

Σύγχρονα Δίκτυα και Διασύνδεση ΔτΠ

Σκουτας Δημητρης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών &
Επικοινωνιακών Συστημάτων
Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (1)

- Το **Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things - IoT)** είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που στοχεύει στην χρήση του διαδικτύου ως μια κοινή **διεπαφή** για την διασύνδεση «έξυπνων» φυσικών αντικειμένων.
- Ως έξυπνα φυσικά αντικείμενα **ονομάζουμε:**
 - Τα αντικείμενα εκείνα στα οποία έχει ενσωματωθεί κατάλληλο **υλικό και λογισμικό** ώστε να είναι σε θέση να αποκτούν, κυρίως μέσω της χρήσης αισθητήρων, πρόσβαση σε πληροφορία **την οποία στην συνέχεια μεταδίδουν** είτε **προς τον άνθρωπο χρήστη** είτε **προς μια άλλη συσκευή (μηχανή)** ενώ συχνά υπάρχει και η **δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας** με σκοπό την **εκτέλεση εντολών** (π.χ. έξυπνο κλιματιστικό).

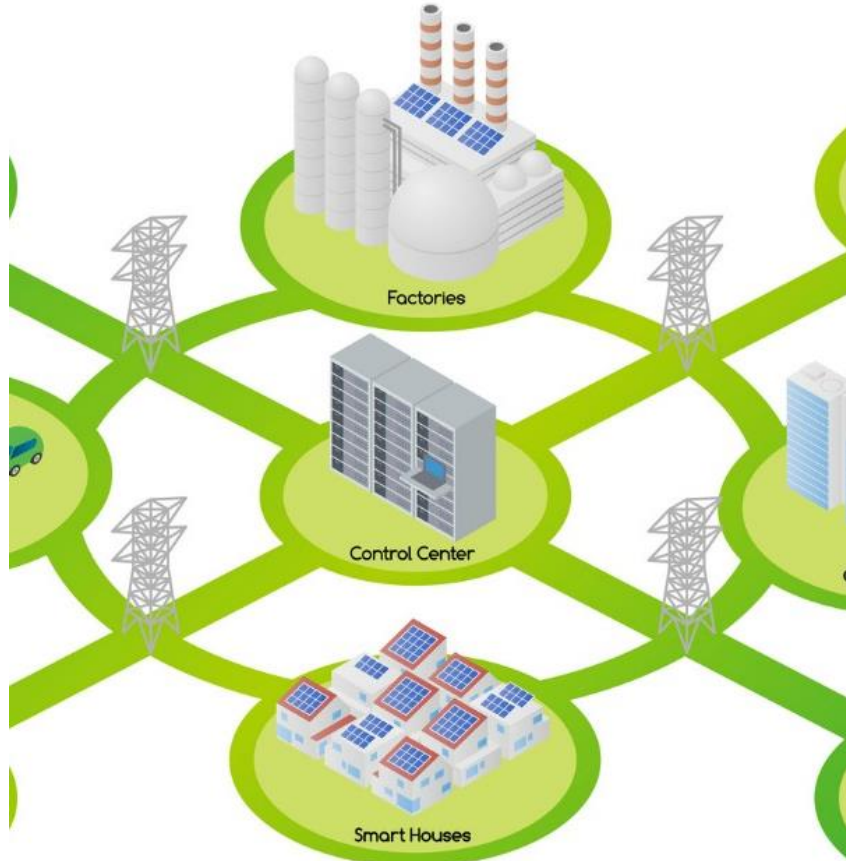
Το Διαδίκτυο των αντικειμένων (2)



- Έτσι στο νέο δικτυακό περιβάλλον μπορούμε να διακρίνουμε την επικοινωνία **μηχανής με μηχανή (Machine to Machine - M2M)**, **μηχανής με άνθρωπο (Machine to Human - M2H)** και φυσικά **ανθρώπου με άνθρωπο (H2H)**.
- Οι νέες αυτές δυνατότητες επικοινωνίας θα επηρεάσουν άμεσα διάφορες πτυχές της καθημερινής ζωής των ανθρώπων αλλά και της λειτουργίας των επιχειρήσεων.

Smart Grid

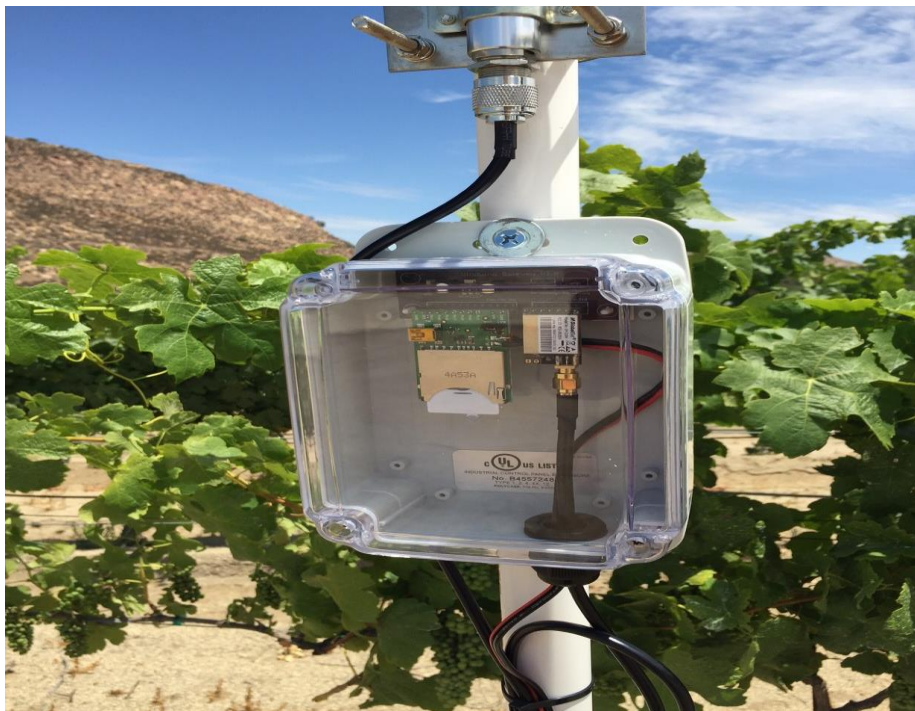
Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (3)



This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-NC-ND](#)

- Πιθανά σενάρια χρήσης του IoT είναι:
- **έξυπνα κτίρια και κατ' επέκταση έξυπνες πόλεις** με συστήματα διαρκούς ενημέρωσης (κυκλοφορίας, μέσω **μαζικής μεταφοράς**, συστήματα **έξυπνης χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας - microgrids**),
- **έξυπνα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας – smart grids**,

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (3)



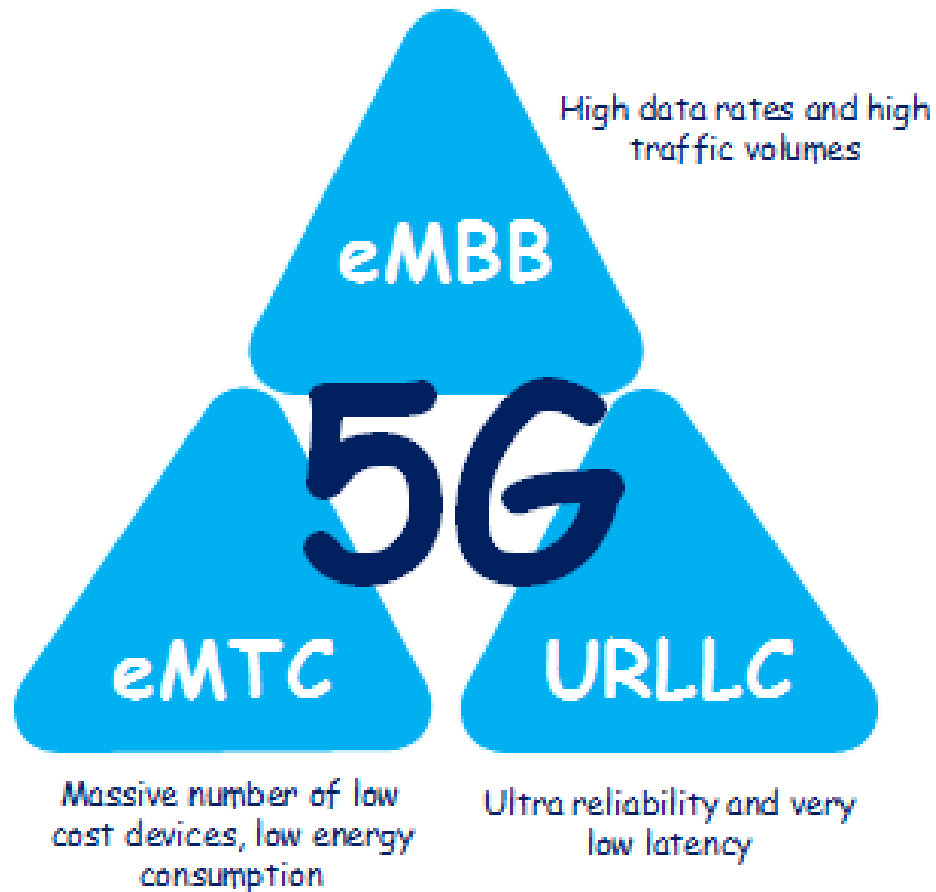
This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA-NC](#)



This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

- όπως και συστήματα γεωργίας ακριβείας ή μελέτης περιβαλλοντικών δεικτών και ορθολογικής χρήσης φυσικών πόρων.
- Εφαρμογές υγείας, όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση ηλικιωμένων ή ασθενών με ειδικές ανάγκες αλλά και η
- απομακρυσμένη παροχή υπηρεσιών πρωτοβάθμιας φροντίδας σε δυσπρόσιτες περιοχές είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικές και είναι πιθανό να παρέχουν κρίσιμα δεδομένα προς άμεση μετάδοση (alert).

