



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

## ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

### Ενότητα 3 : Βασικές Αρχές Σχεδίασης Κυψελωτών Συστημάτων

Δημοσθένης Βουγιούκας  
Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Κυψέλες

4

- Μια μεγάλη περιοχή κάλυψης
  - Απαιτεί έναν πομποδέκτη με υψηλή εκπεμπόμενη ισχύ.
  - Παρέχει χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας.
  - Παρουσιάζει μεγάλες καθυστερήσεις στην εγκατάσταση μιας κλήσης.
  - Δεν επαναχρησιμοποιεί πυκνά τις διαθέσιμες συχνότητες και άρα δεν εκμεταλλεύεται αποδοτικά το φάσμα.
  - Δεν καλύπτει τις ανάγκες των χρηστών σε τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

# Κυψέλες

5

- Ένα κυψελωτό σύστημα (πρόταση V.H. Mac Donald 1979 ή D.H. Ring το 1947)
  - ▣ Χρησιμοποιεί πολλαπλούς πομποδέκτες με χαμηλή εκπεμπόμενη ισχύ.
  - ▣ Παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσίας.
  - ▣ Παρουσιάζει μικρές καθυστερήσεις στην εγκατάσταση μιας κλήσης.
  - ▣ Επαναχρησιμοποιεί πυκνά (σε μικρή απόσταση) τις διαθέσιμες συχνότητες και άρα εκμεταλλεύεται αποδοτικά το φάσμα.
  - ▣ Καλύπτει τις ανάγκες των χρηστών σε τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

# Κυψέλες

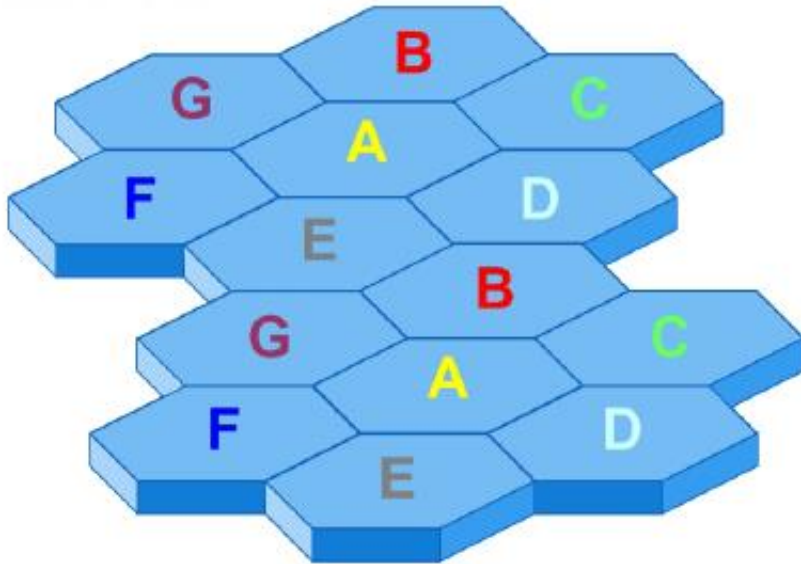
6

- Ο συνολικός αριθμός διαύλων διαιρείται σε ομάδες
- Κάθε κυψέλη έχει έναν Σταθμό Βάσης (ΣΒ ή BTS) με περιορισμένη ισχύ εκπομπής.
  - ▣ Μια ομάδα ραδιοδιαύλων που δεν χρησιμοποιείται σε γειτονικές (που να εφάπτονται) κυψέλες.
  - ▣ Κεραίες που επιτυγχάνουν την επιθυμητή κάλυψη στη γεωγραφική περιοχή.
  - ▣ Λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων απαιτείται προσεκτική σχεδίαση των κυψελών ώστε να περιορίζονται οι παρεμβολές.
- Η διαδικασία σχεδίασης, επιλογής και απόδοσης των διαύλων στις κυψέλες καλείται **frequency planning**.

# Κυψέλες

7

- Επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων ραδιοδιαύλων στην περιοχή εφαρμογής.



