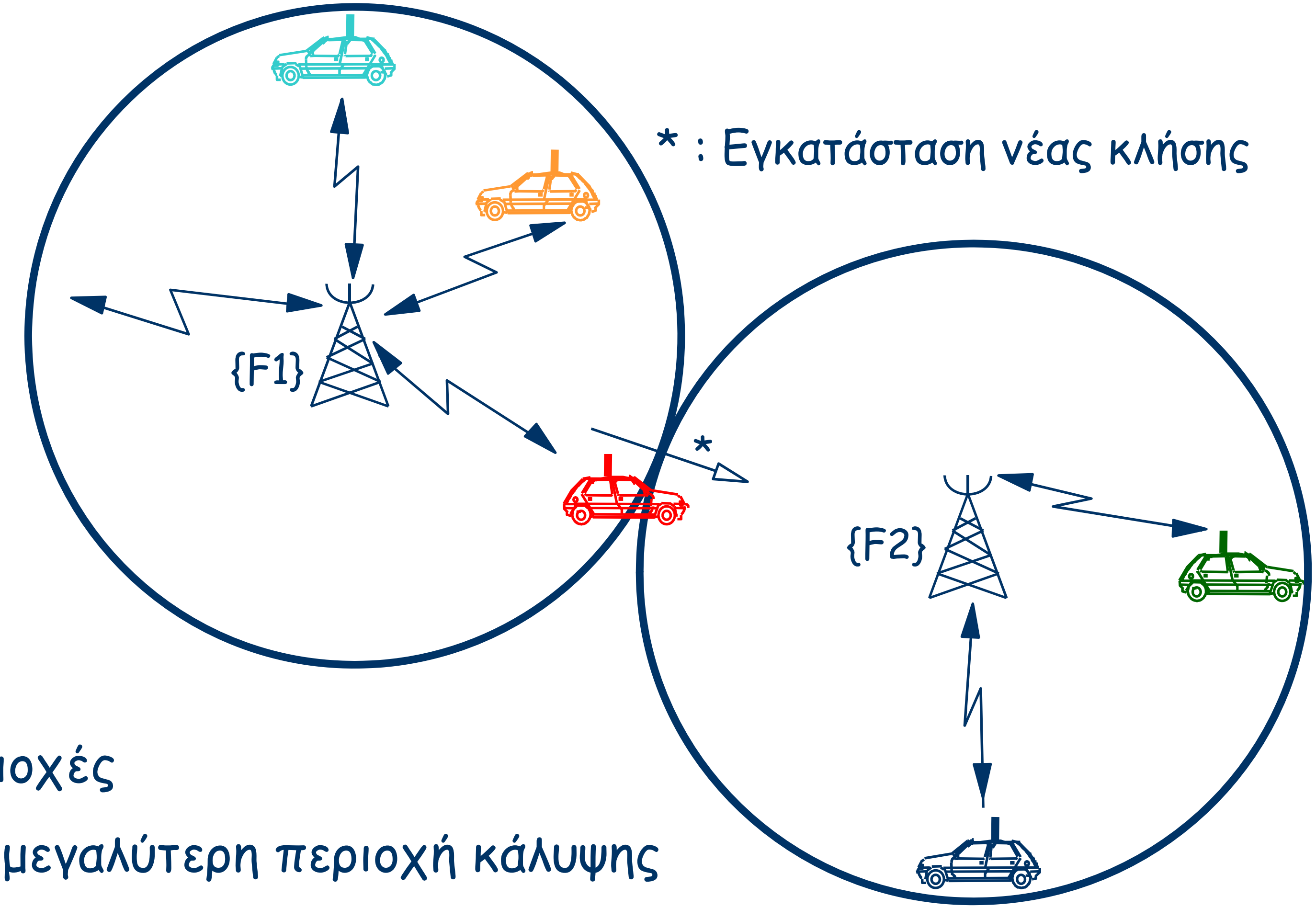
Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών

Βασικές αρχές των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών

Περίληψη

- 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

Συμβατικά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών

Χαρακτηριστικά των συμβατικών συστημάτων:

- Πολύ καλή ραδιοκάλυψη
- Δεν είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθούν οι ίδιες συχνότητες στην περιοχή εξυπηρέτησης
- Περιορισμένος αριθμός ταυτόχρονα εξυπηρετούμενων χρηστών
- Μη αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος

Κυψελωτή δομή - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

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

Κυψελωτή δομή - 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.

Κυψελωτή δομή - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

- Μια ομάδα ραδιοδιαύλων χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση περισσοτέρων 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 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

χρήστης $\xrightarrow{\text{ζεύξη ανόδου (uplink)}}$ BS

χρήστης $\xleftarrow{\text{ζεύξη καθόδου (downlink)}}$ BS

- 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)

Κυψελωτή δομή - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

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

$$M=K\times N_c \text{ ή } N_c=M\times 1/K$$

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

Κυψελωτή δομή - Επέκταση χωρητικότητας

- Έστω:
  - J ο συνολικός αριθμός των ομάδων επαναναχρησιμοποίησης του συστήματος
  - C ο συνολικός αριθμός των διαύλων του συστήματος με επαναχρησιμοποίηση

$$C = J \times M = J \times K \times N_c$$

- Μέγεθος ομάδας επαναχρησιμοποίησης K↓
  - ⇒J↑ για κάλυψη της ίδιας περιοχής εξυπηρέτησης
  - ⇒C↑ για δοθέν M
  - δηλαδή, για δοθέν M ο συνολικός αριθμός των διαύλων αυξάνει, όταν το K μειώνεται
  - το K όμως εξαρτάται από την επιτρεπόμενη στάθμη ομοδιαυλικής παρεμβολής

Κυψελωτή δομή - Επέκταση χωρητικότητας

- Παράδειγμα

Κυψελωτό σύστημα χρησιμοποιεί φάσμα με συνολικό αριθμό διαύλων M=1000. Το εμβαδό κάθε κυψέλης είναι 6 km^2 και η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος είναι 2100 km^2.

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

Κυψελωτή δομή - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

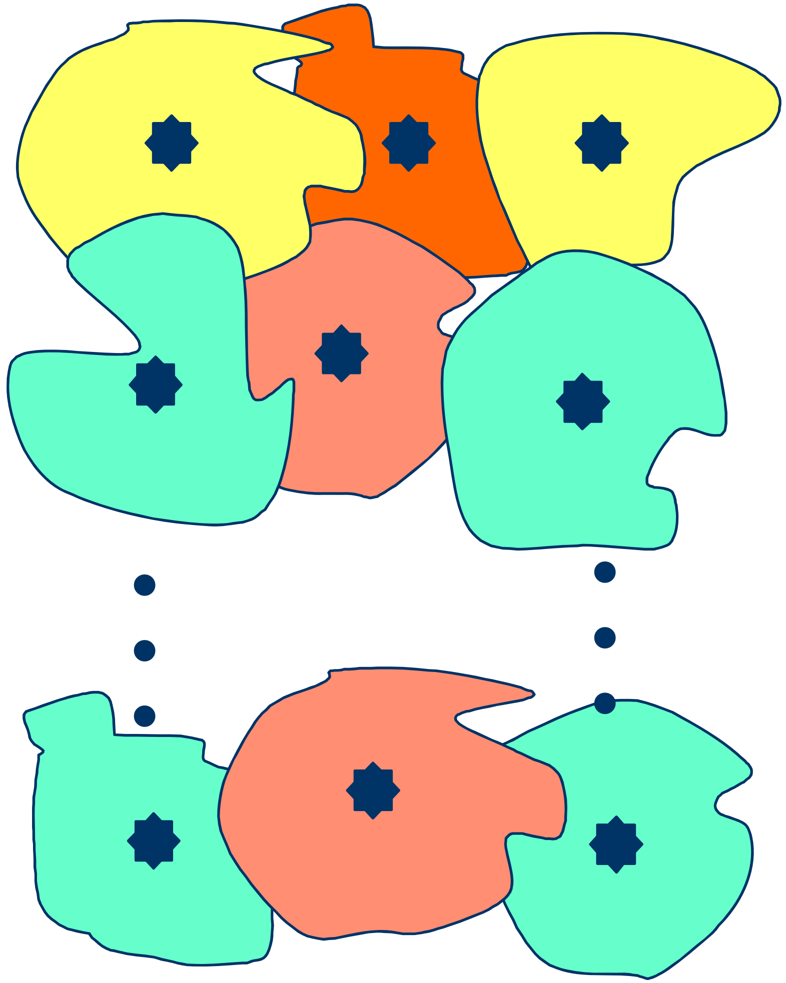
- Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα:
  - το διατιθέμενο εύρος ζώνης
  - το μέγεθος των κυψελών
  - η στάθμη της παρεμβολής που μπορεί να είναι ανεκτή σε έναν ραδιοδίαυλο, η οποία καθορίζει το K
  - η κοινή ασύρματη διεπαφή, πάνω από την οποία επικοινωνούν οι χρήστες

Περιορισμοί στην επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

- 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 τέτοιον τρόπο, ώστε οι περιοχές χωρίς κάλυψη να μην υπερβαίνουν κάποιο αποδεκτό όριο



Ιδανική κυψελωτή δομή

Θεωρούμε ότι:

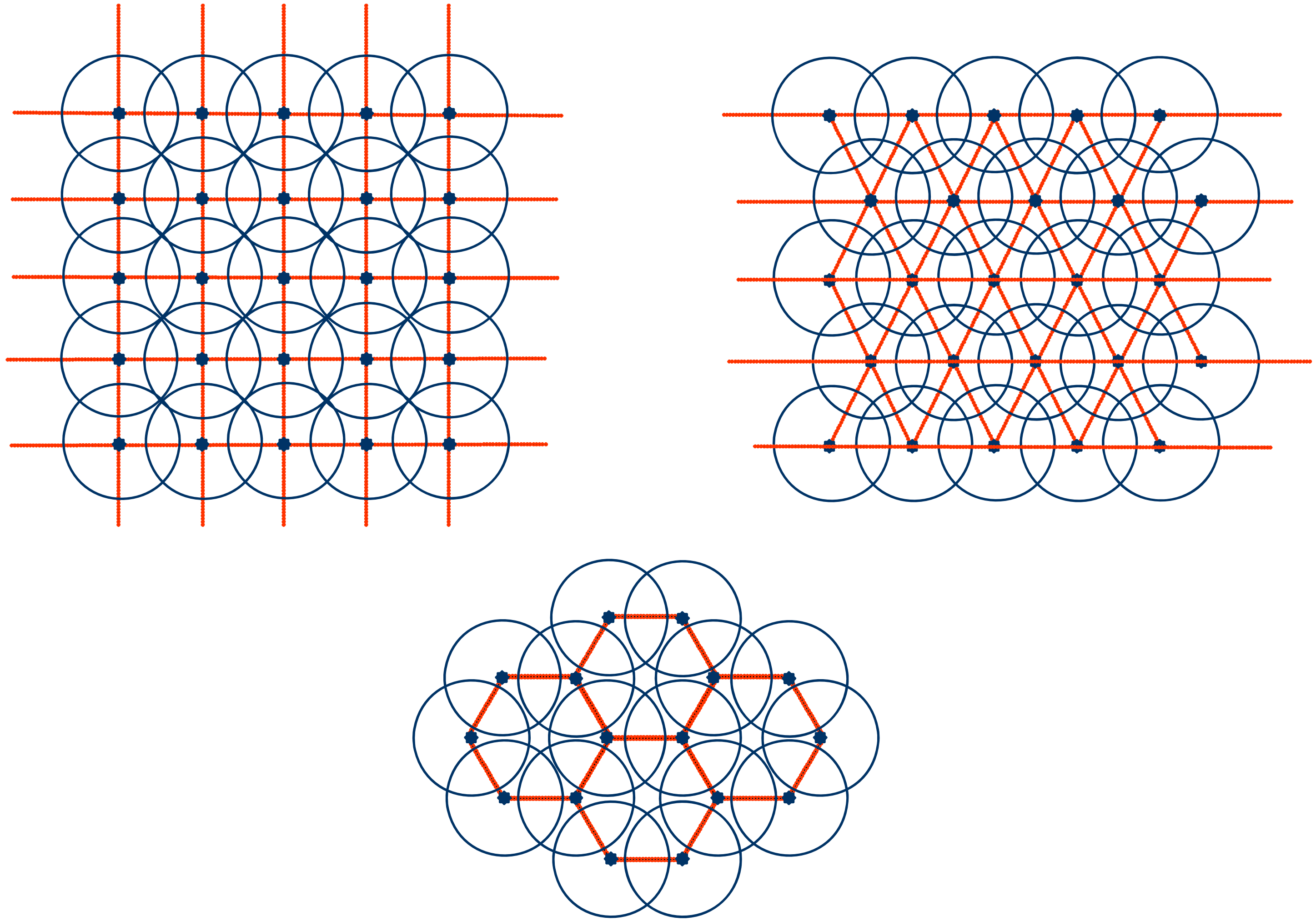
- έχουμε ιδανική ραδιοδιάδοση και στη ζεύξη καθόδου και στη ζεύξη ανόδου
- η ισχύς του σήματος μειώνεται ανάλογα με το d^{-n}
- για τις ασύρματες ζεύξεις του συστήματος ισχύει η αρχή της αντιστροφής.