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (4)



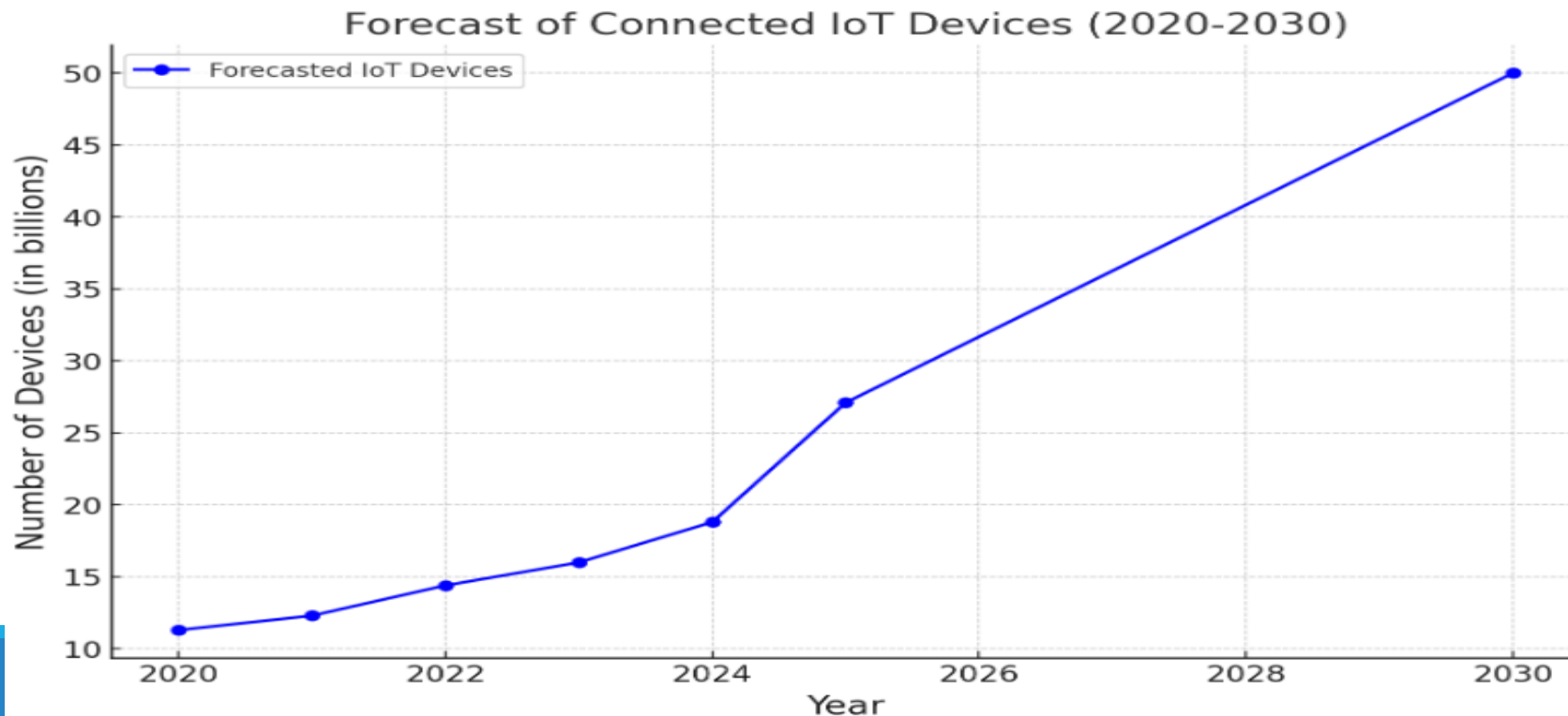
This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

- Τέτοιου είδους δεδομένα όπως και τα δεδομένα συσκευών του *απτικού διαδικτύου* (μετάδοση *απτικής ανάδρασης*) απαιτούν *μετάδοση υψηλής αξιοπιστίας και ασφάλειας με πολύ χαμηλή καθυστέρηση (URLLC)*.
- Η εφαρμογή των παραπάνω σε μεγάλη κλίμακα απαιτεί **εξοπλισμό χαμηλού κόστους** και με **χαμηλή κατανάλωση ενέργειας** έτσι ώστε να μπορούμε να πετύχουμε την βιώσιμη κάλυψη μιας ευρείας περιοχής.

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (5)

Επίσης, οι **διάφορες εφαρμογές** που γίνονται εφικτές με το IoT απαιτούν να εξασφαλιστεί η **σύνδεση τους στο διαδίκτυο**.

Εκτιμάται ότι μέχρι το τέλος του **2025** θα είναι συνδεδεμένες περίπου **27,1 δισεκατομμύρια έξυπνων συσκευών** σε όλο τον κόσμο.



Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (6)



This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)



ZigBee[®]

Control your world

This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

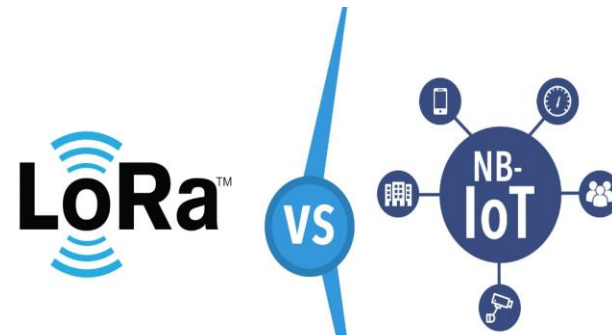
- Προβλέπεται ακόμα ότι από αυτές περίπου **2,6 δισεκατομμύρια** θα επικοινωνούν μέσω δικτύων ευρείας περιοχής (wide-area) ενώ το μεγαλύτερο μέρος, περίπου **24,5 δισεκατομμύρια** θα επικοινωνεί μέσω δικτύων μικρής εμβέλειας - (short-range).
- Όταν πρόκειται για δίκτυα μικρής εμβέλειας ειδικά σε αστικές περιοχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν γνωστές τεχνολογίες ή οι IoT παραλλαγές τους όπως **IEEE 802.11ah** (900Mhz), **Bluetooth Low Energy**, **IEEE 802.15.4** (e.g. Zigbee), **6LoWPAN**.

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (7)

- Και στα **ευρείας περιοχής δίκτυα** όμως, αυτή τη στιγμή, το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς IoT βασίζεται σε ειδικά σχεδιασμένες δικτυακές τεχνολογίες όπως **LoRa**, **Sigfox**, **Weightless**.
- *Γιατί όμως αναπτύχθηκαν αυτές οι τεχνολογίες από την στιγμή που υπάρχει ευρεία ασύρματη κάλυψη μέσω των δικτύων κινητής τηλεφωνίας;*



This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)



This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (8)



[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-NC-ND](#)



[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)



[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

- Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (3G, 4G) μπορούν να παρέχουν:
 - Πρόσβαση στο διαδίκτυο με ανάθεση πραγματικής IP διεύθυνσης στην συσκευή.
 - Λειτουργία σε αδειοδοτημένη περιοχή συχνοτήτων και επομένως με λιγότερες παρεμβολές.
 - Ενιαία τυποποίηση των συσκευών ανεξάρτητα της χώρας προέλευσης ή λειτουργίας.
 - Ασφάλεια στις μεταδόσεις με αυθεντικοποίηση της συσκευής και κρυπτογράφηση της ροής δεδομένων.