Τα γράμματα αντιστοιχούν σε ομάδες διαφορετικών διαύλων

# Κυψέλες

8

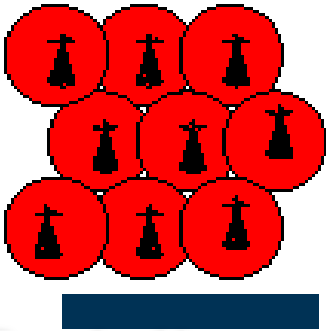
- Αν και ο κύκλος θα αναπαριστούσε καλύτερα την περιοχή κάλυψης από μια ομοιοκατευθυντική κεραία με απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου, εντούτοις...
- Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε γειτονικούς κύκλους για την κάλυψη μιας περιοχής χωρίς **επικαλύψεις** ή **κενά**.
- Για **πλήρη κάλυψη χωρίς επικαλύψεις** απομένουν: τετράγωνο, ισόπλευρο τρίγωνο, κανονικό εξάγωνο.



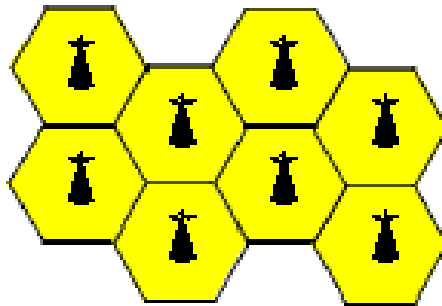
# Κυψέλες

9

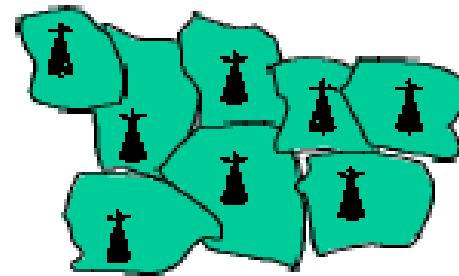
- Γιατί χρησιμοποιούμε το κανονικό εξάγωνο για αναπαράσταση της κυψέλης?
  - Προσομοιώνει καλύτερα τον κύκλο
  - Προσφέρει το μεγαλύτερο εμβαδόν στα πλέον απομακρυσμένα σημεία της περιμέτρου (αυτά ενδιαφέρουν από άποψη διάδοσης).
  - Συνεπώς καλύπτεται μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή με τον ελάχιστο αριθμό σχημάτων (κυψελών).
  - Η πραγματική ραδιοκάλυψη μιας κυψέλης είναι **άμορφη** και προκύπτει μόνο από μετρήσεις ή ακριβή μοντέλα ραδιοκάλυψης.



Ιδεατή κάλυψη



Κυψελοειδές Μοντέλο



Η Σκληρή  
Πραγματικότητα

# Κυψέλες

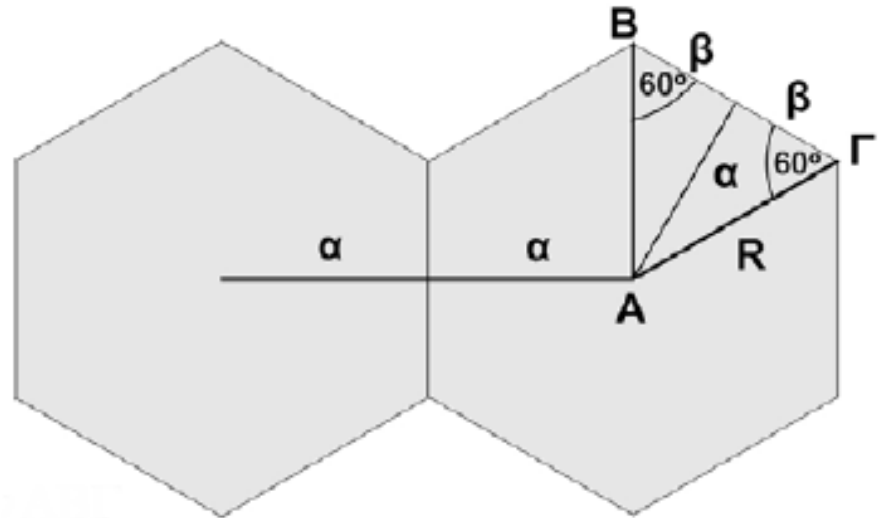
10

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} R$$

$$\beta = \frac{R}{2}$$

Εμβαδόν Τριγώνου ΑΒΓ

$$2 \frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} R \right) \left( \frac{R}{2} \right) = \frac{\sqrt{3}}{4} R^2$$



