύνσεις της κλήσης. Έτσι, ο πάροχος πρέπει στη πραγματικότητα να αποκτήσει δύο μη επικαλυπτόμενα μέρη του φάσματος, ίσου εύρους το καθένα, για τη λειτουργία του δικτύου του. Το πρώτο από τα μέρη αυτά είναι η ανωφερής μπάντα και η δεύτερη η κατωφερής. Συνεπώς, όταν αναφέρουμε ότι ένα FDM κανάλι ανατίθεται σε ένα MS για τη πραγματοποίηση μιας κλήσης, στη πραγματικότητα ανατίθενται για την συνολική διάρκεια της κλήσης δύο χρονικές σχισμές στο MS, μια σε συχνοτικό κανάλι της ανωφερούς και μια σε συχνοτικό κανάλι της κατωφερούς μπάντας.

Επισήμανση



Τα κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G αποτελούν το διάδοχο της προηγούμενης γενιάς, των δικτύων 1G. Η κυριότερη καινοτομία την οποία εισάγουν είναι η ψηφιοποίηση της φωνής. Αντίθετα, στα δίκτυα 1G, η μετάδοση της φωνής γινόταν ως αναλογική πληροφορία. Πλεονεκτήματα της ψηφιοποίησης είναι μεταξύ άλλων, η δυνατότητα για ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, κρυπτογράφηση, συμπίεση και πολυπλεξία.

2. Η κυψελοειδής αρχιτεκτονική

Ένα κυψελοειδές δίκτυο έχει την ιεραρχική τοπολογία του Σχήματος 1. Ο χώρος κάλυψης του δικτύου χωρίζεται σε *κυψέλες* (*cells*) και κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από το δικό της BS.

Ο χώρος στον οποίο τα MSs εξυπηρετούνται από ένα BS αντιστοιχεί στη κυψέλη του BS αυτού. Το μέγεθος των κυψελών ποικίλλει, από μερικές εκατοντάδες μέτρα (σύνηθες στις αστικές περιοχές με μεγάλη πυκνότητα συνδρομητών), έως μερικές δεκάδες χιλιόμετρα (σύνηθες σε αγροτικές περιοχές με μικρή πυκνότητα συνδρομητών). Κάθε BS έχει στη διάθεσή του ένα σύνολο από συχνοτικά κανάλια τα οποία όπως αναφέραμε διαμοιράζονται στο χρόνο στα ενεργά MS της κυψέλης.

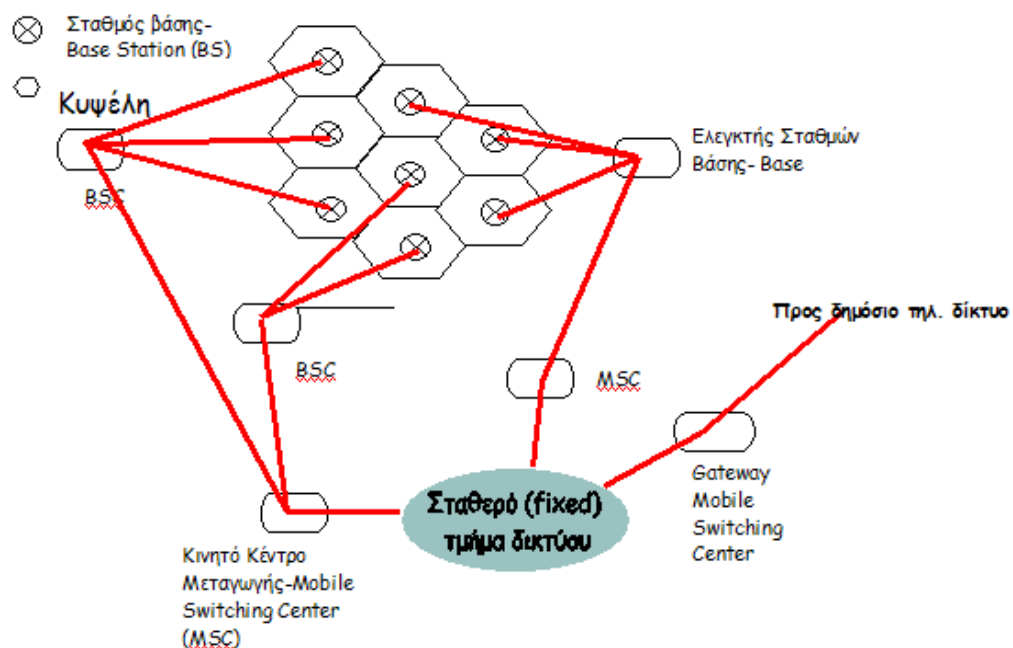
Οι χρήστες, έχουν MSs με πομπούς μικρής ισχύος και επικοινωνούν με το δίκτυο μέσω του BS της κυψέλης στην οποία ανήκουν. Γειτονικοί BSs χρησιμοποιούν διαφορετικά συχνοτικά κανάλια ώστε να μην υπάρχουν *συγκαναλικές παρεμβολές (cochannel interference)* σε MS που βρίσκονται σε γειτονικές κυψέλες. Κατά τη κίνησή του χρήστη, το MS του μπορεί να εισέλθει σε καινούρια κυψέλη. Το MS καταλαβαίνει ότι εισήλθε κυψέλη μετρώντας την ισχύ που λαμβάνει από τους διάφορους παρακείμενους BS. Κατά την είσοδο του σε νέα κυψέλη, θα πρέπει να ξεκινήσει να χρησιμοποιεί συχνοτικά κανάλια αυτής. Η διαδικασία αυτή, η οποία ονομάζεται *μεταπομπή (handover)* περιγράφεται αναλυτικότερα στη συνέχεια του κειμένου.



Επισήμανση

Όταν ένας δέκτης (είτε MS είτε BS) λαμβάνει ταυτόχρονα μετάδοση από δυο ή περισσότερους πομπούς, στο ίδιο συχνοτικό κανάλι, τότε λέμε ότι στο δέκτη εμφανίζονται *συγκαναλικές παρεμβολές (cochannel interference)*.

Οι κυψέλες έχουν γενικά ακανόνιστο σχήμα αν και για λόγους απλότητας συχνά συμβολίζονται ως εξαγωνικές. Το εξαγωνικό σχήμα προϋποθέτει ίδια κάλυψη ανά κυψέλη (ίδια ισχύς εκπομπής στις κεραίες των BS). Αν υπάρχουν εμπόδια (π.χ. λόφοι), τότε είναι δυνατό ένα MS να μετράει μεγαλύτερη ισχύ από κάποιο BS, χωρίς αυτός ο BS να είναι ο κοντινότερος στο MS.



Σχήμα 1: Τοπολογία κυψελοειδών δικτύων.

Ο BS περιέχει τη κεραία της κυψέλης και επίσης υλοποιεί τα πρωτόκολλα επικοινωνίας με τα MS. Περισσότεροι του ενός BSs διασυνδέονται με ενσύρματες συνδέσεις με έναν *Ελεγκτή Σταθμών Βάσης (Base Station Controller, BSC)*. Τα BSs και το αντίστοιχο BSC ονομάζονται *Υποσύστημα Σταθμών Βάσης (Base Station Subsystem, BSS)*. Το BSC ενσωματώνει την ευφυΐα για τη διαχείριση της σηματοδότησης που απαιτείται για τη πραγματοποίηση των μεταπομπών.

Τα BSCs συνδέονται με ένα *Κέντρο Κινητής Μεταγωγής (Mobile Switching Center, MSC)* το οποίο διασυνδέεται στην σταθερή υποδομή του δικτύου. Το MSC συντονίζει τις ενέργειες μέσα σε ένα αριθμό κυψελών. Οι σπουδαιότερες λειτουργίες που επιτελεί είναι:

- ✓ Ανάθεση συχνοτικών καναλιών στις κυψέλες.
- ✓ Δρομολόγηση κλήσεων μεταξύ κυψελών που ανήκουν σε διαφορετικό κέντρο μεταγωγής.
- ✓ Χειρισμό πληροφορίας για τη γεωγραφική θέση των MS.
- ✓ Ασφάλεια συνδιαλέξεων.
- ✓ Χρέωση χρηστών.
- ✓ Μεταπομπές.

Τέλος, το *πυλαίο MSC (Gateway MSC, GMSC)* αποτελεί την πύλη διασύνδεσης του κυψελοειδούς δικτύου με τα υπόλοιπα δίκτυα τηλεφωνίας.

3. Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Η ιδέα του κυψελοειδούς δικτύου 2G FDM/TDMA βασίζεται στην *επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων* σε κυψέλες που απέχουν περισσότερο ενός ορίου απόστασης. Το όριο αυτό είναι τέτοιο ώστε οι παρεμβολές μεταξύ των ομόσυχων κυψελών να είναι μικρές και ονομάζεται *απόσταση επαναχρησιμοποίησης (reuse distance)*.

Προφανώς γειτονικές κυψέλες θα χρησιμοποιούν διαφορετικά συχνοτικά κανάλια. Η ομάδα κυψελών που μοιράζονται τα S συνολικά συχνοτικά κανάλια του συστήματος ονομάζεται *ομάδα (cluster)* και ο αριθμός των κυψελών της, N , *μέγεθος ομάδας (cluster size)*. Το N είναι πάντοτε τέτοιο ώστε $N=i^2+j^2$, όπου i, j φυσικοί αριθμοί.

Ο τρόπος υπολογισμού της κυψέλης στην οποία θα επαναχρησιμοποιηθεί μια συχνότητα φαίνεται στο Σχήμα 2. Γνωρίζοντας το μέγεθος ομάδας N και συνεπώς τις παραμέτρους i, j , για να προσδιορίσουμε μια από τις έξι πλησιέστερες ομόσυχες κυψέλες μιας συγκεκριμένης κυψέλης θα πρέπει από τη θέση αυτής να μετακινηθούμε i κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε ακολουθίας εξαγώνων, κατόπιν να «στρίψουμε» εξήντα μοίρες με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού και τέλος να μετακινηθούμε j κυψέλες κατά μήκος της νέας διεύθυνσης. Πραγματοποιώντας τη διαδικασία αυτή και για τις έξι πλευρές του εξαγώνου της κυψέλης, βρίσκουμε τις έξι πλησιέστερες ομόσυχες κυψέλες αυτής.



ΟΡΙΣΜΟΣ

Χωρητικότητα (capacity) ενός κυψελοειδούς δικτύου ονομάζεται ο μέγιστος αριθμός MS που αυτό μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα.

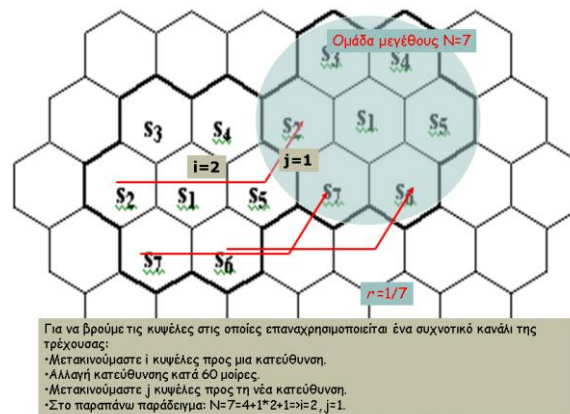
Σε ένα κυψελοειδές σύστημα 2G FDM/TDMA, όπου το μέγεθος των κυψελών είναι περίπου το ίδιο και η ισχύς εκπομπής κάθε κυψέλης είναι η ίδια, αποδεικνύεται ότι η

συγκαναλική παρεμβολή είναι συνάρτηση της ακτίνας R της κυψέλης και της απόστασης D που ενώνει τα κέντρα δύο πλησιέστερων ομόσυχων κυψελών. Η συγκαναλική παρεμβολή εξαρτάται από τον λόγο $q=D/R$ που ονομάζεται *συγκαναλικός λόγος επαναχρησιμοποίησης* (*cochannel reuse ratio*) και στην περίπτωση της εξαγωνικής κυψέλης συνδέεται με το μέγεθος ομάδας N , με την παρακάτω σχέση (1):

$$q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (1)$$

Η παραπάνω σχέση είναι σημαντική επειδή συσχετίζει την χωρητικότητα ενός κυψελοειδούς συστήματος 2G FDM/TDMA με την συγκαναλική παρεμβολή. Μειώνοντας την τιμή του λόγου q επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη χωρητικότητα εφόσον το μέγεθος ομάδας N μειώνεται και άρα, για σταθερό συνολικό αριθμό συχνοτικών καναλιών του παρόχου, ο αριθμός των καναλιών ανά κυψέλη αυξάνεται. Όμως, η συγκαναλική παρεμβολή αυξάνεται για μικρές τιμές του q καθώς οι ομόσυχες κυψέλες πλέον είναι πιο κοντά μεταξύ τους. Αντίθετα, αυξάνοντας την τιμή του λόγου q αυξάνεται και το N και βελτιώνεται η ποιότητα μετάδοσης λόγω μικρότερης συγκαναλικής παρεμβολής, με αντίστοιχη προφανώς μείωση στη χωρητικότητα κάθε κυψέλης. Τυπικές τιμές του N που χρησιμοποιούνται είναι 4, 7 ή 12.

Η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων οδηγεί στη διάθεση $k=S/N$ καναλιών ανά κυψέλη. Η κάλυψη περιοχής μεγαλύτερης από αυτή της μιας ομάδας, επιτυγχάνεται με αντιγραφή της ομάδας μέχρι να καλυφθεί η απαιτούμενη περιοχή. Αν μια ομάδα επαναλαμβάνεται L φορές, τότε ο συνολικός αριθμός συχνοτικών καναλιών του συστήματος που είναι σε χρήση ισούνται με $C = L * k * N$.



Σχήμα 2: Τρόπος υπολογισμού της κυψέλης στην οποία θα επαναχρησιμοποιηθεί μια συχνότητα.

Για να λειτουργήσει αποδοτικά το σύστημα θα πρέπει σε κάθε κυψέλη, ο λόγος *Συγκαναλικών Παρεμβολών* (*Carrier to Interference Ratio, C/I*), με τις παρεμβολές να θεωρούνται αποκλειστικά από ομόσυχες κυψέλες, να είναι κάτω ενός ορίου. Οι συνολικές παρεμβολές σε μια δεδομένη κυψέλη (για ίδια ισχύ εκπομπής ανά κυψέλη) μπορεί να αποδειχθεί ότι δίνονται από τη σχέση (2):

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} (D_i)^{-n}} \quad (2)$$

όπου i_0 το πλήθος κυψελών ίδιας συχνότητας, D_i η απόστασή τους από την εν λόγω κυψέλη και R η ακτίνα της κυψέλης.

Θεωρώντας μόνο τις έξι πλησιέστερες γειτονικές ομόσυχνές κυψέλες, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{C}{I} = \frac{D^n}{i_o R^n} = \frac{(\sqrt{3}N)^n}{6} \quad (3)$$

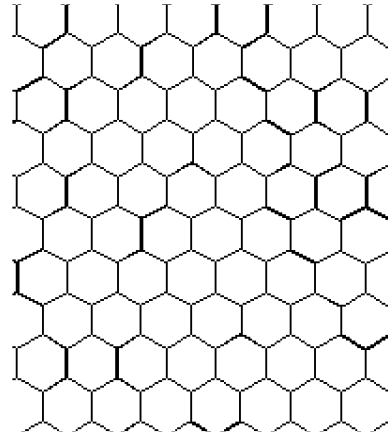
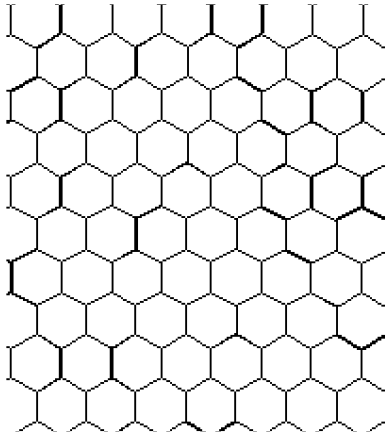
Για τυπική τιμή του εκθέτη διάδοσης $n=4$, είναι $C/I=0.167 (D/R)^4$. Παίρνοντας το παράδειγμα της περίπτωσης του 1G κυψελοειδούς συστήματος κινητής τηλεφωνίας *Advanced Mobile Phone System, (AMPS)*, το οποίο για αποδεκτή ποιότητα κλήσης απαιτεί $C/I > 50$ (17 dB), θα πρέπει $N=5.7$, δηλ. να είναι $N=7$ (εφόσον θα πρέπει $N=i^2+j^2$, όπου i, j φυσικοί αριθμοί). Σε συστήματα 2G, με χρήση διόρθωσης λαθών, ο δέκτης μπορεί να ανεχτεί και υψηλότερο επίπεδο παρεμβολών. Έτσι αν πλέον $C/I=8=9$ dB είναι ένας αποδεκτός λόγος, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε $N=4$ και επομένως να επιτύχουμε συνολικά μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Η σχέση (3) συνδέει το λόγο C/I με το μέγεθος ομάδας N , που καθορίζει την συνολική χωρητικότητα του συστήματος.