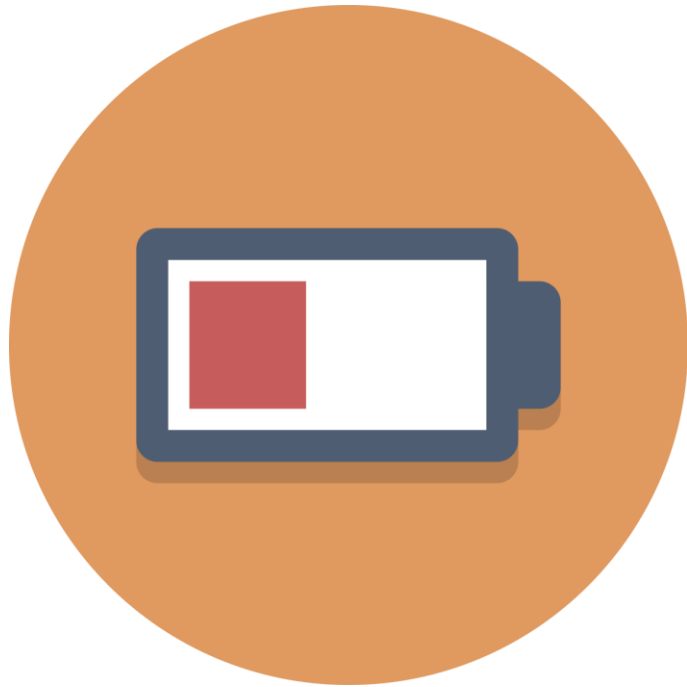
Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (9)

- **Αλλά έχουν τα εξής μειονεκτήματα:**
- **Κόστος:** Απαιτούν συνδρομή σε έναν πάροχο κινητής τηλεφωνίας για την απόκτηση **SIM (Subscriber Identification Module) κάρτας** και της δυνατότητας **αποστολής και λήψης δεδομένων**.
- **Αριθμοδότηση:** Επιπλέον ο πάροχος πρέπει να αντιστοιχήσει **έναν τηλεφωνικό αριθμό στην SIM κάρτα** και αυτό θα δημιουργούσε πρόβλημα στους παρόχους αν λάβουμε υπόψη την **αλματώδη ανάπτυξη της αγοράς IoT**.
 - Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι να έχουμε **ειδικό πρόθεμα για τους τηλεφωνικούς αριθμούς των IoT συσκευών** (π.χ. 020 στην Ιαπωνία) με τελικό στόχο η αναγνώριση να γίνεται μόνο μέσω **IP διεύθυνσης (IPv6)**.



This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY-NC](#)

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (10)



[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

- **Ενεργειακή κατανάλωση:** Ειδικά σε περιβάλλοντα ευρείας κάλυψης οι **συσκευές IoT** είναι, στην γενική περίπτωση, **περιορισμένες σε πόρους** και χαρακτηρίζονται από **χαμηλές δυνατότητες** τόσο από άποψη **υπολογιστικής ισχύος** αλλά και **διαθέσιμης παροχής ενέργειας**.
- Επομένως ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα για εφαρμογές IoT είναι η **υποστήριξη συσκευών με χαμηλή κατανάλωσης ενέργειας**.

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων



- Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι σχεδιασμένα να παρέχουν ποιότητα εξυπηρέτησης η οποία χρειάζεται **συνεχή επικοινωνία** με τις συσκευές όπως κατά τις παρακάτω διαδικασίες:
 - Περιοδικές **διαδικασίες ελέγχου θέσης και λειτουργίας** κινητών σε αδράνεια (paging),
 - **Διαδικασίες αλλαγής διαύλου επικοινωνίας** ή σταθμού βάσης (handover),
 - Περιοδικές **αναφορές ποιότητας καναλιού** (Channel State Information – CSI ή Channel Quality Indicator - CQI).
 - Περιοδικές **διαδικασίες προσαρμογής της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης** της μετάδοσης στις συνθήκες του καναλιού (Adaptive Modulation and Coding).

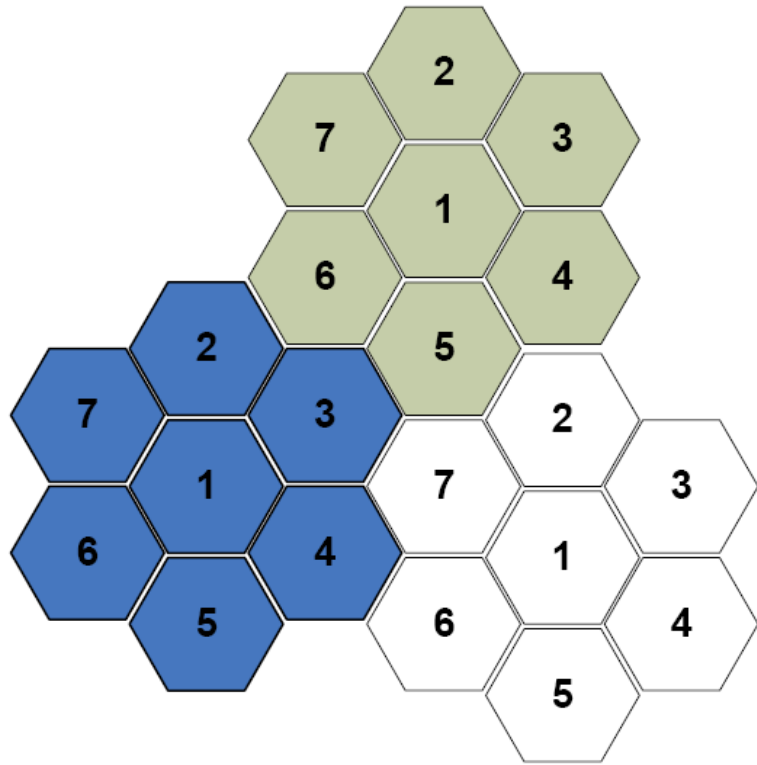
Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων

- *Η συνεχής αυτή επικοινωνία καταναλώνει ενέργεια από την μπαταρία της ασύρματης συσκευής κάτι το οποίο δεν είναι απαραίτητο αν η συσκευή δεν κινείται και δεν χρειάζεται υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.*
- Έτσι αναπτύχθηκαν νέα πρότυπα κινητών επικοινωνιών που θα επιτρέψουν στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας να καλύψουν τα μειονεκτήματά τους και να αποκτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς IoT.
- Η **3GPP (3rd Generation Partnership Project)** προχώρησε στην προτυποποίηση των παρακάτω δικτυακών τεχνολογιών :
 - **EC-GSM-IoT** (Extended Coverage GSM for the Internet of Things)
 - **NB-IoT** (Narrow-Band Internet of Things)
 - **LTE-M** (Long-Term Evolution for Machines)

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων

- **EC-GSM-IoT** (Extended Coverage GSM for the Internet of Things)
 - Βασίζεται στα υπάρχοντα δίκτυα GSM και μπορεί να υλοποιηθεί με αναβάθμιση λογισμικού. Εύρος ζώνης καναλιών **200kHz**.
- **NB-IoT** (Narrow-Band Internet of Things)
 - Το NB-IoT χρησιμοποιεί ένα υποσύνολο του προτύπου LTE και περιορίζει σημαντικά το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης (**180kHz – 200kHz**).
- **LTE-M** (Long-Term Evolution for Machines)
 - Το LTE-M χρησιμοποιεί και αυτό ένα υποσύνολο του προτύπου LTE αλλά σε σχέση με το NB-IoT παρέχει υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και μετάδοση φωνής, αλλά απαιτεί και μεγαλύτερο εύρος ζώνης (**1.4 MHz**)
- *Επομένως για να εξετάσουμε αυτές τις τεχνολογίες πρέπει πρώτα να δούμε την βάση τους που είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας:*

Βασικές αρχές δικτύων κινητής τηλεφωνίας



Κυψελωτή δομή –
Επαναχρησιμοποίηση
συχνοτήτων

Αρχικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών

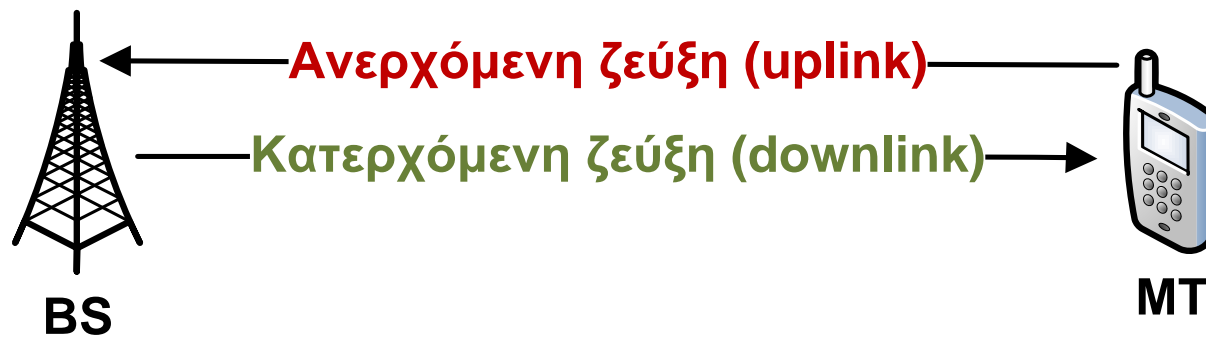
- **Χαρακτηριστικά των αρχικών συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών:**
 - Κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης περιοχής με χρήση σταθμού βάσης με **υψηλή ισχύ εκπομπής**.
 - Δεν ήταν δυνατή η **επαναχρησιμοποίηση** της ίδιας περιοχής συχνοτήτων μέσα στην περιοχή κάλυψης διότι θα προκαλούσε παρεμβολές.
 - Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο αριθμός των ταυτόχρονα εξυπηρετούμενων χρηστών να είναι περιορισμένος και επομένως **η χρησιμοποίηση του φάσματος να μην είναι αποδοτική**.
 - **Δεν προβλέπονταν ακόμα διαδικασία διαπομπής**, δηλαδή η αυτόματη αλλαγή ραδιοδιαύλου κάθε φορά που το κινητό άλλαζε ζώνη κάλυψης.

