



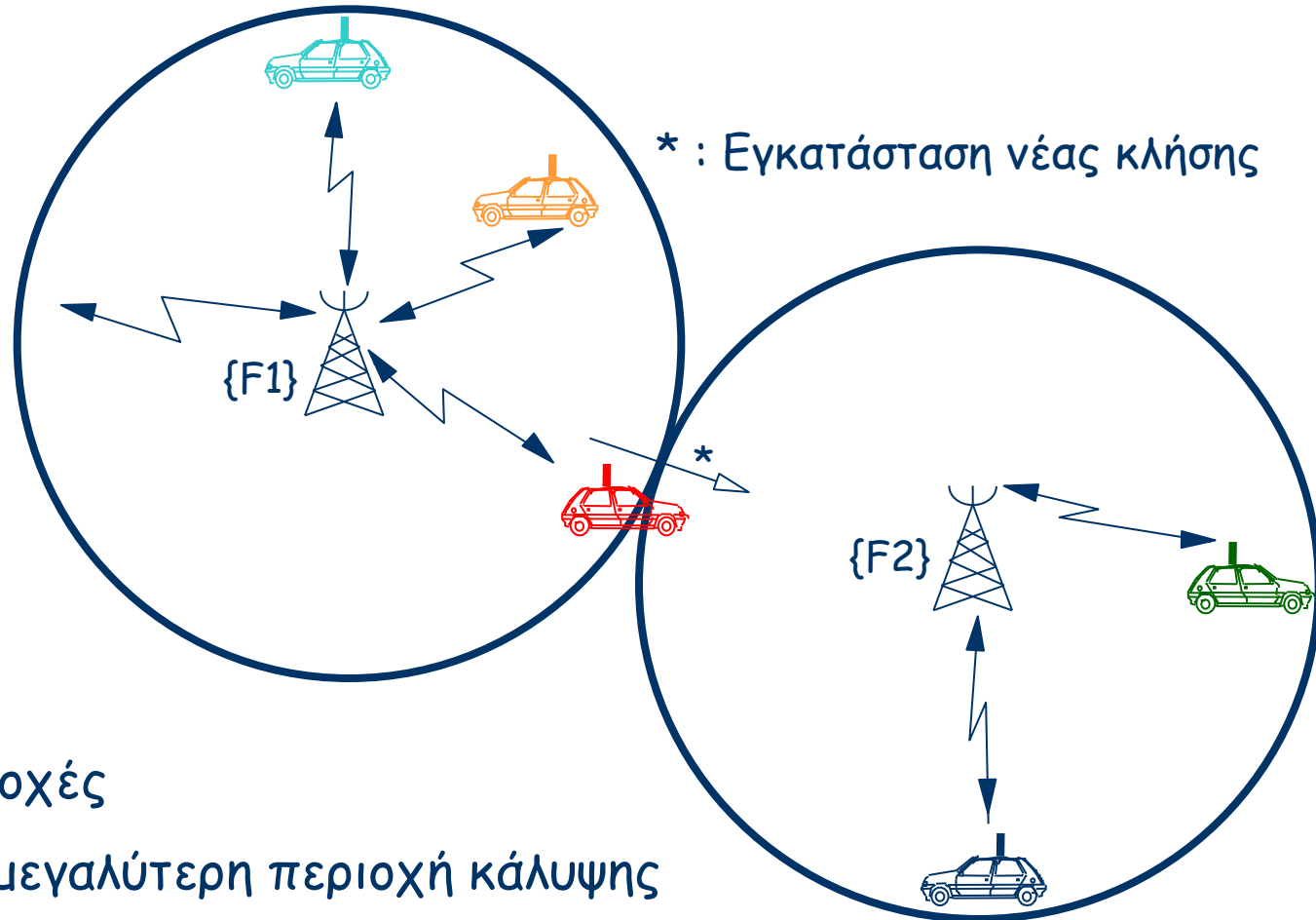
# Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών

Βασικές αρχές των  
κυβελωτών συστημάτων  
κινητών επικοινωνιών



- Κυψελωτή δομή
- Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων
  - Μονοδιάστατα κυψελωτά συστήματα
  - Κυψελωτά συστήματα δύο διαστάσεων
- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα
  - Ένταση κίνησης
  - Συγκέντρωση - Βαθμός εξυπηρέτησης
  - Συστήματα Erlang-B και Erlang-C
- Φασματική απόδοση κυψελωτών συστημάτων
- Κυψελωτά συστήματα απλωμένου φάσματος

# Συμβατικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών



Αυτόνομες περιοχές

Όσο το δυνατό μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης

Μεγάλη ισχύς εκπομπής

Όχι διαπομπές

Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών



## Χαρακτηριστικά των συμβατικών συστημάτων:

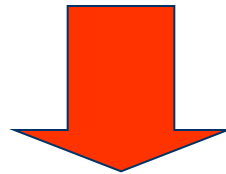
- Πολύ καλή ραδιοκάλυψη
- Δυσκολία στην επαναχρησιμοποίηση των ίδιων συχνοτήτων στην περιοχή εξυπηρέτησης
- Περιορισμένος αριθμός ταυτόχρονα εξυπηρετούμενων χρηστών
- Μη αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος

# Κυψελωτή δομή



Το ιδανικό σύστημα κινητών επικοινωνιών θα πρέπει:

- να λειτουργεί σε μια περιορισμένη και προκαθορισμένη ζώνη συχνοτήτων και
- να εξυπηρετεί σχεδόν απεριόριστο αριθμό χρηστών σε απεριόριστες, όσο αφορά την έκτασή τους, γεωγραφικές περιοχές.



- Κυψελωτό σύστημα
- Όχι πολύ μεγάλες τεχνολογικές αλλαγές



## Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

- Αντικατάσταση ενός πομπού μεγάλης ισχύος από πολλούς πομπούς μικρής ισχύος, ο καθένας από τους οποίους καλύπτει μικρό τμήμα της περιοχής εξυπηρέτησης του συστήματος (κυψέλη-cell)
- Σε κάθε σταθμό βάσης κατανέμεται ένα μέρος του συνόλου των διαύλων που διατίθενται για το σύστημα.
- Σε γειτονικούς σταθμούς κατανέμονται διαφορετικές ομάδες διαύλων.
- Όλοι οι διαθέσιμοι δίαυλοι κατανέμονται σε σχετικά μικρό αριθμό γειτονικών σταθμών βάσης.



## Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

- Μια ομάδα ραδιοδιαύλων χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση περισσότερων της μιας γεωγραφικών περιοχών (επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων)
- Οι παρεμβολές στη λήψη για χρήστες (τερματικά) που βρίσκονται σε διαφορετικές κυψέλες πρέπει να είναι αμελητέες ή κάτω από μια αποδεκτή στάθμη
- Διαισθητικά, δύο γεωγραφικές περιοχές που χρησιμοποιούν τις ίδιες ομάδες συχνοτήτων πρέπει να απέχουν επαρκώς μεταξύ τους

# Κυψελωτή δομή



## Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

- Κάθε κυψέλη έχει μια μονάδα εκπομπής λήψης, τον **σταθμό βάσης (Base Station, BS)** που αποτελεί και **σημείο πρόσβασης (Access Point, AP)** στο σύστημα



- Η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος απαρτίζεται από ένα σύνολο κυψελών
- Μια ομάδα κυψελών που χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες σε κάθε κυψέλη ονομάζεται **ομάδα επαναχρησιμοποίησης (reuse cluster)**
- Κυψέλες που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες ονομάζονται **ομοδιαυλικές (co-channel cells)**





## Επαναχρησιμοποίηση συχνотήτων

- Έστω:
  - $M$  ο συνολικός αριθμός των διαύλων του συστήματος χωρίς επαναχρησιμοποίηση,  $M = B_s/W$
  - $K$  ο αριθμός των κυψελών σε κάθε ομάδα επαναχρησιμοποίησης
  - $C_c$  ο αριθμός των διαύλων κάθε κυψέλης




$$M = K \times C_c \quad \eta \quad C_c = M \times \frac{1}{K}$$

- Η επαναχρησιμοποίηση ανά  $K$  κυψέλες προσφέρει χρήση  $1/K$  του φάσματος σε κάθε κυψέλη



## Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

- Αν  $N_c$  είναι ο συνολικός αριθμός των κυψελών του συστήματος και  $C$  ο συνολικός αριθμός των διαύλων στην περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος


$$C = N_c \times C_c = N_c \times \frac{M}{K}$$

- Για δοθέν φάσμα (δοθέν  $M$ ) και τον ίδιο αριθμό κυψελών, όταν  $K \downarrow \Rightarrow C \uparrow$ , διότι  $C_c \uparrow$
- Επίσης, όταν  $K \downarrow \Rightarrow J \uparrow$ , όπου  $J = N_c / K$  είναι το πλήθος των ομάδων επαναχρησιμοποίησης φάσματος
- Το  $K$  όμως εξαρτάται από την επιτρεπόμενη στάθμη ομοδιαυλικής παρεμβολής



## Επαναχρησιμοποίηση συχνотήτων

### ➤ Παράδειγμα

Κυψελωτό σύστημα χρησιμοποιεί φάσμα με συνολικό αριθμό διαύλων  $M=300$ . Το εμβαδό κάθε κυψέλης είναι  $6 \text{ km}^2$  και η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος είναι  $2100 \text{ km}^2$ .

- α. Ποιος είναι ο συνολικός αριθμός διαύλων  $C$  στην περιοχή εξυπηρέτησης για  $K=7$ ;
- β. Πόσες φορές επαναχρησιμοποιείται το φάσμα για να καλυφθεί η ίδια περιοχή εξυπηρέτησης, όταν  $K=4$ ;
- γ. Πόσο αυξάνει η χωρητικότητα του συστήματος με τη μείωση του  $K$  από 7 σε 4;



## Χωρητικότητα

- Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα:
  - το διατιθέμενο εύρος ζώνης
  - το μέγεθος των κυψελών
  - η στάθμη της παρεμβολής που μπορεί να είναι ανεκτή σε έναν ραδιοδίαυλο, η οποία καθορίζει το  $K$
  - η κοινή ασύρματη διεπαφή, πάνω από την οποία επικοινωνούν οι χρήστες



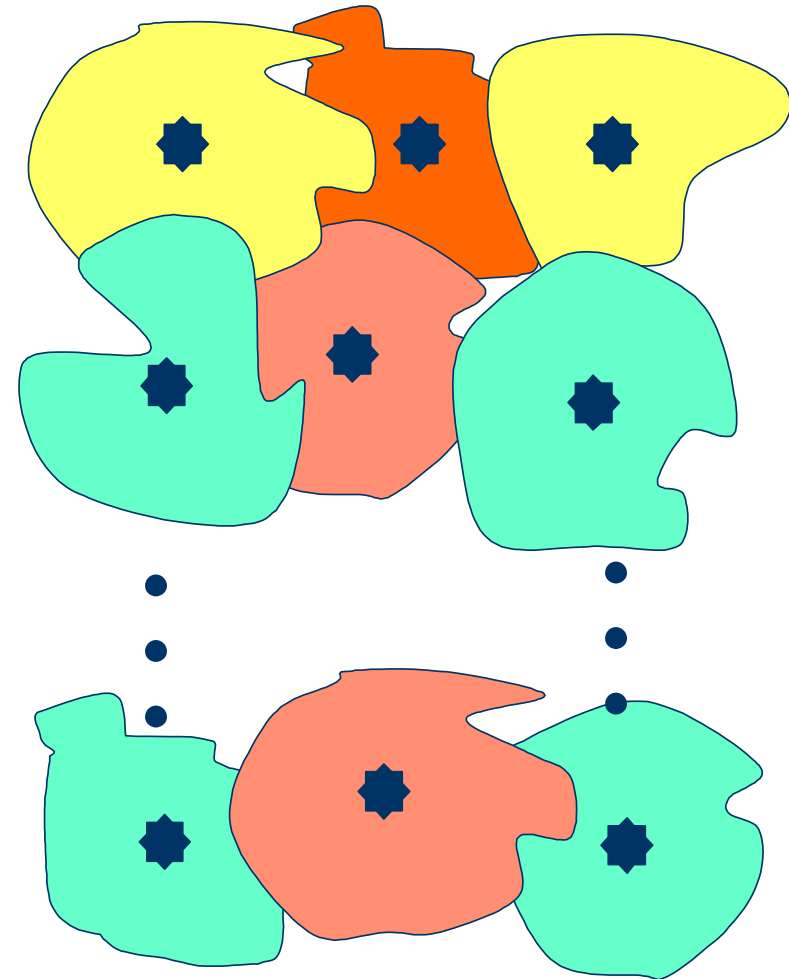
## Περιορισμοί στην επαναχρησιμοποίηση

- Η αμοιβαία παρεμβολή διαύλων της ίδιας συχνότητας, οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικές κυψέλες ονομάζεται *ομοδιαυλική παρεμβολή (co-channel interference)*
- Ο καθορισμός της επαρκούς απόστασης  $D$  μεταξύ των ομοδιαυλικών κυψελών και της επιτρεπόμενης παρεμβολής είναι έργο της σχεδίασης των κυψελωτών συστημάτων
- $D$ : *απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse distance)*

# Πραγματική κυψελωτή δομή



Ένα ενδιαφέρον σχεδιαστικό πρόβλημα είναι η τοποθέτηση των σταθμών βάσης κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι περιοχές χωρίς κάλυψη να μην υπερβαίνουν κάποιο αποδεκτό όριο



# Ιδανική κυψελωτή δομή



Θεωρούμε ότι:

- έχουμε ιδανική ραδιοδιάδοση και στη ζεύξη καθόδου και στη ζεύξη ανόδου
- η ισχύς του σήματος μειώνεται ανάλογα με το  $d^{-n}$
- για τις ασύρματες ζεύξεις του συστήματος ισχύει η αρχή της αντιστροφής.