ΑΣΚΗΣΗ 1

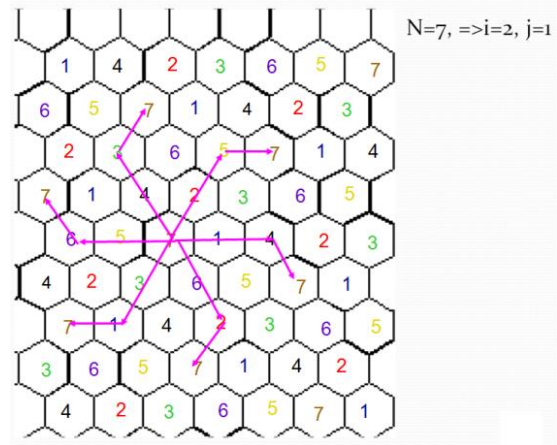
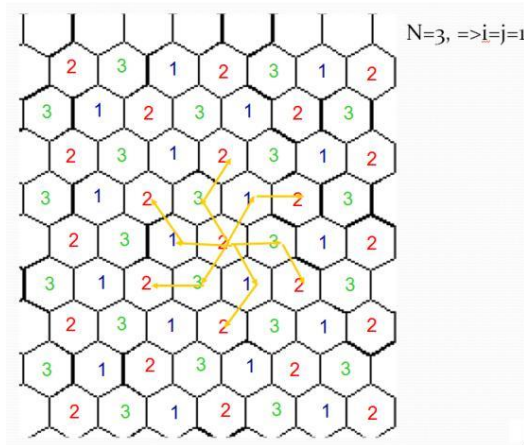
Συμπληρώστε τις παρακάτω κυψέλες με το σετ καναλιών που θα χρησιμοποιείται σε καθεμία, για α) $N=3$, β) $N=7$.



Απάντηση

α

β



ΑΣΚΗΣΗ 2

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα κινητής τηλεφωνίας τύπου FDM/TDMA, απαιτείται λόγος σήματος προς παρεμβολές τουλάχιστον ίσος με 15 dB προκειμένου το σύστημα να λειτουργήσει. Η τιμή του εκθέτη διάδοσης είναι ίση με $n=4$. Να υπολογίσετε το μέγεθος ομάδας N , το οποίο οδηγεί στην ανάθεση του μεγαλύτερου αριθμού συχνοτικών καναλιών ανά κυψέλη.

Απάντηση

Ψάχνουμε το μικρότερο δυνατό μέγεθος ομάδας. Γνωρίζουμε ότι $10\log(C/I)=15 \Rightarrow C/I=10^{1.5}=31.6$. Συνεπώς, με βάση τη σχέση (3) του κειμένου μελέτης:

$$C/I \geq \frac{(\sqrt{3N_{reuse}})^n}{6} \Rightarrow 31.6 \geq \frac{(\sqrt{3N_{reuse}})^4}{6} \Rightarrow 9(N_{reuse})^2 \geq 189.6 \Rightarrow N_{reuse} \geq 4.59 \text{ και}$$

επειδή το N_{reuse} μπορεί να πάρει τιμές ίσες με i^2+j^2+ij , i, j μη αρνητικοί ακέραιοι, προκύπτει ότι το ελάχιστο δυνατό $N_{reuse}=7$, για $i=1, j=2$.



ΑΣΚΗΣΗ 3

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα κινητής τηλεφωνίας τύπου FDM/TDMA που χρησιμοποιεί εξαγωνικές κυψέλες, για κάθε κυψέλη, απαγορεύεται περισσότεροι του ενός γείτονες αυτής να χρησιμοποιούν τα ίδια συχνοτικά κανάλια. Αν σε ένα τέτοιο σύστημα είναι συνολικά διαθέσιμα 840 συχνοτικά κανάλια να προτείνεται ένα μέγεθος ομάδας το οποίο οδηγεί στη χρήση του μέγιστου δυνατού αριθμού συχνοτικών καναλιών σε κάθε κυψέλη.

Απάντηση

Κάθε κυψέλη έχει 6 γείτονες. Συνεπώς, αν n συχνοτικά κανάλια χρησιμοποιούνται στη κυψέλη, τότε άλλα $6*n$ χρησιμοποιούνται συνολικά στις 6 γειτονικές. Συνεπώς το σύνολο των συχνοτικών καναλιών χρησιμοποιούνται σε 7 κυψέλες είναι $7*n$. Συνεπώς $7*n=840 \Rightarrow n=120$ με μέγεθος ομάδας 7.

4. Παρεμβολές από κανάλια γειτονικά στη συχνότητα

Παρεμβολή γειτονικού καναλιού (*adjacent channel interference, ACI*) ονομάζεται η παρεμβολή που οφείλεται σε σήματα τα οποία εκπέμπονται σε συχνότητες παρακείμενες αυτής του επιθυμητού σήματος. Προκαλείται από τη διάχυση ενέργειας μεταξύ καναλιών σε κοντινές συχνότητες και οφείλεται στην ύπαρξη μη ιδανικών φίλτρων που επιτρέπουν τη λήψη γειτονικών συχνοτήτων εντός της ζώνης λήψης συχνοτήτων του δέκτη. Αντιμετωπίζεται είτε με φίλτρα κατά την εκπομπή και τη λήψη, είτε με μπάντες ασφαλείας (*guard bands*) μεταξύ των καναλιών αυτών.



ΟΡΙΣΜΟΣ

Μπάντα ασφαλείας (*guard band*) ενός συχνοτικού καναλιού ονομάζεται ένα κομμάτι φάσματος σε συχνότητα παρακείμενη εκείνης του καναλιού, η οποία δε χρησιμοποιείται, προκειμένου να αποφευχθούν παρεμβολές γειτονικού καναλιού.

Οι περιορισμοί που θέτουν οι παρεμβολές αυτές μπορούν να περιγραφούν μέσω ενός διανύσματος $c=(c_0, c_1, \dots, c_n)$. Η τιμή του c_i αντιστοιχεί στην ελάχιστη συχνοτική απόσταση που πρέπει να έχουν δύο συχνοτικά κανάλια προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα από χρήστες σε κυψέλες με γεωγραφική απόσταση i . Π.χ. για $c=(3, 2, 1, \dots, \dots)$, χρήστες οι οποίοι βρίσκονται στην ίδια κυψέλη (γεωγραφική απόσταση=0) πρέπει να χρησιμοποιούν κανάλια που βρίσκονται σε συχνοτική απόσταση τουλάχιστον 3. Παρόμοια, χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε γειτονικές κυψέλες (γεωγραφική απόσταση=1) πρέπει να χρησιμοποιούν κανάλια που βρίσκονται σε συχνοτική απόσταση τουλάχιστον 2.

5. Μέθοδοι αύξησης χωρητικότητας κυψέλης

Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητο να αυξηθεί η χωρητικότητα των κυψελών ενός συστήματος, κάτι που σημαίνει ότι χρειάζονται περισσότερα κανάλια FDM/TDMA εντός κάθε κυψέλης. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, υπάρχει μια σειρά μεθόδων, οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω:

- ✓ Πρόσθεση νέων καναλιών. (π.χ. διπλάσιες σχισμές/πλαίσιο σε TDMA συστήματα). Έχει το μειονέκτημα της υποβάθμισης στην ποιότητα καναλιού καθώς στο ίδιο εύρος ζώνης έχουμε περισσότερα FDM/TDMA κανάλια, μικρότερης πλέον χωρητικότητας, καθώς η διάρκεια της χρονικής σχισμής μειώνεται.
- ✓ Δανεισμός συχνοτικών καναλιών από γειτονικές κυψέλες. Επιβλέπεται από το MSC έτσι ώστε ο περιορισμός ελάχιστης απόστασης επαναχρησιμοποίησης καναλιών να εξακολουθεί να ισχύει.
- ✓ Διάρθρωση κυψελών (*cell splitting*). Διαίρεση κάθε κυψέλης σε μικρότερες κυψέλες. Έχει το πλεονέκτημα της διατήρησης της ποιότητας του καναλιού. Όμως απαιτεί περισσότερους BS και πιο πολύπλοκο υλικό καθώς πλέον και τα MS και οι BS θα πρέπει να δουλεύουν με έλεγχο ισχύος (*power control*), ώστε να εκπέμπουν με μικρότερη ισχύ λόγω της μικρότερης εμβέλειας κυψέλης για να αποφεύγουν τη δημιουργία συγκαναλικών παρεμβολών.
- ✓ Τομεοποίηση της κυψέλης (*cell sectoring*). Κάνει χρήση κατευθυντικών κεραιών που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος τους προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Π.χ. αν οι κεραιές εκπέμπουν σε γωνία 120, η κυψέλη χωρίζεται σε 3 τομείς, ενώ αν οι κεραιές εκπέμπουν σε γωνία 60, η κυψέλη χωρίζεται σε 6 τομείς.

5.1 Δανεισμός καναλιών

Μια κυψέλη μπορεί να δανειστεί αχρησιμοποίητα κανάλια από γειτονική της, λαμβανόμενου υπόψη του περιορισμού από την απόσταση επαναχρησιμοποίησης. Τα κανάλια παραμένουν στη νέα κυψέλη μέχρι να γίνει ξανά ανακατανομή πόρων από το σύστημα.

Οποιοδήποτε κανάλι μπορεί να δοθεί σε γειτονική κυψέλη λαμβανόμενου όμως υπόψη του περιορισμού από την απόσταση επαναχρησιμοποίησης. Για να δοθεί λοιπόν δε θα πρέπει να βρίσκεται σε χρήση το αντίστοιχο κανάλι στις κυψέλες των γειτονικών ομάδων. Αντίστοιχα, όταν δανείζεται ένα κανάλι μιας κυψέλης σε γειτονική, το αντίστοιχο κανάλι στις κυψέλες των γειτονικών ομάδων “κλειδώνει” και δε χρησιμοποιείται σε αυτές μέχρι να επιστραφεί το κανάλι στη κυψέλη-κάτοχο.

Για το καθορισμό ποιών και πόσων καναλιών θα μπορεί να δανείσει μια κυψέλη σε γειτονικές της, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μέθοδοι:

- ✓ *Απλός Υβριδικός Δανεισμός Καναλιών.* Στη μέθοδο αυτή το σύνολο των καναλιών μιας κυψέλης, χωρίζεται σε δύο υποσύνολα A (κανάλια που δε μπορούν να δανειοδοτηθούν) και B (κανάλια που μπορούν να δανειοδοτηθούν). Η αναλογία του πλήθους των A και B είναι προκαθορισμένη.
- ✓ *Δανεισμός με Διάταξη Καναλιών.* Στη μέθοδο αυτή γίνεται δυναμική αναπροσαρμογή της αναλογίας του πλήθους των A και B ανάλογα με τις συνθήκες ζήτησης εύρους ζώνης στις κυψέλες.

5.2 Διάρθρωση κυψελών

Προκειμένου να αυξήσουμε τη χωρητικότητα σε μια περιοχή με μεγάλη ζήτηση, μπορούμε να αντικαταστήσουμε τις κυψέλες τις με περισσότερες, μικρότερης εμβέλειας. Η αύξηση της χωρητικότητας μιας κυψέλης με διαίρεση επιτυγχάνεται με την εξής διαδικασία. Αρχικά μειώνουμε την ακτίνα της κυψέλης κατά ένα παράγοντα λ . Μετά αυξάνουμε τον αριθμό κυψελών κατά ένα παράγοντα λ^2 . Στη συνέχεια μειώνουμε την εκπεμπόμενη ισχύ κατά λ^n , όπου n είναι ο εκθέτης διάδοσης. Έτσι τελικά έχουμε τον ίδιο αριθμό καναλιών ανά κυψέλη, αλλά λ^2 περισσότερα κανάλια ανά km^2 . Για παράδειγμα, μείωση της ακτίνας στο μισό αυξάνει τον αριθμό των κυψελών 4 φορές. Κατά συνέπεια, η τεχνική της διαίρεσης κυψέλης επιτυγχάνει την αύξηση χωρητικότητας ελαττώνοντας την ακτίνα R της κυψέλης και διατηρώντας το μέγεθος ομάδας N σταθερό.

Με απλούς υπολογισμούς μπορεί να δείχνει ότι μια μείωση της ακτίνας της κυψέλης κατά έναν παράγοντα τέσσερα θα προκαλέσει δεκαπλάσια αύξηση στο ρυθμό μεταπομπής ανά συνδρομητή. Επομένως, είναι σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση κόστους-οφέλους για να αξιολογηθεί το συνολικό κόστος της διαίρεσης κυψέλης έναντι άλλων διαθέσιμων εναλλακτικών επιλογών για την αντιμετώπιση του αυξανόμενου φορτίου επικοινωνίας.

Στη πράξη σπάνια γίνεται πλήρης διαίρεση, λόγω α) γεωγραφικών-εδαφικών συνθηκών, β) λόγω επιπλέον κόστους από περισσότερους BSs. Έτσι διαίρεση κυψελών γίνεται συνήθως σε κυψέλες που βρίσκονται σε περιοχές με μεγάλο αριθμό συνδρομητών.

Όταν συνυπάρχουν «μικρές» και «μεγάλες» κυψέλες, κατανομή συχνοτήτων είναι πολύ πιο δύσκολη από τη πρώτη περίπτωση. Πρέπει και πάλι να ισχύει σε όλο το σύστημα ο περιορισμός της απόστασης επαναχρησιμοποίησης.

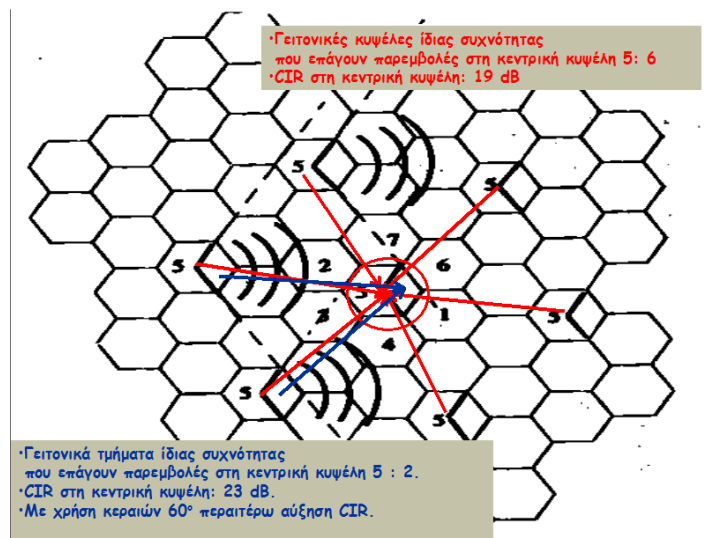
5.3 Τομεοποίηση (sectorization)

Είναι η αντικατάσταση της πανκατευθυντικής κεραίας του BS με περισσότερες από μια κατευθυντικές. Χωρίζει τη κυψέλη σε αντίστοιχα τμήματα (ένα ανά κεραία) και το σύνολο των καναλιών της κυψέλης ισομοιράζεται στα τμήματα αυτά.

Χρησιμοποιώντας τρεις κατευθυντικές κεραίες, κάθε κυψέλη χωρίζεται σε τρεις τομείς των 120 μοιρών με κάθε τομέα να καλύπτεται από την αντίστοιχη κατευθυντική κεραία. Έτσι, κάθε MS που βρίσκεται μέσα σε ένα τομέα εξυπηρετείται από την αντίστοιχη κεραία. Τα διαθέσιμα κανάλια επαναχρησιμοποιούνται μόνο στα ίδια τμήματα των κυψελών σε κάθε ομάδα του συστήματος.

Πλεονέκτημα της τομεοποίησης είναι η αύξηση του λόγου C/R για του χρήστες, καθώς ο αριθμός των συγκαναλικών τομέων ίδιας συχνότητας που δημιουργούν παρεμβολές σε κάθε τομέα είναι μικρότερος από τον αριθμό των ομόσυχων κυψελών ίδιας συχνότητας για το ίδιο επίπεδο γειννίας (βλ. Σχήμα 3). Η παραπάνω αύξηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί περαιτέρω το μέγεθος ομάδας και επομένως να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

Για να φανεί το πλεονέκτημα της τομεοποίησης, αρκεί να αναφερθεί ότι για τις ίδιες παραμέτρους του συστήματος (εκθέτης διάδοσης $n=4$, $N=7$), στο παράδειγμα του Σχήματος 3, η χρήση κατευθυντικών κεραιών των 120 μοιρών οδηγεί σε βελτίωση του λόγου SNR κατά 4 dB σε σχέση με το παραδοσιακό σύστημα των πανκατευθυντικών κεραιών. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η τομεοποίηση μειώνει τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών σε κάθε τμήμα με αποτέλεσμα τη μείωση της *αποδοτικότητας συγκατάλωσης (trunking efficiency)*.



Σχήμα 3: Μείωση παρεμβολών σε σύστημα με κατευθυντικές κεραίες.



ΑΣΚΗΣΗ 4

Υποθέστε ότι σε ένα κυψελοειδές δίκτυο τηλεφωνίας τύπου FDM/TDMA απαιτείται να γίνει κάποια ενέργεια για διπλασιασμό του μέγιστου αριθμού φωνητικών κλήσεων που μπορούν να υποστηριχθούν ταυτόχρονα. Προτείνετε δύο μεθόδους ώστε να επιτευχθεί το παραπάνω χωρίς να αποδοθεί στο σύστημα άδεια για χρήση νέου φάσματος. Τεκμηριώστε αριθμητικά τη πρότασή σας και σχολιάστε σύντομα από ένα μειονέκτημα κάθε μεθόδου που προτείνετε.

Απάντηση

Ένας τρόπος είναι η κυψελική διαίρεση, με κάθε κυψέλη να διαιρείται σε δυο, μισής έκτασης της αρχικής. Η έκταση του συστήματος παραμένει η ίδια, ο αριθμός των κυψελών διπλασιάζεται, με αποτέλεσμα να διπλασιάζονται τα συνολικά συχνοτικά κανάλια του συστήματος και κατά συνέπεια ο μέγιστος αριθμός ταυτόχρονων κλήσεων που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η χρήση διπλασίου αριθμού σταθμών-βάσης με αποτέλεσμα αυξημένο κόστος υλικού και αυξημένο αριθμό μεταπομπών.