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

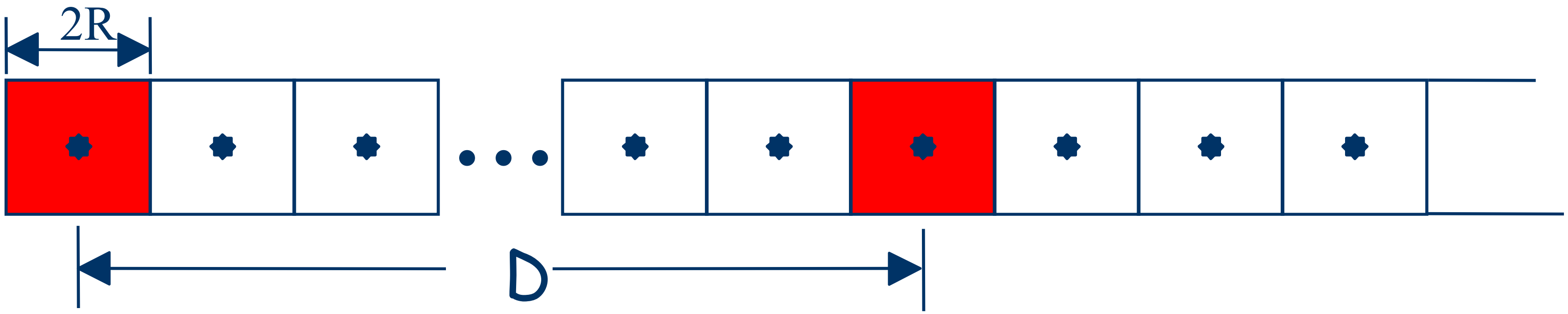
Ιδανική κυψελωτή δομή



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 εξάγωνο
- Οι ιδανικές αναπαραστάσεις των κυψελών είναι χρήσιμες, όταν ασχολείται κάποιος με θέματα επίδοσης των συστημάτων