Κυψελωτή δομή

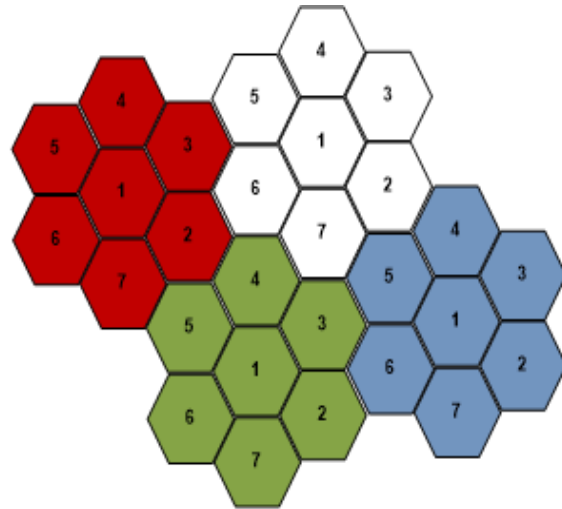
- Η κυψελωτή προσέγγιση έδωσε λύση στο πρόβλημα της μειωμένης **χρησιμοποίησης (utilisation)** του φάσματος και χωρητικότητας χρηστών.
- Με βάση την προσέγγιση αυτή **ο κεντρικός πομπός** μεγάλης ισχύος **αντικαταστάθηκε από πολλούς πομπούς** μικρότερης ισχύος.
- Καθένας από τους πομπούς αυτούς καλύπτει ένα μικρό τμήμα της συνολικής περιοχής κάλυψης το οποίο το ονομάζουμε **κελί (cell)**.
- Ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν τεχνικές **διαπομπής (handover)** που επέτρεπαν την μετακίνηση μεταξύ των κελίων με τρόπο διαφανή στον χρήστη.

Δομή του κελιού

- Κάθε κελί έχει διαθέσιμους έναν σταθμό βάσης (**Base Station BS, Node B**) μέσω του οποίου συνδέονται οι χρήστες (**Mobile Terminal MT, User Equipment UE**) στο σύστημα.



- Σε κάθε κελί ανατίθεται ένα μέρος του συνόλου των διαύλων που είναι διαθέσιμοι για το σύστημα.
- Βασική προϋπόθεση, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα παρεμβολών, είναι να **κατανέμονται διαφορετικές ομάδες διαύλων σε γειτονικά κελιά**.



Ομάδα Επαναχρησιμοποίησης

- Το σύνολο των διαθέσιμων δίαυλων του συστήματος κατανέμονται σε μια μικρή σχετικά ομάδα κελιών η οποία χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες σε κάθε κυψέλη και ονομάζεται **ομάδα επαναχρησιμοποίησης** (reuse cluster)
- Η ομάδα αυτή μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ολόκληρης της ζητούμενης περιοχής.
- Κελιά στα οποία έχουν ανατεθεί οι ίδιοι ράδιο-δίαυλοι (συχνότητες) ονομάζονται ομοδιαυλικά (co-channel cells)

Κυψελωτή δομή

- Αν ο αριθμός των κελιών της ομάδας επαναχρησιμοποίησης είναι K και κάθε κελί χρησιμοποιεί N_c διαύλους εύρους ζώνης W τότε το συνολικό φάσμα συχνοτήτων T του συστήματος είναι :

$$T = K \cdot N_c \cdot W$$

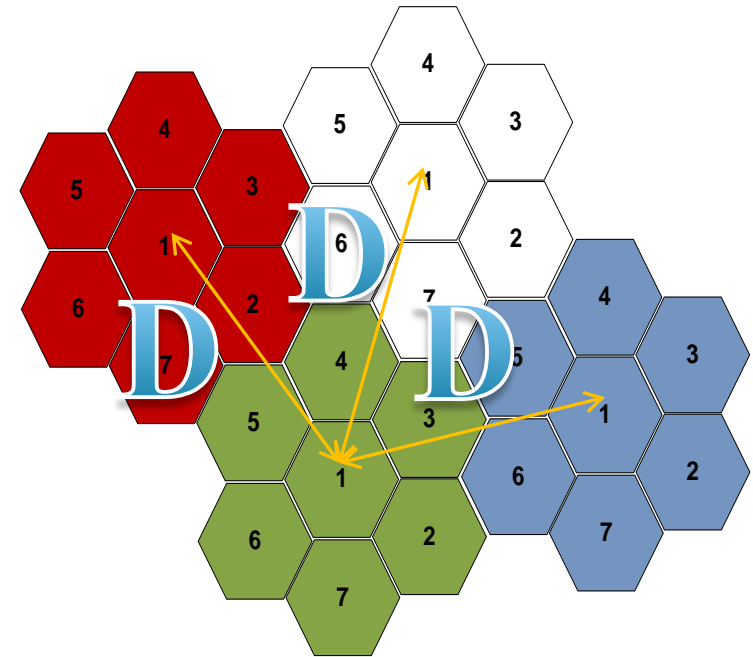
και προκύπτει ότι:

$$N_c = T / (K \cdot W)$$

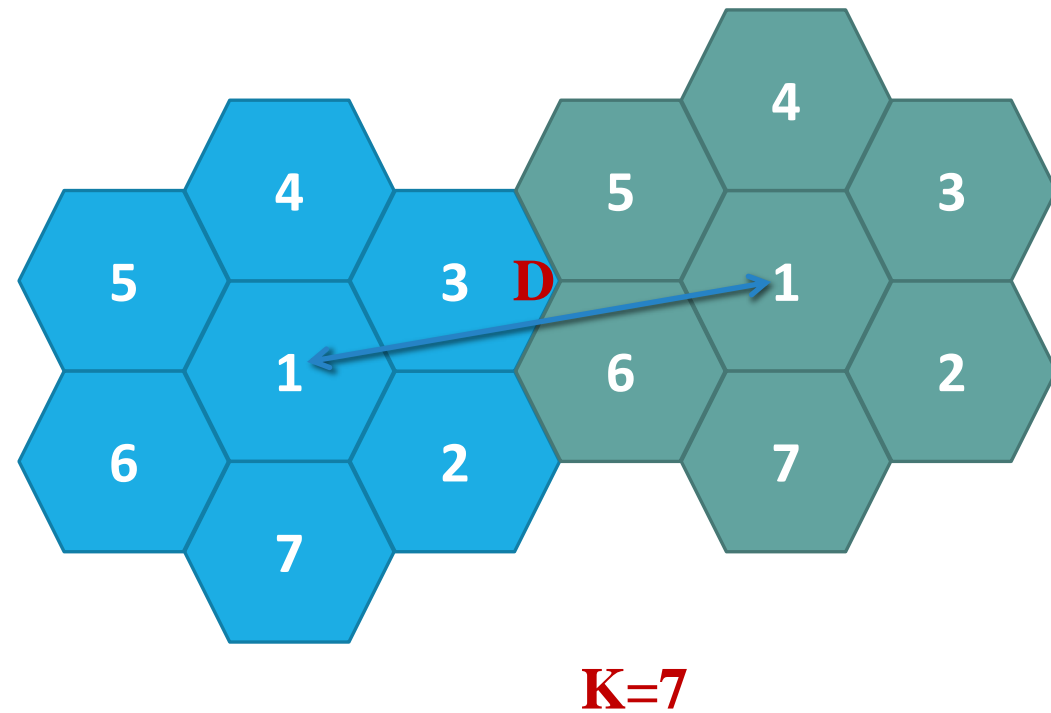
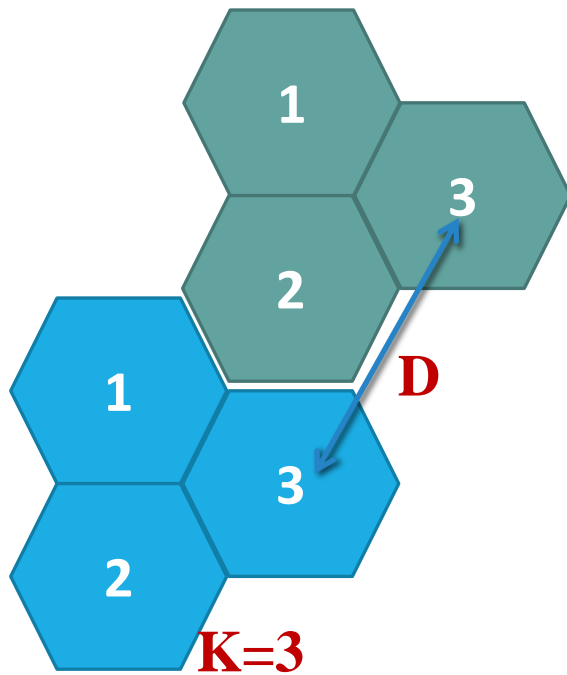
- Επομένως, δεδομένου ότι το συνολικό φάσμα συχνοτήτων T του συστήματος είναι σταθερό και έχοντας σταθερό εύρος ζώνης διαύλου τότε:
- ο αριθμός N_c των διαύλων ανά κελί εξαρτάται από τον αριθμό K των κελιών της ομάδας.