Ένας δεύτερος τρόπος είναι ο διαμοιρασμός κάθε συχνοτικού καναλιού στο χρόνο σε διπλάσιο αριθμό χρηστών (επομένως να γίνει χρήση διπλάσιου αριθμού σχισμών ανά TDMA πλαίσιο). Συνεπώς μπορεί να εξυπηρετηθούν διπλάσιες κλήσεις από το υφιστάμενο σύστημα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μειωμένη ποιότητα κλήσης, καθώς κάθε χρήστης θα έχει μικρότερο χρονικό διάστημα για τη μετάδοση της ψηφιοποιημένης φωνής του, με αποτέλεσμα να απαιτείται χρήση κωδικοποιητή φωνής χαμηλότερου ρυθμού.



ΑΣΚΗΣΗ 5

Αναφέρθηκε ότι «η τομεοποίηση μειώνει τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών σε κάθε τμήμα με αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας συγκανάλωσης (trunking efficiency)». Προσπαθήστε να εξηγήσετε με απλό τρόπο τη παραπάνω φράση και δώστε ένα απλό παράδειγμα που καταδεικνύει την αναφερόμενη μείωση.

Απάντηση

Η δυνατότητα πρόσβασης σε μεγαλύτερες ομάδες καναλιών ονομάζεται συγκανάλωση.

Με τη μέθοδο της τομεοποίησης ο αριθμός καναλιών της κυψέλης τα οποία δύναται να χρησιμοποιήσει ένα MS είναι μικρότερος, καθώς το MS έχει πρόσβαση πλέον μόνο στα κανάλια του τομέα του και όχι σε όλα τα κανάλια της κυψέλης. Συνεπώς, αν υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή MS με κάποιους τομείς να περιέχουν πολύ περισσότερα MS σε σχέση με τους άλλους, η χωρητικότητα του συστήματος μπορεί να μειωθεί καθώς οι MS σε πυκνοκατοικημένους τομείς μπορεί να μη βρίσκουν ελεύθερο κανάλι αν και άλλοι τομείς μπορεί να περιέχουν πολλά ελεύθερα κανάλια.

Παράδειγμα: Αν μια κυψέλη έχει 120 ζεύγη από συχνοτικά κανάλια και 120 χρήστες εντός αυτής, τότε κάθε MS μπορεί πάντοτε να πραγματοποιήσει μια κλήση. Αν όμως η κυψέλη χωριστεί σε 3 τομείς Α, Β, Γ, κάθε ένας θα έχει 40 κανάλια. Αν κάποια στιγμή 60 χρήστες βρεθούν σε ένα τομέα, και κάνουν όλοι αίτηση για εγκατάσταση κλήσης, οι 30 δε θα μπορέσουν να την εγκαταστήσουν παρά το γεγονός ότι στη κυψέλη (αλλά όχι στον τομέα τους) υπάρχουν ελεύθερα κανάλια.

6. Ενημέρωση θέσης και δρομολόγηση

Καθώς οι πόροι σε ένα κυψελοειδές ασύρματο δίκτυο είναι περιορισμένοι, τα MSs δε μπορούν να έχουν μόνιμη πρόσβαση στο δίκτυο. Έτσι θα πρέπει να πραγματοποιούν αιτήσεις για τη πραγματοποίηση σύνδεσης αλλά και να μπορούν να δεχθούν ειδοποιήσεις για εισερχόμενες κλήσεις. Θα πρέπει λοιπόν να αντιμετωπιστούν τα παρακάτω δύο θέματα:

- ✓ Ανάγκη εντοπισμού του MS και αντιστοίχισης του σε μια κυψέλη του συστήματος. Αυτό απαιτείται καθώς τη στιγμή που ένα MS θα έχει εισερχόμενη κλήση, η θέση του

μπορεί να έχει αλλάξει σε σχέση με τη τελευταία φορά που αυτό είχε αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο. Το κυψελοειδές δίκτυο θα πρέπει να γνωρίζει τη κυψέλη στην οποία βρίσκεται το MS, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο BS της για να εξυπηρετήσει την κλήση στο MS.

- ✓ Καθώς σε κάθε MS δεν έχει αρχικά ανατεθεί κάποιο εύρος ζώνης για τη πρόσβασή του στο δίκτυο, απαιτείται κάποιος μηχανισμός για την αρχικοποίηση μιας κλήσης από το MS ή για την απάντηση του MS σε μια εισερχόμενη σε αυτό κλήση. Η αντιμετώπιση του θέματος αυτού περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

Για την αντιμετώπιση του πρώτου προβλήματος χρησιμοποιούνται οι διαδικασίες εντοπισμού θέσης και δρομολόγησης κλήσης. Για το σκοπό αυτό κάθε MSC διατηρεί δύο Βάσεις Δεδομένων, τον Καταχωρητή Θέσης Βάσης (*Home Location Register, HLR*) και τον Καταχωρητή Θέσης Επισκεπτών (*Visitor Location Register, VLR*). Οι οντότητες αυτές αποτελούν το Υποσύστημα Δικτύου και Μεταγωγής (*Network and Switching System, NSS*). Κάθε MS είναι καταχωρημένο σε συγκεκριμένο HLR, που είναι συνήθως του MSC της περιοχής στην οποία εγγράφηκε ο χρήστης όταν έκανε τη πρώτη σύνδεση του στο δίκτυο (περιοχή βάσης του MS). Ο VLR καταχωρεί MS που δεν είναι εγγεγραμμένα στον HLR αλλά εισέρχονται¹ σε κυψέλη του MSC στο οποίο ανήκει ο VLR. Κάθε πάροχος έχει ένα GMSC στο οποίο φτάνουν όλες οι κλήσεις που αφορούν MS στο δίκτυο του. Τα MSCs, HLR και VLR ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης και από κοινού συμβάλλουν στη διαδικασία εγκατάστασης κλήσης ενός MS σε περιαγωγή.

Η διαχείριση της γεωγραφικής θέσης των MS πραγματοποιείται ως ακολούθως. Ένα MS σε περιαγωγή επικοινωνεί με το πλησιέστερο γειτονικό BS και το πληροφορεί για την ύπαρξη του στη συγκεκριμένη περιοχή. Εάν η περιοχή αυτή είναι διαφορετική από τη περιοχή βάσης του MS, τότε χρησιμοποιείται η ταυτότητα του τελευταίου για το καθορισμό της περιοχής βάσης του και ο HLR της θέσης βάσης του MS ενημερώνεται για τη τρέχουσα θέση του MS. Στη συνέχεια, ο VLR στη τρέχουσα θέση του MS δέχεται επιβεβαίωση από τον HLR της θέσης βάσης του MS για την εγκυρότητα συνδρομής του MS στο δίκτυο.

Όταν κάποιος πραγματοποιεί μια κλήση προς το συγκεκριμένο MS, ο αριθμός κλήσης αναγνωρίζει το MSC του MS και ένα σχετικό μήνυμα στέλνεται στο MSC αυτό. Το MSC με τη σειρά ελέγχει αν το MS βρίσκεται καταχωρημένο στο HLR του. Στη συνέχεια, καθώς γνωρίζει ότι το MS βρίσκεται σε περιαγωγή, ρωτάει τον VLR της περιοχής στην οποία βρίσκεται το MS για την τρέχουσα θέση αυτού. Το VLR γνωρίζει τη θέση του MS και παρέχει την αντίστοιχη πληροφορία στο HLR. Το HLR προωθεί την πληροφορία αυτή στο MSC το οποίο πλέον εγκαθιστά την κλήση προς το MS.

7. Κανάλια δεδομένων και ελέγχου

Υπάρχουν δύο είδη καναλιών μεταξύ MS και BS:

- ✓ Τα κανάλια κίνησης δεδομένων (*traffic channels*). Αυτά μεταφέρουν φωνή ή δεδομένα. Κατά την αίτηση για εγκατάσταση κλήσης, εγκαθίστανται δύο κανάλια κίνησης δεδομένων: το κατωφερές (*downlink*), με κατεύθυνση από το BS προς το MS και το ανωφερές (*uplink*), με κατεύθυνση από το MS προς το BS.
- ✓ Τα κανάλια ελέγχου (*control channels*). Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο κλήσεων, του δικτύου, σηματοδότηση κτλ.

¹ Η διαδικασία εισόδου ενός MS σε κυψέλη που επιβλεπείται από άλλο MSC ονομάζεται *περιαγωγή (roaming)*

Υπάρχουν δύο είδη καναλιών ελέγχου:

- ✓ *Τα μέσα στην σύνδεση (in-band).* Δημιουργούνται εσωτερικά στο κανάλι κίνησης δεδομένων (π.χ. με ανάθεση κάποιων σχισμών αποκλειστικά για το κανάλι ελέγχου). Χρησιμεύουν στη μεταφορά πληροφορίας ελέγχου σχετικά με τη κλήση αυτή. Μειονέκτημα είναι ότι δημιουργούνται προφανώς μετά την εγκατάσταση της κλήσης.
- ✓ *Τα έξω από την σύνδεση (out of band).* Είναι κανάλια κοινά για όλους τους χρήστες της κυψέλης, μέσω των οποίων μεταδίδουν αιτήσεις για εγκατάσταση κλήσεων. Στην ανωφερή σύνδεση μοιράζονται *ανταγωνιστικά (contention-based)* π.χ μέσω slotted ALOHA. Η ανταγωνιστική πρόσβαση δημιουργεί το πρόβλημα αστάθειας σε περιπτώσεις μεγάλης ζήτησης και πρέπει να αντιμετωπίζεται.

Όπως αναφέρθηκε, στη προηγούμενη ενότητα, καθώς σε κάθε MS δεν έχει αρχικά ανατεθεί κάποιο εύρος ζώνης για τη πρόσβασή του στο δίκτυο, απαιτείται κάποιος μηχανισμός για την αρχικοποίηση μιας κλήσης από το MS ή για την απάντηση του MS σε μια εισερχόμενη σε αυτό κλήση. Το θέμα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση μονίμων έξω από τη σύνδεση καναλιών ελέγχου. Όταν ένα MS εισέρχεται σε μια κυψέλη, ακροάται τα κανάλια αυτά. Ένα τέτοιο κανάλι είναι το *κανάλι ειδοποίησης εισερχόμενης κλήσης*. Αν πραγματοποιηθεί μια κλήση προς το MS και το δίκτυο γνωρίζει ότι το MS βρίσκεται σε μια κυψέλη, τότε ο BS της κυψέλης εκπέμπει μια ειδοποίηση προς το MS επάνω από το παραπάνω κανάλι. Ένα δεύτερο κοινό κανάλι είναι το *κανάλι τυχαίας πρόσβασης*, το οποίο διαμοιράζεται σε όλα τα MS στη κυψέλη. Όταν ένα MS θέλει να απαντήσει σε μια εισερχόμενη κλήση (διότι έχει δεχθεί ειδοποίηση για αυτήν), ή να ξεκινήσει μια νέα κλήση, ανταγωνίζεται για πρόσβαση στο κανάλι τυχαίας πρόσβασης της κυψέλης του στέλνοντας ένα αντίστοιχο μήνυμα στο BS. Με τη λήψη του μηνύματος αυτού, το δίκτυο αναθέτει στο MS ένα κανάλι και ξεκινάει η διαδικασία εγκατάστασης κλήσης.

8. Μεταπομπή

Καθώς σε γειτονικές κυψέλες δε χρησιμοποιούνται τα ίδια κανάλια, οποτεδήποτε ένα MS εισέρχεται σε μια γειτονική κυψέλη θα πρέπει να αλλάξει το ανωφερές και κατωφερές κανάλι του σε συχνότητες της νέας κυψέλης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μεταπομπή.

Αν ένας χρήστης κινείται προς μια κυψέλη και πρέπει να κάνει μεταπομπή σε αυτήν το MSC είναι υπεύθυνο να μεταφέρει την κλήση σε κανάλι που ανήκει στο νέο BS. Θα πρέπει όμως τέτοιο κανάλι να είναι διαθέσιμο στον νέο BS, διαφορετικά η κλήση θα τερματιστεί. Για να αποφευχθεί το παραπάνω δεσμεύονται κάποια κανάλια ειδικά για την εξυπηρέτηση των μεταπομπών.

8.1 Κριτήρια για πραγματοποίηση μεταπομπής

- ✓ Ισχύς σήματος. Το MS μετράει την ισχύ που λαμβάνει από τους γειτονικούς BS. Ανάλογα με τις μετρήσεις αυτές, αποφασίζεται ή όχι η μεταφορά του χρήστη σε κανάλι άλλου BS. Πρόβλημα της μεθόδου αυτής είναι η περίπτωση της κίνησης χρήστη στα όρια δύο κυψελών, κάτι που δημιουργεί υψηλό ρυθμό μεταπομπών (κάτι που είναι γνωστό ως ring-rong effect) με συνέπεια την επιβάρυνση του MSC με πολλές λειτουργίες διαχείρισης.
- ✓ Ισχύς σήματος με κατώφλι. Η μεταπομπή σε ένα νέο BS πραγματοποιείται αν η ισχύς λήψης στο MS από το νέο BS είναι κατά h μεγαλύτερη από την ισχύ λήψης από τον τρέχων BS. Προφανώς όσο μεγαλύτερο είναι το h τόσο μειώνεται το ring rong effect,

αλλά σε βάρος της ισχύος λήψης του λαμβανόμενου στο MS σήματος. Επίσης μεγάλο h δημιουργεί αυξημένες συγκαταλκικές παρεμβολές καθώς το MS μπορεί να μπει στη γεωγραφική περιοχή μιας νέας κυψέλης και καθώς η μεταπομπή δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί, να παραβιάζεται η απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

- ✓ Ρυθμός λαθών πακέτων (Packet Error Rate, PER). Η μεταπομπή πραγματοποιείται αν αυτός ο ρυθμός υπερβεί κάποιο όριο. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί περισσότερο χρόνο για τη μέτρηση ικανού αριθμού πακέτων ψηφιοποιημένης φωνής. Είναι όμως πιο αξιόπιστη από τις προηγούμενες, καθώς μπορεί να μην αποφασίσει μεταπομπή για στιγμιαίες πτώσης ισχύος στο MS, λόγω κάποιου προσωρινού εμποδίου (π.χ. κτίριο) στη πορεία διάδοσης του λαμβανόμενου σήματος.

8.2 Ποιότητα υπηρεσίας και μεταπομπές

Καθώς οι χρήστες είναι φυσικό να ενοχλούνται περισσότερο από την απότομη διακοπή μιας κλήσης (λόγω αποτυχημένης μεταπομπής) σε σχέση με την απόρριψη μιας νέας αίτησης κλήσης, πρέπει η *πιθανότητα διακοπής μιας κλήσης σε εξέλιξη (call dropping probability)* να είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την *πιθανότητα απόρριψης αίτησης για νέα κλήση (call blocking probability)*. Συνεπώς θα πρέπει οι μεταπομπές να έχουν προτεραιότητα στη χρήση των ελευθέρων καναλιών της κυψέλης σε σχέση με τις αιτήσεις εγκατάστασης νέας κλήσης. Αυτό σημαίνει ότι κατά την διάθεση των καναλιών της κυψέλης, θα πρέπει να δίνεται προτεραιότητα χρήσης τους σε μεταπομπές έναντι των αιτήσεων για νέα κλήση.

8.2.1 Μέθοδοι μείωσης πιθανότητας διακοπής κλήσης σε εξέλιξη

- ✓ Κράτηση καναλιών για εξυπηρέτηση των μεταπομπών. Στη μέθοδο αυτή μερικά κανάλια σε κάθε κυψέλη χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για μεταπομπές και τα υπόλοιπα είτε για νέες κλήσεις, είτε για μεταπομπές. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μείωση της χωρητικότητας του συστήματος καθώς αιτήσεις για νέες κλήσεις στη κυψέλη μπορεί να μην ικανοποιηθούν παρά την ύπαρξη ελεύθερων καναλιών.
- ✓ Κατά προτεραιότητα εξυπηρέτηση των μεταπομπών. Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται με την χρήση όλων των καναλιών είτε για νέες κλήσεις είτε για μεταπομπές και τοποθέτηση των αιτήσεων για μεταπομπές σε ουρά αναμονής όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι. Επιπρόσθετα, οι αιτήσεις για νέες κλήσεις απορρίπτονται όσο υπάρχουν αιτήσεις στην παραπάνω ουρά. Αν ένα MS είναι σε διαδικασία μεταπομπής και δεν ελευθερωθεί κανάλι πριν η ισχύς που λαμβάνεται στο MS από τον τρέχων BS πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, η κλήση θα τερματιστεί. Το σχήμα αυτό οδηγεί σε εξυπηρέτηση όλων των μεταπομπών πριν εξυπηρετηθεί αίτηση για νέα κλήση.
- ✓ Shadow clustering: Με την τεχνική αυτή ελέγχεται η πιθανότητα μια αίτηση για νέα κλήση να χρειαστεί μεταπομπή. Για τον έλεγχο χρησιμοποιείται η κατεύθυνση του MS, η ταχύτητα του, η κατεύθυνση των δρόμων στην περιοχή. Αν βρεθεί ότι η μεταπομπή είναι πιθανό να συμβεί, τότε υπολογίζεται η πιθανότητα μη επιτυχίας της (βάση στοιχείων όπως στατιστικά δεδομένα για την συχνότητα των μεταπομπών στην περιοχή αυτή την ώρα, το φόρτο της νέας κυψέλης κτλ). Αν η πιθανότητα μη επιτυχούς μεταπομπής ξεπερνάει κάποιο όριο, τότε η νέα κλήση δεν εγκαθίσταται.