Μονοδιάστατα συστήματα

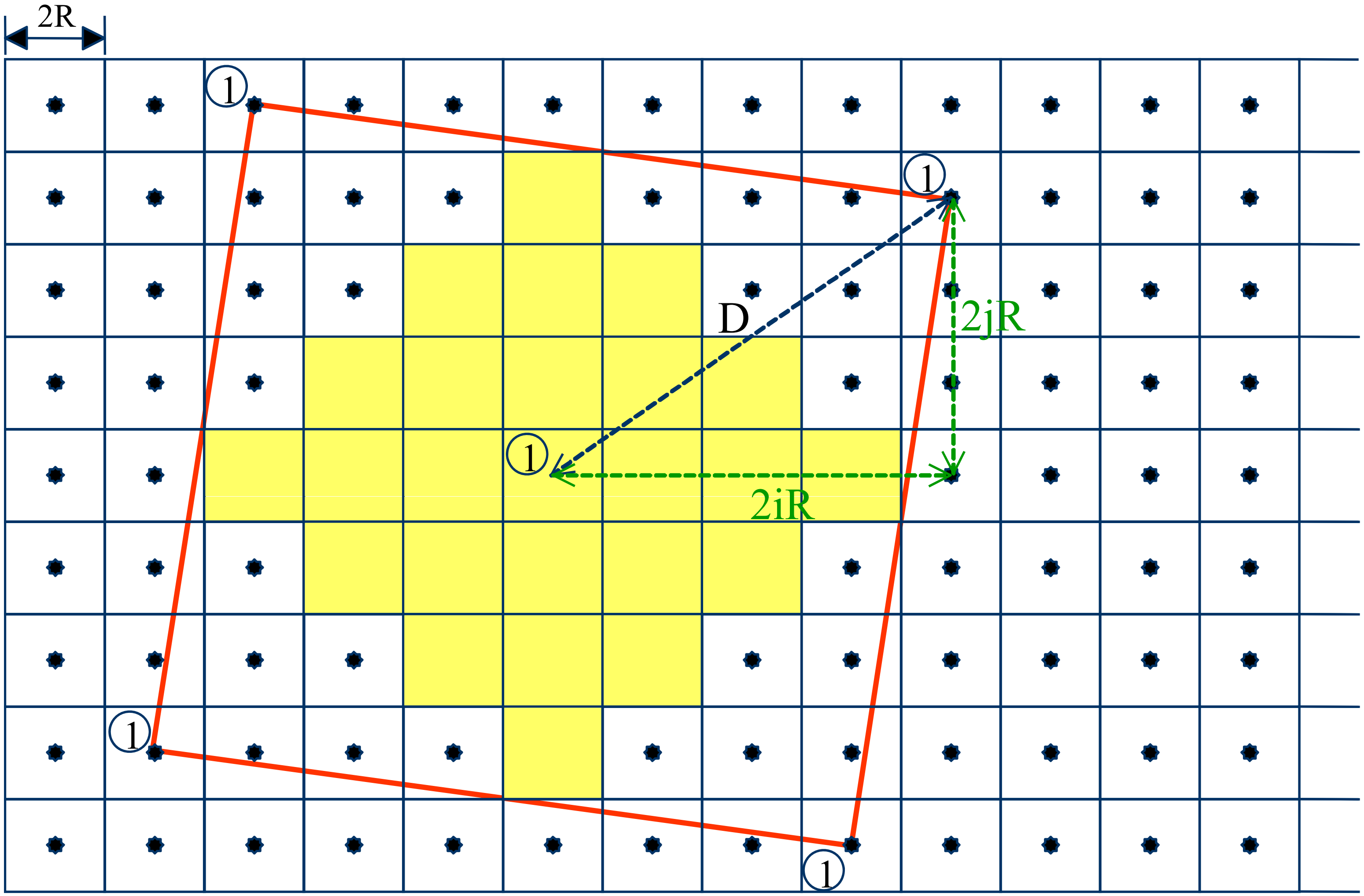


$$K = \frac{D}{2R}$$

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

Συστήματα δύο διαστάσεων

Τετραγωνικές κυψέλες



Συστήματα δύο διαστάσεων

Τετραγωνικές κυψέλες

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

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

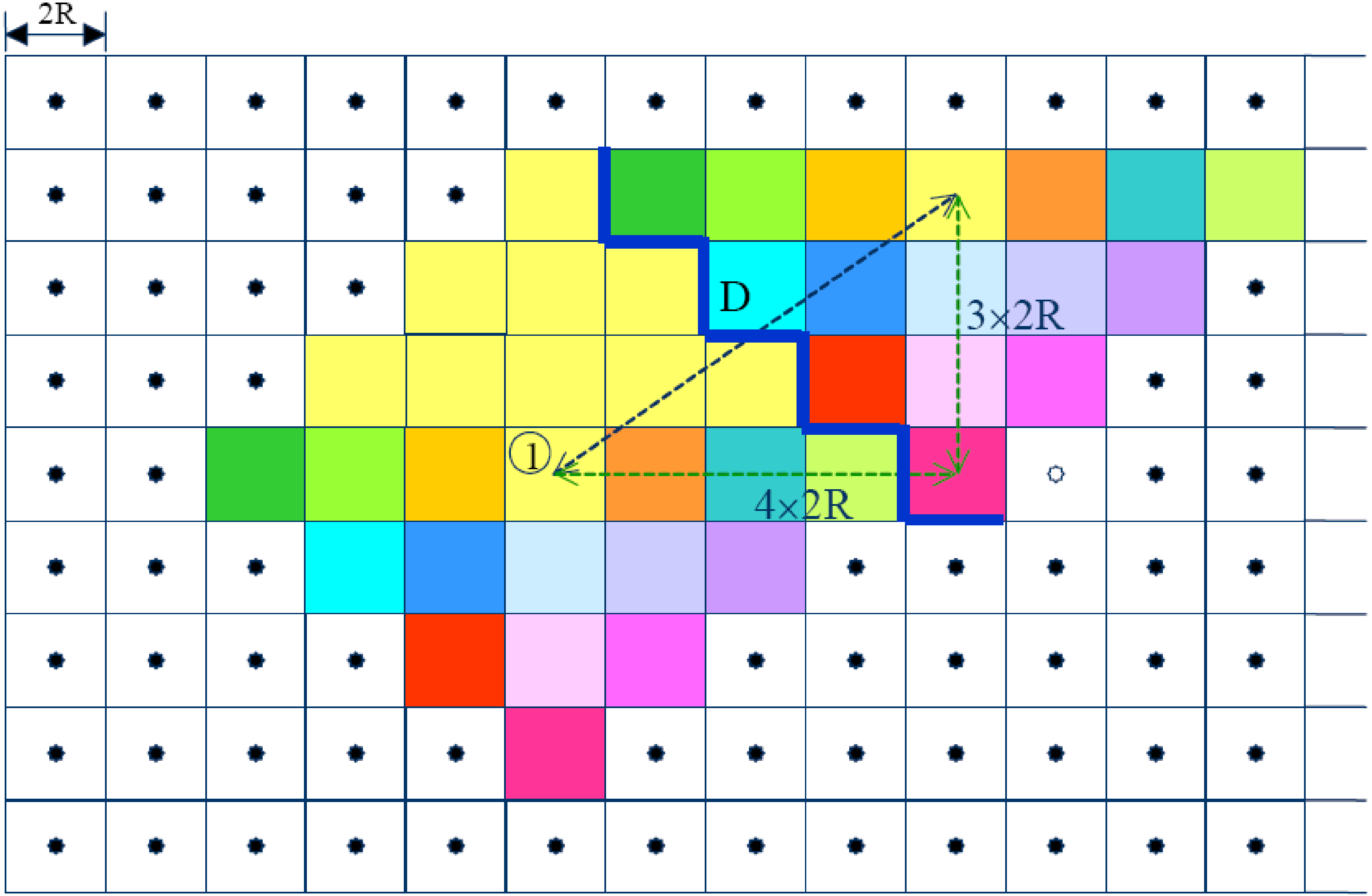
$$K = i^2 + j^2$$

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

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

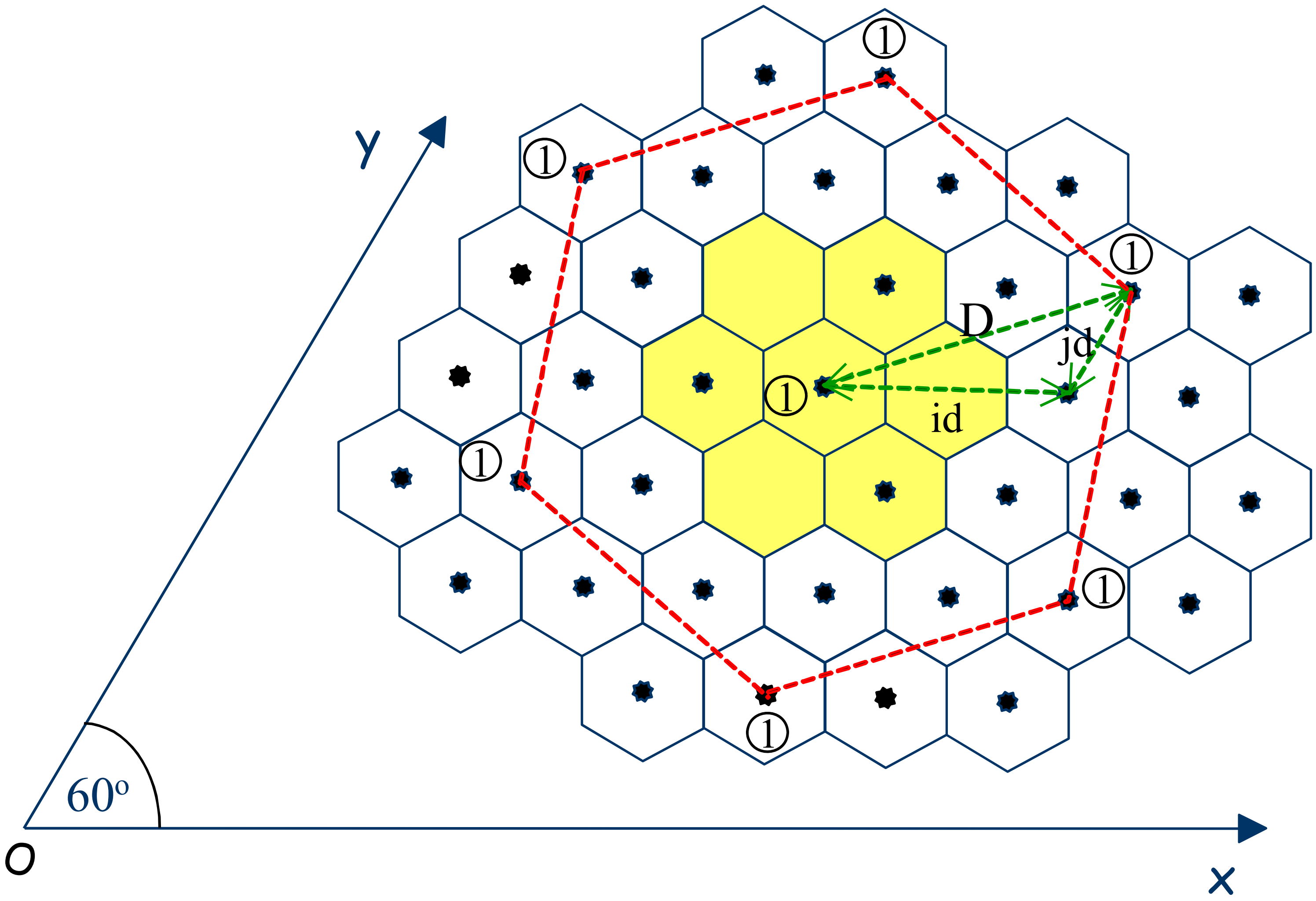
Συστήματα δύο διαστάσεων

Τετραγωνικές κυψέλες: K = 25



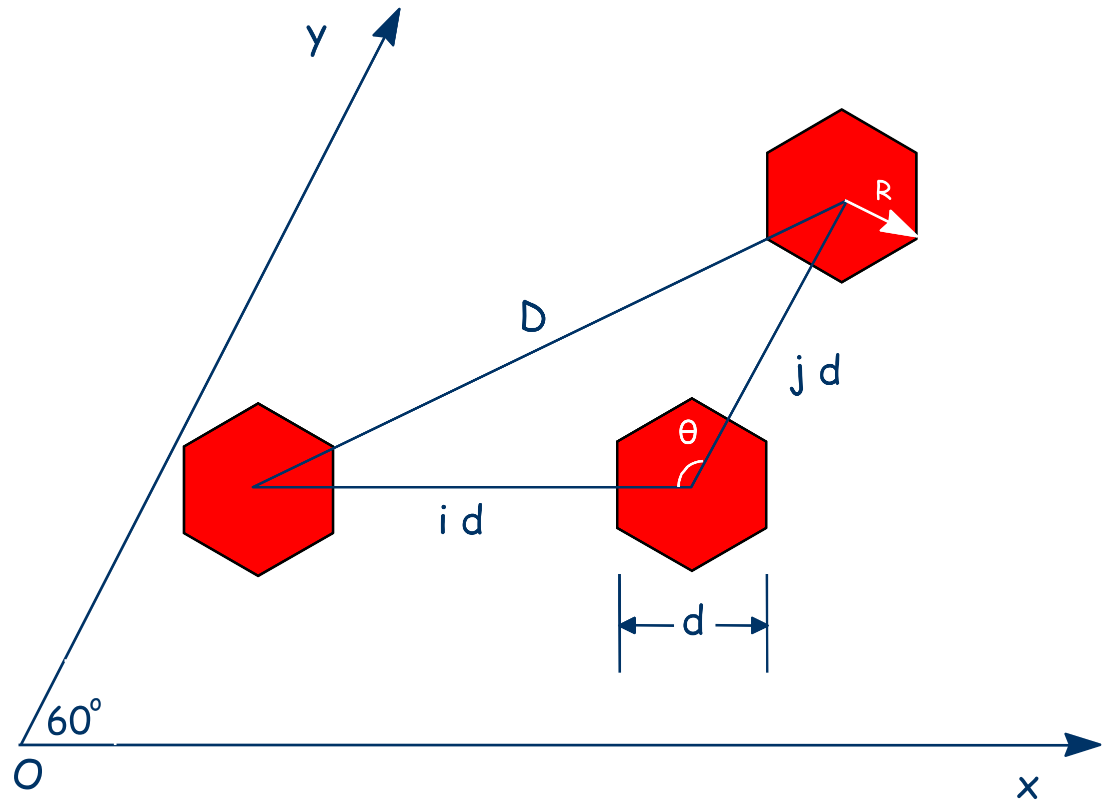
Συστήματα δύο διαστάσεων

Εξαγωνικές κυψέλες



Συστήματα δύο διαστάσεων

Εξαγωνικές κυψέλες



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

Συστήματα δύο διαστάσεων

Εξαγωνικές κυψέλες

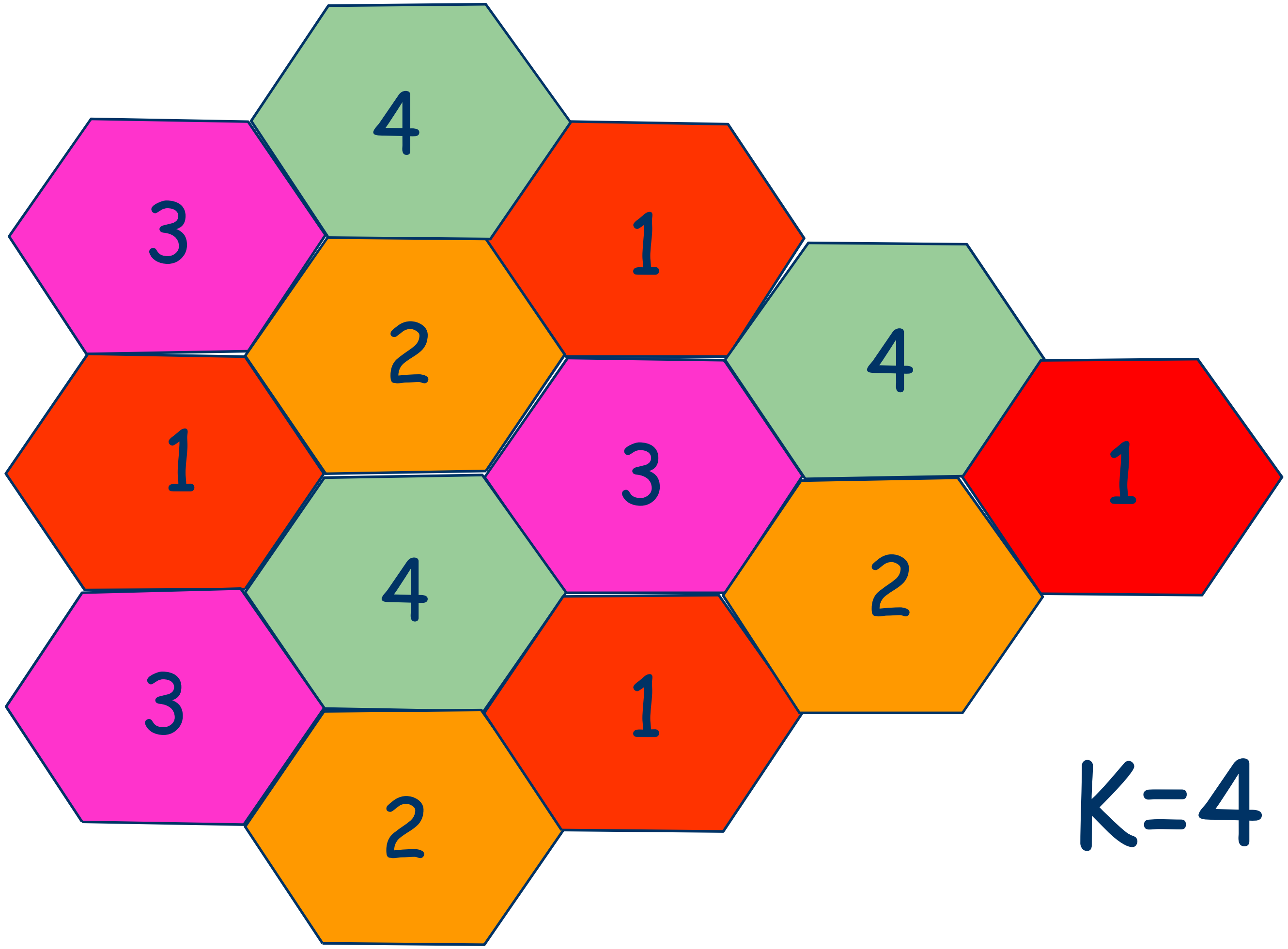
$$D^2 = (i^2 + i \cdot j + j^2) \cdot d^2$$