Κυψελωτή δομή

- Ο αριθμός K ονομάζεται **συντελεστής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων (frequency reuse factor)**
- Μειώνοντας το K αυξάνω τον αριθμό N_c των διαύλων ανά κελί και επομένως αυξάνω την συνολική χωρητικότητα.
- Μειώνοντας αυτόν τον συντελεστή μειώνω το μέγεθος της ομάδας επαναχρησιμοποίησης
- και επομένως μειώνω την απόσταση D μεταξύ ομοδιαυλικών κελιών (όταν το μέγεθος του κελιού παραμένει σταθερό) και επομένως αυξάνω τις παρεμβολές (interference).



Κυψελωτή δομή

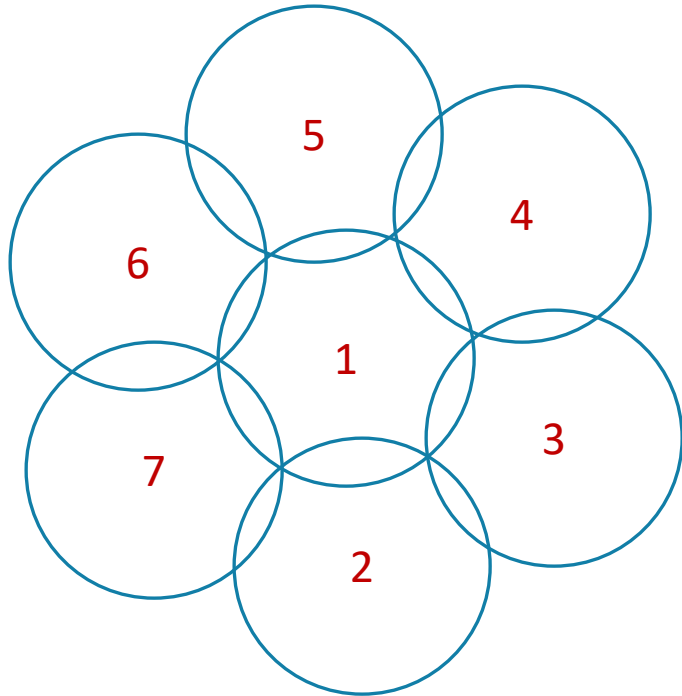


Κυψελωτή δομή

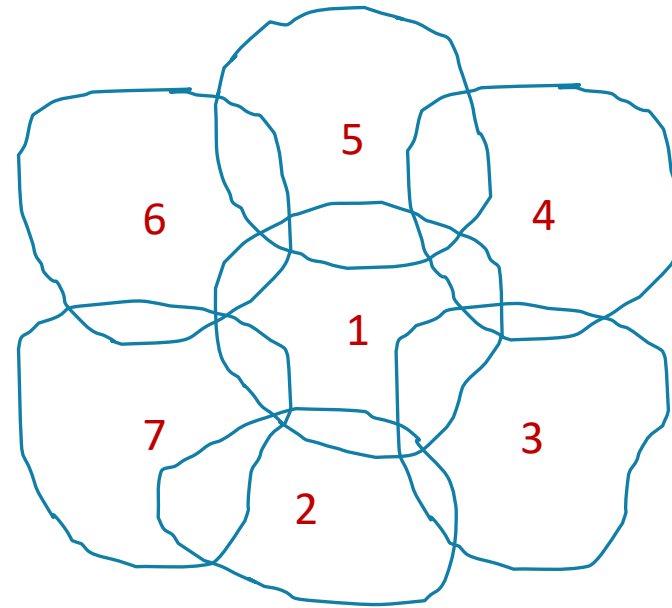
- Η απόσταση D ονομάζεται απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (**frequency reuse distance**).
- Μειώνοντας το D αυξάνω τις **ομοδιαυλικές παρεμβολές** (**co-channel interference**) δηλαδή την αμοιβαία παρεμβολή διαύλων της ίδιας συχνότητας οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικά κελιά.
- Επομένως η αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος μέσω της μείωσης του K μπορεί να γίνει μέχρι εκείνο το σημείο που οι **ομοδιαυλικές παρεμβολές** δεν ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο.
- Ο καθορισμός της απόστασης D είναι βασική παράμετρος του σχεδιασμού της δομής ενός κυψελωτού συστήματος.

Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

- Σε ένα σύστημα με ιδανική διάδοση η κάλυψη των σταθμών βάσης θα είχε την μορφή **(α)** ενώ στην πραγματικότητα έχω την πιο ασαφή μορφή **(β)**:



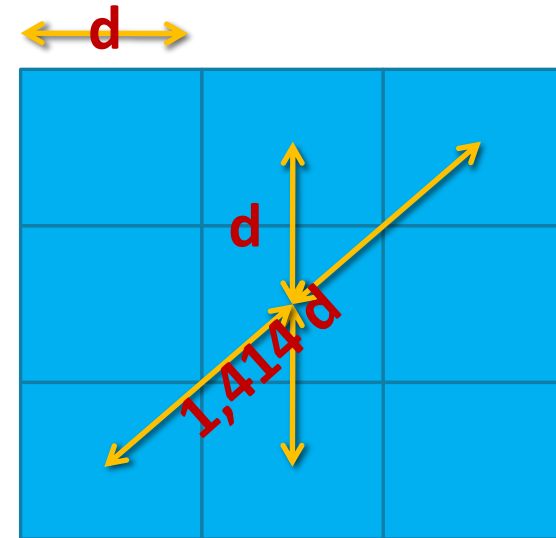
(α)



(β)

Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

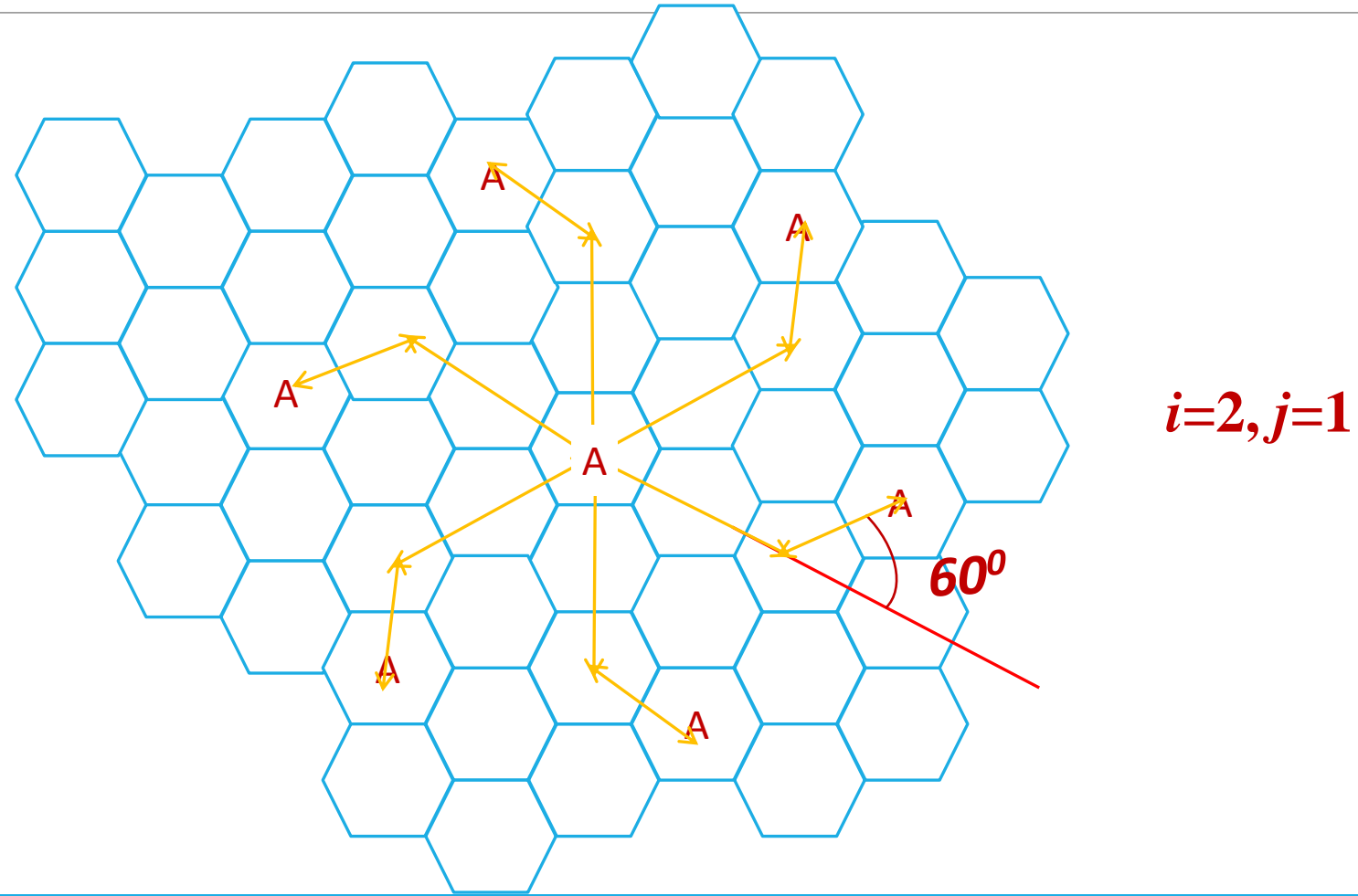
- Για τον αρχικό σχεδιασμό των κυψελωτών συστημάτων χρειαζόμαστε ένα απλοποιημένο μοντέλο της ραδιοκάλυψης ενός σταθμού βάσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς επικαλύψεις.
- Τα μόνα κανονικά πολύγωνα που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε είναι το τετράγωνο και το εξάγωνο.
- Το τετραγωνικό μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για αναπαράσταση συστημάτων δυο διαστάσεων γιατί κάθε σταθμός βάσης δεν ισαπέχει από τους γειτονικούς του σταθμούς.
- Η εξαγωνική διάταξη εξασφαλίζει σταθμούς που ισαπέχουν.



Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

- Για τον σχεδιασμό ενός κυψελωτού συστήματος θεωρούμε 2 ακέραιους i, j όπου ($i \geq j$) τους οποίους ονομάζουμε **παραμέτρους ολίσθησης**.
- Ξεκινώντας από οποιαδήποτε κυψέλη ως αναφορά, βρίσκουμε τις πλησιέστερες ομοδιαυλικές κυψέλες ως εξής:
 - Μετακινούμαστε i κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε αλυσίδας εξαγώνων
 - Στρέφουμε ανθρωρολογιακά κατά 60° και στη συνέχεια
 - Μετακινούμαστε j κυψέλες κατά μήκος της αλυσίδας εξαγώνων προς την οποία στραφήκαμε
- Η κυψέλη που καταλήγουμε και η κυψέλη αναφοράς είναι ομοδιαυλικές

Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

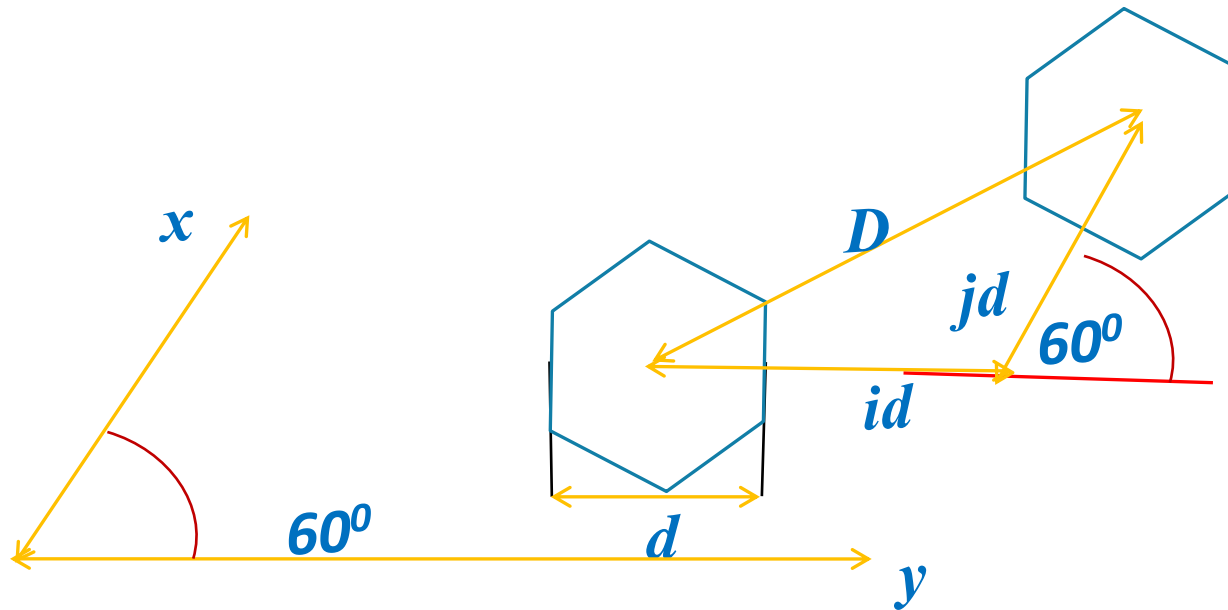


Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

- Οι ομοδιαυλικές κυψέλες προκύπτουν επίσης με μετακίνηση j κυψελών πριν και i κυψελών μετά τη στροφή των 60°
- Επίσης προκύπτουν στρέφοντας ωρολογιακά και όχι ανθρωρολογιακά
- Δηλαδή, συνολικά υπάρχουν 4 ισοδύναμοι κατοπτρικοί μεταξύ τους τρόποι.
- Ο σχεδιασμός του κυψελωτού συστήματος με αυτόν τον τρόπο μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε τον **συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων K** και την **απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας D** συναρτήσει των παραμέτρων ολίσθησης i και j .

Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

- Για απλοποίηση οι άξονες στο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούμε έχουν γωνία 60° .
- Εκφράζουμε τις συντεταγμένες με βάση το d το οποίο ισούται με την απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών σταθμών βάσης.



Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

- Από το **θεώρημα των συνημιτόνων** προκύπτει ότι η απόσταση D δίνεται από την σχέση:

$$D^2 = (i \cdot d)^2 + (j \cdot d)^2 - 2(i \cdot d)(j \cdot d)\cos 120^\circ$$

$$D^2 = (i^2 + i \cdot j + j^2) \cdot d^2$$

- Αποδεικνύεται ότι ο αριθμός **K** των κελιών μιας ομάδας (cluster) δίνεται από την σχέση:

$$K = i^2 + i \cdot j + j^2, \quad i \geq j, \quad i, j \in \mathbb{Z}^+$$

i	j	K
1	0	1
1	1	3
2	1	7

Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

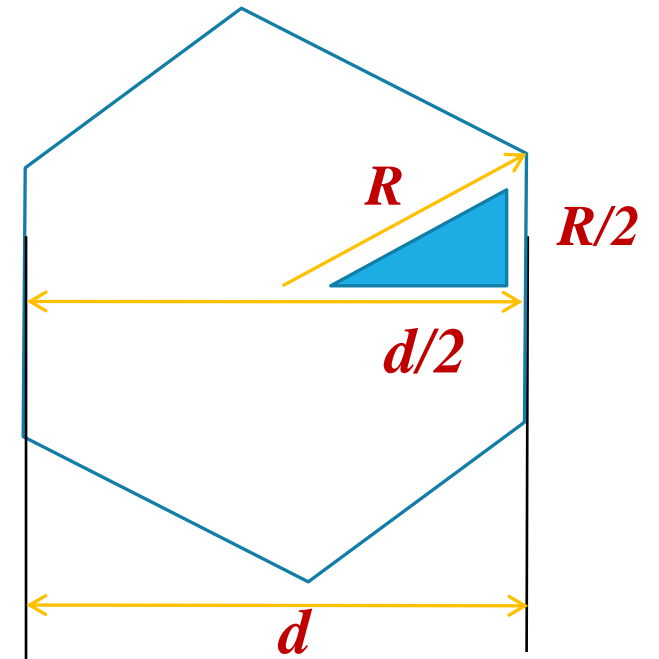
- Ο λόγος (D/R) της απόστασης μεταξύ των κέντρων διαδοχικών ομοδιαυλικών κυψελών D , προς την ακτίνα της κυψέλης R καλείται **λόγος ομοδιαυλικής επαναχρησιμοποίησης** (co-channel reuse ratio) ή περίοδος επαναχρησιμοποίησης ή συντελεστής μείωσης ομοδιαυλικής παρεμβολής

- Ισχύει

$$\frac{D}{R} = \frac{\sqrt{K \cdot d^2}}{R}$$

- και όπως προκύπτει από την γεωμετρία του εξαγώνου:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3K}$$



Σχεδιασμός Κυψελωτής δομής

- Βλέπουμε δηλαδή την εξάρτηση του λόγου **ομοδιαυλικής επαναχρησιμοποίησης** από τον αριθμό των κελιών στην ομάδα (cluster)
- Η αύξηση του λόγου **ομοδιαυλικής επαναχρησιμοποίησης** οδηγεί σε μείωση των ομοδιαυλικών παρεμβολών και επομένως σε βελτίωση της ποιότητας μετάδοσης. Ταυτόχρονα οδηγεί σε **μείωση της χωρητικότητας του συστήματος** εξαιτίας της εξάρτησης από το K .
- Η μείωση αυτού του λόγου αντίθετα οδηγεί σε **αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος** αλλά και αύξηση των ομοδιαυλικών παρεμβολών.