# Ιδανική κυψελωτή δομή

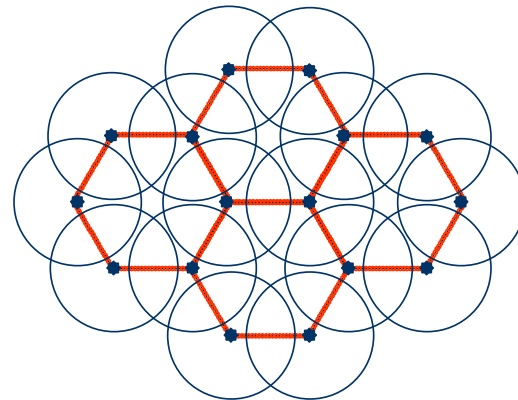
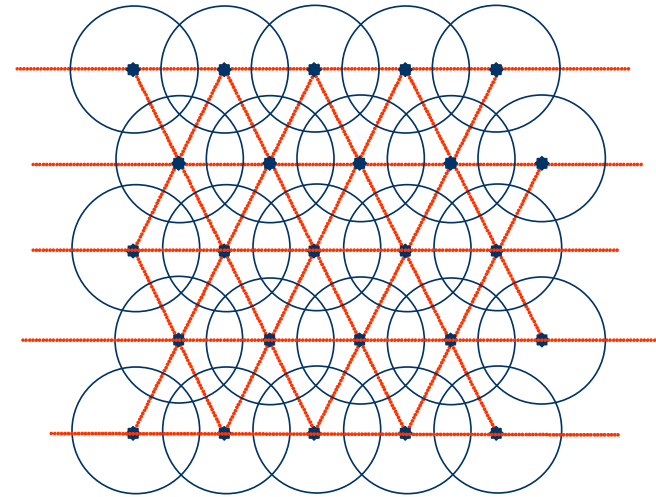
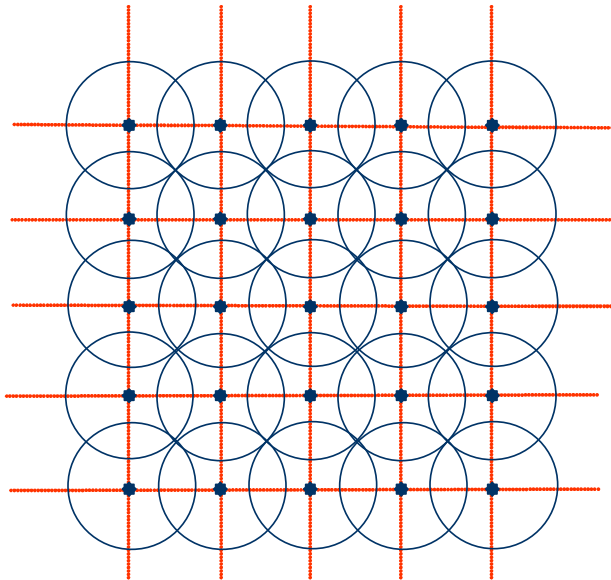


Σε ένα ιδανικό κυψελωτό σύστημα

- Οι κυψέλες θα είναι κυκλικές
- Η περιοχή εξυπηρέτησης μπορεί να καλυφθεί με σταθμούς βάσης διατεταγμένους σε τετραγωνικά, τριγωνικά ή εξαγωνικά πλέγματα



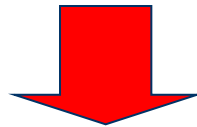
# Ιδανική κυψελωτή δομή



# Ιδανική κυψελωτή δομή

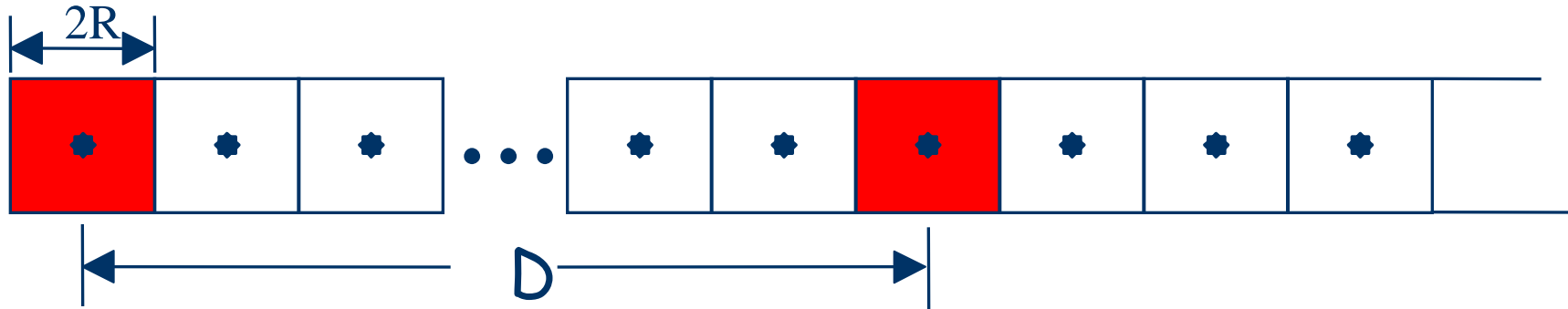


- Για να αποφευχθούν οι επικαλυπτόμενες περιοχές και για να έχουμε καλύτερη προσέγγιση στη μελέτη των κυψελωτών συστημάτων



- Κυψέλες με σχήμα κανονικού πολυγώνου.
  - τρίγωνο, τετράγωνο και εξαγώνο
  - γωνία πολυγώνου:  $\varphi = 2-4/n$  ορθές γωνίες
- Οι ιδανικές αναπαραστάσεις των κυψελών είναι χρήσιμες, όταν ασχολείται κάποιος με θέματα επίδοσης των συστημάτων

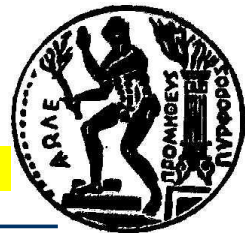
# Μονοδιάστατα συστήματα



$$K = \frac{D}{2R}$$

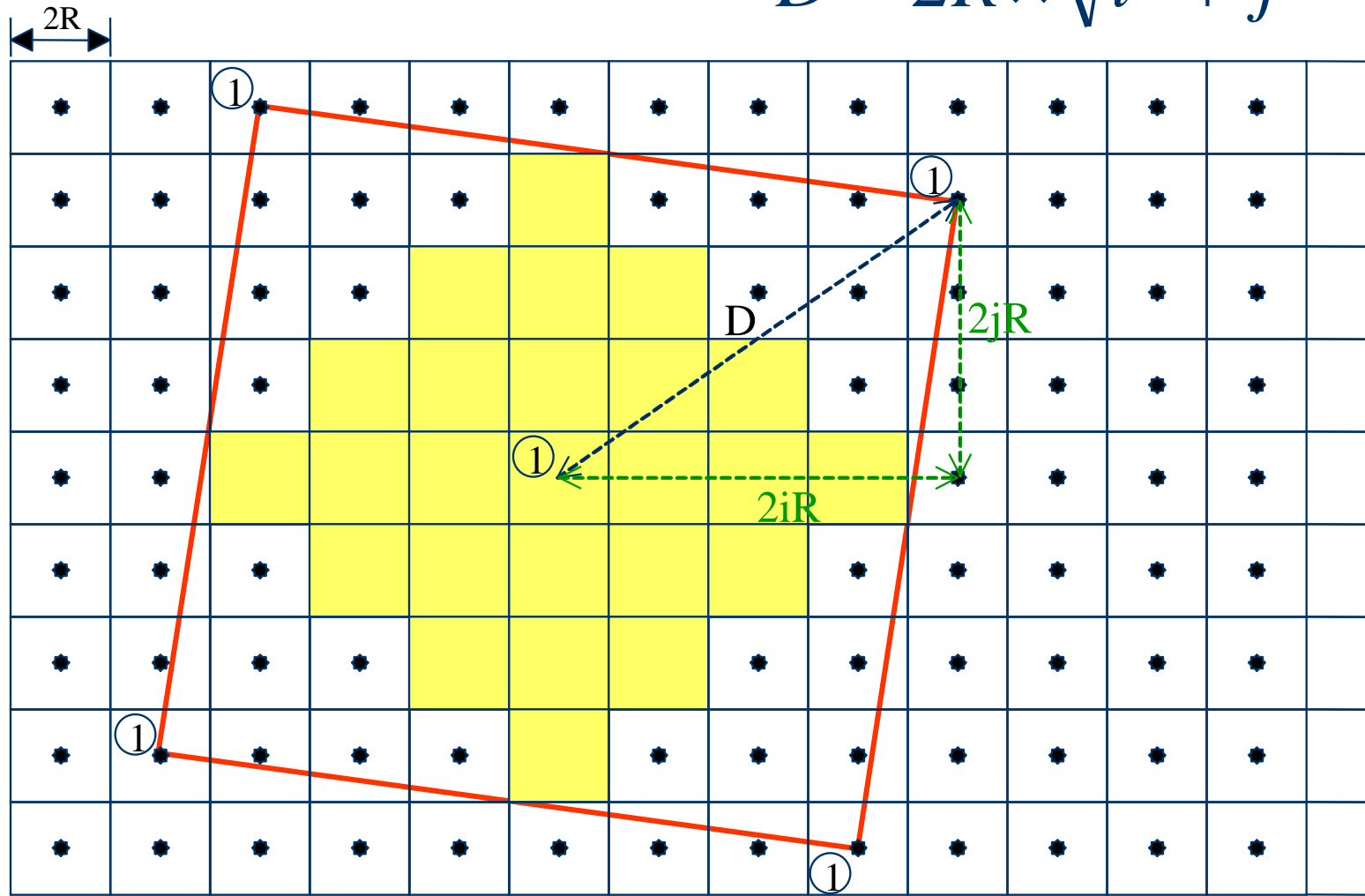
$$K = \frac{D \times (2R)}{(2R)^2} = \frac{S_K}{S_C}$$

# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Τετραγωνικές κυψέλες

$$D = 2R \times \sqrt{i^2 + j^2}$$



# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Τετραγωνικές κυψέλες

$$D = 2R \times \sqrt{i^2 + j^2} \quad K + 4(K/4) = 2K$$

$$2K = \frac{S_{D\sqrt{2}}}{S_c} = \frac{2(i^2 + j^2) \times (2R)^2}{(2R)^2} = 2(i^2 + j^2)$$

$$K = i^2 + j^2$$

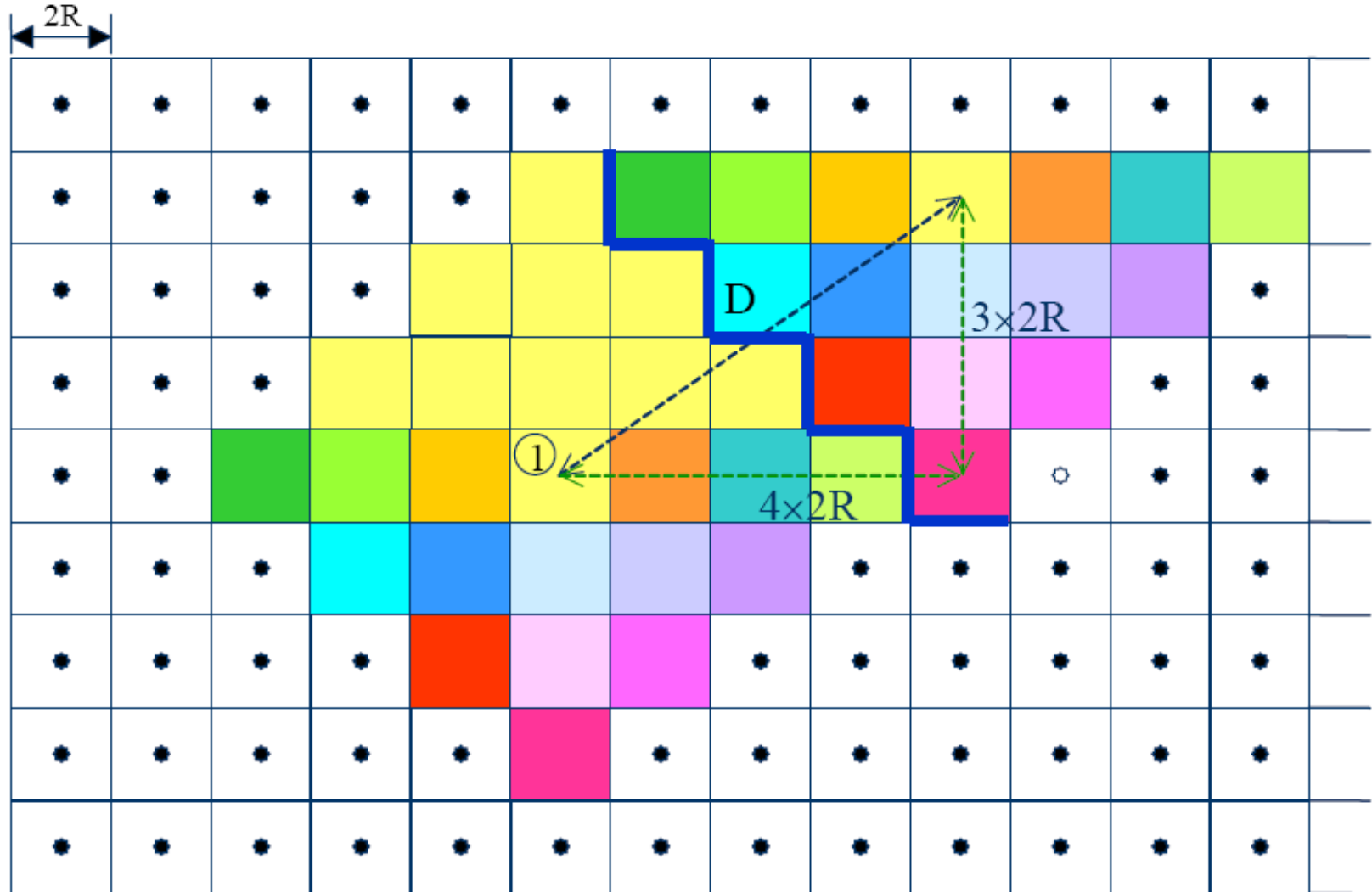
$K$ : 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 16, 17, 18, 20, 25, ...

$$D = 2R\sqrt{K}$$

# Συστήματα δύο διαστάσεων



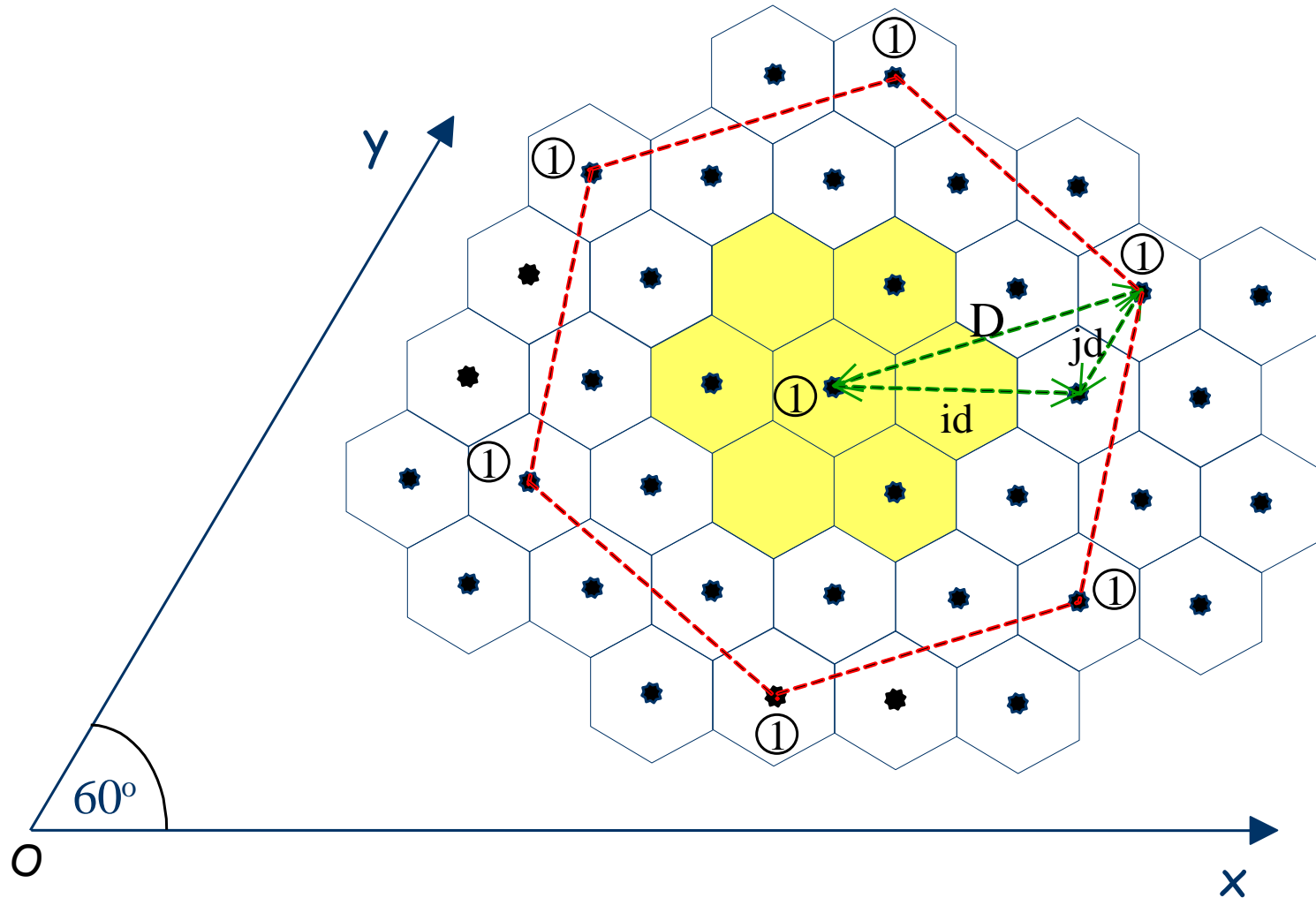
Τετραγωνικές κυψέλες:  $K = 25$  ( $i=4, j=3$ )