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

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

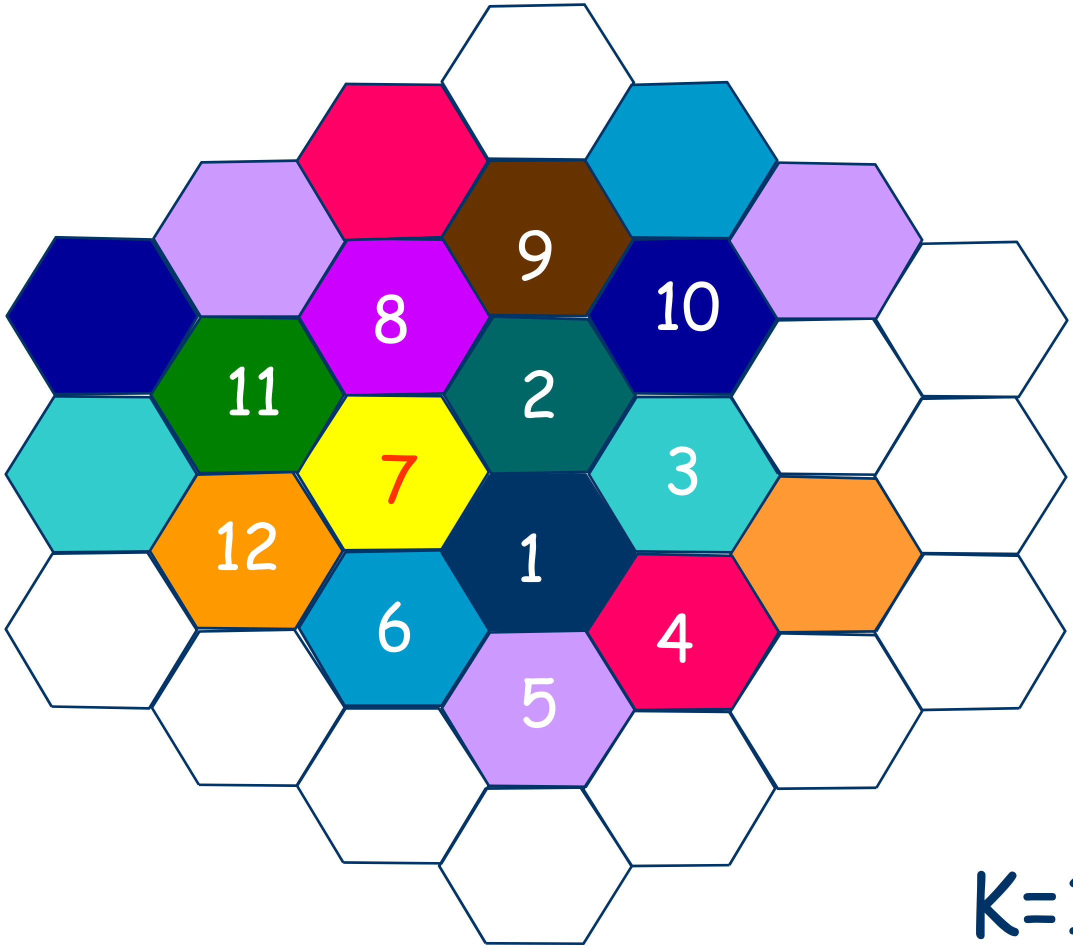
$$D = R\sqrt{3K}$$

Συστήματα δύο διαστάσεων



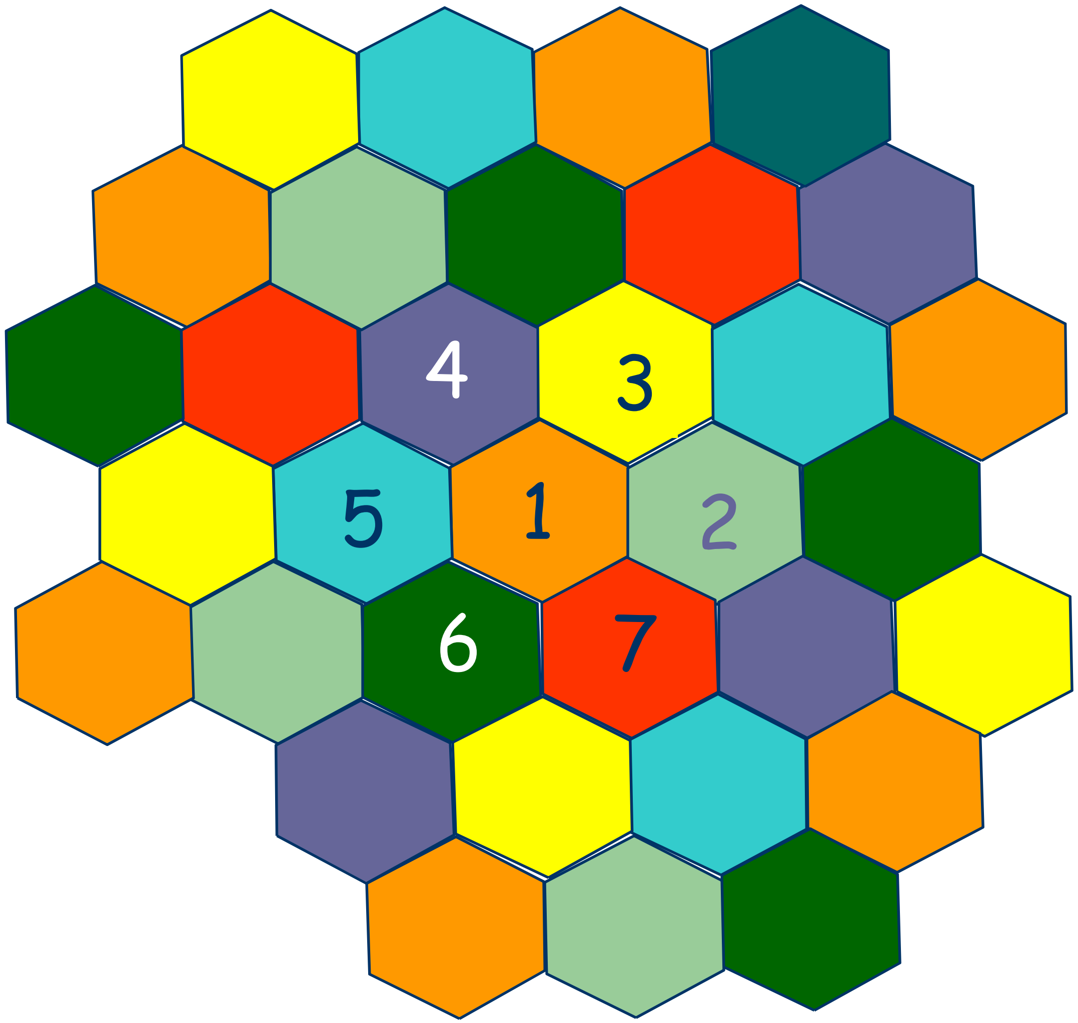
K=4

Συστήματα δύο διαστάσεων



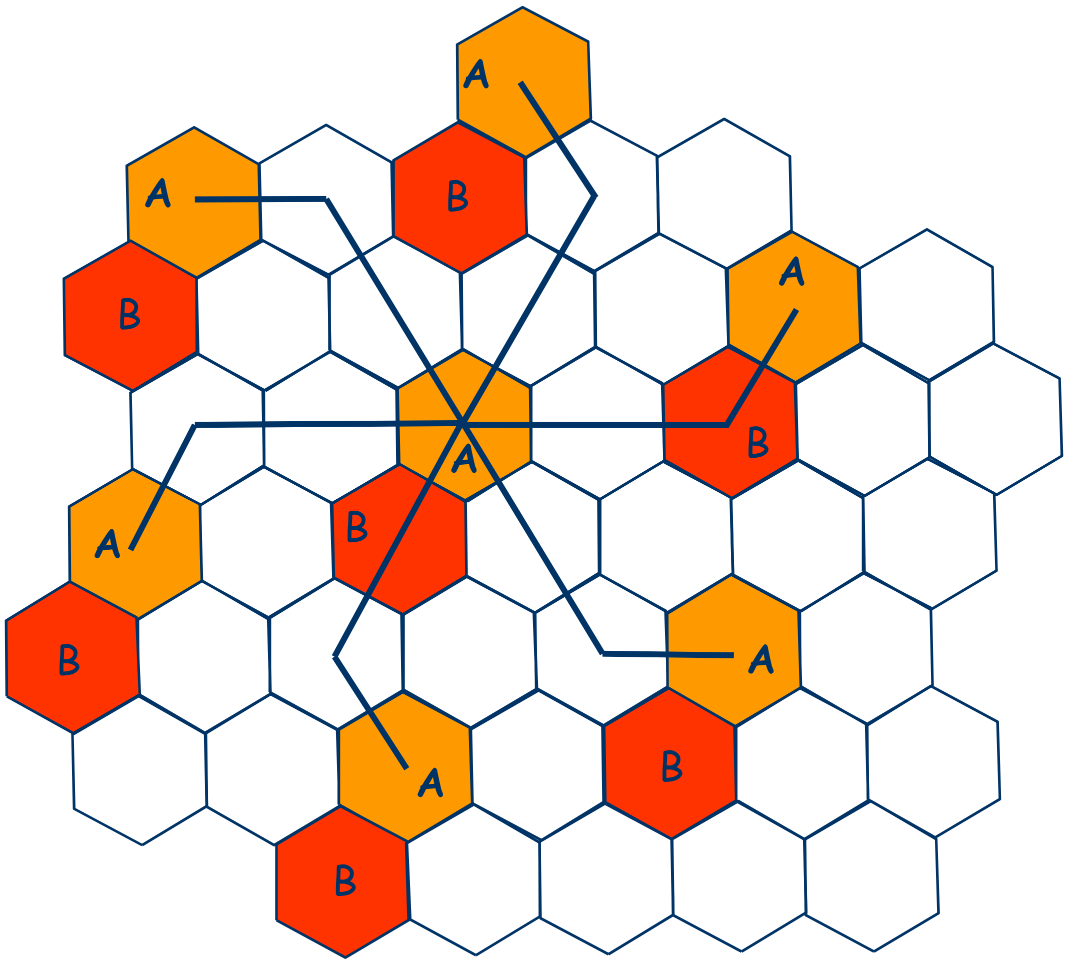
K=12

Συστήματα δύο διαστάσεων



K=7

Συστήματα δύο διαστάσεων



K=7 i=2, j=1

Συστήματα δύο διαστάσεων

Παράδειγμα 3.1

Εύρος ζώνης 33MHz διατίθεται σε κυψελωτό σύστημα. Κάθε δίαυλος έχει W = 25kHz 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

- Τ*ηλεπικοινωνιακή 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 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 διαθεσίμων διαύλων
- η πιθανότητα αποκλεισμού
- ο τρόπος αντιμετώπισης των αποκλειομένων 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.

Ένταση της κίνησης

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

Ένταση της κίνησης

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

Ένταση της κίνησης

- 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 $T = 1$ 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.

Ένταση της κίνησης

- 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.

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 *ένταση της προσφερόμενης κίνησης* 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 κίνηση ανά χρήστη σε erlang.
  - 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-Βαθμός εξυπηρέτησης

- 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.

Συγκέντρωση-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
- Ο βαθμός εξυπηρέτησης 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.

Συγκέντρωση-Βαθμός εξυπηρέτησης

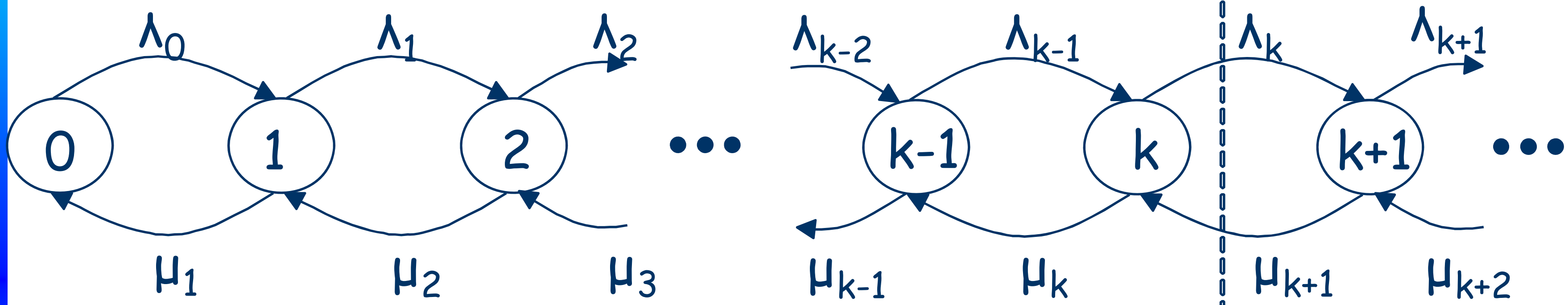
- Η μέγιστη μεταφερόμενη κίνηση είναι ίση με τον αριθμό των διαύλων *C*, σε erlangs.
- Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων με συγκέντρωση, που χρησιμοποιούνται στην πράξη.
- Όχι αναμονή στις αιτήσεις κλήσης.
  - *GOS* = η πιθανότητα να αποκλειστεί μια κλήση.
- *Ουρά* αναμονής για τις κλήσεις που αποκλείονται.
  - *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 οι ροές μεταξύ των καταστάσεων πρέπει να είναι ίσες

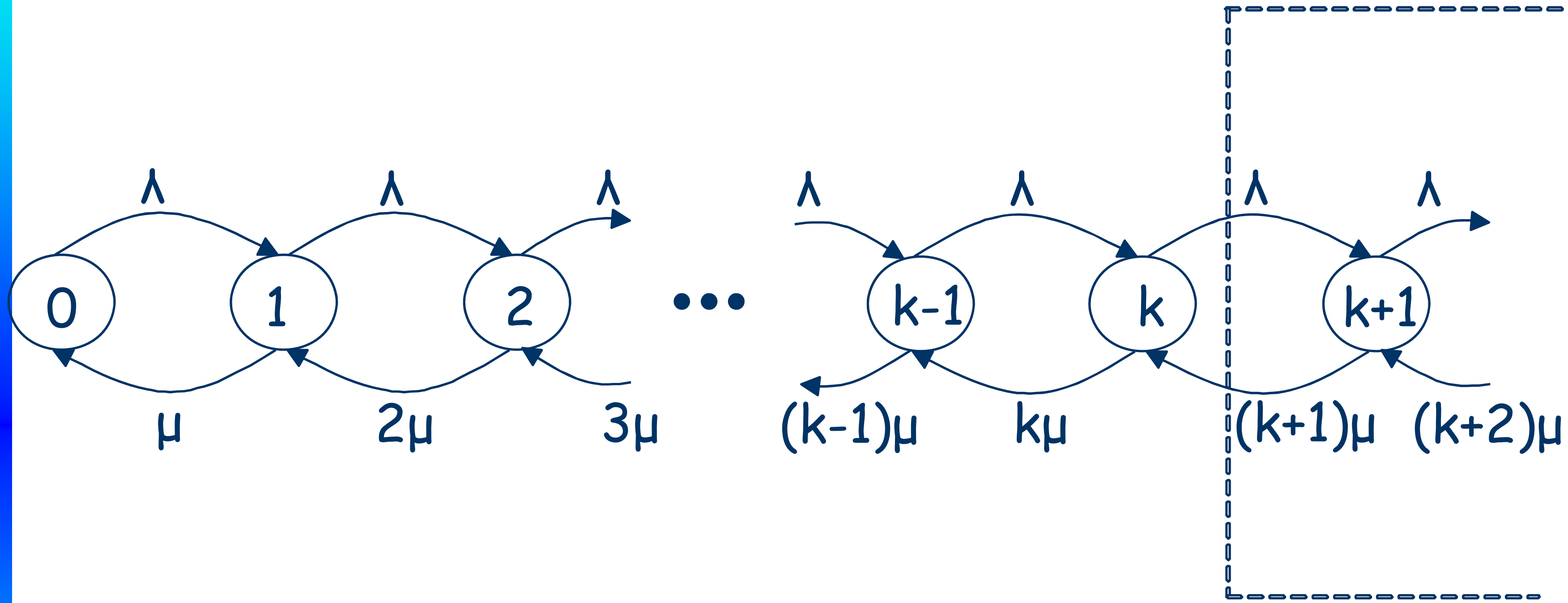
$$\lambda_k P_k = \mu_{k+1} P_{k+1}\,, \quad \gamma\iota\alpha\ 0 \le k \le C-1$$

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

Erlang B

- Υποθέσεις:
- Είναι διαθέσιμοι C δίαυλοι
- Η κατανομή άφιξης των κλήσεων είναι Poisson με ρυθμό λ.
- 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.

Erlang B



$$\lambda P_k = (k+1)\mu P_{k+1}, \quad \gamma\iota\alpha\ 0 \le k \le C-1$$

$$P_{k+1} = \frac{A}{k+1} P_k \qquad\qquad A = \lambda / \mu$$

Erlang B

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

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{C} \frac{A^k}{k!}} \qquad \Pr[blocking] = P_C$$

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

Erlang B

- Η *απόδοση συγκέντρωσης (trunking efficiency)* είναι ένα μέτρο του αριθμού 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.