Εμβαδόν Εξαγώνου:

$$6 \frac{\sqrt{3}}{4} R^2 = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} R^2$$

# Κυψέλες

11

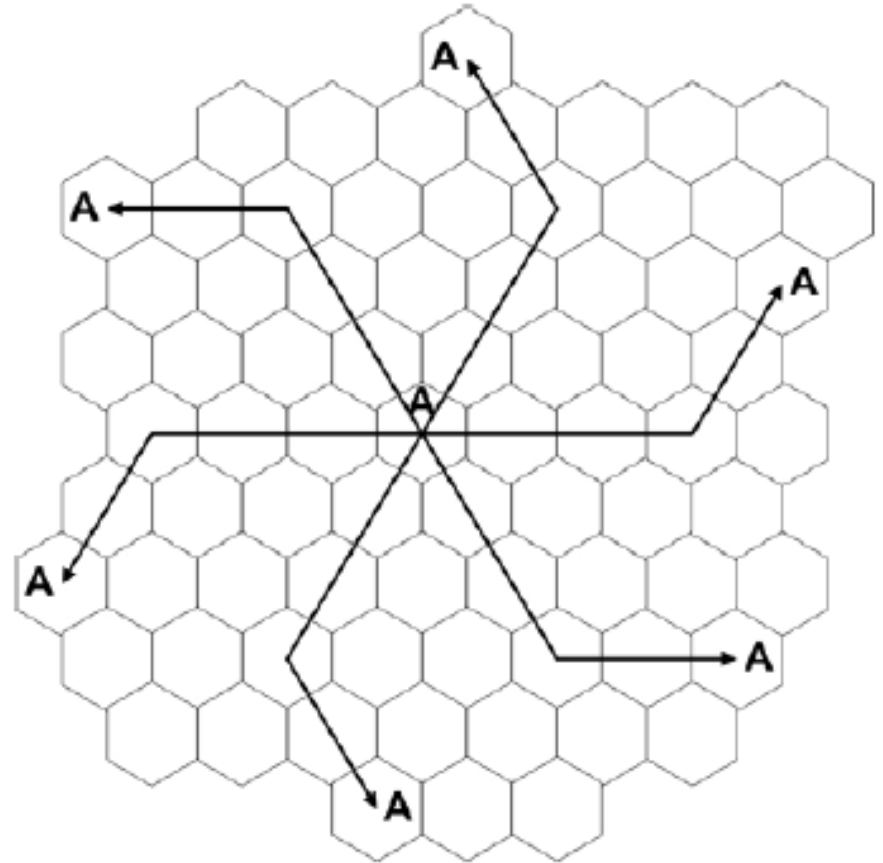
- Διαδικασία εύρεσης ομοδιαυλικών κυψελών
  - Ξεκινάμε από οποιαδήποτε κυψέλη σαν αναφορά
  - Μετακινούμαστε  $i$  κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε αλυσίδας εξαγώνων
  - Στρέφουμε ανθρωρολογικά κατά  $60^\circ$
  - Μετακινούμαστε  $j$  κυψέλες κατά μήκος της αλυσίδας εξαγώνων προς την οποία στραφήκαμε
  - Η  $j$ -οστή κυψέλη και η κυψέλη αναφοράς είναι ομοδιαυλικές
- Αν επιστρέψουμε στην κυψέλη αναφοράς και κινηθούμε κατά μήκος μιας διαφορετικής αλυσίδας εξαγώνων, θα προκύψει μια νέα ομοδιαυλική κυψέλη.