Τηλεπικοινωνιακή κίνηση

- Οι ραδιοδίαυλοι κατανέμονται λαμβάνοντας υπόψη την τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε κάθε κελί. **Ονομάζουμε προσφερόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση το σύνολο των κλήσεων με μεταγωγή κυκλώματος που ζητούν να εξυπηρετηθούν.**
- Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση χαρακτηρίζεται από:
 - Μέσο ρυθμό άφιξης των κλήσεων λ
 - Μέση διάρκεια των κλήσεων H (Holding time)
- Η συνολική προσφερόμενη κίνηση A είναι:
$$A = \lambda \cdot H$$
- Είναι καθαρός αριθμός χωρίς φυσική μονάδα αλλά συμβατικά του αποδίδουμε την μονάδα **Erlang**

Βαθμός εξυπηρέτησης

- Το προσφερόμενο φορτίο στο δίκτυο δεν παραμένει σταθερό αλλά αντίθετα **παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα**.
- **Αυτό που ενδιαφέρει τον σχεδιαστή του συστήματος είναι η δυνατότητα του χρήστη να προσπελάσει το σύστημα την ώρα του μέγιστου προσφερόμενου φορτίου.**
- Έτσι, ονομάζουμε **Βαθμό Εξυπηρέτησης (Grade of Service-GoS)** τη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα μια κλήση να χαθεί ή να βρίσκεται σε ουρά αναμονής περισσότερο από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- **Οι ράδιο-διαυλοι κατανέμονται στα κελιά έτσι ώστε να ικανοποιούν ένα προκαθορισμένο GoS για δεδομένο προσφερόμενο φορτίο.**

Erlang B

- Το μοντέλο **Erlang B** περιγράφει ένα σύστημα με **πεπερασμένο αριθμό διαύλων n , χωρίς ουρά αναμονής**.
- Η άφιξη των κλήσεων γίνεται κατά **Poisson** ενώ και οι χρόνοι αναχώρησης των κλήσεων είναι εκθετικά κατανεμημένοι.
- Περιγράφεται δηλαδή ένα σύστημα **$M/M/n/n$** (*n εξυπηρετητές, n το πολύ πελάτες στο σύστημα*)
- Αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα απόρριψης (blocking probability) δίνεται από τη σχέση:

$$P_B(n, A) = \frac{A^n}{\sum_{k=0}^n \frac{A^k}{k!}}$$

Erlang B

- Για τον υπολογισμό της πιθανότητας απόρριψης ή του απαιτούμενου ρυθμού διαύλων για δεδομένη πιθανότητα απόρριψης ισχύει και η επαναληπτική σχέση:

$$P_B(n, A) = \frac{\frac{A \cdot P_B(n-1, A)}{n}}{1 + \frac{A \cdot P_B(n-1, A)}{n}}, \quad P_B(0, A) = 1$$

- Η σχέση αυτή είναι **ποιο κατάλληλη για χρήση σε υπολογιστή** και δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα λόγω της απουσίας παραγοντικών (πρόβλημα σύγκλισης/ακρίβειας).

Erlang B Traffic Table

n	Blocking probability P_B										n
	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	
1	.00705	.00806	.00908	.01010	.02041	.03093	.05263	.11111	.25000	.66667	1
2	.12600	.13532	.14416	.15259	.22347	.28155	.38132	.59543	1.0000	2.0000	2
3	.39664	.41757	.43711	.45549	.60221	.71513	.89940	1.2708	1.9299	3.4798	3
4	.77729	.81029	.84085	.86942	1.0923	1.2589	1.5246	2.0454	2.9452	5.0210	4
5	1.2362	1.2810	1.3223	1.3608	1.6571	1.8752	2.2185	2.8811	4.0104	6.5955	5
6	1.7531	1.8093	1.8610	1.9090	2.2759	2.5431	2.9603	3.7584	5.1086	8.1907	6
7	2.3149	2.3820	2.4437	2.5009	2.9354	3.2497	3.7378	4.6662	6.2302	9.7998	7
8	2.9125	2.9902	3.0615	3.1276	3.6271	3.9865	4.5430	5.5971	7.3692	11.419	8
9	3.5395	3.6274	3.7080	3.7825	4.3447	4.7479	5.3702	6.5464	8.5217	13.045	9
10	4.1911	4.2889	4.3784	4.4612	5.0840	5.5294	6.2157	7.5106	9.6850	14.677	10
11	4.8637	4.9709	5.0691	5.1599	5.8415	6.3280	7.0764	8.4871	10.857	16.314	11
12	5.5543	5.6708	5.7774	5.8760	6.6147	7.1410	7.9501	9.4740	12.036	17.954	12

Erlang C

- Το μοντέλο **Erlang C** περιγράφει ένα σύστημα με **πεπερασμένο αριθμό διαύλων n , με ουρά αναμονής**.
- Και εδώ η άφιξη των κλήσεων ακολουθεί την κατανομή Poisson ενώ και οι χρόνοι εξυπηρέτησης των κλήσεων είναι εκθετικά κατανεμημένοι.
- Περιγράφεται δηλαδή μια ουρά **$M/M/n$** . (*n εξυπηρετητές, άπειρο μέγεθος ουράς*)
- Αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα μια κλήση να καθυστερήσει (στην ουρά) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{(Delay>0)}(n, A) = \frac{A^n}{A^n + \left(1 - \frac{A}{n}\right) n! \sum_{i=0}^{n-1} \frac{A^i}{i!}}$$

Erlang C

- Η σχέση που συνδέει το μοντέλο **Erlang C** με το μοντέλο **Erlang B** είναι:

$$P_{(Delay>0)}(n, A) = \frac{n \cdot P_B(n, A)}{n - A(1 - P_B(n, A))}$$

- Η πιθανότητα μια κλήση να απορριφθεί, δηλαδή να αναγκαστεί να περιμένει στην ουρά για χρόνο μεγαλύτερο από t δίνεται (θεωρώντας σύστημα FIFO) από τη σχέση:

$$P_{(Delay>t)}(n, A) = P_{(Delay>0)}(n, A) \cdot \exp\left(-\frac{(n - A) \cdot t}{H}\right)$$

Call Admission Control

- Σε ένα **κλασικό τηλεφωνικό σύστημα** θεωρούμε ότι δεν υπάρχει περίοδος αναμονής για τις εισερχόμενες κλήσεις και **ισχύει η σχέση του Erlang B**.
- Το σύστημα **Ελέγχου Αποδοχής νέων κλήσεων (Call Admission Control)** ελέγχει αν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι (χωρητικότητα) και δέχεται ή όχι μια νέα κλήση.
- Σε συστήματα που οι **εισερχόμενες κλήσεις έχουν διαφορετικές απαιτήσεις** τότε πρέπει και το σύστημα αποδοχής κλήσεων να προσαρμοστεί έτσι ώστε να έχουν όλα τα είδη εισερχόμενων κλήσεων την ίδια πιθανότητα αποδοχής.
- Αυτό δεν είναι εύκολο καθώς κλήσεις με μεγάλες απαιτήσεις χωρητικότητας/πόρων εξυπηρετούνται δυσκολότερα από ότι κλήσεις μικρών απαιτήσεων.

Αλλαγή Ραδιοδιαύλου

- Η κίνηση του χρήστη σε ένα χώρο ο οποίος καλύπτεται από ένα αριθμό διαφορετικών κελιών ή τομέων προϋποθέτει την **ύπαρξη ενός μηχανισμού που θα κάνει αυτή την μετακίνηση να γίνεται με διαφανή τρόπο.**
- Αυτή η αυτόματη διαδικασία αλλαγής συχνότητας καθώς το κινητό περνάει από ένα κελί στο επόμενο ονομάζεται διακυψελική διαπομπή (**intercell handover – handoff**)
- Η διαπομπή μιας κλήσης σε διαφορετικό δίαυλο της ίδιας κυψέλης ο οποίος παρουσιάζει καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά ονομάζεται ενδοκυψελική διαπομπή (**intracell handoff - handover**)
- Τα στάδια μιας διαπομπής είναι:
 - Εκτίμηση της ποιότητας της ζεύξης - Έναρξη της διαδικασίας διαπομπής - **Απόδοση πόρων από το σύστημα**

Μηχανισμός Διαπομπής

- Ο αριθμός των διακυψελικών διαπομπών εξαρτάται από το μέγεθος του κελιού.
- Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του κελιού:
 - Τόσο περισσότερες διαπομπές πραγματοποιούνται ενώ
 - Τόσο γρηγορότερα πρέπει να ολοκληρώνεται η διαδικασία της διαπομπής.
- Επομένως η μείωση του μεγέθους των κελιών προϋποθέτει :
 - οι αλγόριθμοι διαπομπής να είναι αξιόπιστοι και
 - να εκτελούνται σε μικρό χρόνο έτσι ώστε να μειώνεται η πιθανότητα αποτυχίας μιας διαπομπής.