Erlang B

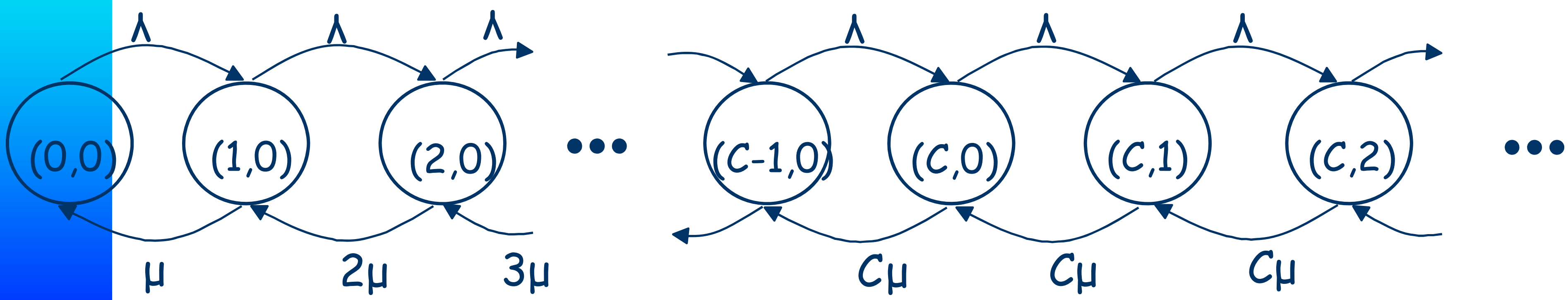
Χωρητικότητα συστήματος Erlang B

Αριθμός Διαύλων	Χωρητικότητα (erlang) για *GOS*			
	= 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 λ.
- Αν μια εισερχόμενη κλήση δεν βρίσκει ελεύθερο δίαυλο, τοποθετείται σε ουρά αναμονής με άπειρο μήκος.
- Κάθε κλήση εξυπηρετείται με τη σειρά άφιξής της.

Erlang C



$$\lambda P_k = (k+1)\mu P_{k+1}, \quad \gamma\iota\alpha \ 0 \le k \le C-1$$

$$\lambda P_k = C\mu P_{k+1}, \qquad \gamma\iota\alpha \ k \ge C$$

$$P_k = \frac{A^k}{k!} P_0, \quad \gamma\iota\alpha \ 0 \le k \le C$$

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\mu C}\right)^{k-C} P_C = \frac{A^k}{C^{k-C} C!} P_0 \quad \gamma\iota\alpha \ k \ge C$$

Erlang C

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

$$P_0 = \frac{1}{\displaystyle\sum_{k=1}^{C-1}\frac{A^k}{k!} + \frac{A^C}{C!(1-\frac{A}{C})}} \qquad \Pr[delay > 0] = \sum_{k=C}^{\infty} P_k$$

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

Erlang C

$$\Pr[delay > t] = \Pr[delay > 0] \Pr[delay > t | delay > 0]$$

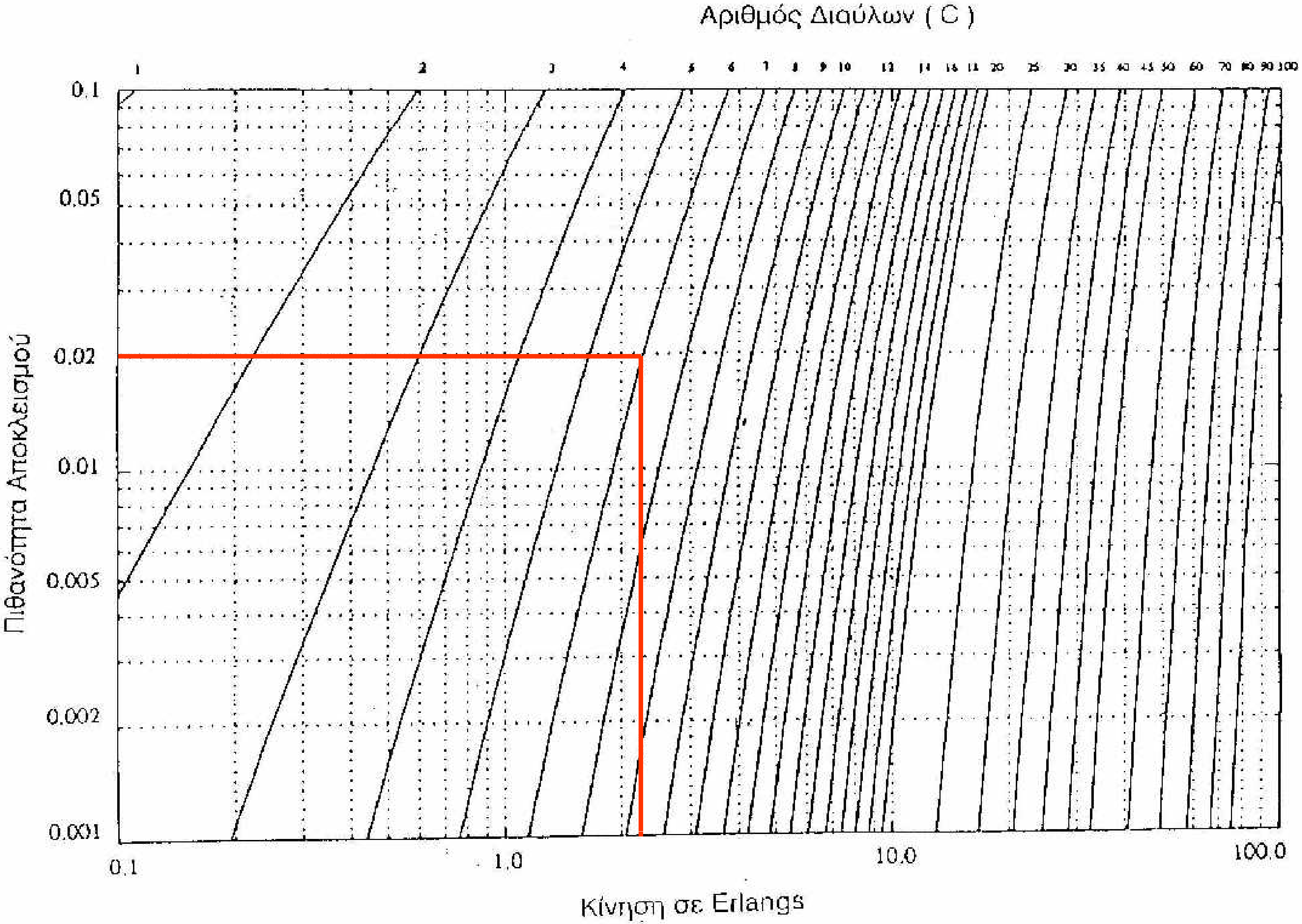
$$= \Pr[delay > 0] \cdot e^{\frac{-(C-A)t}{H}}$$

Η συνάρτηση κατανομής της καθυστέρησης για συστήματα FIFO είναι εκθετική

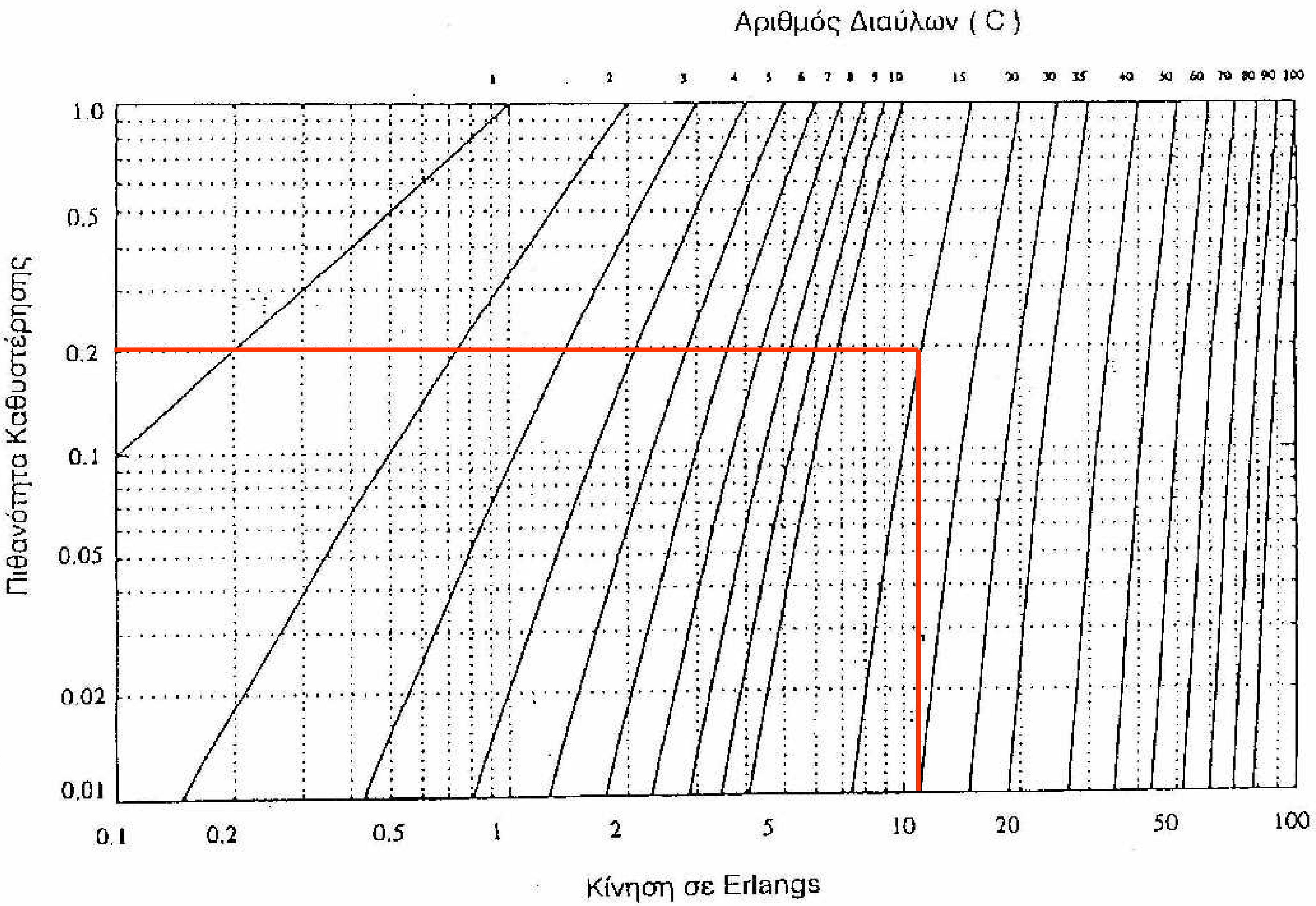
Η μέση καθυστέρηση για όλες τις κλήσεις σε ένα σύστημα με αναμονή

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

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



Αριθμός Διαύλων (C)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
12
14
16
18
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100
0.1
0.05
0.02
0.01
0.005
0.002
0.001
Πιθανότητα Αποκλεισμού
0.1
1.0
10.0
100.0
Κίνηση σε Erlangs



Αριθμός Διαύλων (C)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
15
20
30
35
40
50
60
70
80
90
100
Πιθανότητα Καθυστέρησης
1.0
0.5
0.2
0.1
0.05
0.02
0.01
0.1
0.2
0.5
1
2
5
10
20
50
100
Κίνηση σε Erlangs

Παράδειγμα 3.6

Πόλη έκτασης $2000km^2$, $K = 7$, $R = 3km$,
$B_s = 28MHz$, $W = 200KHz$, 8 δίαυλοι/ραδιοδίαυλο.
Υποθέτουμε *GOS* = 0.02 για σύστημα Erlang B. Αν η $A_u = 0.1$ 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, $C_{ολ} = 84$.
Αν A_u=0.06 erlang και $\lambda = 2$ κλήσεις / ώρα, υπολογίστε τα παρακάτω για σύστημα Erlang C με $GOS = 0.05$.