8.3 Είδη μεταπομπών

- ✓ Μεταξύ καναλιών στην ίδια κυψέλη.
- ✓ Μεταξύ κυψελών του ίδιου BSC.
- ✓ Μεταξύ κυψελών διαφορετικού BSC και ίδιου MSC.
- ✓ Μεταξύ κυψελών διαφορετικού MSC.
- ✓ *Μαλακή μεταπομπή (Soft handoff)*. Γίνεται σύνδεση με τη νέα BS και κατόπιν αποσύνδεση από προηγούμενη.
- ✓ *Σκληρή μεταπομπή (hard handoff)*. Γίνεται σύνδεση με τη νέα BS και από λίγο πιο πριν αποσύνδεση από προηγούμενη.

Η απόφαση πραγματοποίησης μεταπομπής μπορεί να γίνει με πρωτοβουλία του MS ή του BS. Στη πρώτη περίπτωση το MS ακροάται τις μεταδόσεις γειτονικών σε αυτό BSs και με βάση την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος αποφασίζει το BS με το οποίο θα συσχετιστεί. Στη δεύτερη περίπτωση το δίκτυο μετράει την ισχύ του σήματος που στέλνει το MS, όπως αυτή φθάνει στα BSs του και με βάση τη πληροφορία αυτή αποφασίζει σε ποιο BS θα συσχετίσει το MS. Η δεύτερη περίπτωση δίνει τη δυνατότητα στο δίκτυο να πραγματοποιεί *εξισορρόπηση φόρτου (load balancing)* με στοχευόμενη κατανομή των MS σε BSs.

Μια ενδιαμέση περίπτωση είναι η *Υποβοηθούμενη από το MS Μεταπομπή (Mobile Assisted Handoff)*. Κατά τη διάρκεια των σχισμών στις οποίες δεν εμπλέκεται σε κλήση, το MS ακροάται τις μεταδόσεις γειτονικών σε αυτό κυψελών και με βάση την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος καθορίζει μια λίστα με τους υποψήφιους BS για πιθανή μεταπομπή. Η λίστα αυτή στέλνεται στο δίκτυο το οποίο και αποφασίζει για τη μεταπομπή του MS.

9. Ανάθεση καναλιών σε κυψέλες

Σε κάθε δίκτυο κυψελοειδούς τηλεφωνίας FDM/TDMA θα πρέπει να αποφασισθεί ποια κανάλια θα ανατεθούν σε κάθε κυψέλη κάθε ομάδας. Παρακάτω περιγράφουμε τις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται.

9.1 Σταθερή Ανάθεση Καναλιών (Fixed Channel Assignment-FCA)

Σε κάθε κυψέλη ανατίθεται ένα συγκεκριμένο σύνολο καναλιών. Στην πιο απλή μορφή μπορεί κάθε κυψέλη να έχει ίσο αριθμό καναλιών. Αυτό είναι αποδοτικό μόνο για ίσο αριθμό χρηστών σε κάθε κυψέλη. Σε ρεαλιστικές περιπτώσεις όμως, υπάρχουν κυψέλες στις οποίες υπάρχουν περισσότεροι χρήστες. Στην περίπτωση αυτή το παραπάνω σχήμα οδηγεί σε μεγαλύτερη πιθανότητα μπλοκαρίσματος για κλήσεις στις "πυκνοκατοικημένες κυψέλες". Η πιο χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι το FCA με *Ανομοιόμορφη Ανάθεση Καναλιών (Non uniform Channel Allocation)*, όπου κάθε κυψέλη έχει τόσα κανάλια όσα η αναμενόμενη ζήτηση σε αυτήν. Πρέπει προφανώς να υπάρχει κάποιος τρόπος πρόγνωσης της ζήτησης στη κυψέλη.

- ✓ Σταθερή Ανάθεση Καναλιών (Fixed Channel Assignment-FCA). Σε κάθε κυψέλη ανατίθεται ένα συγκεκριμένο σετ καναλιών. Στην πιο απλή μορφή μπορεί κάθε κυψέλη να έχει ίσο αριθμό καναλιών. Αυτό είναι αποδοτικό μόνο για ίση πυκνότητα χρηστών σε κάθε κυψέλη. Σε ρεαλιστικές περιπτώσεις όμως, υπάρχουν κυψέλες στις οποίες υπάρχουν περισσότεροι (κατά πολύ) χρήστες. Στην περίπτωση αυτή το παραπάνω σχήμα οδηγεί σε μεγαλύτερη πιθανότητα μπλοκαρίσματος για κλήσεις

στις "πυκνοκατοικημένες κυψέλες". Έτσι χρησιμοποιούνται οι επόμενες δύο παραλλαγές του FCA.

- ✓ το FCA με Ανομοιόμορφη Ανάθεση Καναλιών (Non-uniform Channel Allocation): Κάθε κυψέλη έχει τόσα κανάλια όσα η αναμενόμενη κίνηση σε αυτήν. Πρέπει προφανώς να υπάρχει κάποιος τρόπος πρόγνωσης.
- ✓ το FCA με Στατική Δανειοδότηση (Static Borrowing): Μια κυψέλη μπορεί να δανειστεί αχρησιμοποίητα κανάλια από γειτονική της, λαμβανόμενου υπόψη του περιορισμού από την απόσταση επαναχρησιμοποίησης. Η ανακατανομή της κίνησης θεωρείται ότι είναι γνωστή από πριν έτσι ώστε να γίνει ο δανεισμός των καναλιών. Τα κανάλια παραμένουν στη νέα κυψέλη μέχρι να γίνει ξανά ανακατανομή πόρων από το σύστημα.

9.2 Σχήματα Δανεισμού Καναλιών

Σε αυτές τις μεθόδους, μόλις μία κλήση με "δανεισμένο κανάλι" τερματιστεί, η συχνότητα επιστρέφεται αμέσως στην αρχική κυψέλη.

9.2.1 Απλά σχήματα δανεισμού καναλιών

- ✓ Borrow from the richest (SBR): Στη μέθοδο αυτή μια κυψέλη δανείζεται κανάλι από τη γειτονική κυψέλη με τα περισσότερα ελεύθερα κανάλια.
- ✓ Βασικός Αλγόριθμος με Αναδιάταξη (Basic Algorithm with Reassignment ή BAR). Στη μέθοδο αυτή μόλις ελευθερωθεί ένα από τα κανάλια της κυψέλης, η κλήση μεταφέρεται σε αυτό και το δανεικό κανάλι επιστρέφεται στη κυψέλη-κάτοχό του.

Οποιοδήποτε κανάλι μπορεί να δοθεί σε γειτονική κυψέλη λαμβανόμενου όμως υπόψη του περιορισμού από την απόσταση επαναχρησιμοποίησης. Για να δοθεί λοιπόν δε θα πρέπει να βρίσκεται σε χρήση το αντίστοιχο κανάλι στις κυψέλες των γειτονικών clusters. Αντίστοιχα, όταν δανείζεται ένα κανάλι μιας κυψέλης σε γειτονική, το αντίστοιχο κανάλι στις κυψέλες των γειτονικών clusters "κλειδώνει" και δε χρησιμοποιείται σε αυτές μέχρι να επιστραφεί το κανάλι στη κυψέλη-κάτοχο.

9.2.2 Υβριδικά σχήματα δανεισμού καναλιών

- ✓ Απλός Υβριδικός Δανεισμός Καναλιών (Simple Hybrid Channel Borrowing Strategy, SHCB). Στη μέθοδο αυτή το σύνολο των καναλιών μιας κυψέλης, χωρίζεται σε δύο υποσύνολα A (κανάλια που δε μπορούν να δανειοδοτηθούν) και B (κανάλια που μπορούν να δανειοδοτηθούν). Η αναλογία του πλήθους των A και B είναι προκαθορισμένη.
- ✓ Δανεισμός με Διάταξη Καναλιών (Borrowing with Channel Ordering ή BCO). Στη μέθοδο αυτή γίνεται δυναμική αναπροσαρμογή της αναλογίας του πλήθους των A και B ανάλογα με τις συνθήκες κίνησης.

9.3 Δυναμική ανάθεση καναλιών

Στη μέθοδο αυτή δεν υπάρχει a-priori συσχέτιση καναλιών με κυψέλες. Όλα τα κανάλια διαχειρίζονται κεντρικά ως ένα σύνολο από το οποίο εξυπηρετούνται όλες οι αιτήσεις των BS

για νέα κανάλια. Με την παύση χρήσης ενός καναλιού, αυτό επιστρέφεται στο σύνολο. Και πάλι βέβαια η ανάθεση γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί για τη ελάχιστη απόσταση επαναχρησιμοποίησης.

Η τεχνική αυτή σκοπεύει στην επιλογή και ανάθεση κάθε φορά του καναλιού με το μικρότερο κόστος για το σύστημα. Το κόστος αυτό μπορεί να εξαρτάται από:

- ✓ Τη πιθανότητα μπλοκαρίσματος στις γειτονικές κυψέλες.
- ✓ Τις παρεμβολές στην ίδια κυψέλη.
- ✓ Την απόσταση επαναχρησιμοποίησης ενός καναλιού.

Ενότητα 2: Κυψελοειδή Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G)

1. Το σύστημα GSM

Το σύστημα GSM αποτελεί το πιο διαδεδομένο σύστημα κυψελοειδούς τηλεφωνίας 2G και βασίζεται σε FDM/TDMA. Είναι ένα πρότυπο το οποίο αναπτύχθηκε από το *Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Προτύπων Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute, ETSI)* και η πρώτη έκδοση του δημοσιεύθηκε το 1990. Η εμπορική λειτουργία συστημάτων GSM ξεκίνησε το 1991 και μέχρι το 1993 υπήρχαν σε λειτουργία 36 δίκτυα GSM στην Ευρώπη. Η εγκατάσταση και χρήση συστημάτων GSM επεκτάθηκε σε ένα μεγάλο αριθμό χωρών παγκοσμίως.

Το πρότυπο GSM επιτρέπει τη λειτουργία σε τέσσερις περιοχές συχνοτήτων:

- στα 900 MHz, περιοχή στην οποία λειτούργησαν οι πρώτες εγκαταστάσεις του GSM.
- 1800 MHz, με κυριότερη χρήση σε μεταγενέστερες εγκαταστάσεις στην Ευρώπη.
- 1900 MHz, με κυριότερη χρήση σε εγκαταστάσεις στην Αμερική.

Η κύρια υπηρεσία που προσέφεραν αρχικά τα GSM δίκτυα είναι φωνητική τηλεφωνία. Η καινοτομία η οποία έφεραν σε σχέση με τα προηγούμενα 1G δίκτυα, ήταν το γεγονός ότι η φωνή ψηφιοποιείται και κωδικοποιείται πριν τη μετάδοσή της. Επίσης, οι πρώτες εγκαταστάσεις του GSM έδιναν τη δυνατότητα μεταφοράς ψηφιακών δεδομένων σε ταχύτητες έως 9.6 Kbps.

Κάθε δίκτυο GSM χαρακτηρίζεται από την αρχιτεκτονική που περιγράφηκε στο Σχήμα 1. Κάθε GSM MS αποτελείται από το τερματικό και μια έξυπνη κάρτα που ονομάζεται *Subscriber Identity Module (SIM)*, όπου αποθηκεύεται ο αριθμός κλήσης του χρήστη και τα διαπιστευτήρια της σύνδεσης του στο δίκτυο του παρόχου στον οποίο ανήκει. Η κάρτα αυτή επιτρέπει στο συνδρομητή να είναι ανεξάρτητος από συγκεκριμένο MS και να μπορεί να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες δικτύου του παρόχου του μέσω οποιουδήποτε MS στο οποίο εισάγει τη κάρτα SIM του. Κάθε τερματικό αναγνωρίζεται κατά μοναδικό τρόπο από τον αριθμό *International Mobile Equipment Identity (IMEI)*.

Όσον αφορά το MSC των δικτύων GSM, επιπλέον των HLR και VLR που περιγράφηκαν παραπάνω, αυτό περιέχει δυο επιπλέον οντότητες, τον *Καταχωρητή Ταυτότητας Εξοπλισμού (Equipment Identity Register, EIR)* και το *Κέντρο Πιστοποίησης (Authentication Center, AuC)*. Ο EIR περιέχει μια λίστα με όλα τα νόμιμα τερματικά του παρόχου, σημειωμένα με τα IMEI τους. Μη νόμιμα τερματικά είναι εκείνα για τα οποία η πρόσβαση στο δίκτυο του παρόχου έχει απαγορευθεί. Το AuC περιέχει τα συμμετρικά κλειδιά κρυπτογράφησης των συνδρομητών (που βρίσκονται αποθηκευμένα και στις κάρτες SIM τους) και τα οποία είναι απαραίτητα στις διαδικασίες πιστοποίησης των χρηστών για είσοδο τους στο δίκτυο αλλά και για την κρυπτογράφηση της μεταφερόμενης πληροφορίας.

Όσον αφορά τη μετάδοση της πληροφορίας, το GSM χρησιμοποιεί συχνοτικά κανάλια εύρους 200 KHz, με ρυθμό μετάδοσης 270.8 Kbps στο Φυσικό Επίπεδο. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης ενός GSM παρόχου αποτελείται από 124 συχνοτικά κανάλια. Κάθε συχνοτικό κανάλι χωρίζεται σε οκτώ χρονικές σχισμές διάρκειας 0.577 msec έκαστη. Οκτώ τέτοιες σχισμές αποτελούν ένα πλαίσιο (frame) του GSM.

Το γεγονός ότι το ασύρματο κανάλι μεταβάλλεται με μη προβλέψιμο τρόπο, όπως περιγράφηκε στη πρώτη συνεδρία, απαιτεί τα MSs να μπορούν να μεταβάλλουν την ισχύ μετάδοσης τους, κάτι που άλλωστε απαιτείται και από τη δυνατότητα συνύπαρξης κυψελών διαφορετικής εμβέλειας (βλ. συζήτηση για διαίρεση κυψελών). Για να ανταποκριθεί στην

ανάγκη αυτή, το GSM χρησιμοποιεί έλεγχο ισχύος. Στη κατωφερή σύνδεση, το MS μετρά το την ισχύ λήψης και τη ποιότητα σύνδεσης με έως 6 γειτονικούς BSs και περνά τις πληροφορίες στο BSC ο οποίος αποφασίζει για την ισχύ εκπομπής του BS που εξυπηρετεί το MS. Στην ανωφερή σύνδεση ο BS πραγματοποιεί μετρήσεις της ισχύος λήψης από το MS και ενημερώνει το MS για τη νέα ισχύ εκπομπής μέσω ενός καναλιού ελέγχου. Οι μεταβολές γίνονται με στόχο αποδεκτή επικοινωνία με τη μικρότερη δυνατή ισχύ.

Μια εξελιγμένη δυνατότητα που προσφέρει το πρότυπο GSM είναι η *Ασυνεχής Εκπομπή (Discontinuous Transmission)*. Πρόκειται για αυτόματη και προσωρινή διακοπή της εκπομπής του GSM MS που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια παύσεων που ανιχνεύονται στην ομιλία του χρήστη του MS. Στη πράξη δε διακόπτεται η εκπομπή, αλλά μεταδίδονται σχισμές απουσίας ήχου (silence frames) με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με τις κανονικές σχισμές μεταφοράς ψηφιοποιημένης φωνής. Όταν ο δέκτης του συνομιλητή λαμβάνει silence frames εισάγει τεχνητό θόρυβο στο ακουστικό για αποφυγή ηχητικής σιγής που ίσως θα έκανε το συνομιλητή να νομίσει ότι η κλήση τερματίστηκε. Πλεονεκτήματα της μεθόδου Ασυνεχούς Εκπομπής είναι η εξοικονόμηση ενέργειας στα MS και η μείωση των παρεμβολών. Για να υλοποιηθεί όμως απαιτείται ένας *Μηχανισμός Ανίχνευσης Φωνητικής δραστηριότητας (Voice Activity Detector, VAD)*, με τον οποίο κατά τη διάρκεια της κλήσης, το MS πραγματοποιεί μέτρηση του ηχητικού θορύβου του περιβάλλοντος του. Η ασυνεχής εκπομπή ενεργοποιείται όταν ο μηχανισμός αυτός αναγνωρίσει παύση ομιλίας για ένα διάστημα σιγής μεγαλύτερο ενός ορίου.

Όταν ένα MS δεν εμπλέκεται σε κλήση, μπορεί να ενεργοποιήσει το μηχανισμό *Ασυνεχούς Λήψης (Discontinuous Reception)*. Έτσι όταν δε βρίσκεται σε κατάσταση λήψης τοποθετείται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, κατά την οποία κλείνει το κύκλωμα του δέκτη του και το ανοίγει περιοδικά για να ελέγξει το κανάλι ειδοποίησης για εισερχόμενες κλήσεις. Το προφανές πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η εξοικονόμηση ενέργειας στο MS.



ΑΣΚΗΣΗ 6

Σε ένα σύστημα GSM υποθέτουμε ότι το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος είναι 50 MHz (25 MHz ανωφερής μπάντα, 25 MHz κατωφερής μπάντα). Σε ανωφερή και κατωφερή σύνδεση μια κλήση καταλαμβάνει από 1 σχισμή σε κάθε πλαίσιο των 8 σχισμών. Ανωφερής και κατωφερής εξυπηρετούνται από συχνοτικά κανάλια εύρους 200 KHz. Το μέγεθος ομάδας είναι N=4. Υπολογίστε το μέγιστο αριθμό των κλήσεων που μπορούν να υποστηριχθούν ταυτόχρονα σε κάθε κυψέλη.