# Συστήματα δύο διαστάσεων



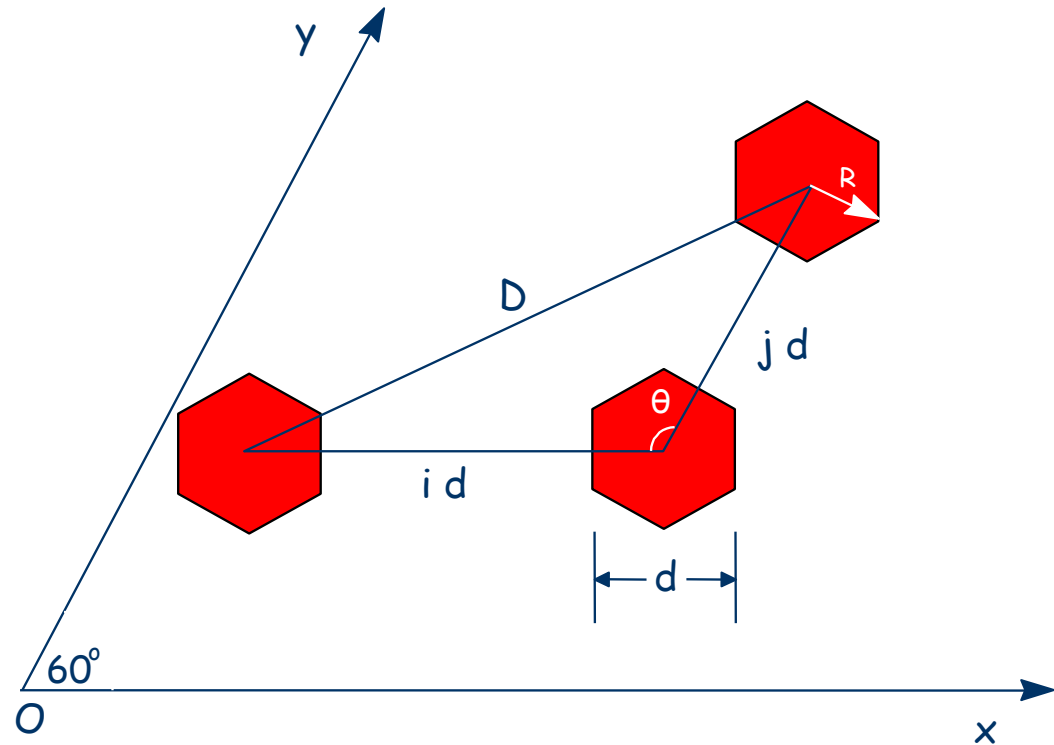
## Εξαγωνικές κυψέλες



# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Εξαγωνικές κυψέλες



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

Για  $\theta = 120^\circ$

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



# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Εξαγωνικές κυψέλες

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

$$K + 6(K/3) = 3K \quad 3K = \frac{S_D}{S_c} = \frac{D^2}{R^2}$$

$$d = \sqrt{3} \cdot R \quad K = (i^2 + i \cdot j + j^2)$$

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

# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Εξαγωνικές κυψέλες

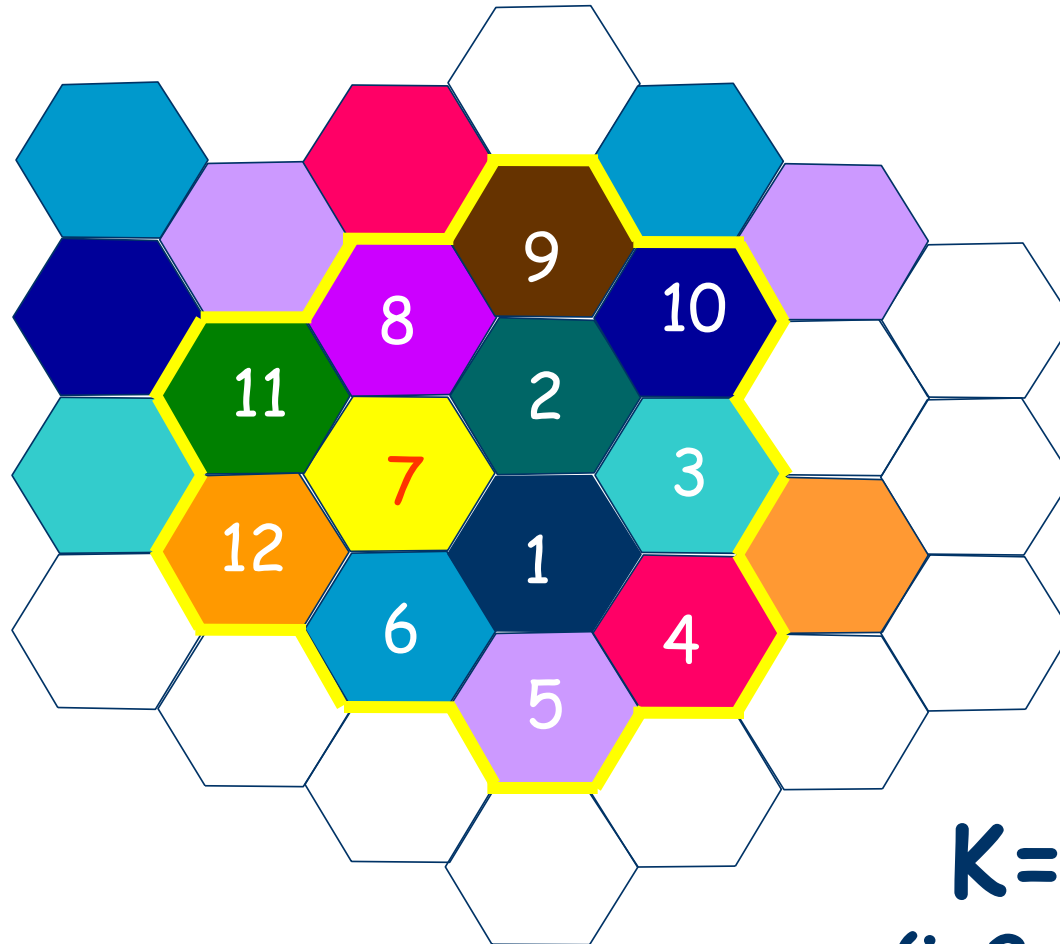


$$K=4$$
$$(i=2, j=0)$$

# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Εξαγωνικές κυψέλες

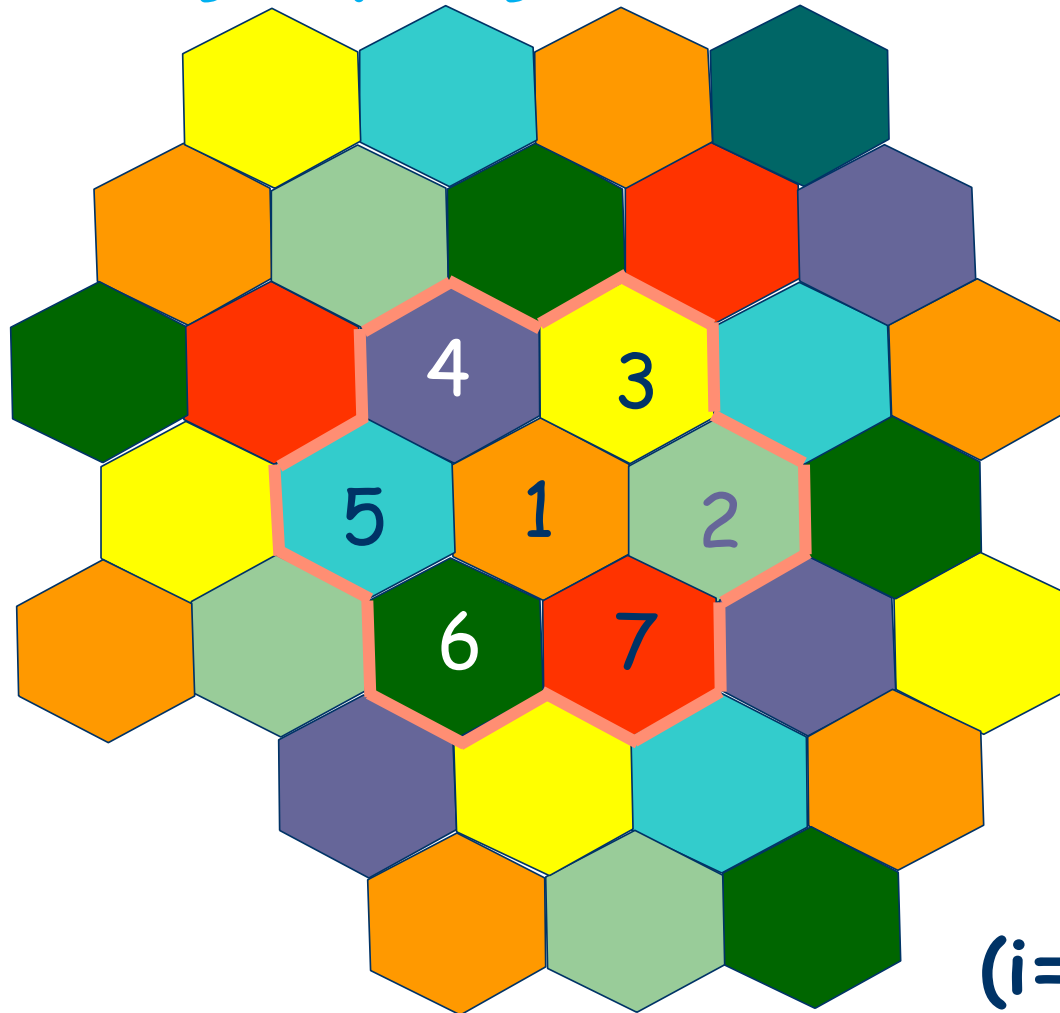


$$K=12$$
$$(i=2, j=2)$$

# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Εξαγωνικές κυψέλες

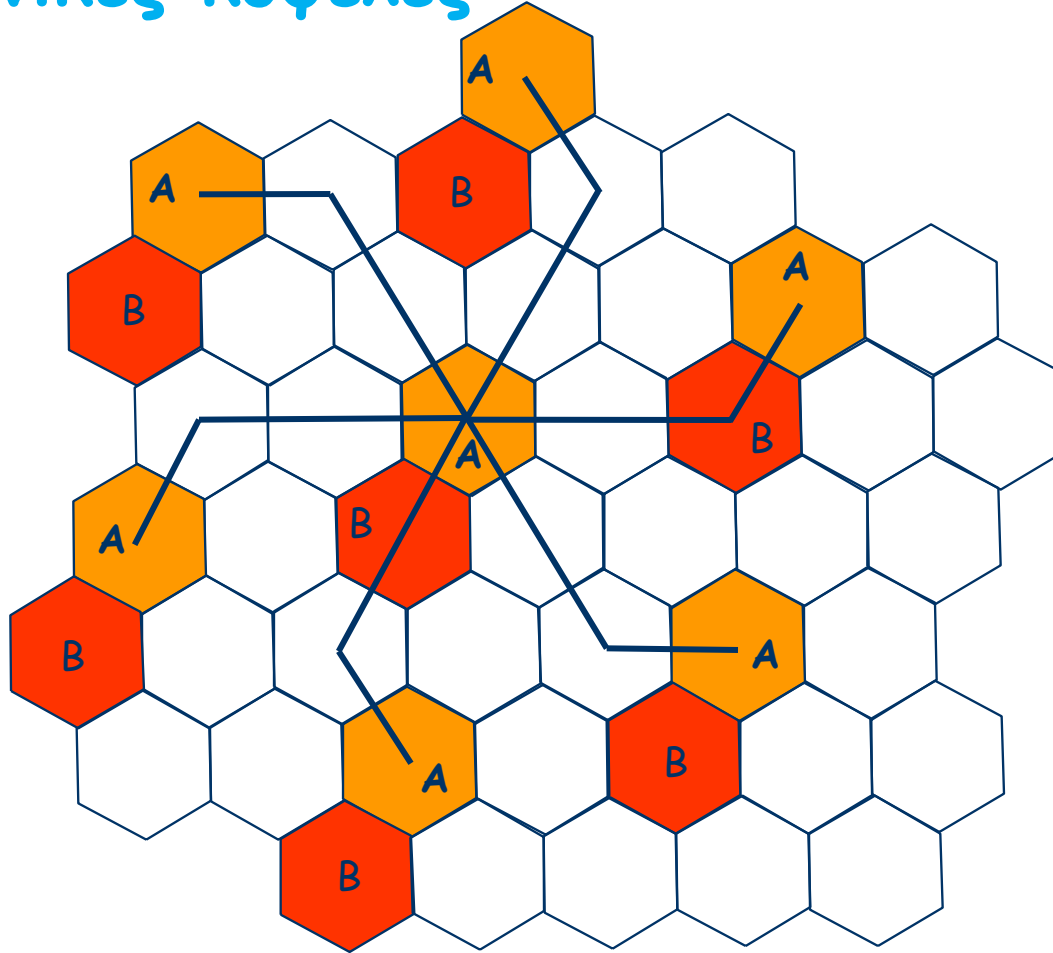


$$K=7$$
$$(i=2, j=1)$$

# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Εξαγωνικές κυψέλες



$$K=7 \quad i=2, j=1$$

Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών

# Συστήματα δύο διαστάσεων



## Παράδειγμα 3.1

Εύρος ζώνης 33MHz διατίθεται σε κυψελωτό σύστημα. Κάθε διάυλος έχει  $W = 25\text{kHz}$  ανά κατεύθυνση και χρησιμοποιείται για τηλεφωνία και έλεγχο.

Να υπολογιστεί ο αριθμός των διαύλων που θα κατανεμηθούν ανά κυψέλη, αν το σύστημα χρησιμοποιεί  $K = 7$ .

Αν διατίθεται 1MHz από το φάσμα για διαύλους ελέγχου, καθορίστε μια ομοιόμορφη κατανομή των διαύλων ελέγχου και φωνής.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



- Βασικός παράγοντας στη σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων είναι η δυνατότητα εξυπηρέτησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.
- Μετά τη διαστασιολόγηση του συστήματος, οι ραδιοδίαυλοι κατανέμονται στις κυψέλες λαμβάνοντας υπόψη:
  - την πυκνότητα των χρηστών σε κάθε κυψέλη,
  - την απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων
  - το διαθέσιμο φάσμα.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



- **Τηλεπικοινωνιακή κίνηση** ή απλά **κίνηση** στα κυψελωτά συστήματα, ορίζεται **το σύνολο**, όσο αφορά το πλήθος και τη διάρκεια, **των κλήσεων από και προς τα κινητά τερματικά**, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω ενός αριθμού διαύλων.
- Η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι ένα θέμα που έχει μελετηθεί εκτενώς στα **τηλεφωνικά συστήματα**, όπου χρησιμοποιείται η **μεταγωγή κυκλώματος**.
- Ονομάζουμε **κίνηση** το σύνολο των τηλεφωνικών κλήσεων ή κλήσεων μετάδοσης δεδομένων με μεταγωγή κυκλώματος προς και από κάποιον σταθμό βάσης.



# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



- Θεωρούμε έναν σταθμό βάσης που διαθέτει συγκεκριμένο αριθμό διαύλων για εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών.
- Η φορά της πρόσβασης δεν επηρεάζει την ανάλυση της κίνησης με βάση τη θεωρία αναμονής.
- Η θεώρηση της κίνησης δεν εξαρτάται από τον τύπο της ασύρματης πρόσβασης ή τον τύπο της πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται στον δίαυλο.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



Οι σημαντικότεροι παράγοντες για την εξυπηρέτηση της κίνησης είναι:

- ο ρυθμός άφιξης κλήσεων
- οι διάρκειες κατάληψης των διαύλων για τις επιτυχείς κλήσεις
- ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων διαύλων
- η πιθανότητα αποκλεισμού
- ο τρόπος αντιμετώπισης των αποκλεισμένων κλήσεων

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



- Η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ασχολείται με τα προβλήματα αναμονής ή/και απωλειών κλήσεων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.
- Η ανάλυση των προβλημάτων αυτών εξαρτάται τόσο από τις διαδικασίες εισόδου και εξόδου, όσο και από τη δομή του συστήματος.
- Οι απαντήσεις στα προβλήματα δεν μπορεί να είναι ακριβείς. Μπορεί να βρεθούν μόνο πιθανότητες ή μέσες τιμές για τα εξεταζόμενα μεγέθη.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



## Μεταφερόμενη κίνηση

Υποθέτουμε ότι:

- Ο αριθμός των χρηστών είναι πολύ μεγάλος και ο ρυθμός κλήσεων από κάθε χρήστη είναι μικρός, οπότε οι αφίξεις κλήσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι **τυχαίες** και **ανεξάρτητες** και μπορεί να περιγραφούν ως διαδικασίες *Poisson*.
- Οι διάρκειες κατάληψης των διαύλων είναι **τυχαίες** και **ανεξάρτητες**.
- Οι στοχαστικές ανελίξεις της κίνησης είναι **στατικές** ως προς τον χρόνο και **εργοδικές**.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



## Μεταφερόμενη κίνηση

$C$ : ο συνολικός αριθμός των διαύλων.

$t_n$ : το άθροισμα των χρονικών διαστημάτων, όπου οι  $n$  από τους  $C$  διαύλους είναι κατειλημμένοι κατά τη διάρκεια μιας μακράς χρονικής περιόδου  $T$

$$T = \sum_{n=0}^C t_n$$

**Όγκος κίνησης**  $= \sum_{n=0}^C n \cdot t_n$

άθροισμα όλων των χρόνων κατάληψης.

**μεταφερόμενη κίνηση ή ένταση της κίνησης**

$$= \frac{1}{T} \sum_{n=0}^C n \cdot t_n = \sum_{n=0}^C n \cdot (t_n / T)$$

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



## Μεταφερόμενη κίνηση

- Αν οι ποσότητες  $t_n$  και  $T$  εκφράζονται με τις ίδιες μονάδες, η μεταφερόμενη κίνηση είναι αδιάστατη ποσότητα και εκφράζεται σε *erlang*
- Στην πράξη, λαμβάνεται συνήθως  $T = 1 \text{ h}$ .
- Η ποσότητα  $t_n / T$  είναι το κλάσμα της χρονικής περιόδου  $T$  κατά τη διάρκεια του οποίου είναι κατειλημμένοι  $n$  δίαυλοι.
- Συνεπώς, *μεταφερόμενη κίνηση* είναι ο μέσος αριθμός των διαύλων που είναι κατειλημμένοι κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου  $T$ .



## Μεταφερόμενη κίνηση

- **1 erlang** αντιπροσωπεύει την κίνηση που μεταφέρεται από έναν δίαυλο, ο οποίος είναι πλήρως κατειλημμένος ( π.χ. 1 ώρα κατάληψης του διαύλου ανά ώρα ή 1 λεπτό κατάληψης ανά λεπτό).
- Το erlang είναι αδιάστατη μονάδα.
- Ένας ραδιοδίαυλος, ο οποίος π.χ. είναι κατειλημμένος 30 λεπτά κατά τη διάρκεια μιας ώρας, μεταφέρει 0.5 erlang κίνησης.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



## Προσφερόμενη κίνηση

- Οι υπολογισμοί που γίνονται στη θεωρία τηλεπικοινωνιακής κίνησης βασίζονται στη γνώση της προσφερόμενης κίνησης.
- Η *προσφερόμενη κίνηση (offered traffic)* δημιουργείται από τις κλήσεις που φθάνουν στο σύστημα, άσχετα από τη μετέπειτα τύχη τους.
- Η *προσφερόμενη κίνηση* ορίζεται ως ο μέσος αριθμός αφίξεων στο σύστημα κατά τη διάρκεια του μέσου χρόνου κατάληψης.

*Προσφερόμενη  
κίνηση*

$$A = \lambda H$$





## Προσφερόμενη κίνηση *Παράδειγμα 3.2*

Τα παρακάτω στοιχεία αντιπροσωπεύουν έρευνα αγοράς και αφορούν τη διάρκεια των κλήσεων την ώρα αιχμής και το ποσοστό των χρηστών στο οποίο αντιστοιχεί η διάρκεια αυτή. Υπολογίστε την προσφερόμενη κίνηση ανά χρήστη, αν κατά μέσο όρο κάθε χρήστης κάνει μία κλήση/ώρα.

- 0 - 1 min, 50% των χρηστών
- 1 - 2 min, 30% των χρηστών
- 2 - 3 min, 15% των χρηστών
- 3 - 10 min, 5% των χρηστών.



## Προσφερόμενη κίνηση

### Παράδειγμα 3.3

Η έρευνα αγοράς για ένα κυψελωτό σύστημα έδωσε την παρακάτω κατανομή του αριθμού κλήσεων την ώρα αιχμής συναρτήσει του ποσοστού των χρηστών που πραγματοποιούν αυτές τις κλήσεις. Βρείτε τον αριθμό των κλήσεων ανά χρήστη.

- 0 - 1 κλήσεις την ώρα αιχμής , 60% των χρηστών
- 1 - 2 κλήσεις την ώρα αιχμής , 30% των χρηστών
- 2 - 10 κλήσεις την ώρα αιχμής , 8% των χρηστών
- πάνω από 10 κλήσεις την ώρα αιχμής , 2% των χρηστών.



## Συγκέντρωση

- Τα κυψελωτά συστήματα βασίζονται στη *συγκέντρωση (trunking)* για να είναι δυνατό να εξυπηρετείται μεγάλος αριθμός χρηστών με το περιορισμένο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων που διατίθεται σε κάθε σύστημα.
- Η συγκέντρωση εκμεταλλεύεται τη στατιστική συμπεριφορά των χρηστών, γεγονός που έχει ως συνέπεια ένας σταθερός αριθμός διαύλων ή κυκλωμάτων να μπορεί να εξυπηρετεί έναν μεγάλο αριθμό συνδρομητών με τυχαία συμπεριφορά.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



## Βαθμός εξυπηρέτησης

- Ο **βαθμός εξυπηρέτησης (Grade of Service, GOS)**, είναι ένα μέτρο της δυνατότητας πρόσβασης κάποιου χρήστη σε σύστημα με συγκέντρωση, κατά την ώρα αιχμής, και ορίζεται ως ο **λόγος του αριθμού των ανεπιτυχών κλήσεων προς τον συνολικό αριθμό κλήσεων την ώρα αιχμής**
- Είναι ένας δείκτης επίδοσης ενός συγκεκριμένου συστήματος με συγκέντρωση και καθορίζει την επιθυμητή πιθανότητα να αποκτήσει κάποιος χρήστης δίαυλο πρόσβασης, με δεδομένο τον αριθμό των διαύλων που είναι διαθέσιμοι στο σύστημα.

# Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα



## Βαθμός εξυπηρέτησης

- Η μέγιστη μεταφερόμενη κίνηση είναι ίση με τον αριθμό των διαύλων  $C$ , σε erlangs.
- Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων με συγκέντρωση, που χρησιμοποιούνται στην πράξη.
- Όχι αναμονή στις κλήσεις που αποκλείονται.
  - $GOS$  = η πιθανότητα να αποκλειστεί μια κλήση.
- Ουρά αναμονής για τις κλήσεις που αποκλείονται.
  - $GOS$  = η πιθανότητα να αποκλειστεί μια κλήση, αφού παραμείνει στη ουρά για ένα προκαθορισμένο διάστημα.

# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης

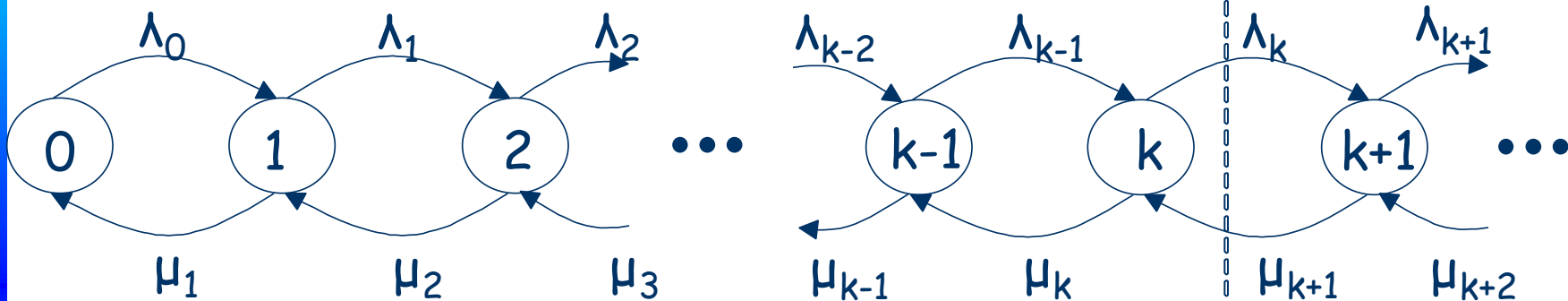


- Ανάλογα με τον τρόπο που το κάθε σύστημα θεωρείται ότι αντιμετωπίζει τις κλήσεις που βρίσκουν κατειλημμένους όλους τους διαύλους, προκύπτουν και διαφορετικοί μαθηματικοί τύποι.
- Η μαθηματική ανάλυση διευκολύνεται πολύ με την εφαρμογή της διαδικασίας γεννήσεων - θανάτων.
- Η διαδικασία γεννήσεων - θανάτων περιγράφει τη μεταβολή του αριθμού των κατειλημμένων διαύλων συναρτήσει του χρόνου.

# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



Το διάγραμμα ρυθμού μετάβασης καταστάσεων της διαδικασίας γεννήσεων-θανάτων.



Στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή, στατιστική ισορροπία, οι ροές μεταξύ των καταστάσεων πρέπει να είναι ίσες.

$$\lambda_k P_k = \mu_{k+1} P_{k+1}, \quad \text{για } 0 \leq k \leq C-1$$

$$P_{k+1} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k+1}} P_k$$

$$P_{k+1} = \frac{\lambda_k \lambda_{k-1} \dots \lambda_0}{\mu_{k+1} \mu_k \dots \mu_1} P_0$$



## Erlang B

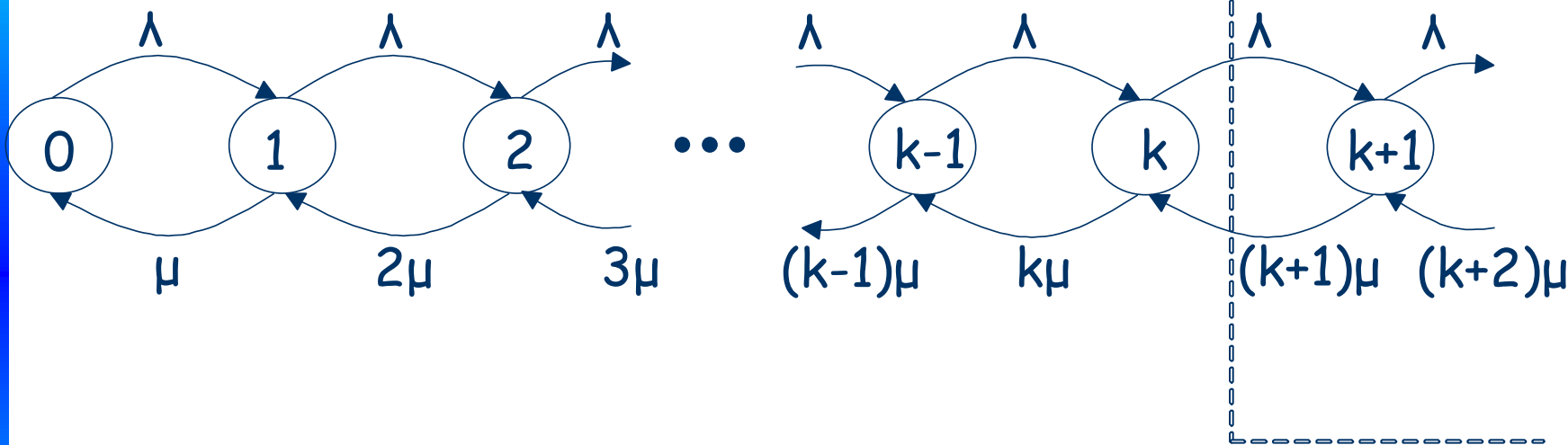
- Υποθέσεις:
  - Είναι διαθέσιμοι  $C$  δίαυλοι.
  - Η κατανομή άφιξης των κλήσεων είναι Poisson με ρυθμό  $\lambda$ .
  - Οι κλήσεις που βρίσκουν ελεύθερο δίαυλο εξυπηρετούνται αμέσως. Οι κλήσεις που βρίσκουν όλους τους διαύλους κατειλημμένους αποκλείονται και εγκαταλείπουν το σύστημα.
  - Οι χρόνοι κατάληψης των διαύλων είναι ανεξάρτητοι με εκθετική κατανομή και μέση διάρκεια  $H = 1/\mu$ .
  - Το σύστημα είναι σε στατιστική ισορροπία.



# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



## Erlang B



$$\lambda P_k = (k+1)\mu P_{k+1}, \quad \text{για } 0 \leq k \leq C-1$$

$$\mu = 1 / H$$

$$A = \lambda / \mu$$

$$P_{k+1} = \frac{A}{k+1} P_k$$

# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



## Erlang B

$$P_{k+1} = \frac{A^{k+1}}{(k+1)!} P_0 \quad \sum_{k=0}^C P_k = 1 \quad \sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!} P_0 = 1$$

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}}$$

$$\Pr[\textit{blocking}] = P_C$$

$$\Pr[\textit{blocking}] = \frac{A^C}{C!} \frac{1}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}}$$



## Erlang B

- Η *απόδοση συγκέντρωσης (trunking efficiency)* είναι ένα μέτρο για τον αριθμό των χρηστών στους οποίους μπορεί να προσφερθεί ένας συγκεκριμένος *GOS*, με δεδομένη διάταξη των σταθερών διαύλων.
- Ο τρόπος ομαδοποίησης των διαύλων μπορεί να αλλάξει ουσιαστικά τον αριθμό των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα με συγκέντρωση.

# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



## Erlang B

### Χωρητικότητα συστήματος Erlang B

Αριθμός Διαύλων	Χωρητικότητα (erlang) για <i>GOS</i>			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2



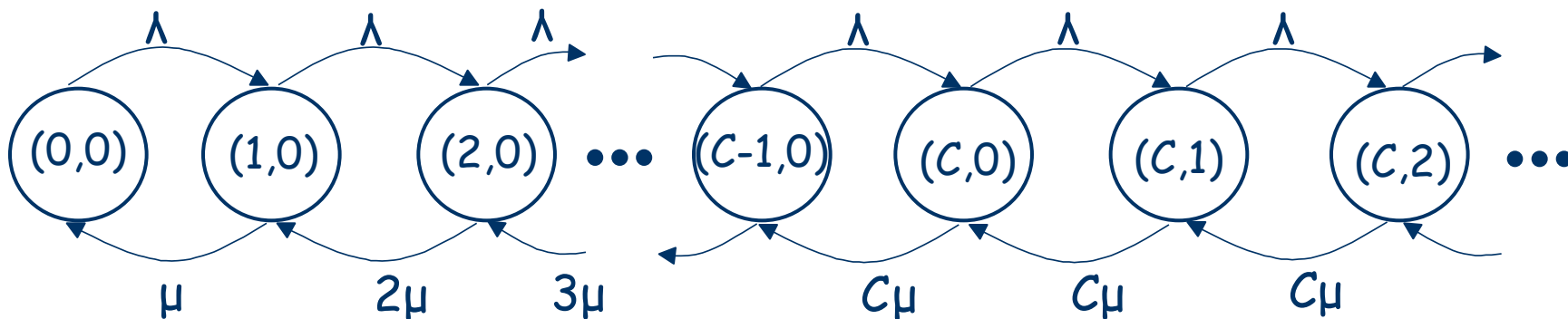
## Erlang C

- Παρόμοιες υποθέσεις με Erlang B.
- Είναι διαθέσιμοι C δίαυλοι.
- Η κατανομή άφιξης των κλήσεων είναι Poisson με ρυθμό  $\lambda$ .
- Αν μια εισερχόμενη κλήση δεν βρίσκει ελεύθερο δίαυλο, τοποθετείται σε ουρά αναμονής με άπειρο μήκος.
- Κάθε κλήση εξυπηρετείται με τη σειρά άφιξής της.

# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



## Erlang C



$$\lambda P_k = (k+1)\mu P_{k+1}, \quad \text{για } 0 \leq k \leq C-1$$

$$\lambda P_k = C\mu P_{k+1}, \quad \text{για } k \geq C$$

$$P_k = \frac{A^k}{k!} P_0, \quad \text{για } 0 \leq k \leq C$$

$$P_k = \left( \frac{\lambda}{\mu C} \right)^{k-C} P_C = \frac{A^k}{C^{k-C} C!} P_0 \quad \text{για } k \geq C$$

# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



## Erlang C

$$\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1, \quad \text{όταν } \lambda < \mu C \quad \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!} P_0 + \sum_{k=C}^{\infty} \frac{A^k}{C^{k-C} C!} P_0 = 1$$

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!} + \frac{A^C}{C!(1 - \frac{A}{C})}}$$

$$\Pr[\text{delay} > 0] = \sum_{k=C}^{\infty} P_k$$

$$\Pr[\text{delay} > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}}$$



## Erlang C

$$\Pr[\text{delay} > t] = \Pr[\text{delay} > 0] \Pr[\text{delay} > t | \text{delay} > 0]$$

$$= \Pr[\text{delay} > 0] \cdot e^{-\frac{(C-A)t}{H}}$$

Η συνάρτηση κατανομής της καθυστέρησης για συστήματα FIFO είναι εκθετική

Η μέση καθυστέρηση για όλες τις κλήσεις σε ένα σύστημα με αναμονή

$$\bar{d} = \Pr[\text{delay} > 0] \cdot \frac{H}{C - A}$$

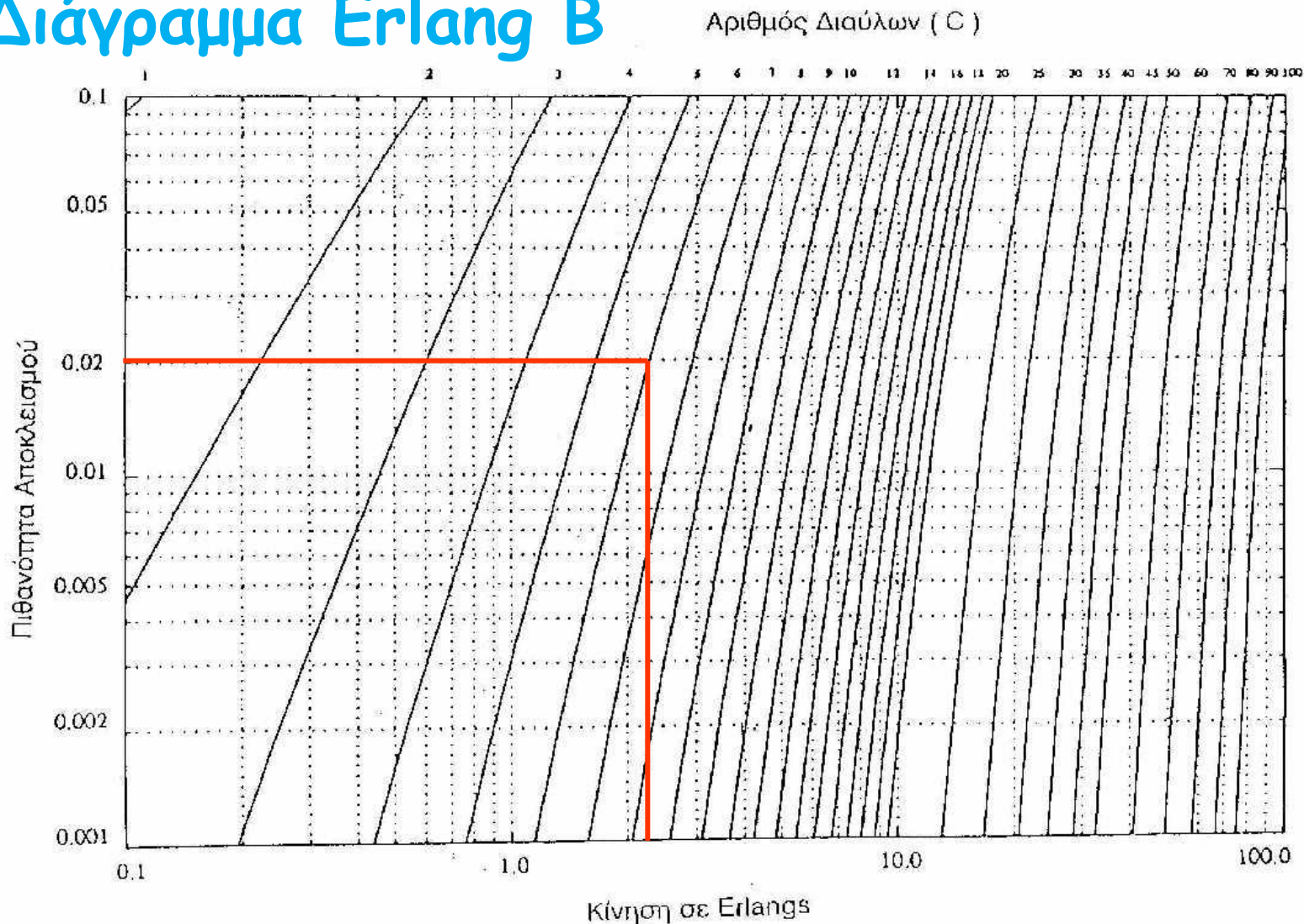
$H/(C-A)$  : η μέση καθυστέρηση για τις κλήσεις που μπαίνουν στην ουρά



# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



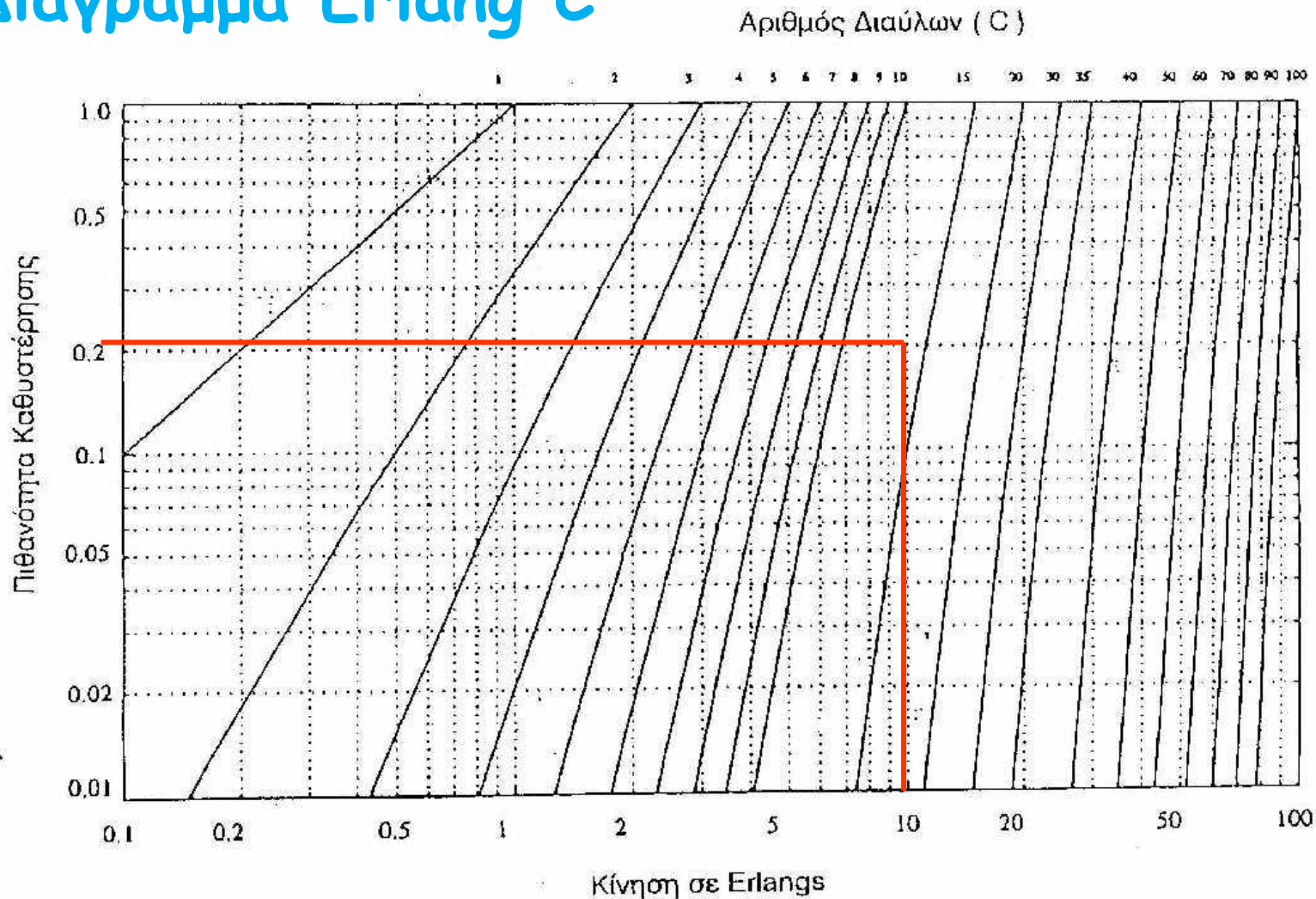
## Διάγραμμα Erlang B



# Υπολογισμός βαθμού εξυπηρέτησης



## Διάγραμμα Erlang C





## Παράδειγμα 3.6

Πόλη έκτασης  $2000\text{km}^2$ ,  $K = 7$ ,  $R = 3\text{km}$ ,  
 $B_s = 28\text{MHz}$ ,  $W = 200\text{KHz}$ , 8 δίαυλοι/ραδιοδίαυλο.

Υποθέτουμε  $GOS = 0.02$  για σύστημα Erlang B. Αν  
η  $A_u = 0.1\text{ erlang}$ , υπολογίστε,

(α)  $N_c$ , (β)  $C_c$ , (γ)  $A_c$ ,

(δ) τη μέγιστη προσφερόμενη κίνηση,

(ε)  $N_u$  για  $GOS = 0.02$ ,

(στ) τον θεωρητικό μέγιστο αριθμό χρηστών που  
μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα  
κάποια στιγμή.



## Παράδειγμα 3.7

$K = 7$  εξαγωνικές κυψέλες  $R = 2.31$  km,  $C_{0\lambda} = 84$ .  
Αν  $A_u = 0.06$  erlang και  $\lambda = 2$  κλήσεις / ώρα,  
υπολογίστε τα παρακάτω για σύστημα Erlang C με  
 $GOS = 0.05$ .

- Πόσοι χρήστες ανά  $\text{km}^2$  θα υποστηρίζονται από το σύστημα;
- Ποια είναι η πιθανότητα μια καθυστερημένη κλήση να περιμένει περισσότερο από 12 sec;
- Ποια είναι η πιθανότητα να καθυστερήσει μια κλήση περισσότερο από 12 sec;



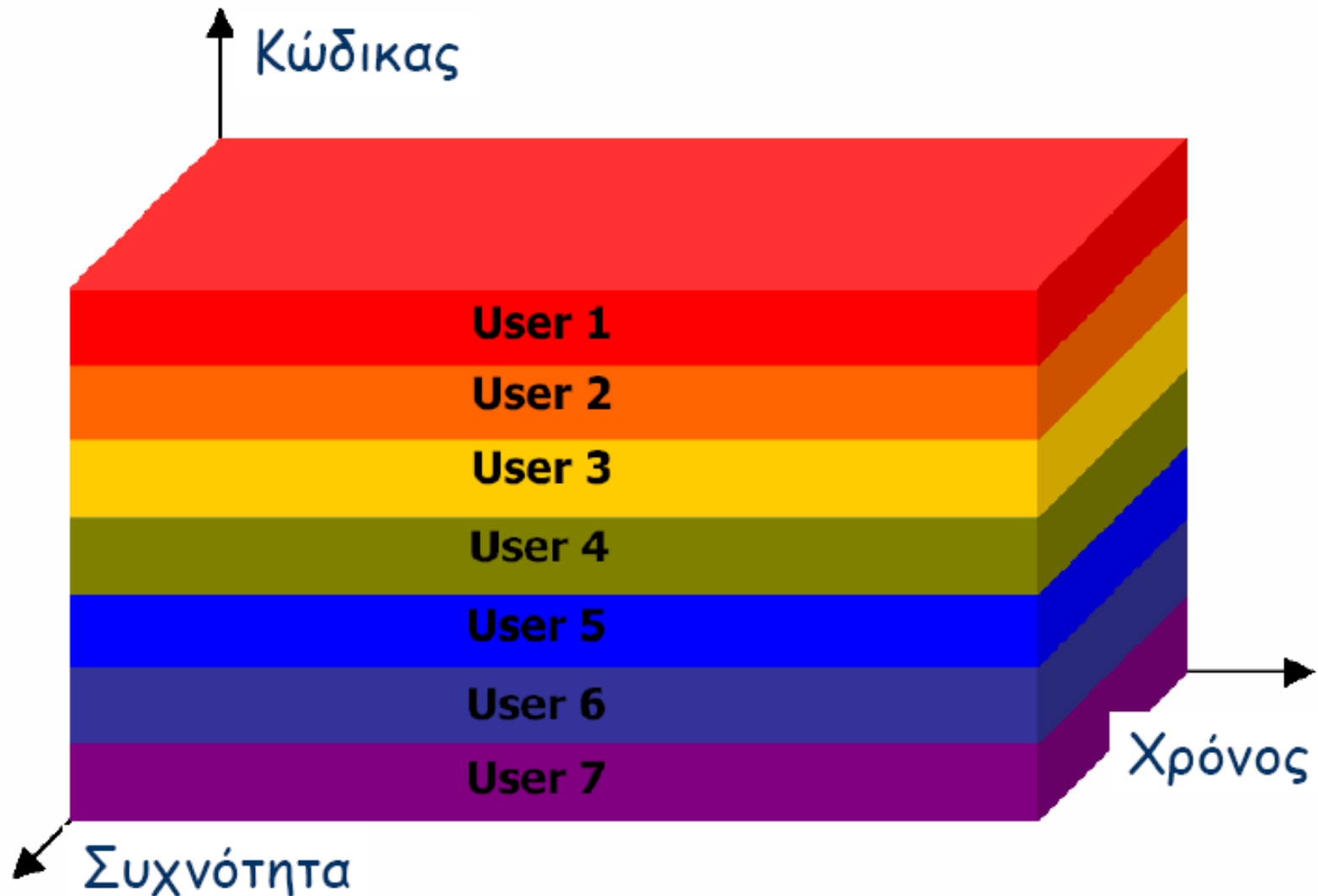
$$B_S = C_C \cdot K \cdot W$$

$$\eta_S = \frac{A_{Ct}}{B_S \cdot S_C} = \frac{A_{Ct}}{C_C \cdot K \cdot W \cdot S_C}$$