α) Πόσοι χρήστες ανά km^2 θα υποστηρίζονται από το σύστημα;

β) Ποια είναι η πιθανότητα μια καθυστερημένη κλήση να περιμένει περισσότερο από 12 sec;

γ) Ποια είναι η πιθανότητα να καθυστερήσει μια κλήση περισσότερο από 12 sec;

Φασματική απόδοση κυψελωτών συστημάτων

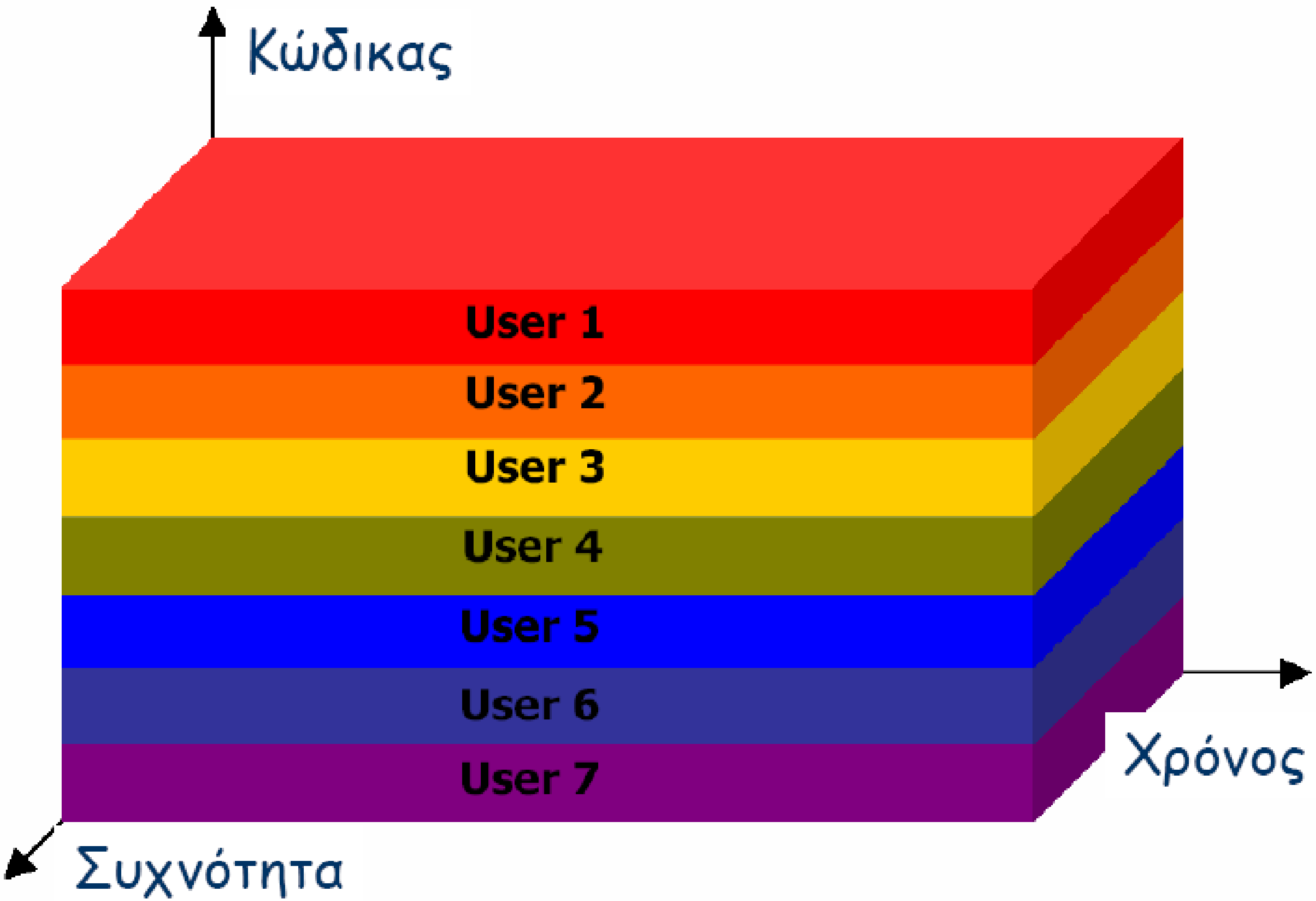
$$B_S = C_C \cdot K \cdot W$$

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

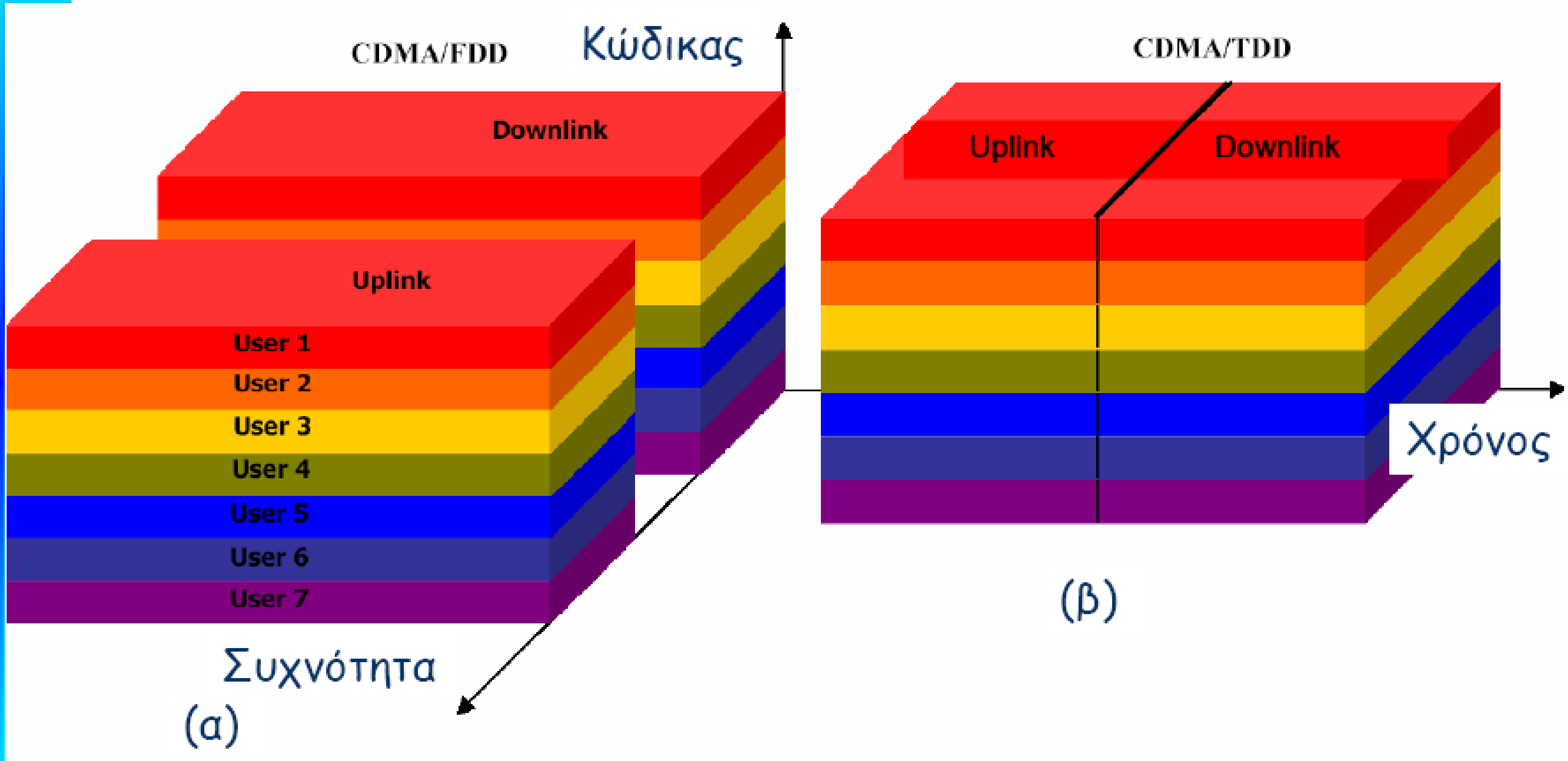
A_{Ct} : η μεταφερόμενη κίνηση ανά κυψέλη

Η φασματική απόδοση εκφράζεται σε *erlang/MHz/km²* (όχι σε erlang/Hz/m²).

CDMA


Κώδικας
User 1
User 2
User 3
User 4
User 5
User 6
User 7
Χρόνος
Συχνότητα

CDMA



CDMA/FDD
Κώδικας
Downlink
Uplink
User 1
User 2
User 3
User 4
User 5
User 6
User 7
Συχνότητα
(α)
CDMA/TDD
Uplink
Downlink
Χρόνος
(β)

Βασικές αρχές της CDMA

Θεωρητική χωρητικότητα διαύλου χωρίς σφάλματα:

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

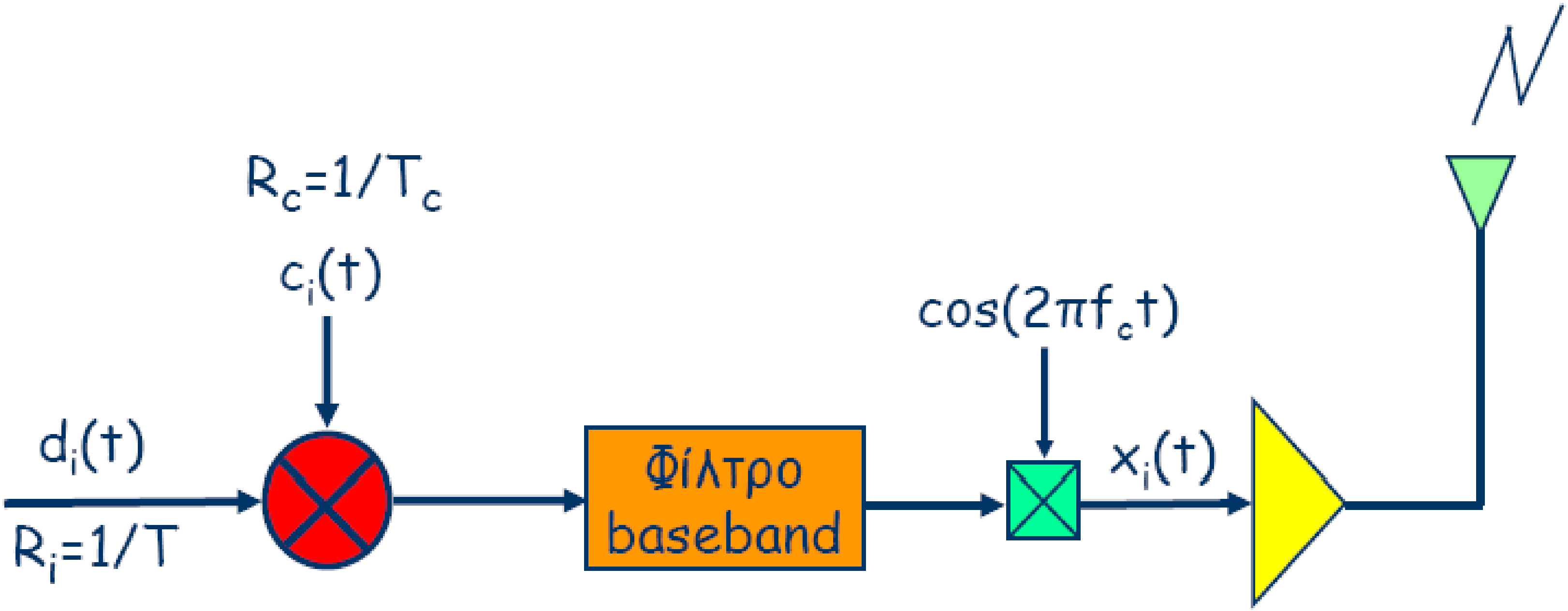
$$\ln[1 + \frac{S}{N}] = \frac{S}{N} - \frac{1}{2}\left(\frac{S}{N}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{S}{N}\right)^3 - \frac{1}{4}\left(\frac{S}{N}\right)^4 + \cdots$$