Απάντηση

Number of
channels/cell=

$$\begin{aligned} & \frac{(totalbandwidth = 25MHz)}{(bandwidthperfrequencychannel = 200 KHz)} \cdot (timeslotsperfrequencychannel = 8) \cdot (frequencyreusefactor = 4) \\ &= \frac{25,000 \times 8}{200 \times 4} \\ &= 250. \text{ (the actual number would be somewhat less due to overhead from signalling, etc.)} \end{aligned}$$

2. Κυψελοειδή δίκτυα 2.5G: General Packet Radio Service (GPRS)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στις πρώτες εγκαταστάσεις συστημάτων GSM οι συνδρομητές είχαν τη δυνατότητα μεταφοράς και λήψης δεδομένων με ταχύτητες έως 9.6 Kbps σε κάθε κατεύθυνση. Η μεταφορά αυτή γινόταν χρησιμοποιώντας τη μια σχισμή ανά πλαίσιο GSM σε ανωφερή και κατωφερή σύνδεση, τις οποίες δίνει το δίκτυο σε κάθε MS που πραγματοποιεί κλήση. Η τεχνολογία αυτή ήταν γνωστή ως *Circuit Switched Data (CSD)*. Είχε δυο βασικά προβλήματα:

- ✓ Μικρό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων.
- ✓ Οι δυο σχισμές (ανωφερής και κατωφερής) χρησιμοποιούνται από το MS ανεξάρτητα αν αυτό στέλνει/λαμβάνει δεδομένα ή όχι. Βασιζόταν δηλαδή σε *μεταγωγή κυκλώματος (circuit switching)*, με αποτέλεσμα όταν το MS δεν έστελνε/λάμβανε δεδομένα α) να δεσμεύεται εύρος ζώνης χωρίς λόγο, β) να χρεώνεται ο συνδρομητής.

Η λειτουργία του GPRS έφερε δυο καινοτομίες: α) απόδοση στο MS περισσότερων σχισμών μέσα σε ένα GSM πλαίσιο, β) το GPRS χρησιμοποιεί *μεταγωγή πακέτου (packet switching)*, με αποτέλεσμα κάθε MS να χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης κατ'απαίτηση, όταν πραγματικά το χρειάζεται. Με την κατ'απαίτηση ανάθεση σχισμών στα MSs, το GPRS μπορεί να υποστηρίξει πολύ εύκολα *ογκοχρέωση* του χρήστη. Το GPRS μπορεί να προσφέρει στο MS ρυθμούς μετάδοσης 110 Kbps στο Φυσικό Επίπεδο.

3. Κυψελοειδή δίκτυα 2.75G: Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)

Το πρότυπο EDGE αποτελεί έναν εύκολο τρόπο αναβάθμισης ενός δικτύου GSM προς τη κατεύθυνση της παροχής μεγαλύτερων ρυθμών μεταφοράς (έως 473 Kbps στο Φυσικό Επίπεδο) από εκείνους του GPRS. Αυτό επιτυγχάνεται επαναχρησιμοποιώντας τα 200 KHz κανάλια του GSM, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η προσφορά των υψηλών ρυθμών μετάδοσης του EDGE επάνω από ένα υφιστάμενο δίκτυο GSM. Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης οφείλονται στα παρακάτω:

- ✓ Βελτιωμένο Φυσικό Επίπεδο. Γίνεται χρήση τεχνικών διαμόρφωσης υψηλότερου επιπέδου από τις αντίστοιχες του GSM. Εκτός από την *Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)* του GSM, το EDGE χρησιμοποιεί την μέθοδο διαμόρφωσης *Eight Phase Shift Keying (8-PSK)*, η οποία κωδικοποιεί τρία bits ανά μεταδιδόμενο σύμβολο, σε αντίθεση με τη GMSK που κωδικοποιεί ένα bit ανά σύμβολο.
- ✓ *Προσαρμογή Σύνδεσης (Link Adaptation, LA)*. Με βάση τη ποιότητα της σύνδεσης μεταβάλλεται η μέθοδος κωδικοποίησης και διαμόρφωσης των μεταδιδόμενων πακέτων δεδομένων. Σε ενθόρυβη σύνδεση, η LA επιλέγει τη χρήση GMSK η οποία σε τέτοιες περιπτώσεις είναι λιγότερο ευπαθής στο θόρυβο σε σχέση με την 8-PSK. Όταν η ποιότητα της σύνδεσης είναι υψηλή επιλέγεται η πιο αποδοτική 8-PSK για μεγαλύτερους ρυθμούς μεταφοράς.
- ✓ *Τμηματικός Πλεονασμός (Incremental Redundancy, IR)*. Αρχικά, ο IR μεταδίδει τα πακέτα με μικρή επιβάρυνση κωδικοποίησης ώστε να επιτευχθεί αυξημένος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων. Αν συμβούν σφάλματα σε λήψεις πακέτων, επιλέγεται μεγαλύτερη επιβάρυνση κωδικοποίησης.

Ενότητα 3: Κυψελοειδή Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (3G)

Τα κυψελοειδή δίκτυα 2G βελτίωσαν πολύ τις επιδόσεις και τη χωρητικότητα της κινητής τηλεφωνίας. Παρόλα αυτά, από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 φάνηκε ότι θα ήταν ανεπαρκή για τη παροχή υψηλών ταχυτήτων για μεταφορά δεδομένων. Για το λόγο αυτό, ξεκίνησε η προσπάθεια προτυποποίησης της Τρίτης Γενιάς των κυψελοειδών δικτύων, με στόχο την παροχή στους κινητούς χρήστες ρυθμών μετάδοσης ικανών να υποστηρίξουν προηγμένες εφαρμογές, όπως mobile multimedia, κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο, βιντεοκλήσεις, mobile TV, κτλ.

Σύμφωνα με τις αρχικές απαιτήσεις που είχε θέσει η ITU-R, για να χαρακτηριστεί μια τεχνολογία 3G, θα έπρεπε να προσφέρει στο κινητό χρήστη ρυθμούς μετάδοσης τουλάχιστο 200 Kbps. Με τη πάροδο των χρόνων βέβαια, οι τελευταίες εκδόσεις συστημάτων 3G (γνωστά και ως 3.5G και 3.75G) προσφέρουν πρόσβαση από κινητά τερματικά σε ταχύτητες αρκετών Mbps

1. Διαμόρφωση Ευρέως Φάσματος Ευθείας Ακολουθίας

Τα περισσότερα πρότυπα 3G, χρησιμοποιούν ως μέθοδο διαμοιρασμού πόρων στο ασύρματο κανάλι μια μέθοδος *Πολλαπλής Πρόσβασης Ευρέως Φάσματος* (*Code Division Multiple Access, CDMA*), γνωστή ως *Διαμόρφωση Ευρέως Φάσματος Ευθείας Ακολουθίας* (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*). Κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί όλα τα διαθέσιμα συχνοτικά κανάλια, κάτι που προφανώς θέτει το μέγεθος ομάδας πάντοτε σε 1. Σε κάθε κινητό χρήστη σε μια κυψέλη γίνεται ανάθεση ενός κωδικού των n -bits. Οι κωδικοί των χρηστών πρέπει να είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, κάτι που σημαίνει ότι το κανονικοποιημένο εσωτερικό γινόμενο οποιωνδήποτε δύο κωδικών πρέπει να είναι ίσο με το 0. Οι χρήστες εκπέμπουν ταυτόχρονα και οι δέκτες των μηνυμάτων διαχωρίζουν το μήνυμα ενός αποστολέα με βάση τον κώδικά του. Η μετάδοση των δεδομένων του χρήστη λαμβάνει χώρα ως εξής: Για να κάνει εκπομπή δυαδικού 1 ο χρήστης μεταδίδει τον κωδικό του ενώ, για να κάνει εκπομπή δυαδικού 0, εκπέμπει τη λογική άρνηση του κωδικού του.

Το Σχήμα 4 εξηγεί τη λειτουργία της μεθόδου DSSS όπου, για λόγους απλότητας, οι εκπομπές 0 και 1 αναπαριστώνται με τα σύμβολα +1 και -1 αντίστοιχα. Για δύο σταθμούς, A, B, των οποίων οι μεταδόσεις θεωρούμε ότι ξεκινούν πάντοτε ταυτόχρονα και $n=4$, το Σχήμα 5 δείχνει τους κωδικούς των σταθμών, τα σύμβολα που προκύπτουν για δύο διαφορετικές περιπτώσεις εκπομπής 1 bit από τους A και B και τη διαδικασία εξαγωγής του μηνύματος του αποστολέα από το παραλήπτη.

Η μέθοδος DSSS αυξάνει το συχνοτικό εύρος του μεταδιδόμενου μηνύματος λόγω της εκπομπής n bits για κάθε bit δεδομένων του χρήστη με αποτέλεσμα να προσδίδει, και αυτή, αντοχή στη σκίαση. Επιπλέον, η μέθοδος επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία περισσότερων του ενός πομπών υπό την προϋπόθεση ότι οι αντίστοιχοι κωδικοί τους είναι ορθογώνιοι. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η μειωμένη αποδοτικότητα στη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, η οποία λόγω των n bits του κωδικού των χρηστών των καναλιών, είναι ίση με $1/n$. Επίσης, απαιτεί προσεκτικό έλεγχο ισχύος καθώς τα σήματα από τις ταυτόχρονες μεταδόσεις των χρηστών πρέπει να φτάνουν στον δέκτη με την ίδια ισχύ, ανεξάρτητα από την απόσταση των αντίστοιχων πομπών από τον δέκτη. Το τελευταίο πρόβλημα είναι γνωστό ως πρόβλημα *near-far* και εξηγείται στη συνέχεια.



Επισήμανση

Με τη μέθοδο του ελέγχου ισχύος, μεταβάλλεται η ισχύς του πομπού, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη. Εάν ο δέκτης λαμβάνει σε χαμηλό επίπεδο ισχύος (το οποίο προφανώς συνεπάγεται και μεγαλύτερο ρυθμό σφαλμάτων στη λήψη), ο πομπός αυξάνει την ισχύ μετάδοσής του για να μειωθεί ο ρυθμός σφαλμάτων. Αντίστοιχα, όταν ο δέκτης λαμβάνει σε επίπεδο ισχύος μεγαλύτερο από εκείνο που εγγυάται καλή ποιότητα λήψης, ο πομπός μπορεί να ελαττώσει την ισχύ μετάδοσης, έτσι ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια και να μειώσει τις παρεμβολές που προκαλεί.

Κώδικες A, B	Μεταδιδόμενα σύμβολα	Εξαγωγή μηνύματος αποστολέα
$K_A: 0011$ $K_B: 1010$	A: Bit 1 => -1 -1 1 1 B: Bit 0 => -1 1 -1 1 ----- $S = -2 \ 0 \ 0 \ 2$ A: Bit 1 => -1 -1 1 1 B: καμία μετάδοση ----- $S = -1 -1 \ 1 \ 1$	A: $S * K_A = [-2 \ 0 \ 0 \ 2] * [-1 \ -1 \ 1 \ 1] / 4 = 1 \Rightarrow$ binary 1. B: $S * K_B = [-2 \ 0 \ 0 \ 2] * [1 \ -1 \ 1 \ -1] / 4 = -1 \Rightarrow$ binary 0. A: $S * K_A = [-1 \ -1 \ 1 \ 1] * [-1 \ -1 \ 1 \ 1] / 4 = 1 \Rightarrow$ binary 1. B: $S * K_B = [-1 \ -1 \ 1 \ 1] * [1 \ -1 \ 1 \ -1] / 4 = 0 \Rightarrow$ ο B δε μετέδωσε τίποτε.

Σχήμα 4: Λειτουργία DSSS.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι ελέγχου ισχύος που εφαρμόζονται στα δίκτυα 3G:

- *Ανοικτού βρόχου (open-loop)*. Ο πομπός υπολογίζει την εξασθένηση (πχ μετρώντας την ισχύ λήψης και ανάλογα μεταβάλλει την ισχύ εκπομπής του). είναι αποδοτική μέθοδος μόνο όταν η εκπομπή και η λήψη του σταθμού γίνονται στο ίδιο συχνοτικό κανάλι. Στα δίκτυα 3G χρησιμοποιείται μόνον όταν το τερματικό επιχειρεί σύνδεση με το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης.
- *Κλειστού βρόχου (closed loop)*. Ανάλογα με τη ποιότητα λήψης, ο αποδέκτης οδηγεί τον πομπό σε μεταβολή της ισχύος εκπομπής του ρυθμός επανάληψης της διαδικασίας Closed Loop Power Control (1.500 rps) είναι πιο γρήγορος από τις μεταβολές στη ποιότητα λήψης που εισάγει το ασύρματο κανάλι.

Στη συνέχεια δείχνουμε ενδεικτικά τι πρόβλημα δημιουργείται όταν ο έλεγχος ισχύος αποτυγχάνει και οι μεταδόσεις των κινητών τερματικών δε φτάνουν στη κεραία του BS με την ίδια ισχύ. Έστω ένα σύστημα DSSS όπου οι χρήστες A, B έχουν τους κωδικούς 0 1 0 1 0 1 0 1 και 0 1 1 1 0 0 1 0 αντίστοιχα. Ο A μεταδίδει δυαδικό 1 και ο B μεταδίδει δυαδικό 0. Θα δείξουμε την αποκωδικοποίηση της μετάδοσης των A και B στον δέκτη, θεωρώντας ότι ο έλεγχος ισχύος αποτυγχάνει και η λαμβανόμενη ισχύς συμβόλων του B στο δέκτη είναι μισή της προβλεπόμενης.

Εφόσον η λαμβανόμενη τάση του A στο δέκτη είναι διπλάσια εκείνης του B η υπέρθεση της ακολουθίας συμβόλων του κωδικού του A με την ακολουθία συμβόλων που προκύπτει από το συμπλήρωμα ως προς ένα του κωδικού του B θα είναι η ακόλουθη: $(-1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1) + (0.5 \ -0.5 \ -0.5 \ -0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ -0.5 \ 0.5) = (-0.5 \ 0.5 \ -1.5 \ 0.5 \ -0.5 \ 1.5 \ -1.5 \ 1.5)$. Έτσι:

- Η αποκωδικοποίηση της μετάδοσης του A θα δώσει το παρακάτω αποτέλεσμα: $(-0.5 \ 0.5 \ -1.5 \ 0.5 \ -0.5 \ 1.5 \ -1.5 \ 1.5) \times (-1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1) = (0.5 + 0.5 \ -1.5 + 0.5 + 0.5 \ -1.5 \ -1.5 \ -1.5) / 8 = 1$.

- Η Αποκωδικοποίηση της μετάδοσης του B θα δώσει το παρακάτω αποτέλεσμα: $(-0.5 \ 0.5 \ -1.5 \ 0.5 \ -0.5 \ 1.5 \ -1.5 \ 1.5) \times (-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1) = (0.5 + 0.5 + 1.5 + 0.5 + 0.5 + 1.5 + 1.5 + 1.5)/8 = -0.5$.

Φαίνεται λοιπόν εύκολα ότι δε μπορεί να γίνει αποκωδικοποίηση της λήψης του B καθώς το -0.5 ισαπέχει από τα 0, που σημαίνει απουσία μετάδοσης και το -1 που σημαίνει μετάδοση δυαδικού 0.

Στα δίκτυα 3G υπάρχουν δύο είδη κωδικών, με διαφορετική σημασία και χρήση ο καθένας.

- Οι *ορθογώνιοι κωδικοί*, οι οποίοι προφανώς και έχουν πλήρης ορθογωνιότητα μεταξύ τους (και συνεπώς μηδενικές παρεμβολές), οι οποίοι όμως είναι πεπερασμένοι και λίγοι σε αριθμό για δεδομένο μήκος κωδικού. Ετσι, αν θέλουμε να υποστηρίξουμε μεγάλο αριθμό χρηστών, θα χρειαστούμε πολλούς κωδικούς και άρα μεγαλύτερο μήκος κωδικών, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη επιβάρυνση (overhead) για τη μετάδοση 1 bit του χρήστη.
- Οι *ημι-ορθογώνιοι κωδικοί*, με πάρα πολύ μεγάλο αριθμό κωδικών για δεδομένο μήκος κωδικού, αλλά υπάρχει με μικρή εναπομείνουσα παρεμβολή μεταξύ κωδικών (καθώς το εσωτερικο γινόμενο μεταξύ δυο κωδικών δεν είναι απόλυτα μηδενικό).

Στα δίκτυα 3G γίνεται χρήση και των δυο ειδών κωδικών ταυτόχρονα (2-layer spreading). Οι ορθογώνιοι κωδικοί συνηθως χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν CDMA κανάλια (γνωστοί ως *channelization codes*, ή *short codes*). Σε ένα δεύτερο επίπεδο, το προκύπτον σήμα κωδικοποιείται με ημι-ορθογώνιο κωδικό για να διαχωριστούν οι χρήστες εντός ενός συχνοτικού καναλιού (γνωστοί ως *scrambling codes*, ή *long codes*).



ΑΣΚΗΣΗ 7

Ένας δέκτης λαμβάνει την ακολουθία συμβόλων (0 0 -2 +2 0 -2 0 +2 -3 -1 -1 +1 +3 +1 +1 -1). Παρακάτω δίνονται οι κωδικοί τριών σταθμών.

A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)

C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)

Ποιοι σταθμοί πραγματοποίησαν μετάδοση και τι μετέδωσε ο καθένας;

Απάντηση

Ο αριθμός συμβόλων στο κωδικό κάθε σταθμού είναι 8, άρα κάθε 8 θραύσματα αντιστοιχούν στη μετάδοση ενός bit χρήστη. Εφόσον η ληφθείσα ακολουθία συμβόλων έχει μήκος 16, αντιστοιχεί σε διάστημα μετάδοσης δυο bit χρήστη.

Για το πρώτο bit έχουμε:

A: $(0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2) \times (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)/8 = 1$. Άρα ο A μετέδωσε δυαδικό 1.