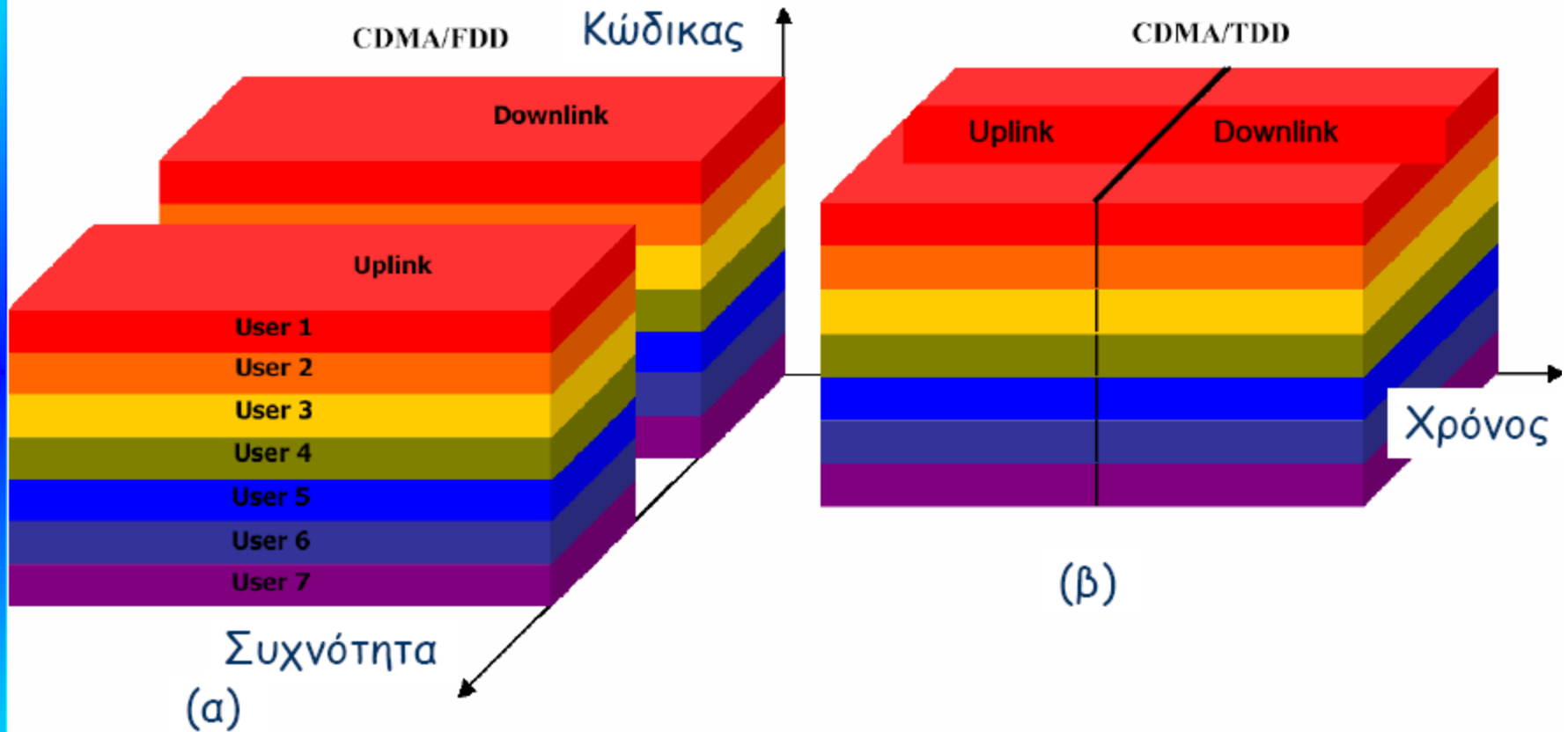
$A_{Ct} = (1-GOS)A_c$ : η μεταφερόμενη κίνηση ανά κυψέλη

Η φασματική απόδοση εκφράζεται σε  $erlang/MHz/km^2$  (όχι σε  $erlang/Hz/m^2$ ).

# CDMA



# CDMA





## Βασικές αρχές

Θεωρητική χωρητικότητα διαύλου χωρίς σφάλματα:

$$C = B_T \log_2 \left[ 1 + \frac{S}{N} \right] \quad \frac{C}{B_T} = 1.44 \ln \left[ 1 + \frac{S}{N} \right]$$

$$\ln \left[ 1 + \frac{S}{N} \right] = \frac{S}{N} - \frac{1}{2} \left( \frac{S}{N} \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{S}{N} \right)^3 - \frac{1}{4} \left( \frac{S}{N} \right)^4 + \dots$$

Αν  $S/N < 1$

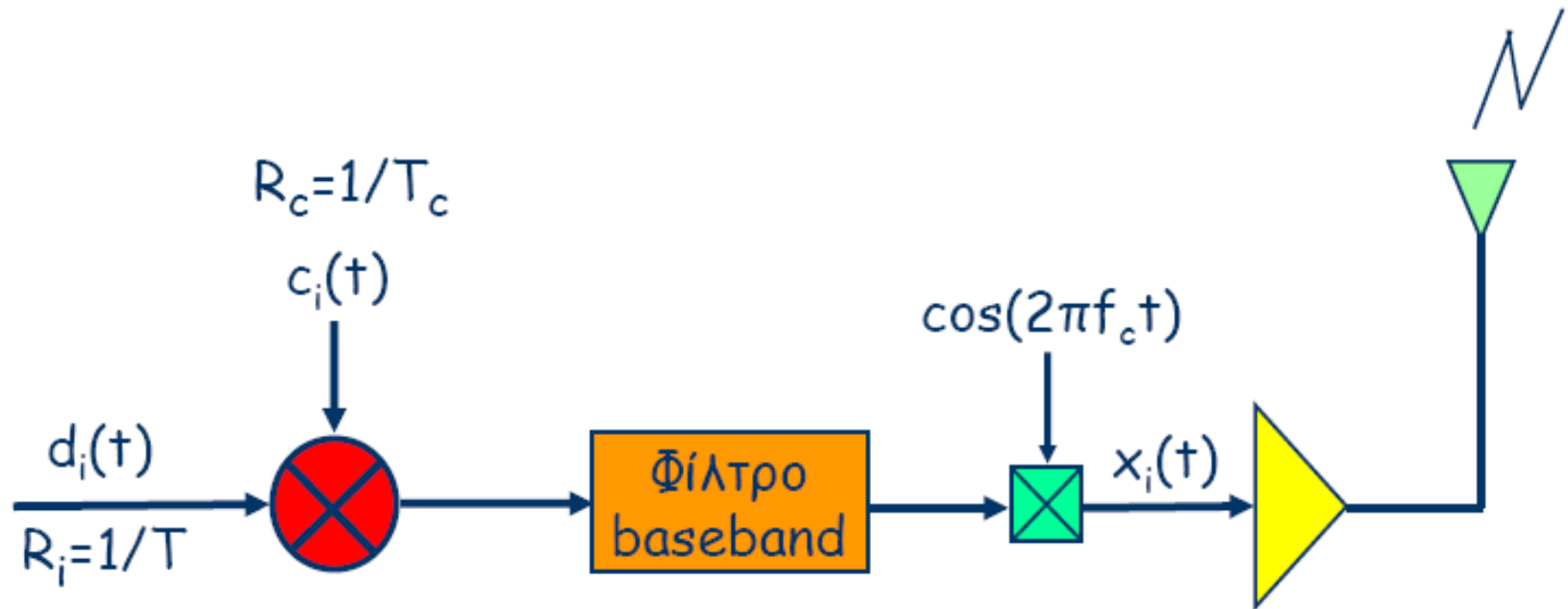
$$\uparrow B_T \approx \frac{C}{1.44} \times \frac{1}{(S/N)} \downarrow$$

π.χ.  $C=24\text{kbps}$ ,  $S/N=0.01$  (-20dB)  $\Rightarrow B_T = 1.67 \text{ MHz}$