Αν $S/N<1$

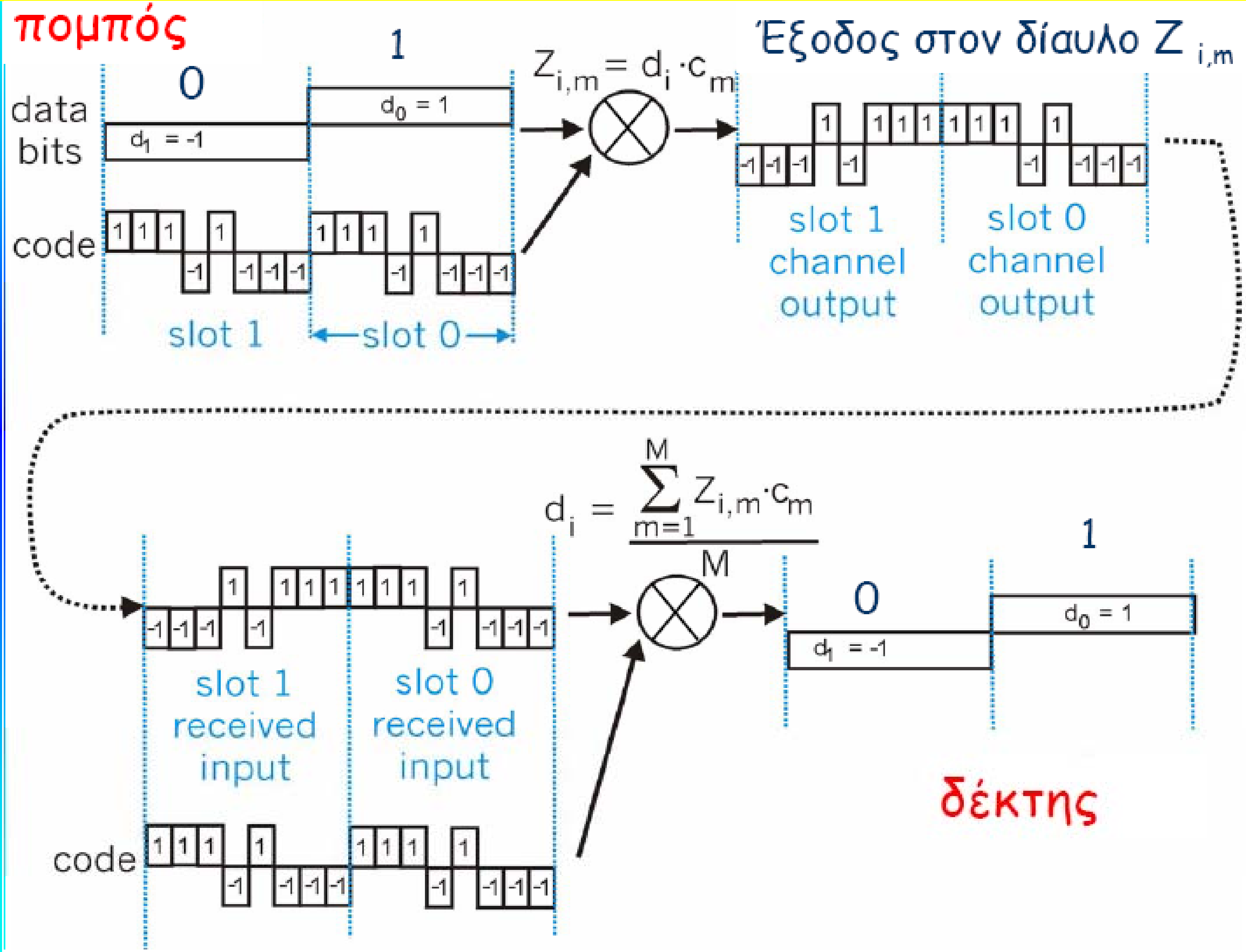
$$\uparrow B_T = \frac{C}{1.44} \times \frac{1}{(S/N)} \downarrow$$

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

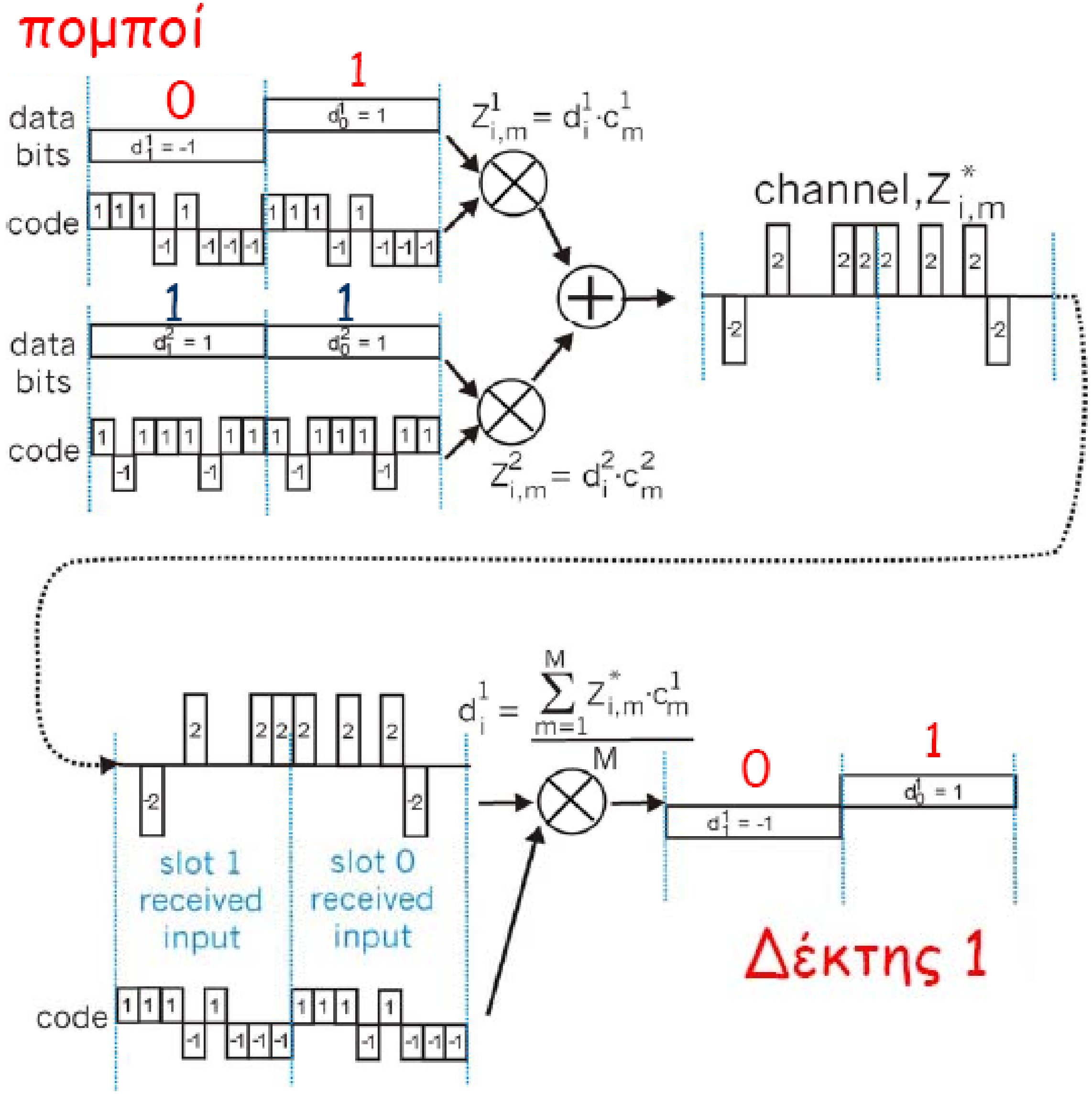
Πομπός συστήματος DSSS



CDMA κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση



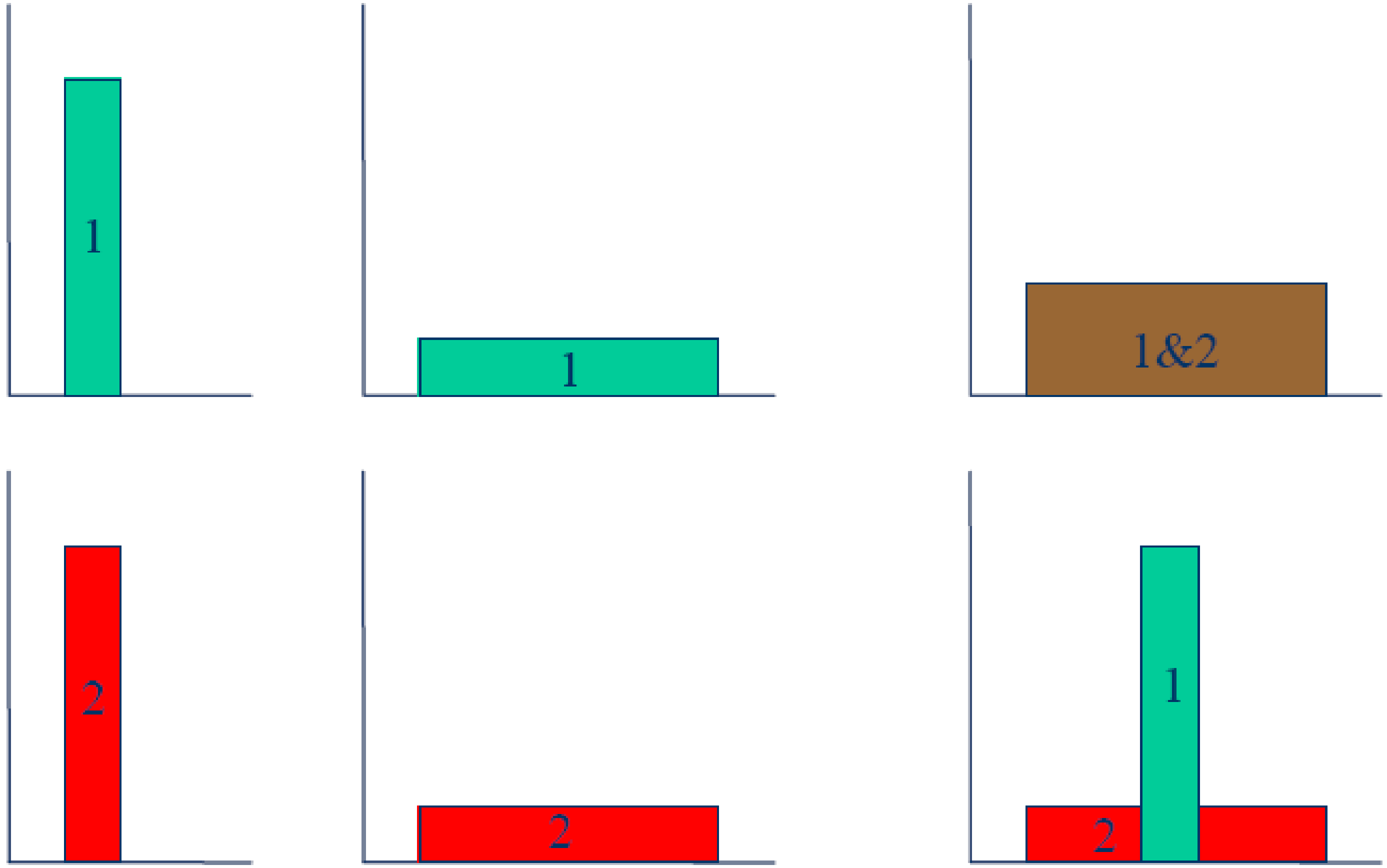
CDMA: παρεμβολή από διπλή μετάδοση



CDMA

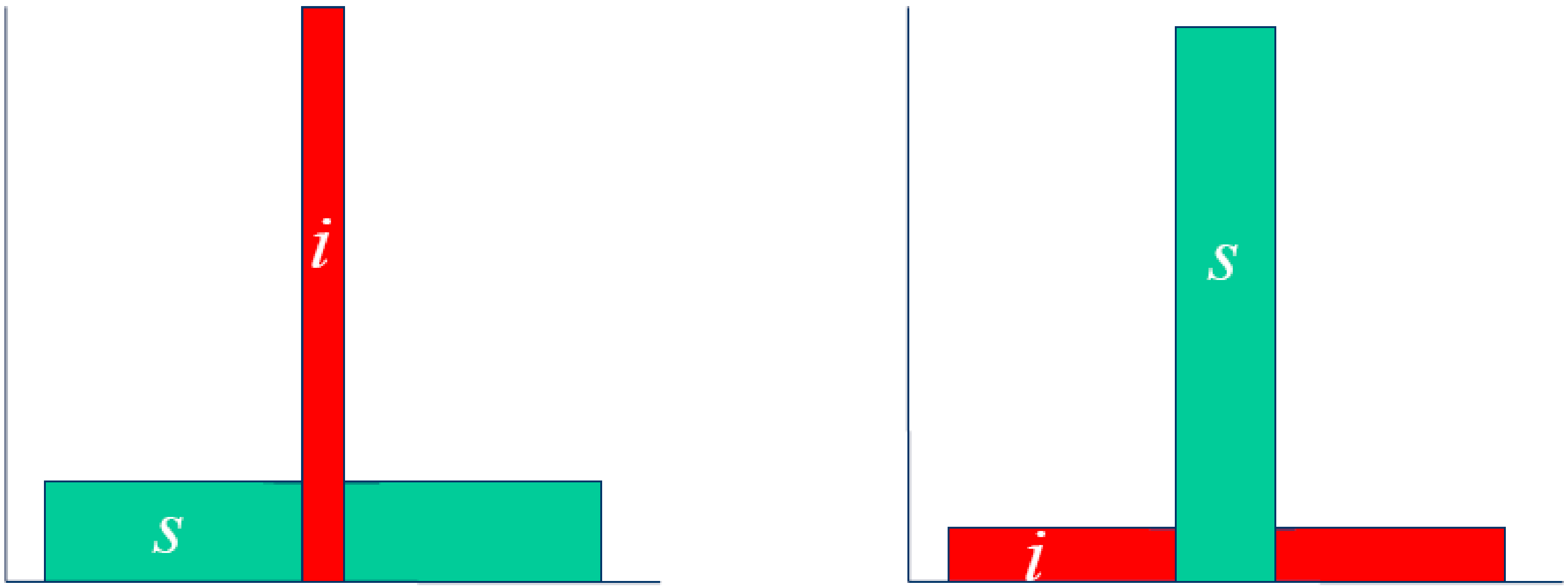
- **Πλεονεκτήματα**
  - δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης
  - προστασία πληροφορίας
  - απόρριψη παρεμβολών
  - προστασία από παρεμβολές λόγω πολλαπλών διαδρομών
  - δεν υπάρχει ανάγκη συγχρονισμού των χρηστών
  - δεν υπάρχει όριο στη χωρητικότητα της κυψέλης
  - όλες οι κυψέλες μπορεί να χρησιμοποιήσουν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