B: $(0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2) \times (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)/8 = -1$. Άρα ο B μετέδωσε δυαδικό 0.

C: $(0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2) \times (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)/8 = 0$. Άρα ο C δεν έκανε μετάδοση.

Για το δεύτερο bit έχουμε:

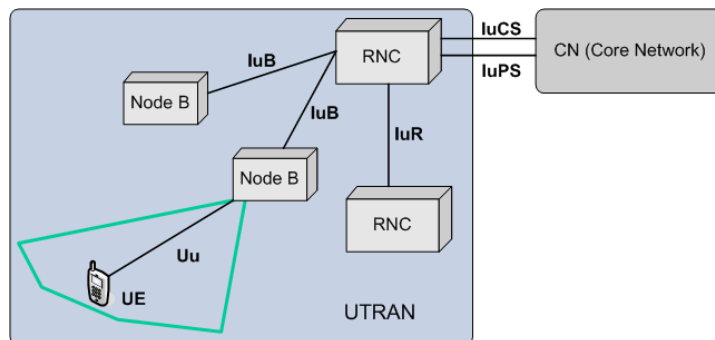
A: $(3 \ -1 \ -1 \ +1 \ +3 \ +1 \ +1 \ -1) \times (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)/8 = 1$. Άρα ο A μετέδωσε δυαδικό 1.

A: $(3 \ -1 \ -1 \ +1 \ +3 \ +1 \ +1 \ -1) \times (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)/8 = 1$. Άρα ο B μετέδωσε δυαδικό 1.

A: $(3 \ -1 \ -1 \ +1 \ +3 \ +1 \ +1 \ -1) \times (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)/8 = 1$. Άρα ο C μετέδωσε δυαδικό 1.

2. WCDMA rel.99

Το πρώτο πρότυπο 3G ανακοινώθηκε από τον οργανισμό 3GPP το 1999 και είναι γνωστό ως *Wideband CDMA (WCDMA) release 99*. Το πρώτο 3G δίκτυο για εμπορική εκμετάλλευση λειτούργησε το 2001 στην Ιαπωνία από τον πάροχο NTT DoCoMo. Ο όρος Wideband (ευρυκαναλικό) υποδεικνύει ότι το συχνοτικό εύρος κάθε καναλιού είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο στη γενιά 2G (5 MHz αντί 200KHz του GSM). Το πρότυπο, επίσης γνωστό με τον όρο *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως 2 Mbps και χρειάζεται απόδοση νέου φάσματος για να λειτουργήσει, καθώς δε μπορεί να χρησιμοποιεί κοινά κανάλια με το GSM λόγω διαφορετικού εύρους. Μπορεί φυσικά να μοιράζεται το ίδιο δίκτυο κορμού με υπάρχοντα 2G συστήματα, όπως το GSM, κάτι που επιτρέπει στους παρόχους την εύκολη εισαγωγή κυψελών 3G σε περιοχές με εγκατεστημένη βάση 2G δικτύων. Στο Σχήμα 5 φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου UMTS, όπου διαπιστώνεται ότι στον κόσμο του 3G κάποιες οντότητες ονομάζονται διαφορετικά (πχ. Radio Network Controller (RNC), αντί για BSC, Node B αντί για BS κτλ). Μια ενδιαφέρουσα διαφορά από το GSM αφορά την κρυπτογράφηση: Ενώ στο GSM κρυπτογραφούνται (προαιρετικά) μόνο οι μεταδόσεις από τα κινητά τερματικά από και προς τον BS, στα δίκτυα 3G κρυπτογραφείται όλο το μονοπάτι από το κινητό τερματικό έως τον RNC. Αυτό γίνεται για αποτροπή υποκλοπής των συνδέσεων RNC-node B, οι οποίες πολύ συχνά υλοποιούνται με ασύρματες μικροκυματικές συνδέσεις.



Σχήμα 5: Η αρχιτεκτονική δικτύου UMTS.

3. Τα επόμενα πρότυπα 3G: Γενιές 3.5G & 3.75G

Μετά τη 1^η έκδοση του UMTS, ακολούθησαν πολλές βελτιώσεις, οι οποίες προσφέρουν πλέον ταχύτητες πολύ μεγαλύτερες από την αρχική απαίτηση της ITU-R για 200 Kbps. Έτσι, τα πρότυπα αυτά αναφέρονται ως γενιάς 3.5 ή και 3.75, καθώς οι προσφερόμενοι ρυθμοί μετάδοσης πλησιάζουν τις απαιτήσεις που θέτουν τα πρότυπα για τα δίκτυα 4G. Το κυριότερο πρότυπο της κατηγορίας αυτής είναι το *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)* και οι βελτιώσεις του (*HSUPA*, *HSPA+* κτλ). Το τελευταίο παρέχει ρυθμούς μετάδοσης έως 84 Mbps (28 σε τρέχοντα εμπορικά συστήματα) στο κατωφρές κανάλι και 22 Mbps στο ανωφές. Μελλοντικά σχέδια (η έκδοση 11 της 3GPP), στοχεύουν σε ρυθμούς περίπου 700 Mbps.

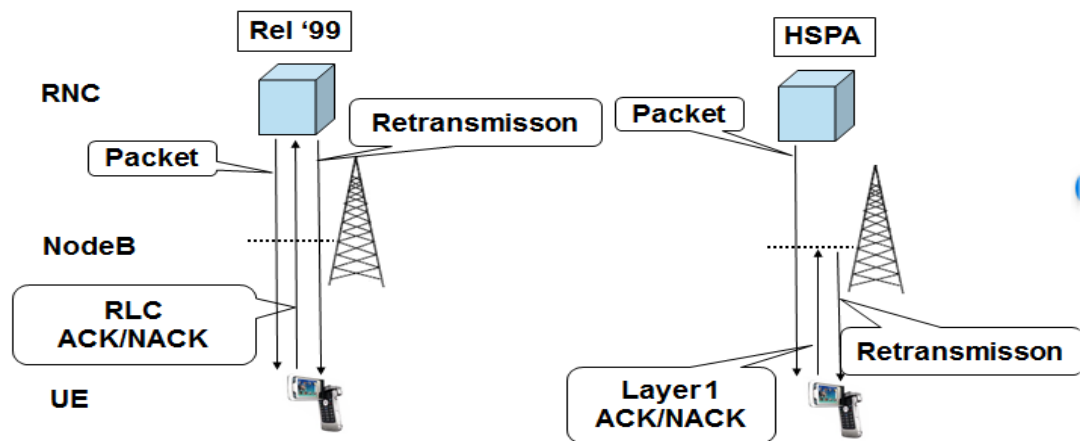
Η αναλυτική περιγραφή των διαφόρων προτύπων 3G είναι πολύ απαιτητική. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια της παραγράφου περιγράφονται οι κυριότερες τεχνολογικές καινοτομίες που τα πρότυπα αυτά εισάγουν και επιτρέπουν έτσι τη παροχή υψηλών ρυθμών μεταφοράς.

Διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης. Χρησιμοποιώντας διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης, μπορεί με την αποστολή ενός συμβόλου να γίνει αποστολή περισσότερων bits. Έτσι, το HSPA υποστηρίζει διαμορφώσεις έως 16 QAM (κάτι που δίνει τη δυνατότητα για μετάδοση μέχρι 4 bits/symbol), ενώ το HSPA+ υποστηρίζει έως και 64 QAM (με δυνατότητα συνεπώς έως 6

bits/symbol). Οι διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης όμως, απαιτούν υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο στο δέκτη. Κατά συνέπεια, όταν οι συνθήκες καναλιού είναι καλές ευνοείται η χρήση διαμόρφωσης μεγάλης τάξης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση γίνεται χρήση πιο απλών διαμορφώσεων (π.χ. QPSK) που μεταφέρουν λιγότερα bits/symbol αλλά είναι ανθεκτικές σε χαμηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο στο δέκτη.

Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Παρόμοια με τη περίπτωση του EDGE, ανάλογα με κατάσταση του καναλιού, εκτίμηση για την οποία μεταφέρει περιοδικά το κινητό τερματικό στον node B, ο node B μεταβάλλει τη μέθοδο διαμόρφωσης αλλά και τον αριθμό των bits που χρησιμοποιούνται για έλεγχο λαθών (FEC bits). Έτσι, όταν η ποιότητα του καναλιού είναι καλή, ο αριθμός των FEC bits μειώνεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων του χρήστη.

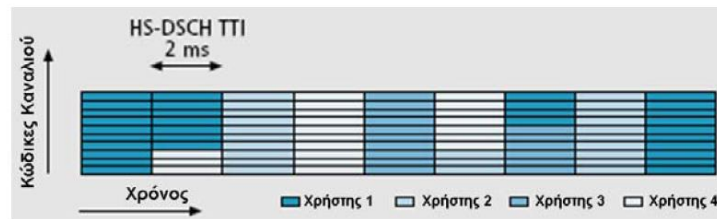
Γρήγορη επανεκπομπή. Σε όλες τις εκδόσεις του HSPA, υπάρχει η δυνατότητα όταν ένα πακέτο δεδομένων ληφθεί με σφάλματα στο κινητό τερματικό να γίνει γρήγορη επανεκπομπή πακέτου, απευθείας από τον node B και όχι από το RNC, κάτι που συμβαίνει υποχρεωτικά στο WCDMA rel.99. Η γρήγορη επανεκπομπή (Σχήμα 6) μειώνει προφανώς το χρόνο για τη λήψη του πακέτου στο κινητό τερματικό.



Σχήμα 6: Επανεκπομπή στο WCDMA rel.99 και γρήγορη επανεκπομπή στο HSPA.

Μικρότερο διάστημα μετάδοσης (transmission time interval, TTI). Το TTI είναι η ελάχιστη διάρκεια μετάδοσης στο κανάλι. Ουσιαστικά καθορίζει το ελάχιστο μέγεθος πακέτου. Στο HSPA και τα μετέπειτα 3G πρότυπα, το TTI έχει τιμή 2msec, σε αντίθεση με το WCDMA rel.99, όπου κυμαίνεται από 10 80 msec. Καθώς σε κάθε TTI ο node B επιλέγει σε ποιο τερματικό θα γίνει μετάδοση πάνω από κάθε συχνοτικό κανάλι, μικρότερο TTI δίνει τη δυνατότητα στο node B να κάνει γρηγορότερα προσαρμογή στη μεταβαλλόμενη κατάσταση των ασυρμάτων καναλιών με τα οποία εξυπηρετεί τα κινητά τερματικά, ένα πλεονέκτημα που είναι γνωστό ως *γρήγορος προγραμματισμός τερματικού (fast node scheduling)*. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη χωρητικότητα. Λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης των συνθηκών σε μία κυψέλη, υπάρχει σχεδόν πάντα ένας χρήστης του οποίου η ποιότητα καναλιού είναι βέλτιστη. Το κέρδος προκύπτει από τη μετάδοση δεδομένων σε χρήστες με ιδανικές συνθήκες και είναι μεγαλύτερο όσο περισσότεροι είναι οι εξυπηρετούμενοι χρήστες. Βέβαια, προκύπτει το ζήτημα της δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες, καθώς μπορεί να ενθαρρύνεται η μετάδοση σε συγκεκριμένους χρήστες, οι οποίοι έχουν συνεχώς ευνοϊκές συνθήκες (πχ. είναι κοντά στον node B), έτσι ώστε να αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Επομένως, ο αλγόριθμος scheduling θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του και τη δικαιοσύνη στην εξυπηρέτηση των τερματικών.

Νέο διαμοιραζόμενο κανάλι μεταφοράς: High Speed-Downlink Shared Channel (HS-DSCH). Η χρήση του καναλιού αυτού ωφελεί καθώς οι κώδικες καναλιού και η ισχύς εκπομπής σε μια κυψέλη θεωρούνται μια κοινή πηγή που μοιράζεται δυναμικά στο χρόνο μεταξύ των κινητών τερματικών ανάλογα με τις ανάγκες τους για εύρος ζώνης στο κατωφρές κανάλι (Σχήμα 7). Ένα τερματικό μπορεί να χρησιμοποιήσει μέχρι 15 κώδικες υλοποιώντας έτσι έως 15 παράλληλα downlink κανάλια.



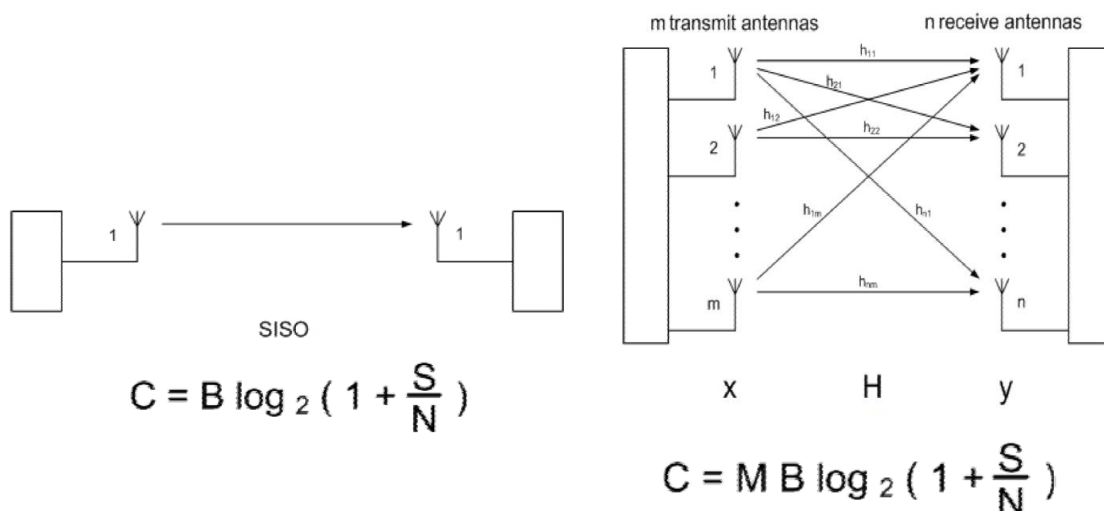
Σχήμα 7: Διαμοιρασμός κωδίκων στο χρόνο στο κανάλι HS-DSCH.

Hybrid ARQ (H-ARQ) μεταξύ τερματικού – nodeB. Όταν έχουμε γρήγορη επαναμετάδοση, το HSPA και τα επόμενα πρότυπα υποστηρίζουν τις ακόλουθες μεθόδους επαναμετάδοσης (ARQ), οι οποίες περιγράφονται με αύξουσα σειρά απόδοσης.

- **Απλό ARQ.** πλεονάζοντα bits τοποθετούνται στο προς μετάδοση μήνυμα με κάποιον error-detecting code (π.χ CRC). Εάν με τη βοήθεια του κώδικα ο αποδέκτης διαπιστώσει εσφαλμένο πακέτο, ζητάει επαναμετάδοση του. Πρόκειται για τη κλασική μέθοδο ARQ.
- **Hybrid ARQ Type 1.** Τα προς μετάδοση δεδομένα κωδικοποιούνται με ένα error detecting code και στη συνέχεια με έναν error-correcting code που διορθώνει ορισμένα πιθανά σφάλματα. Αν ο αποδέκτης εντοπίσει σφάλμα με τον error correcting code το διορθώνει. Εάν αποτύχει στη διόρθωση, ανιχνεύει το εσφαλμένο πακέτο και ζητάει επαναμετάδοση (ομοία με ARQ). Η μέθοδος αυτή έχει καλύτερη απόδοση από το απλό ARQ σε ενθόρυβο κανάλι λόγω λιγότερων επανεκπομπών. Σε αθόρυβο κανάλι έχει χειρότερη απόδοση, λόγω της επιβάρυνσης από τα bits του error correcting code.
- **Hybrid ARQ Type 2.** Τα προς μετάδοση δεδομένα κωδικοποιούνται με ένα error detecting code (φάση A, χρησιμοποιεί λίγα κωδικά bits) και στη συνέχεια με έναν error-correcting code (φάση B, χρησιμοποιεί πολλά κωδικά bits) που διορθώνει ορισμένα πιθανά σφάλματα. Το μήνυμα μεταδίδεται μετά τη φάση A. Αν ο αποδέκτης ανιχνεύσει σφάλμα, ο αποστολέας στέλνει μήνυμα με τα κωδικά bits του error-correcting code. Αν η διόρθωση αποτύχει, μεταδίδει ξανά το μήνυμα (όπως στο απλό ARQ). Η μέθοδος αυτή έχει καλύτερη απόδοση από την type 1 HARQ λόγω λιγότερων δεδομένων που επανεκπέμπονται (phase 2 bits vs entire message). Σε αθόρυβο κανάλι έχει απόδοση παρόμοια με την απλή ARQ, εφόσον ποτέ δε μεταδίδονται bits του error detecting code. Σε ενθόρυβο κανάλι η απόδοσή της είναι παρόμοια με εκείνη της χρήσης error correction.
- **Hybrid ARQ Type 2 with soft combining.** Αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης μεθόδου. Κάθε επαναμετάδοση περιέχει διαφορετικά ECC bits που αφορά το ίδιο σύνολο bits δεδομένων. Μεταδόσεις διαδοχικών ECC bits χρησιμοποιούνται μέχρι να επιτευχθεί διόρθωση του σφάλματος.