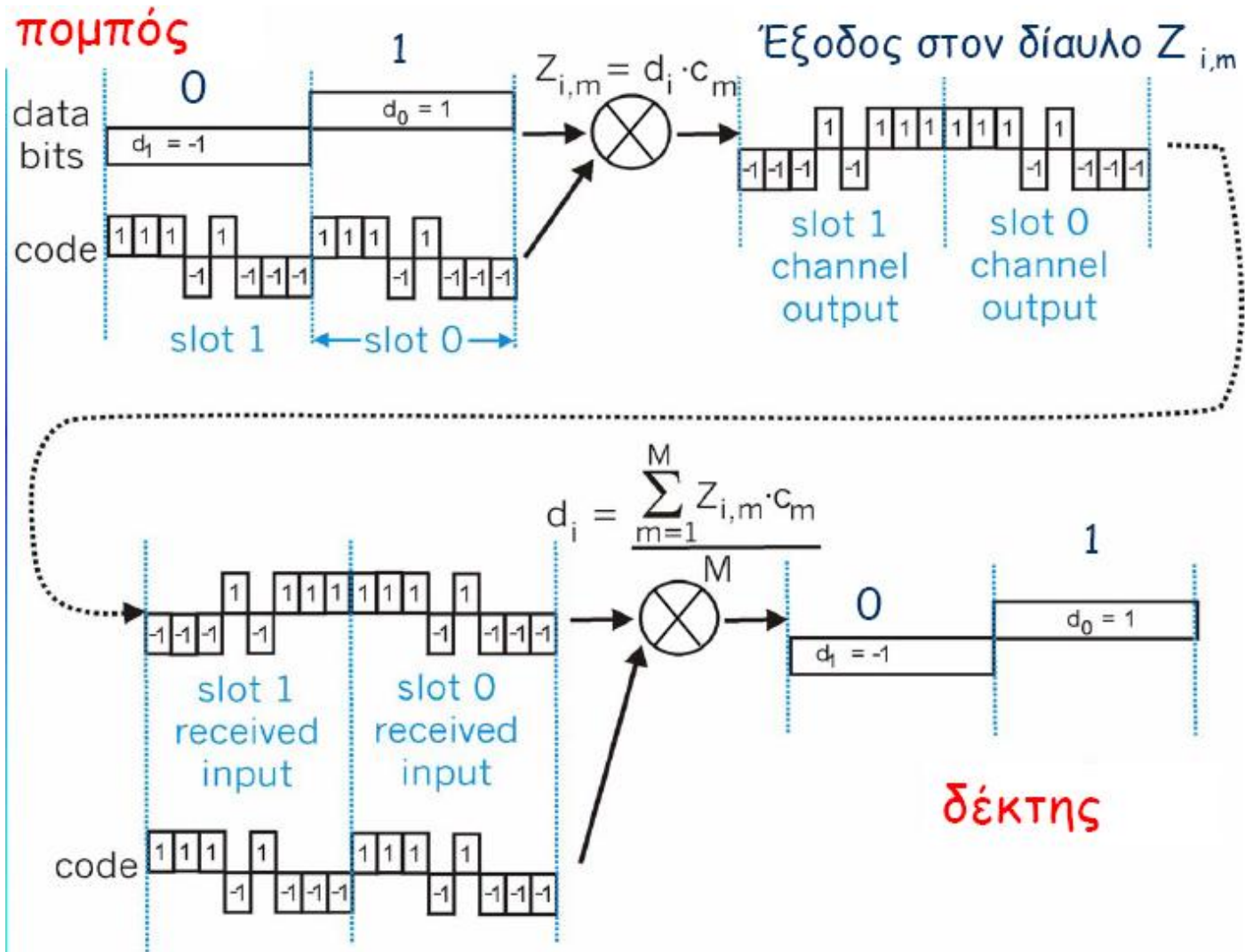


## Πομπός συστήματος DSSS



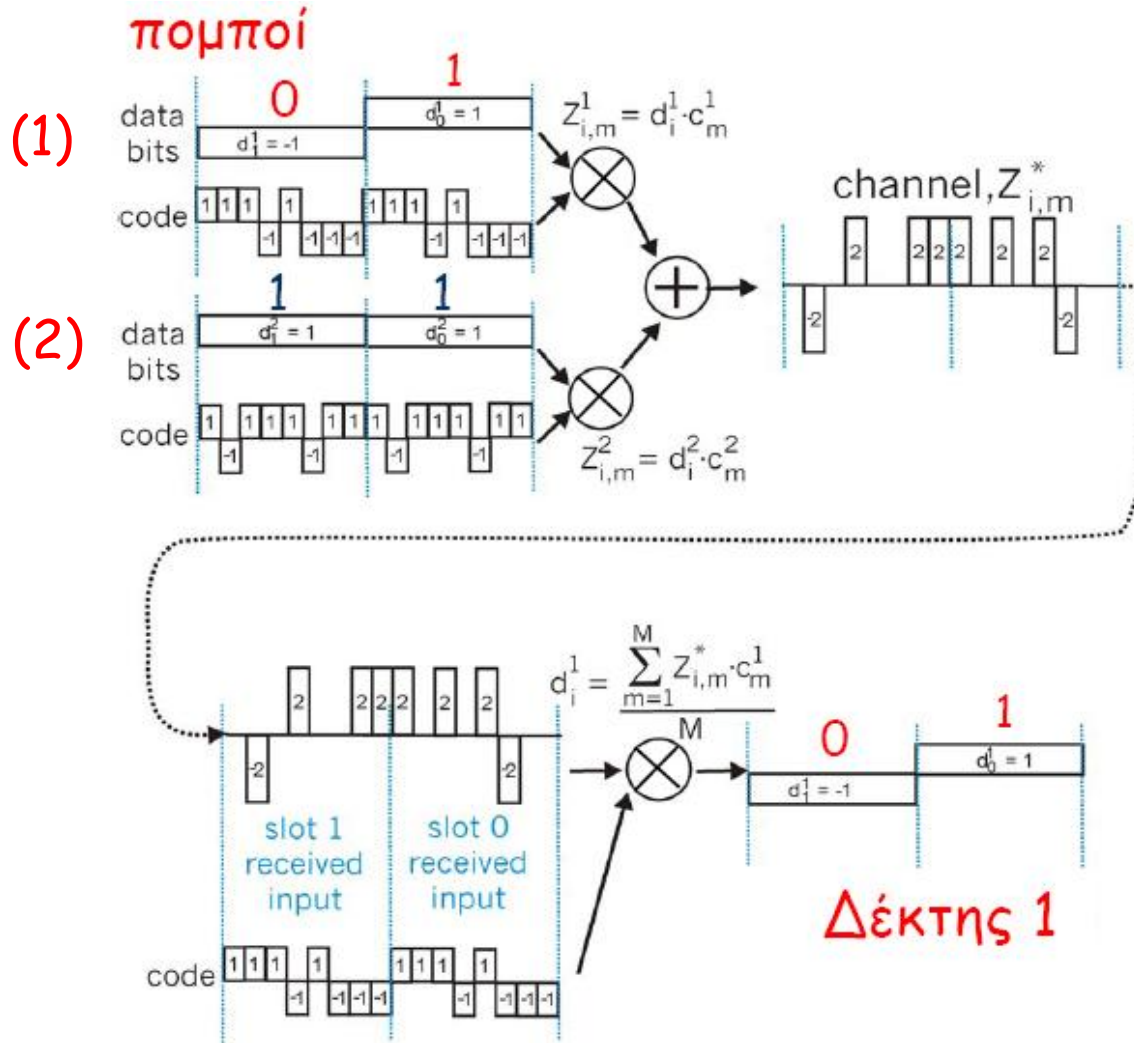


## Κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση





## Παρεμβολή από διπλή μετάδοση

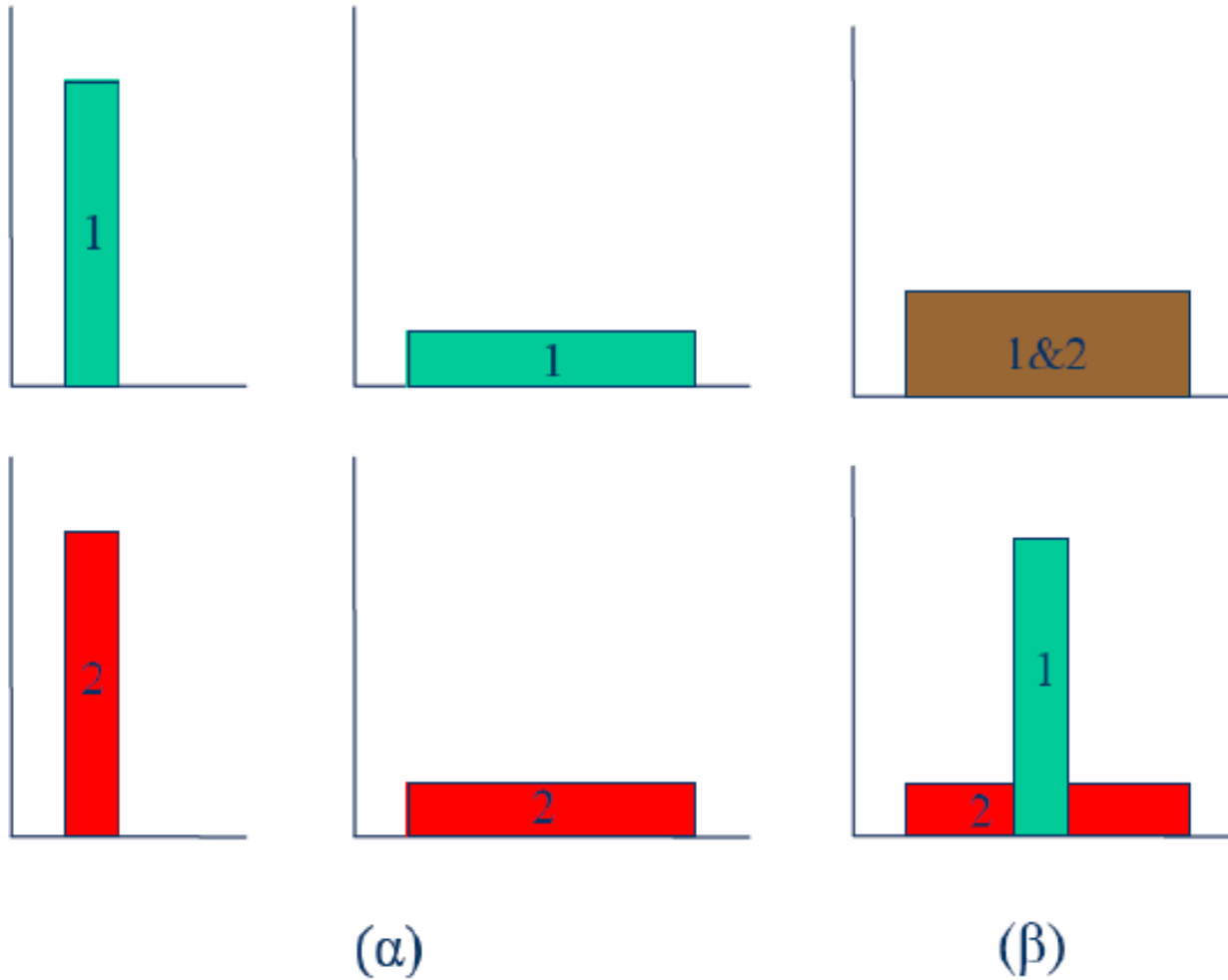




## ➤ Πλεονεκτήματα

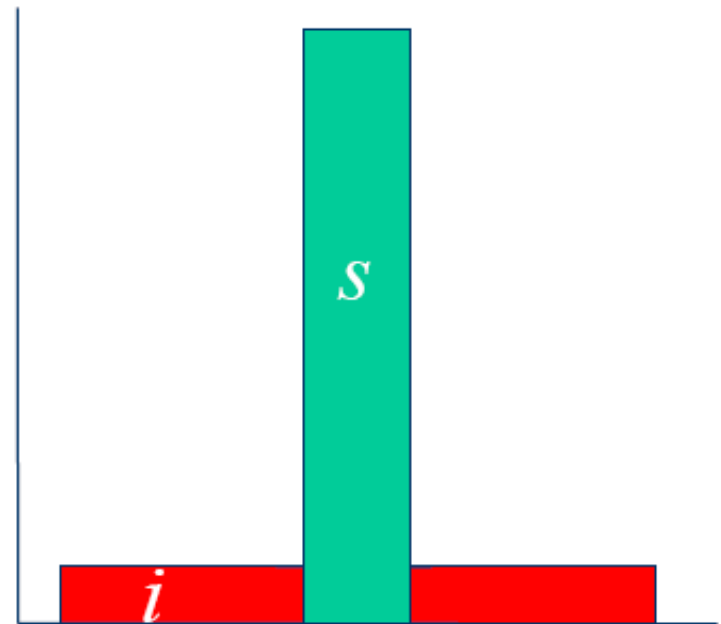
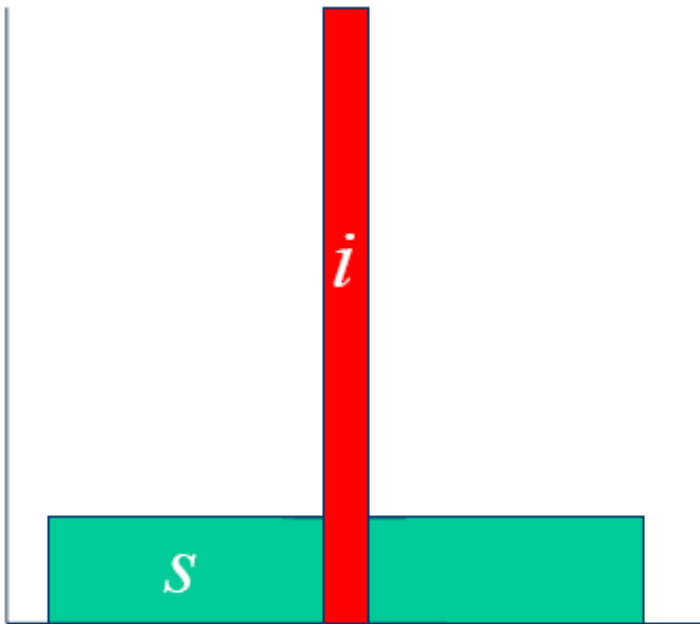
- δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης
- προστασία πληροφορίας
- απόρριψη παρεμβολών
- προστασία από παρεμβολές λόγω πολλαπλών διαδρομών
- δεν υπάρχει ανάγκη συγχρονισμού των χρηστών
- δεν υπάρχει όριο στη χωρητικότητα της κυψέλης
- όλες οι κυψέλες μπορεί να χρησιμοποιήσουν όλες τις συχνότητες

# CDMA





## Απόρριψη παρεμβολών

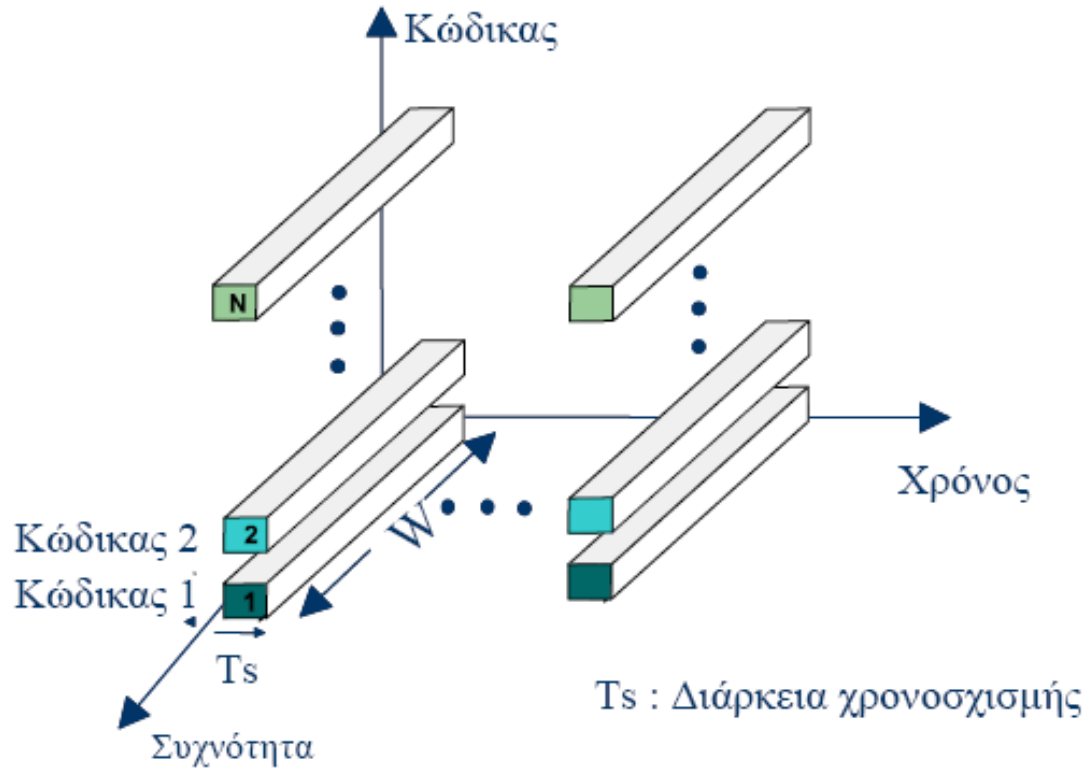




## ➤ Μειονεκτήματα

- πολυπλοκότητα εφαρμογής
- ανάγκη ελέγχου ισχύος
- ανάγκη ύπαρξης ενιαίας ζώνης συχνοτήτων (για άμεση ακολουθία).

# CDMA



$$B_W = \frac{R_{ch}}{R_b} = \frac{T_b}{T_{ch}}$$





- Η ισχύς του σήματος δεν μεταβάλλεται από την εξάπλωση
- Η ισχύς του σήματος είναι στην ουσία η επιφάνεια που ορίζεται από τη φασματική πυκνότητα ισχύος
- Οι ακολουθίες των κωδίκων έχουν πολύ μικρή συσχέτιση
- Η πυκνότητα ισχύος του σήματος προς εκείνη του απλωμένου φάσματος του σήματος, θεωρούμενη στο εύρος ζώνης του σήματος, ισούται με  $W_s/W$

$$G = \frac{W_s}{W} = \frac{1/T_{ch}}{1/T_b} = \frac{T_b}{T_{ch}} = B_W$$



## Περιθώριο παρεμβολής

$$\frac{I_c}{P_r} = \frac{I_t \times W_s}{E_b \times R_b} = \frac{W_s / R_b}{E_b / I_t}$$

Αν τεθεί  $E_b / I_t = (E_b / I_t)_0$  :

κέρδος επεξεργασίας



$$\text{Περιθώριο παρεμβολής} = \frac{W_s / R_b}{(E_b / I_t)_0} = \frac{G_s}{(E_b / I_t)_0}$$

$$\text{Περιθώριο παρεμβολής (dB)} = G_s \text{ (dB)} - \left( \frac{E_b}{I_t} \right)_0 \text{ (dB)}$$



## Χωρητικότητα για σύστημα με μία κυψέλη

$$\frac{I_c}{P_r} = \frac{G_s}{(E_b / I_t)_0} \quad \frac{I_c}{P_r} = \frac{(M-1)P_r}{P_r} = M-1$$



$$(M-1) = \frac{G_s}{(E_b / I_t)_0}$$

$$M = 1 + \frac{G_s}{E_b / I_t} \quad M \approx \frac{G_s}{E_b / I_t} \quad M \approx \frac{G_s}{E_b / I_t} \times \frac{1}{\kappa}$$



## Παράμετροι επαναχρησιμοποίησης

- Με τέλειο έλεγχο ισχύος για τα  $M$  ενεργά ΜΤ μιας κυψέλης και στάθμη ισχύος από κάθε ΜΤ στον δέκτη του σταθμού βάσης ίση με  $P_r$ , η συνολική παρεμβολή  $I_c$  που οφείλεται στα υπόλοιπα τερματικά της ίδιας κυψέλης είναι:

$$I_c = (M - 1) \cdot P_r \cdot \kappa_r$$

- Η μέση ισχύς παρεμβολής  $I_{cn}$  από τις άλλες κυψέλες, ως κάποιο κλάσμα  $\xi$  της συνολικής ισχύος που λαμβάνεται από τον δέκτη του σταθμού βάσης της κυψέλης, είναι

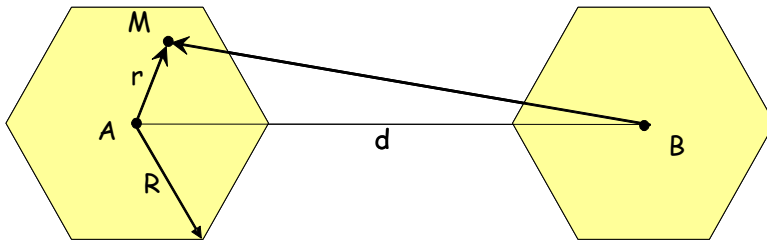
$$I_{cn} = \xi \cdot M \cdot P_r \cdot \kappa_r$$

$\xi$ : κλάσμα επαναχρησιμοποίησης (reuse fraction)

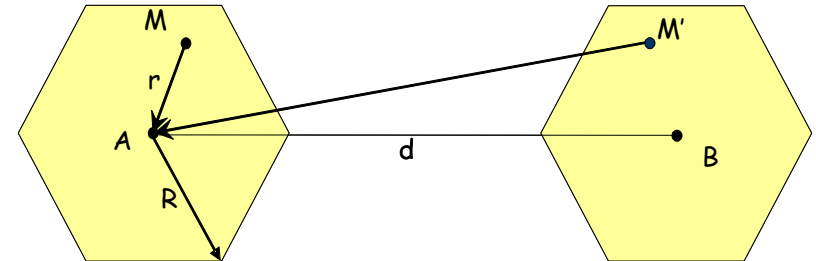
$\kappa_r$ : η μέση τιμή του συντελεστή δραστηκότητας ομιλίας στη ζεύξη ανόδου



## Παράμετροι επαναχρησιμοποίησης



Ζεύξη καθόδου



Ζεύξη ανόδου

➤ Η συνολική ισχύς παρεμβολής  $I_o$  στη ζεύξη ανόδου είναι:

$$I_o = I_c + I_{cn} = [(1 + \xi) \cdot M - 1] \cdot P_r \cdot \kappa_r = \left[ \frac{M}{\eta} - 1 \right] \cdot P_r \cdot \kappa_r$$

$\eta = \frac{1}{1 + \xi}$  : απόδοση επαναχρησιμοποίησης (reuse efficiency)

$K = 1 + \xi$  : συντελεστής επαναχρησιμοποίησης (reuse factor)



## Δίκτυα CDMA με πολλές κυψέλες

- Για να επιτευχθεί ικανοποιητική επίδοση σε μια ζεύξη CDMA πρέπει πρώτα να ορισθεί ο επιθυμητός λόγος FER (Frame Error Ratio).
- Στη συνέχεια προσδιορίζονται πειραματικά οι λόγοι  $E_b/I_+$ , στις ζεύξεις ανόδου και καθόδου.
  - $E_b$ : ενέργεια ανά bit μεταδιδόμενης πληροφορίας
  - $I_+$ : φασματική πυκνότητα παρεμβολής και θορύβου
- Ο μέγιστος υποστηριζόμενος αριθμός ΜΤ στη ζεύξη ανόδου είναι διαφορετικός από εκείνον της ζεύξης καθόδου.
- Κανονικά, η χωρητικότητα ενός συστήματος CDMA εξαρτάται από τη χωρητικότητα στη ζεύξη καθόδου.