CDMA



(α) (β)

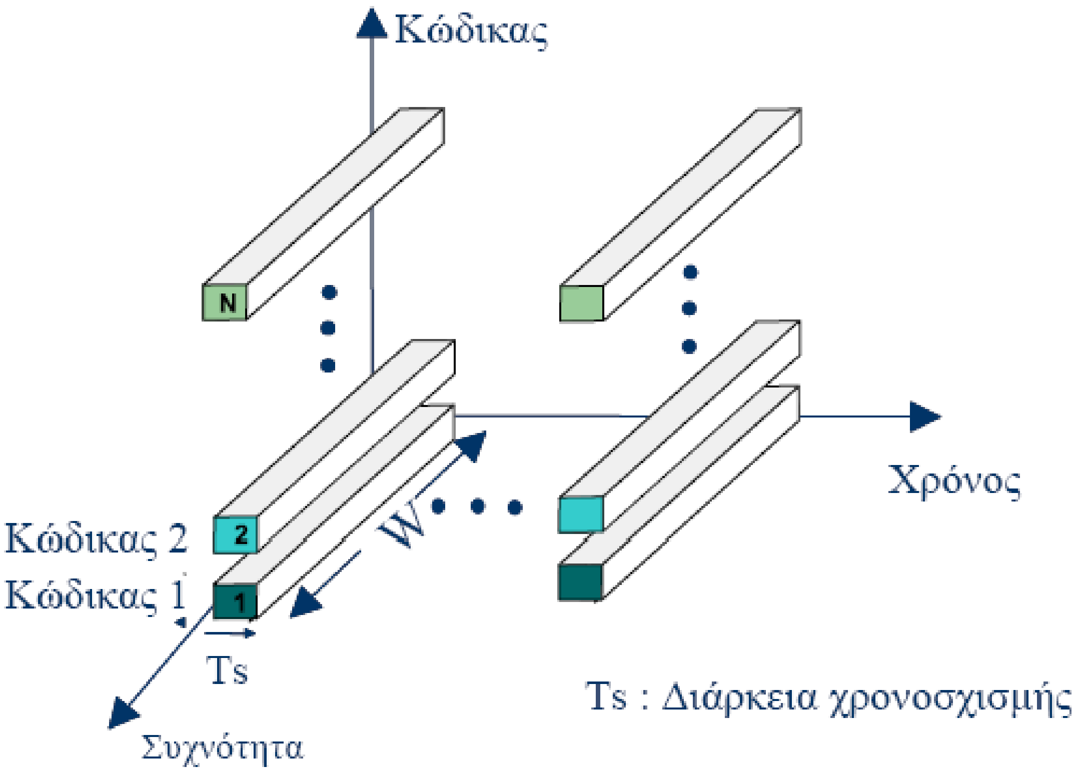
CDMA: απόρριψη παρεμβολών



CDMA

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

CDMA



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

CDMA

- Η ενέργεια του σήματος δεν μεταβάλλεται από την εξάπλωση
- Η ενέργεια 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

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

Αν τεθεί $E_b/I_t = (E_b/I_t)_0$:

κέρδος επεξεργασίας (κέρδος εξάπλωσης)

$$\Pi\varepsilon\rho\iota\theta\acute{\omega}\rho\iota o\ \pi\alpha\rho\varepsilon\mu\beta o\lambda\acute{\eta}\varsigma = \frac{W_s / R_b}{(E_b / I_t)_0} = \frac{G_s}{(E_b / I_t)_0}$$

$$\Pi\varepsilon\rho\iota\theta\acute{\omega}\rho\iota o\ \pi\alpha\rho\varepsilon\mu\beta o\lambda\acute{\eta}\varsigma(dB) = G_s(dB) - \left(\frac{E_b}{I_t}\right)_0 (dB)$$

CDMA: χωρητικότητα

$$P_r = E_b \times R_b \qquad I_o = W_s \times I_t$$

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

$$I_o = (M-1)P_r \qquad \frac{P_r}{I_o} = \frac{P_r}{(M-1)P_r} = \frac{1}{M-1}$$

$$M = 1 + \frac{G_s}{E_b / I_t} \qquad M \approx \frac{G_s}{E_b / I_t}$$

CDMA: χωρητικότητα

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

G = 3×0.85 = 2.55

$$M \approx \frac{G_s}{E_b / I_t} \times \frac{1}{\kappa} \times G$$

$$M \approx \frac{G_s}{E_b / I_t} \times \frac{1}{\kappa} \times G \times \eta$$

CDMA: χωρητικότητα

Παράδειγμα 3.9

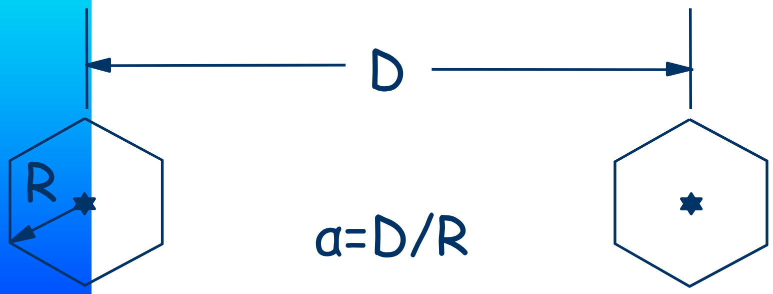
Gs = 128, E_b/I_t 7dB, = η = 0.65, κ = 0.5, κυψέλες με τρεις τομείς. Να υπολογιστεί η χωρητικότητα ανά κυψέλη.

$$M = \frac{128}{10^{-0.7}} \times \frac{1}{0.5} \times 2.55 \times 0.65 = 84 \ \chi\rho\acute{\eta}\sigma\tau\varepsilon\varsigma$$

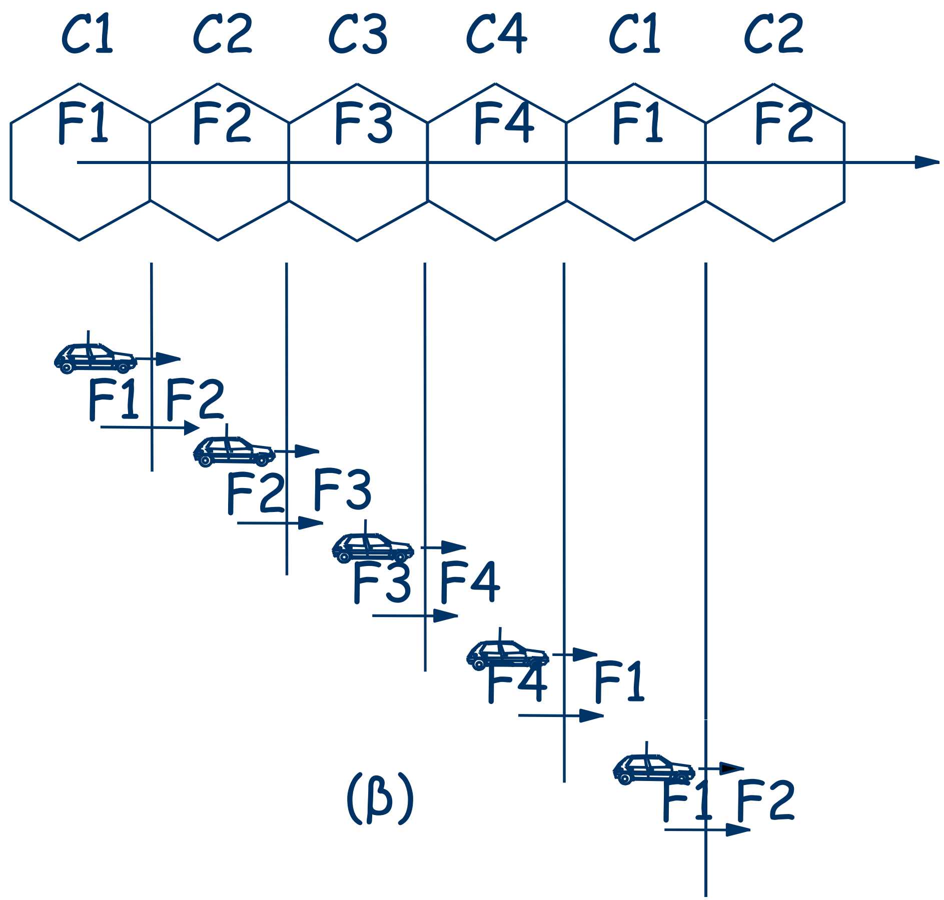
Συστήματα CDMA

- 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

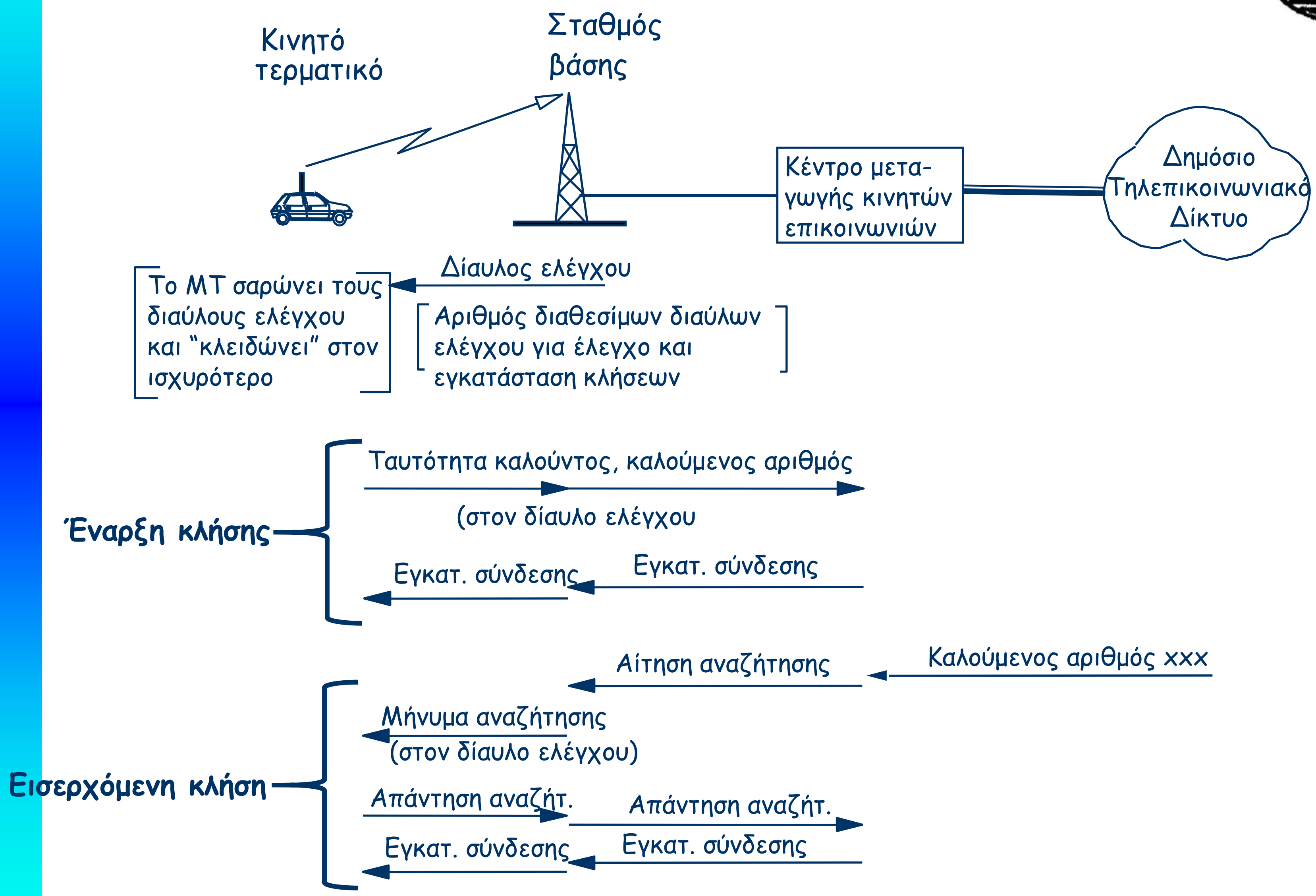


(α)



(β)

Ασύρματη πρόσβαση



Άσκηση 3.9