Συνάθροιση καναλιών (carrier aggregation). Η μέθοδος αυτή ξεκίνησε να υποστηρίζεται στο κατωφές κανάλι στο πρότυπο HSPA+ rel. 8 και στο ανωφές κανάλι στο HSPA+ rel. 9. Αυτό που κάνει είναι η συνένωση δυο 5 MHz 3G καναλιών σε ένα των 10 MHz. Τα κανάλια αυτά μπορεί να είναι συχνοτικά γειτονικά (HSPA+ rel. 8) ή όχι (HSPA+ rel. 9). Στην έκδοση HSPA+ rel.10 υποστηρίζεται συνάθροιση έως 4 καναλιών σε ένα των 20 MHz, ενώ στην έκδοση 11 γίνεται λόγος για συνάθροιση έως 8 καναλιών, σε ένα κανάλι των 40 MHz.

Multiple Input Multiple Output (MIMO). Η τεχνολογία MIMO έχει εφαρμοστεί και σε άλλα ασύρματα δίκτυα (πχ IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac). Στο HSPA+ υποστηρίζεται από την έκδοση 7 και μετά. Η λογική της συνίσταται στο ότι ο πομπός και ο δέκτης διατηρούν από ένα αριθμό στοιχειοκεραίων. Ο πομπός πραγματοποιεί μετάδοση διαφορετικών ροών δεδομένων από κάθε στοιχειοκεραία ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα. Λόγω του φαινομένου της χωρικής επαναχρησιμοποίησης, οι ροές αυτές μπορεί να ληφθούν στο δέκτη, αν εκείνος έχει τουλάχιστο τον αριθμό στοιχειοκεραίων του πομπού. Ο αριθμός διαφορετικών ροών δεδομένων περιορίζεται από τον ελάχιστο αριθμό κεραιών στις δύο πλευρές της σύνδεσης. Ένα σύστημα MIMO χαρακτηρίζεται από τη συντομογραφία $m \times n:k$, όπου a ο μέγιστος αριθμός στοιχειοκεραίων του πομπού, b ο μέγιστος αριθμός στοιχειοκεραίων του δέκτη και c ο μέγιστος αριθμός ταυτόχρονων ροών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8, το τελικό αποτέλεσμα είναι ο πολλαπλασιασμός της χωρητικότητας C του καναλιού, η οποία δίνεται ως γνωστό από το νόμο του Shannon, με τον παράγοντα k . Το HSPA+ υποστηρίζει έως 4×4 στην έκδοση 11.



Σχήμα 8: Συστήματα Single Input Single Output (SISO) και Multiple Input Multiple Output (MIMO).

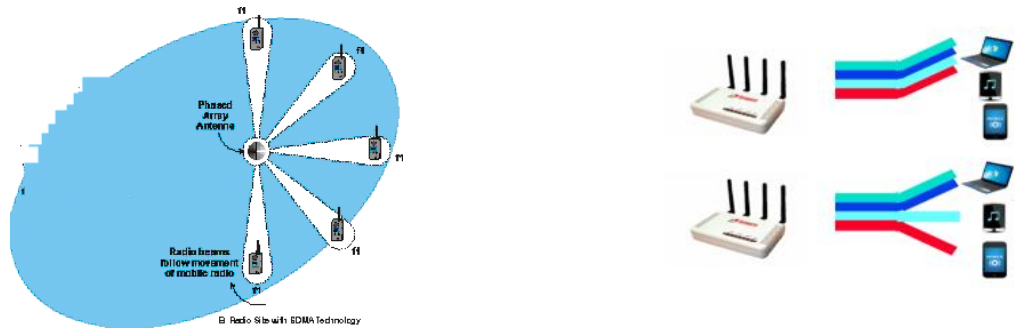


Επισήμανση

Σύμφωνα με το νόμο του Shannon, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης C που μπορεί να επιτευχθεί πάνω από ένα κανάλι εύρους ζώνης B , όταν ο λόγος σήματος προς θόρυβο στο δέκτη είναι S/N , δίνεται από τη σχέση $C = \log_2 B \left(1 + \frac{S}{N} \right)$. Πρόκειται για όριο που σπάνια επιτυγχάνεται, επειδή ο νόμος του Shannon λαμβάνει υπόψη του μόνο το θερμικό θόρυβο.

Beamforming και χωρική πολλαπλή πρόσβαση. Υποστηρίζεται στο HSPA+ rel. 7 και μετά. Πρόκειται για βελτίωση των κατευθυντικών κεραιών των 2G δικτύων. Στο beamforming, συστοιχίες κεραιών δημιουργούν κατευθυνόμενες δέσμες, οι οποίες ακολουθούν τους

χρήστες κατά τη κίνηση τους. Συνεπώς, όπως φαίνεται και στο δεξιό μέρος του Σχήματος 9α, μπορεί να υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση προς πολλά κινητά τερματικά πάνω από το ίδιο συχνοτικό κανάλι με τον ίδιο κώδικα. Το beamforming μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με τη MIMO για το διαμοιρασμό πόρων ενός beamformed καναλιού σε πολλούς χρήστες (Σχήμα 9β).



Σχήμα 9: α) Η μετάδοση με beamforming, β) συνδυασμός beamforming και MIMO.

Ενότητα 4: Κυψελοειδή δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G)

Τα κυψελοειδή δίκτυα 4G αποτελούν την νεότερη εξέλιξη. Οι απαιτήσεις από αυτά έχουν καθορισθεί στη δυνατότητα παροχής ρυθμών 100 Mbps σε χρήστες υψηλής κινητότητας (π.χ. επιβάτες σε τρέινα, αυτοκίνητα κτλ) και 1 Gbps σε σταθερούς, η χαμηλής κινητότητας, χρήστες. Σημειώνεται ότι παρά το γεγονός ότι στις μέρες μας διαφημίζονται πολλές εγκαταστάσεις κυψελοειδών δικτύων ως 4G, κάτι τέτοιο δεν ισχύει με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές. Είναι όμως γενικά αποδεκτή πρακτική, καθώς υπάρχουν τεχνολογίες που δε καλύπτουν τις προδιαγραφές 4G, αλλά προσφέρουν πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μεταφοράς από εκείνους των 3G δικτύων. Παράδειγμα τέτοιων τεχνολογιών είναι η κατηγορίας 3.9G περίπτωση του *Long Term Evolution (LTE) Release 8* και ορισμένες εκδόσεις του IEEE 802.16. Ενδεικτικά, το LTE Release 8 επιτυγχάνει έως 100 Mbps στο κατωφერές κανάλι (έως 300 Mbps με χρήση MIMO) και 50 Mbps στο ανωφერές κανάλι.

Τα δύο πρότυπα τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις ώστε να χαρακτηριστούν ως πρότυπα 4G είναι τα ακόλουθα:

- ✓ *LTE Advanced (LTE Release 10)*. Το πρότυπο προδιαγράφει ρυθμούς μεταφοράς 1 Gbps και 500 Mbps σε κατωφερή και ανωφερή σύνδεση αντίστοιχα. Αποτελεί βελτίωση του υπάρχοντος 3.9G LTE (LTE Release 8) με αποτέλεσμα να είναι οικονομική επιλογή για ένα πάροχο ο οποίος μπορεί με μικρές αλλαγές να αναβαθμίσει το δίκτυο του από LTE Release 8 σε LTE Advanced. Η πρώτη εμπορική λειτουργία δικτύου LTE Advanced έγινε στις αρχές του 2012.
- ✓ *Wireless MAN Advanced (IEEE 802.16m)*. Αναμένονται ρυθμοί μεταφοράς έως 1 Gbps και 100 Mbps σε κατωφερή και ανωφερή σύνδεση αντίστοιχα. Αποτελεί εξέλιξη του IEEE 802.16e (Mobile WiMAX), το οποίο προσφέρει 128 Mbps και 56 Mbps σε κατωφερή και ανωφερή σύνδεση αντίστοιχα.

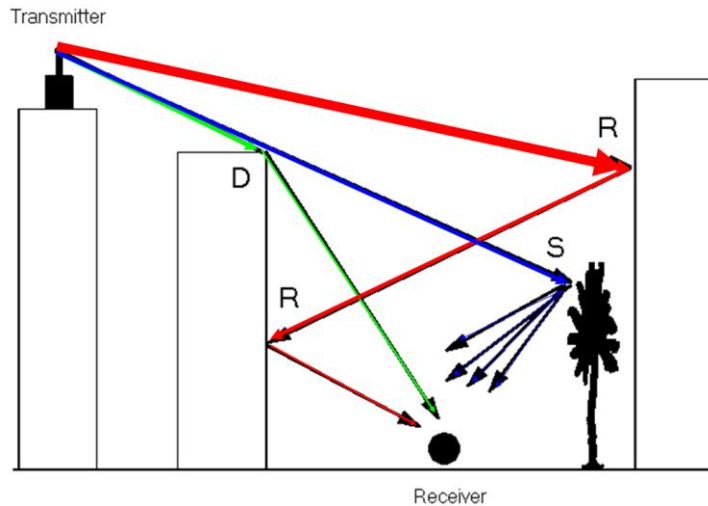
Τα κυψελοειδή δίκτυα 4G είναι πλήρως βασισμένα στο IP και χρησιμοποιούν μόνο μεταγωγή πακέτου. Συνεπώς, σε αντίθεση με τις τεχνολογίες 2G και 3G, όπου οι κλήσεις φωνής υποστηριζόταν με αφοσιωμενο (dedicated) εύρος ζώνης για κάθε κλήση μέσω μεταγωγής κυκλώματος, στα δίκτυα 4G η κίνηση από τη φωνητική κλήση θα ανταγωνίζεται για πόρους στο δίκτυο με όλες τις άλλες εφαρμογές που τρέχουν στα κινητά τερματικά. Σε αναλογία με το VoIP, η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως VoLTE. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι επί του παρόντος, ακόμη και αν είμαστε συνδεδεμένοι σε ένα δίκτυο 4G, οι φωνητικές κλήσεις μας εξυπηρετούνται μέσω των παλιότερων υφιστάμενων 2G & 3G δικτύων.

Και τα δύο 4G πρότυπα βασίζονται στη μέθοδο *Πολλαπλής Πρόσβασης με Ορθογωνική Διάρθρωση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)*. Στην ίδια μέθοδο βασίζονται και όλες οι εκδόσεις του LTE πριν την 10, οι οποίες είναι γενιάς 3.9G. Μετά από μια σύντομη εισαγωγή σε προαπαιτούμενα, η μέθοδος αυτή περιγράφεται στη συνέχεια.

1. Γιατί OFDM;

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία προκαλούνται από μια ασύρματη μετάδοση επηρεάζονται από μια σειρά μηχανισμούς, που οφείλονται στα εμπόδια που υπάρχουν στο περιβάλλον διάδοσης (πχ κτίρια, βουνά, φύλλα δέντρων κτλ). Οι τρεις μηχανισμοί, *ανάκλαση*, *διασπορά* και *περίθλαση* καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη. Ανάκλαση συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα πέσει πάνω σε ένα αντικείμενο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές του μήκους κύματος του. Διασπορά συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο με διαστάσεις της ίδιας

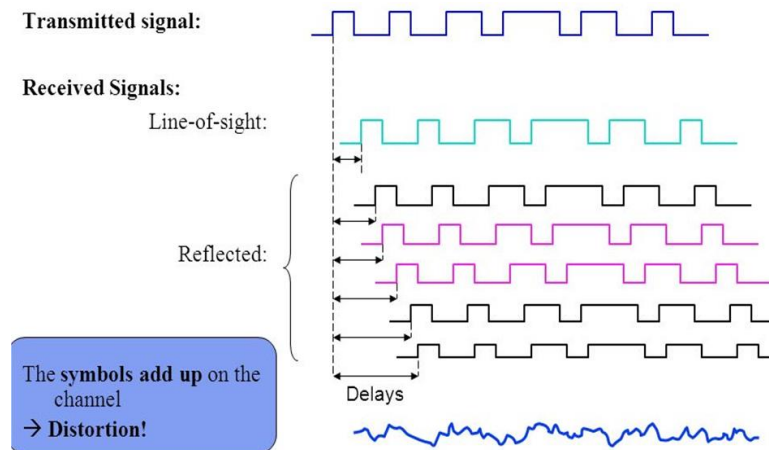
τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί τη διάχυση της ενέργειας του κύματος προς πολλές κατευθύνσεις και είναι το πιο δύσκολο στη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του. Τέλος, η περίθλαση, γνωστή επίσης και ως σκίαση, λαμβάνει χώρα όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αδιαπέραστο αντικείμενο. Στη περίπτωση αυτή, δευτερεύοντα κύματα παρατηρούνται στην άλλη πλευρά του αντικειμένου παρά την έλλειψη οπτικής επαφής με τον πομπό από το σημείο αυτό. Οι μηχανισμοί ανάκλασης, περίθλασης και διασποράς φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Ανάκλαση (R), περίθλαση (D) και διασπορά (S).

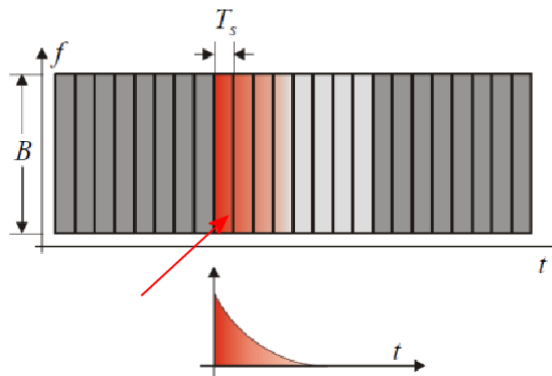
Σε ένα ασύρματο κανάλι το σήμα που ταξιδεύει από τον πομπό στο δέκτη μπορεί να ανακλαστεί από πλήθος εμποδίων (π.χ. κτίρια λόφοι) που συναντά στο μονοπάτι διάδοσης του με αποτέλεσμα να φτάνουν περισσότερες από μια συνιστώσες του σήματος στον δέκτη, κάθε ένα από τα οποία έχει διανύσει διαφορετικό μονοπάτι και συνεπώς διαφορετική απόσταση. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *πολύδρομη διάδοση (multipath propagation)* και μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές στη λαμβανόμενη ισχύ του σήματος στο δέκτη. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι ορισμένες συνιστώσες φτάνουν καθυστερημένα στο δέκτη καθώς έχουν διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από τη κύρια συνιστώσα. Ουσιαστικά αποτελούν λοιπόν θόρυβο και προκαλούν μικρής κλίμακας μεταβολές στη λαμβανόμενη ισχύ. Στη περίπτωση που κάποιες συνιστώσες φτάσουν πάνω από μονοπάτια με διαφορά μήκους πολλαπλάσια του μισού μήκους κύματος, τότε το συνολικό σήμα στο δέκτη καταστέλλεται μερικά ή και ολικά. Το χρονικό διάστημα μεταξύ της λήψης της πρώτης και της τελευταίας συνιστώσας ονομάζεται *επέκταση καθυστέρησης (delay spread)* του καναλιού.

Η πολύδρομη διάδοση μπορεί να οδηγήσει κατά τη διαδικασία ανίχνευσης ενός συμβόλου σε παρουσία ενέργειας στο δέκτη από συνιστώσα που αφορά προηγούμενο σύμβολο, κάτι το οποίο έχει αρνητικές επιπτώσεις στην λήψη του σήματος. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *Διασυμβολική Παρεμβολή (InterSymbol Interference, ISI)* και εμφανίζεται όταν η επέκταση καθυστέρησης είναι συγκρίσιμη με το χρόνο συμβόλου. Το αποτέλεσμα της διασυμβολικής παρεμβολής είναι σημαντικά αρνητικό στη λαμβανόμενο σήμα, λόγω παρεμβολής που προκαλεί η ενέργεια διαδοχικών συμβόλων μεταξύ αυτών. Ένα παράδειγμα διασυμβολικής παρεμβολής φαίνεται στο Σχήμα 11, όπου γίνεται εμφανές ότι λόγω των 4 καθυστερημένων συνιστωσών, ο δέκτης δε μπορεί να ανακτήσει το σήμα που του έστειλε ο πομπός.



Σχήμα 11: Διασυμβολική παρεμβολή.

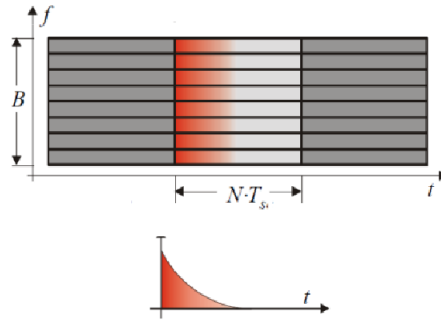
Το πρόβλημα της διασυμβολικής παρεμβολής γίνεται σημαντικό, όταν το κανάλι έχει μεγάλο ρυθμό μεταφοράς. Αυτό συμβαίνει επειδή ένας μεγάλος ρυθμός μεταφοράς (πολλά bps) μεταφράζεται σε μικρότερο χρόνο συμβόλου, ο οποίος όταν γίνει συγκρίσιμος με την επέκταση καθυστέρησης, η διασυμβολική παρεμβολή αρχίζει να έχει σημαντική επίδραση. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 12, στο κάτω μέρος του οποίου φαίνεται η επέκταση καθυστέρησης (ισχύς καθυστερημένων συνιστωσών ως προς το χρόνο) και στο πάνω μέρος του η επίδραση της επέκτασης καθυστέρησης της ενέργειας του σημασμένου συμβόλου στα γειτονικά του, όταν η διάρκεια συμβόλου (T_s) είναι μικρή σε σχέση με την επέκταση καθυστέρησης.



Σχήμα 12: Διασυμβολική παρεμβολή.