Μηχανισμός Διαπομπής

- Οι αλγόριθμοι διαπομπής συνήθως χρησιμοποιούν τη **λαμβανόμενη ισχύ του σήματος** για την αξιολόγηση της ποιότητας της ζεύξης.
- Επομένως:
 - Αν η ισχύς του σήματος που λαμβάνει το κινητό από ένα **διαφορετικό Σταθμό Βάσης**,
 - για **ένα χρονικό διάστημα T** ,
 - είναι **μεγαλύτερη κατά Δ dB** από την ισχύ του σήματος του Σταθμού Βάσης που το εξυπηρετεί την δεδομένη χρονική στιγμή,
 - τότε **ξεκινά η διαδικασία διαπομπής**.

Μηχανισμός Διαπομπής

- Η διαφορά Δ ονομάζεται **υστέρηση διαπομπής (handoff hysteresis)** και χρησιμεύει στο να αποφεύγονται διαδοχικές διαπομπές ανάμεσα σε Σταθμούς Βάσης των οποίων η λαμβανόμενη ισχύς δεν διαφέρει πολύ.
- Η επιλογή των Δ και T εξαρτάται από:
 - το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η διάδοση και
 - από την **ταχύτητα του κινητού δέκτη**
- Το T συνήθως αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια τέτοια ώστε ο δέκτης να καλύπτει **20** έως **40 μήκη κύματος**.
- Έτσι **αποφεύγεται η εκτίμηση να γίνει βάση των διαλείψεων μικρής κλίμακας**

Μηχανισμός Διαπομπής

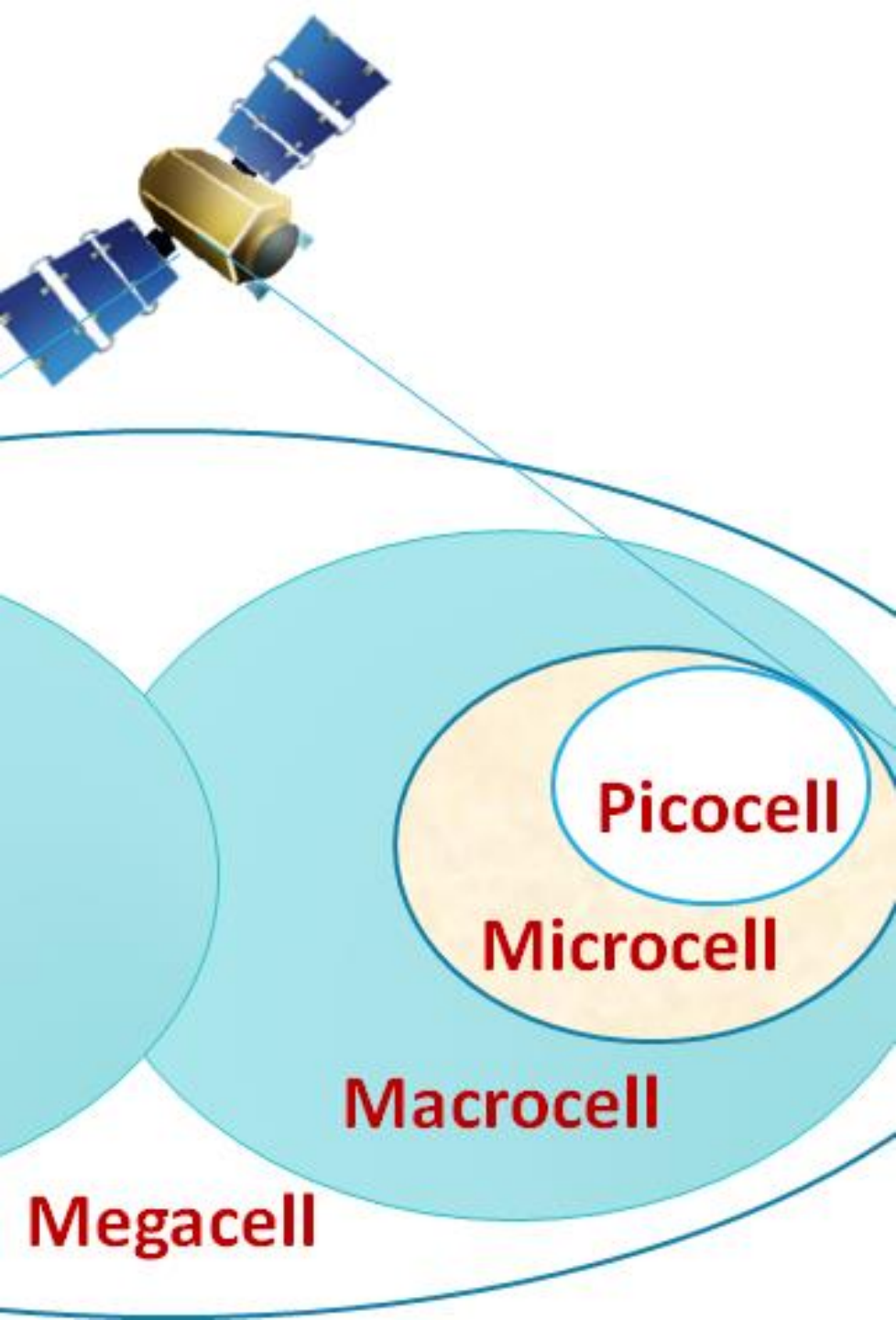
- Προφανώς η αντιστοίχιση μηκών κύματος και χρόνου απαιτεί **εκτίμηση της ταχύτητας του δέκτη**.
- Αυτή πραγματοποιείται με βάση τα **στατιστικά μεγέθη των διαλείψεων μικρής κλίμακας** του λαμβανόμενου σήματος στον Σταθμό Βάσης.
- **Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading)** εμφανίζονται για μετατοπίσεις του κινητού της τάξης του $\lambda/2$, και οφείλονται σε: **α)** πολυδιαδρομική διάδοση και **β)** χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη και των σκεδαστών που συμμετέχουν στην διάδοση.

Αλγόριθμοι διαπομπής

- **Hard Handoff:** Κατά την διάρκεια της διαπομπής το κινητό είναι συνδεδεμένο με ένα μόνο Σταθμό Βάσης κάθε χρονική στιγμή (συστήματα GSM).
 - Η ζεύξη με τον παλιό Σταθμό Βάσης διακόπτεται ταυτόχρονα με την αποκατάσταση της ζεύξης με τον νέο Σταθμό Βάσης.
 - **Hard Handoff** έχουμε συνήθως στις διαπομπές μεταξύ διαφορετικών συστημάτων (π.χ. διαπομπή από **WCDMA FDD** σε **WCDMA TDD** ή **GSM**)
- **Soft Handoff:** Κατά την διάρκεια της διαπομπής οι ραδιοζευξεις προστίθενται και αφαιρούνται με τέτοιο τρόπο ώστε ότι το κινητό να διατηρεί συνεχώς τουλάχιστον μια ενεργή ραδιοζευξη.
- **Softer Handoff:** είναι μια ειδική περίπτωση του Soft Handoff όπου οι ραδιοζεύξεις που προστίθενται και αφαιρούνται ανήκουν στον ίδιο σταθμό βάσης (handoff μεταξύ διαφορετικών sectors)

Προτεραιότητα Διαπομπών

- Από την πλευρά του χρήστη είναι προτιμότερη η απόρριψη μιας νέας κλήσης από την **εξαναγκασμένη λήξη μιας κλήσης σε διαπομπή**.
- Ο σχεδιασμός των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας γίνεται συνήθως έτσι ώστε
 - η πιθανότητα απόρριψης νέων κλήσεων να είναι μικρότερη του **5%** ενώ
 - η πιθανότητα εξαναγκασμένης λήξης μιας κλήσης να είναι μικρότερη του **0,5%**.
- Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να το επιτύχουμε αυτό είναι να δεσμεύσουμε πόρους αποκλειστικά για κλήσεις που προέρχονται από διαπομπή (**guard channel schemes**).



Τύποι κελιών και περιοχή κάλυψης

- **Μεγακυψέλες (megacells)** Καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές μέσω τηλεπικοινωνιακού δορυφόρου.
- **Μακροκυψέλες (Macrocells)** Καλύπτουν περιοχές με ακτίνα μερικών δεκάδων χιλιομέτρων
- **Μικροκυψέλες (Microcells)** Καλύπτουν περιοχές με ακτίνα 1 - 2 χιλιομέτρων.
- **Πικοκυψέλες (Picocells)** Καλύπτουν περιοχές με ακτίνα 100 – 200 μέτρα
- **Σταθμοί Βάσης Σπιτιών (Home Base Stations - Femtocells)** Καλύπτουν πολύ μικρές περιοχές με ακτίνα αντίστοιχη ενός Wi-Fi. Συνδέονται με το δίκτυο κορμού μέσω της DSL γραμμής του οικιακού χρήστη. Αναμένεται να έχουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη IoT σε εσωτερικούς χώρους.