## Δίκτυα CDMA με πολλές κυψέλες

Προτεινόμενες τιμές  $E_b/I_t$ , με βάση τα πειράματα.

Ταχύτητα ΜΤ	$E_b/I_t$ (dB)	Παρατηρήσεις
Μικρή ( $\leq 8$ km/h)	5	Η διάρκεια των διαλείψεων είναι μεγαλύτερη από την περίοδο των ενημερώσεων ελέγχου ισχύος στο τερματικό.
Μεσαία ( $\approx 50$ km/h)	7	Δεν ισχύουν τα πλεονεκτήματα της χαμηλής ή της υψηλής ταχύτητας, οπότε απαιτείται ελαφρώς υψηλότερη τιμή $E_b/I_t$ .
Υψηλή ( $\geq 80$ km/h)	6 - 6.5	Η διάρκεια των διαλείψεων είναι μικρή και συγκρίσιμη με τη διάρκεια του chip. Συνεπώς, απαιτείται μικρή τιμή $E_b/I_t$ .



## Δίκτυα CDMA με πολλές κυψέλες

Τιμές του  $\xi$ , για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  και για  $n = 4$ .

$\sigma$ (dB)	$\xi$	
	2-way SHO	3-way SHO
0	0.44	0.44
2	0.43	0.43
4	0.47	0.45
6	0.56	0.49
8	0.77	0.57
10	1.28	0.75
12	2.62	1.17





## Δίκτυα CDMA με πολλές κυψέλες

### Φορτίο κυψέλης

- Είναι ένα μέτρο για τη ολική ισχύ παρεμβολής  $I_0$  που επιτρέπεται σε ένα σύστημα, με αναφορά τον θερμικό θόρυβο  $N_f$

$$\rho = \frac{M}{M_{\max}}$$

$M$ : ενεργά ΜΤ που εξυπηρετούνται από μια κυψέλη

$M_{\max}$ : μέγιστος δυνατός αριθμός ΜΤ που μπορεί να εξυπηρετηθούν από την κυψέλη

- Αποδεικνύεται ότι:  $\rho \approx I_0 / (I_0 + N_f)$



## Χωρητικότητα ζεύξης ανόδου

Αν αγνοήσουμε τον θόρυβο σε σύστημα CDMA με πολλές κυψέλες

$$\left(\frac{S}{I}\right)_0 = \left(\frac{E_b}{I_t}\right)_0 \cdot \frac{R_b}{W_s} = \left(\frac{E_b}{I_t}\right)_0 \cdot \frac{1}{G_s}$$

$$\left(\frac{E_b}{I_t}\right)_0 = \frac{P_r \cdot G_s}{I_c + I_{cn}} = \frac{P_r \cdot G_s}{(M-1) \cdot P_r \cdot \kappa_r + \xi \cdot M \cdot P_r \cdot \kappa_r}$$

Σε σύστημα CDMA με μία κυψέλη

$$\left(\frac{E_b}{I_t}\right)_0 = \frac{P_r \cdot G_s}{(M'-1) \cdot P_r \cdot \kappa_r}$$

$$\frac{M'}{M} = 1 + \xi = K$$

Η χωρητικότητα ανά κυψέλη σε σύστημα CDMA με μία κυψέλη είναι μεγαλύτερη από εκείνη του συστήματος με πολλές κυψέλες



## Χωρητικότητα ζεύξης ανόδου

Αν λάβουμε υπόψη τον θόρυβο και έχουμε σύστημα με μία κυψέλη

$$E_b = P_{ri} / R_b \quad N_t = N_0 W_s \quad I_{c0} = \frac{1}{W_s} \sum_{i=1}^{M-1} \kappa_r \cdot P_{ri}$$

Για τέλειο έλεγχο ισχύος στη ζεύξη ανόδου και  $P_r$  για όλα τα ΜΤ:

$$I_t = \frac{(M-1) \cdot \kappa_r \cdot P_r}{W_s} + N_0 = I_{c0} + N_0$$

$$\frac{E_b}{I_t} = \frac{W_s}{R_b} \cdot \frac{P_r}{N_0 W_s + (M-1) \cdot \kappa_r \cdot P_r} = G_s \cdot \frac{P_r}{N_0 W_s + (M-1) \cdot \kappa_r \cdot P_r}$$



## Χωρητικότητα ζεύξης ανόδου

$$M = 1 + G_s \cdot \left[ \frac{1}{(E_b / I_t) \cdot \kappa_r} \right] - \frac{N_0 W_s}{\kappa_r \cdot P_r} \quad P_r = \frac{(E_b / I_t) \cdot N_0}{\frac{1}{R_b} - \frac{(M - 1) \cdot (E_b / I_t) \cdot \kappa_r}{W_s}}$$

Αν λάβουμε υπόψη την παρεμβολή από τις άλλες κυψέλες

$$\frac{E_b}{I_t} = G_s \cdot \frac{P_r}{N_0 W_s + (M - 1) \cdot \kappa_r \cdot P_r \cdot K}$$



## Χωρητικότητα ζεύξης ανόδου

Αν ο έλεγχος ισχύος δεν είναι τέλειος και τον λάβουμε υπόψη με έναν παράγοντα  $\eta_c$

$$\frac{E_b}{I_t} = G_s \cdot \frac{P_r}{N_0 W_s + (M-1) \cdot \kappa_r \cdot (P_r / \eta_c) \cdot K}$$

$$M = 1 + G_s \cdot \left[ \frac{\eta_c}{(E_b / I_t) \cdot \kappa_r \cdot K} \right] - \frac{N_0 \cdot W_s \cdot \eta_c}{\kappa_r \cdot P_r \cdot K} \quad P_r = \frac{(E_b / I_t) \cdot N_0}{\frac{1}{R_b} - \frac{(M-1) \cdot (E_b / I_t) \cdot K \cdot \kappa_r}{W_s \cdot \eta_c}}$$

Ασυμπτωτική χωρητικότητα

$$M_{\max} = 1 + G_s \cdot \left[ \frac{\eta_c}{(E_b / I_t) \cdot \kappa_r \cdot K} \right] \quad M_{\max} \approx G_s \cdot \left[ \frac{\eta_c}{(E_b / I_t) \cdot \kappa_r \cdot K} \right]$$



## Παράδειγμα 6.1

Σε σύστημα CDMA  $W_s = 1.23$  MHz,  $R_b = 9.6$  kbps και  $(E_b/I_{\dagger})_0 = 7$  dB. Θεωρούμε ότι  $\xi = 0.55$ ,  $\kappa = 0.5$ ,  $\eta_c = 0.8$  και το κέρδος λόγω χωρισμού των κυψελών σε τομείς είναι ίσο με 2.55.

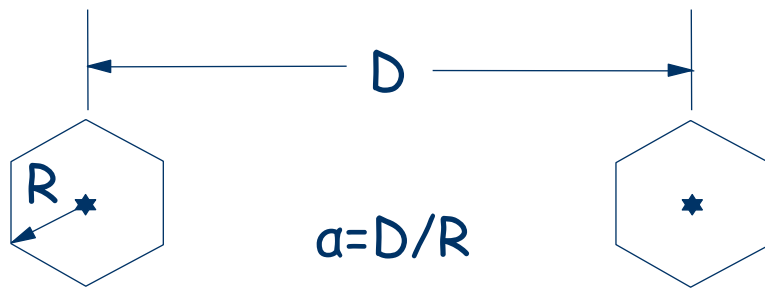
- (α) Να υπολογισθεί η ασυμπτωτική χωρητικότητα
- (β) Ποιος είναι ο μέσος αριθμός ΜΤ που μπορεί να υποστηριχθεί από έναν τομέα κυψέλης, σε κυψέλη με τρεις τομείς;
- (γ) Κατά πόσο θα μειωθεί η χωρητικότητα τομέα, αν  $R_b = 14.4$  kbps;



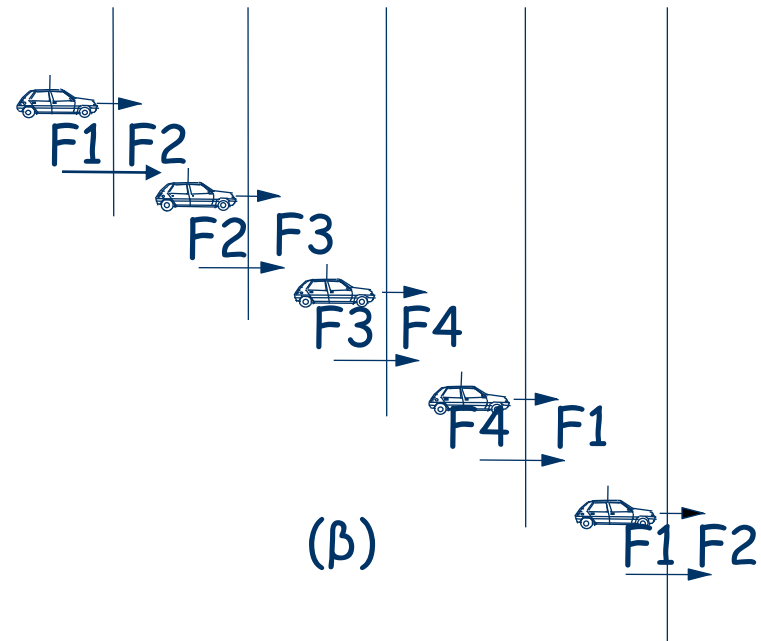
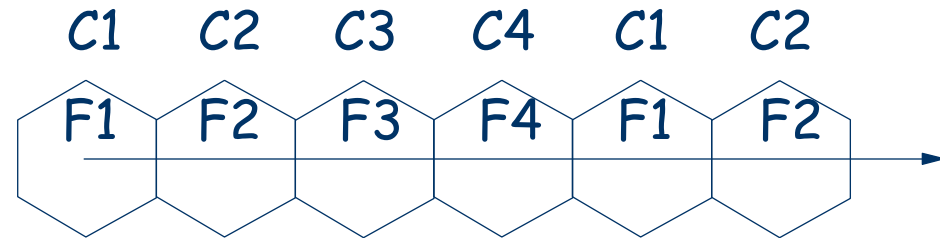
## Συστήματα CDMA

- CDMA ευθείας ακολουθίας (Direct Sequence CDMA, DS/CDMA)
- CDMA με μεταπήδηση συχνότητας (Frequency Hopping CDMA, FH/CDMA)
- CDMA με μεταπήδηση χρόνου (Time Hopping CDMA, TH/CDMA)
- Υβριδικά συστήματα CDMA

# Μηχανισμός διαπομπής



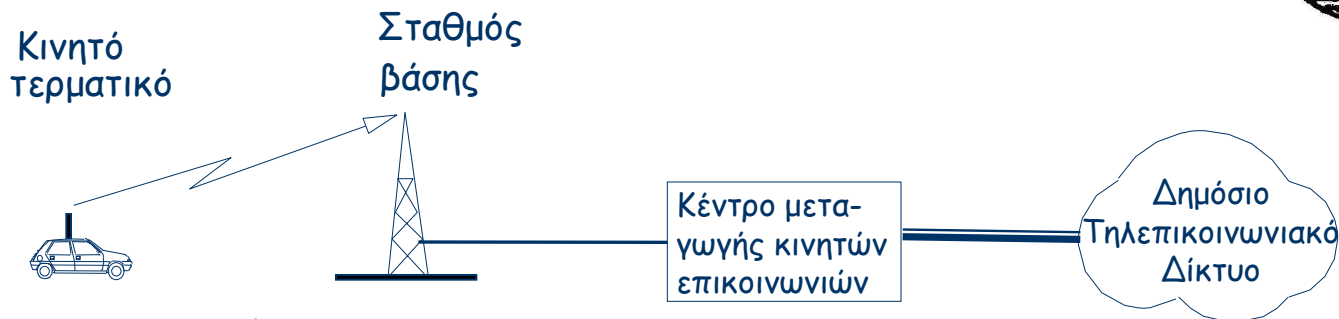
(a)



(b)



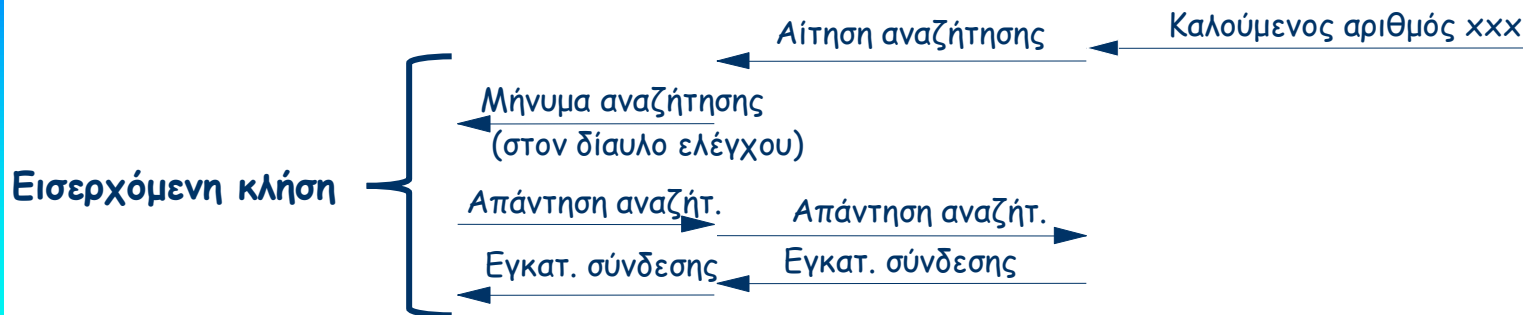
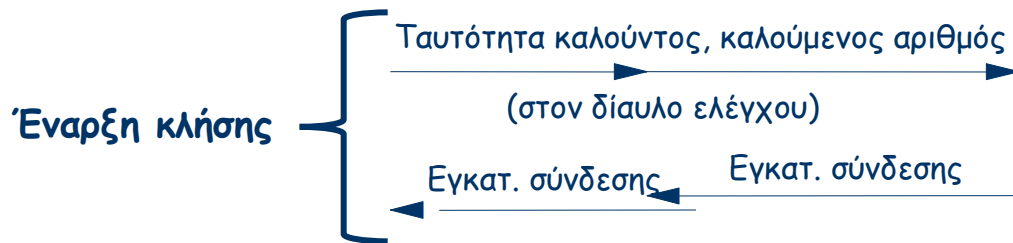
# Ασύρματη πρόσβαση



Το ΜΤ σαρώνει τους διαύλους ελέγχου και "κλειδώνει" στον ισχυρότερο

Δίαυλος ελέγχου

Αριθμός διαθέσιμων διαύλων ελέγχου για έλεγχο και εγκατάσταση κλήσεων



# Άσκηση 3.9