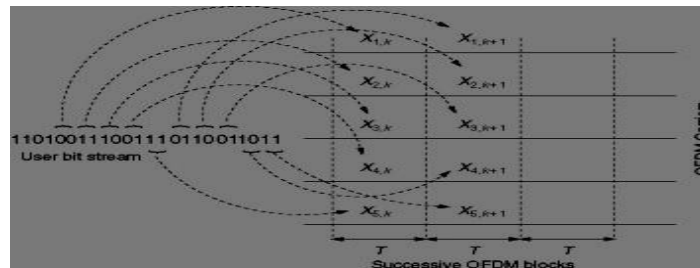
2. OFDM & OFDMA

Μια απλή και αποδοτική λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η μέθοδος OFDM. Σύμφωνα με αυτή, θα διαιρέσουμε το μεγάλο εύρος ζώνης ενός καναλιού, σε σειρά υποκαναλιών μικρότερου εύρους ζώνης. Η λογική πίσω από αυτό είναι ότι λόγω μικρότερου εύρους, κάθε υποκανάλι θα έχει μειωμένο ρυθμό μετάδοσης με αποτέλεσμα ο χρόνος συμβόλου του να αυξάνεται πολύ σε σχέση με την επέκταση καθυστέρησης και έτσι το υποκανάλι δε θα επηρεάζεται από διασυμβολική παρεμβολή, κάτι που φαίνεται και στο Σχήμα 13 ως συνέχεια του Σχήματος 12, όπου με τη διαίρεση του εύρους ζώνης ο χρόνος συμβόλου σε κάθε υποκανάλι πολλαπλασιάστηκε επί n .

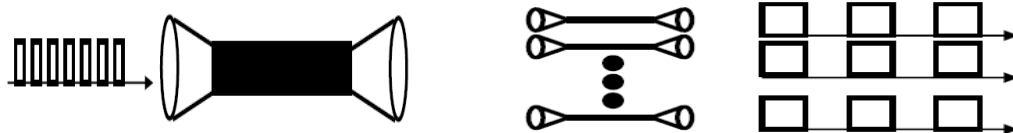


Σχήμα 13: Διασυμβολική παρεμβολή σε ένα OFDM υποκανάλι.

Με λίγα λόγια, 10 κανάλια των 100 KHz είναι καλύτερα από ένα του 1 MHz. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, κάθε υποκανάλι μεταφέρει διαφορετική ροή δεδομένων και διαμορφώνεται ανάλογα με τη ποιότητά του στο δέκτη με μια μέθοδο διαμόρφωσης από BPSK, QPSK, 64-QAM. Το Σχήμα 15 δείχνει μια αναπαράσταση της λογικής του OFDM σε σχέση με την υψίρρυθμη μετάδοση όπου όλο το εύρος ζώνης χρησιμοποιείται από ένα κανάλι.

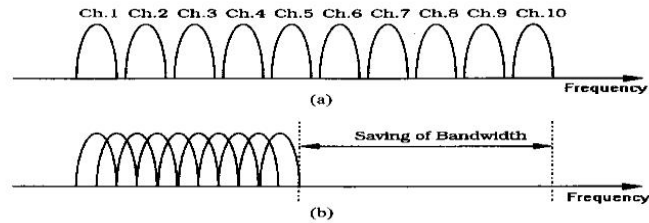


Σχήμα 14: Πολυκαναλική μεταφορά δεδομένων



Σχήμα 15: Μονοκαναλική και πολυκαναλική μετάδοση πάνω από το ίδιο εύρος ζώνης.

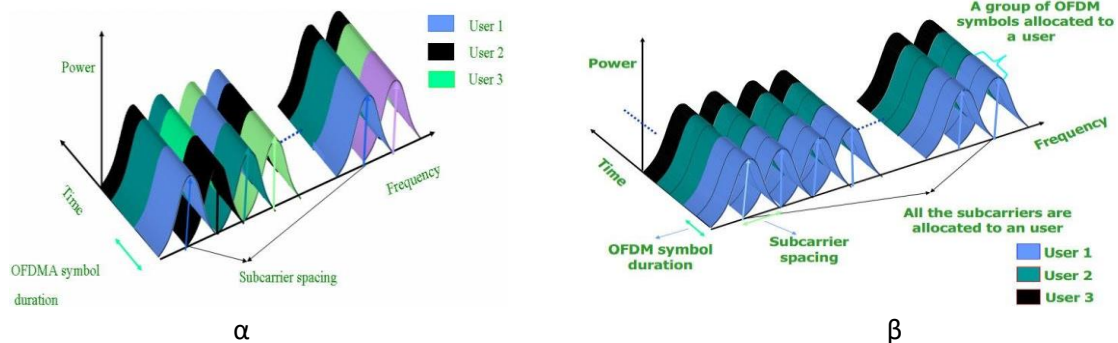
Στα συστήματα που λειτουργούν με OFDM, κάθε συχνοτικό κανάλι χωρίζεται σε τουλάχιστο 256 υποκανάλια. Για να εξοικονομηθεί εύρος ζώνης σε σχέση με την απλή *Πολύπλεξη Συχνότητας (FDM)*, τα φάσματα των υποκαναλιών επικαλύπτονται χωρίς όμως παρεμβολές μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή τα υποκανάλια είναι ορθογώνια μεταξύ τους στη συχνότητα, κάτι που σημαίνει ότι στη κεντρική συχνότητα κάθε υποκαναλιού δεν υπάρχουν συχνοτικές συνιστώσες από γειτονικά του. Ένα παράδειγμα OFDM φαίνεται στο Σχήμα 16, από το οποίο επίσης φαίνεται εύκολα η εξοικονόμηση σε εύρος ζώνης που προκύπτει σε σχέση με την απλή FDM.



Σχήμα 16: FDM vs OFDM.

Η διάσπαση σε υποκανάλια δίνει ένα νέο πεδίο για ανάθεση πόρων. Με απλά λόγια, ένας πομπός μπορεί να χρησιμοποιεί για μια μετάδοση του αριθμού υποκαναλιών ανάλογο του ρυθμού μετάδοσης που θέλει να πετύχει. Έτσι, έχουμε μια μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης στα διαθέσιμα υποκανάλια, η οποία είναι γνωστή ως OFDMA. Την ανάθεση αναλαμβάνει ένα σύνολο μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού, οι οποίες στα δίκτυα LTE εκτελούνται στο BS της κυψέλης, το οποίο στην ορολογία του LTE είναι γνωστό ως *enhanced Node B (eNode B)*. Στα κινητά τερματικά ανατίθενται *resource blocks*, με 1 block να αποτελείται από 12 υποκανάλια για 1 χρονική σχισμή (time slot).

Λόγω υπολογιστικής πολυπλοκότητας της μεθόδου, εφαρμόζεται μόνο στη κατωφερή σύνδεση στα δίκτυα LTE, ενώ στην ανωφερή κάθε κινητό τερματικό χρησιμοποιεί όλο το κανάλι (όλα δηλ. τα υποκανάλια του). Η τελευταία μέθοδος είναι γνωστή ως *OFDMA μονού καναλιού (Single Carrier OFDMA, SC-OFDMA)*. Στο Σχήμα 17, φαίνονται παραδείγματα των δύο μεθόδων, σε ένα σύστημα με 3 τερματικά που έχουν δεδομένα προς μετάδοση.



Σχήμα 17: α) OFDMA & β) SC-OFDMA.

Σημειώνεται ότι στο downlink κάποια υποκανάλια δε χρησιμοποιούνται ποτέ για λήψη δεδομένων από το τερματικό, επειδή είναι αφιερωμένα στην εκτίμηση της ποιότητας της σύνδεσης. Τα υποκανάλια αυτά είναι γνωστά ως *πυλότοι (pilot subchannels)*. Τέλος, μια ενδιαφέρουσα διαφορά μεταξύ LTE και IEEE 802.16m είναι ότι το τελευταίο εφαρμόζει OFDMA και στην ανωφερή σύνδεση.

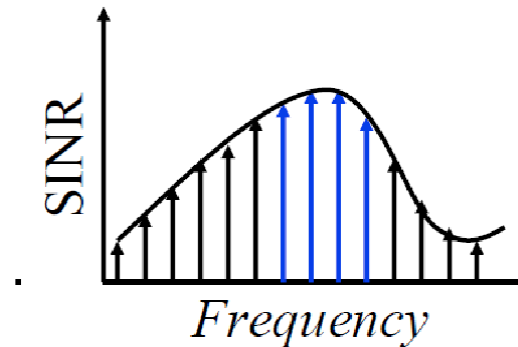
Στη συνέχεια της Ενότητας 5 περιγράφονται οι κύριες τεχνολογικές καινοτομίες των δικτύων LTE και στο τέλος της τα νέα χαρακτηριστικά του LTE Advanced.

3. Καινοτομίες LTE

Υποστήριξη αποκλειστικά υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δίκτυα LTE χρησιμοποιούν μόνο μεταγωγή πακέτου. Όλη η κίνηση μεταφέρεται με το πρωτόκολλο IP.

Επίπεδη αρχιτεκτονική δικτύου πρόσβασης. Η αρχιτεκτονική του LTE είναι επίπεδη, καθώς το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από ένα μόνο είδος κόμβου (eNodeB) (σε αντίθεση πχ με το GSM όπου υπήρχαν BS, BSC, κλπ.).

Δυναμική ανάθεση υποκαναλιών. Ο eNodeB κάνει δυναμική ανάθεση υποκαναλιών για κάθε κινητό τερματικό με βάση το θόρυβο που βλέπει σε καθένα από αυτά το τερματικό. Έτσι, κάθε χρήστης παίρνει τα «καλύτερα» υποκανάλια ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοσή τους. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 18, όπου φαίνεται η ανάθεση υποκαναλιών σε ένα κινητό τερματικό με το καλύτερο δυνατό SNR, όταν το τερματικό ζητάει 4 υποκανάλια.



Σχήμα 18: Δυναμική ανάθεση υποκαναλιών.

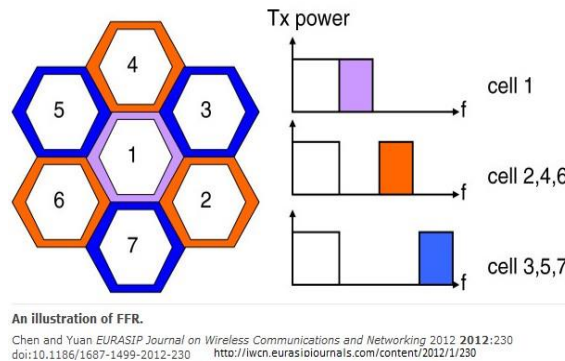
Επέκταση καινοτομιών που εισήγαγε το HSPA+. Υποστηρίζεται:

- Συνάθροιση καναλιών, έως 1.4/3/5/10/15/20 MHz.
- Τρόποι λειτουργίας FDD, TDD, για χρήση paired και unpaired φάσματος.
- 4x4 MIMO.
- Beamforming στο κατωφερές κανάλι.
- Διαμόρφωση: OFDM με QPSK, 16 QAM ... 64 QAM.
- Hybrid ARQ.
- Μικρό TTI (1 ms vs 2ms στο HSPA).
- Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση κάθε υποκαναλιού ανάλογα με θόρυβο.
- Vertical handovers: 2G/3G/4G.

Αποφυγή παρεμβολών. Όπως και τα cdma-based δίκτυα 3G, το LTE λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας 1:1. Η πρόσβαση σε ολόκληρο το φάσμα προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση συνολικά αλλά οδηγεί σε παρεμβολές σε χρήστες στα όρια της κυψέλης. Για τη μείωση των παρεμβολών, μπορεί να υπάρξει συντονισμός μεταξύ των κελιών, αποφεύγοντας τη ταυτόχρονη χρήση φάσματος από τερματικά στα άκρα γειτονικών κυψελών. Παράδειγμα τέτοιου συντονισμού φαίνεται στο Σχήμα 19. Τρεις τρόποι συντονισμού είναι δυνατοί:

- Στατικός: κατανέμει πόρους μία φορά βάση παρελθόντων παρατηρήσεων, και δεν υφίσταται ανακατανομή.
- Ημιστατικός: εξετάζει και καταναλώνει πόρους περιοδικά για μεγάλες αλλαγές στις συνθήκες φόρτου. Η περίοδος είναι της τάξης των ωρών.

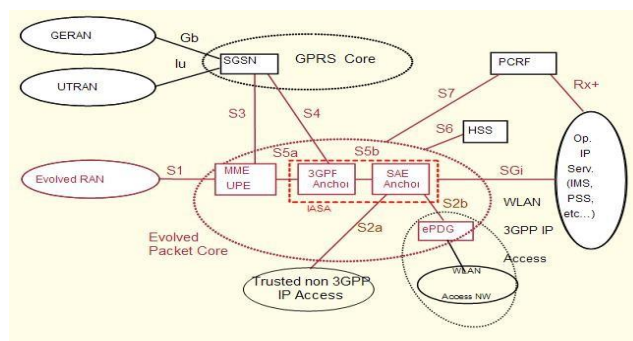
- Δυναμικός: οι eNodeBs επικοινωνούν συνεχώς προκειμένου να προσαρμόζονται σε νέες συνθήκες.



Σχήμα 19: Συντονισμός κυψελών για αποφυγή παρεμβολών.

Νέο δίκτυο κορμού 4G (Evolved Packet Core). Το EPC φαίνεται στο Σχήμα 20. Αποτελείται από τα ακόλουθα είδη κόμβων:

- MME (Mobility Management Entity): Ο βασικός κόμβος ελέγχου για πρόσβαση στο δίκτυο LTE. Αρμόδιο για την παρακολούθηση της κατάστασης των κινητών τερματικών (UE).
- S-GW (Serving Gateway): Δρομολογεί τα πακέτα δεδομένων.
- P-GW (Packet Data Network Gateway): Συνδεει τα MS προς στα εξωτερικά δίκτυα.
- Policy and Charging Resource Function(PCRF): Υπεύθυνο για την Πολιτική και τον Έλεγχο Χρέωσης.
- Home Subscription Server (HSS): αντίγραφο του προφίλ του συνδρομητή (πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που ισχύουν για το χρήστη).



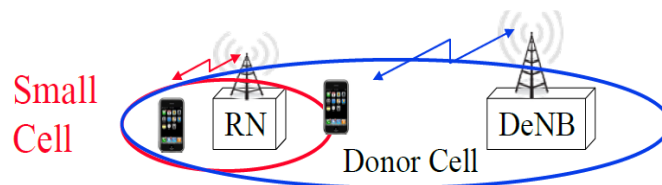
Σχήμα 20: Δίκτυο κορμού 4G.

4. Καινοτομίες LTE Advanced

Συνάθροιση καναλιών. Έως 100 MHz (έως 20 MHz στο LTE). Για ένα κινητό τερματικό, η συνάθροιση στο κατωφρεές κανάλι είναι ανεξάρτητη από εκείνη στο ανωφρεές. Τα κανάλια μπορεί που συναθροίζονται μπορεί να είναι συνεχόμενα ή όχι στη συχνότητα, επιτρέποντας την εκμετάλλευση απομονωμένου φάσματος. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα για τους παρόχους καθώς τους απαλλάσσει από την ανάγκη να αποκτήσουν ένα μεγάλο μέρος διαδοχικού

φάσματος, δίνοντας τους απλά τη δυνατότητα να συνδυάσουν μέρη του φάσματος που ήδη κατέχουν για να υλοποιήσουν τη συνάρθρωση.

Κόμβοι αναμετάδοσης (relay nodes). Πρόκειται για eNodeBs χαμηλής εμβέλειας. Χρησιμοποιούνται για βελτίωση της ποιότητας λήψης στα όρια των μακροκυψελών του LTE, σε εσωτερικό χώρο και για τη δημιουργία hot-spots. Το Σχήμα 21 δείχνει μια μακροκυψέλη στην οποία ένα relay node αναλαμβάνει τις κατωφερείς μεταδόσεις προς το κινητό τερματικό ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα λήψης καθώς το τελευταίο είναι στα όρια της μακροκυψέλης. Ο eNodeB, ο οποίος στη περίπτωση αυτή ονομάζεται *δωρητής (Donor) eNodeB (DeNB)* και το relay node μπορούν να κάνουν χρήση των ίδιων ή διαφορετικών συχνοτήτων. Στη πρώτη περίπτωση, η μετάδοση του relay μπορεί να παρεμβάλει με εκείνη του eNodeB τη λήψη από τον eNB, κάτι που μπορεί να αποφευχθεί με συντονισμό τους για αποφυγή ταυτόχρονων μεταδόσεων.



Σχήμα 21: Κόμβος αναμετάδοσης.

Περεταίρω υποστήριξη MIMO. Υποστηρίζεται MIMO έως 8x8 στο κατωφερές κανάλι και έως 4x4 στο ανωφερές.

Διακυψελική συνεργασία, Coordinated multipoint (CoMP). Στοχεύει σε

- Βελτίωση απόδοσης στο κατωφερές κανάλι στην άκρη της κυψέλης. Για να γίνει αυτό εφικτό, οι eNodeBs σε γειτονικές κυψέλες συντονίζουν τις μεταδόσεις τους. Υπάρχουν δυο δυνατές μέθοδοι, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 22.
 1. *Joint Transmission:* Οι eNodeBs μεταδίδουν ταυτόχρονα την ίδια πληροφορία προς το τερματικό, με αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος λήψης σε αυτό.
 2. *Dynamic Point Selection:* Οι γειτονικές κυψέλες δε μεταδίδουν ταυτόχρονα (ώστε να μη παρεμβάλει η μια στη μετάδοση της άλλης προς το κινητό τερματικό).
- Βελτίωση απόδοσης στο ανωφερές κανάλι στην άκρη της κυψέλης. Η μετάδοση του κινητού τερματικού λαμβάνεται από τα παρακείμενα eNodeBs τα οποία συνεργατικά αποκωδικοποιούν τη λήψη.



Σχήμα 22: Joint Transmission & Dynamic Point Selection.