# Κυψέλες

12

Παράμετροι Ολίσθησης:  
Δύο ακέραιοι  $i, j$

$$i(=3) \geq j(=2)$$



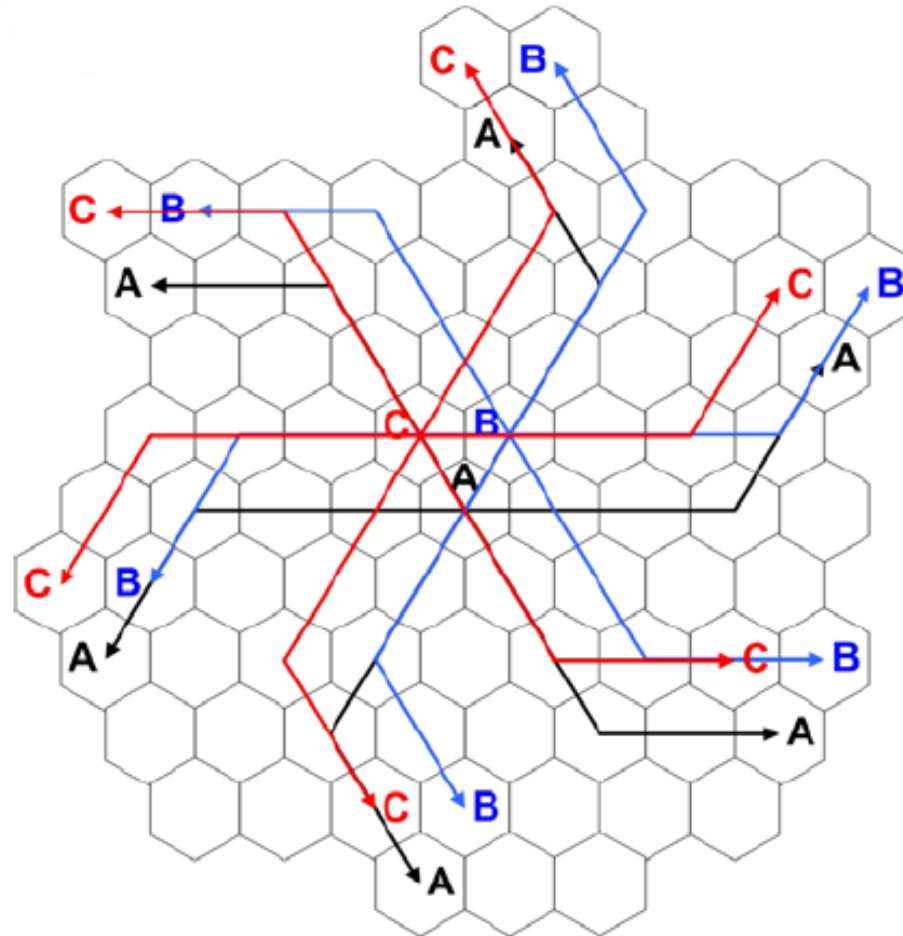
# Κυψέλες

13

- Μπορούμε να μετακινηθούμε  $j$  κυψέλες πριν την ανθρωλογιακή στροφή και  $i$  κυψέλες μετά.
- Επίσης μπορούμε να στραφούμε ωρολογιακά και όχι ανθρωλογιακά.
- Προκύπτουν 4 τρόποι, δίνοντας 2 δομές
- Οι 2 αυτές δομές είναι κατοπτρικές ως προς κατάλληλο άξονα.
- Την ίδια διαδικασία εκτελούμε (με σταθερά  $i, j$ ) για κάθε κυψέλη γειτονική της αρχικής και προκύπτει η **κυψελωτή δομή**.

# Κυψέλες

14

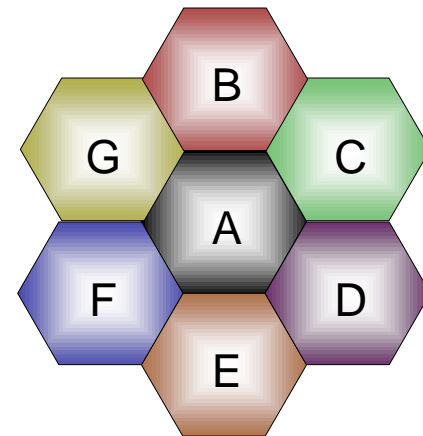


# Κυψέλες

15

Ομάδα (ή Τομέας ή Συστάδα) [Cluster]  
ονομάζεται το ελάχιστο σύνολο των  
κυψελών που χρησιμοποιεί πλήρως  
όλα τα διαθέσιμα κανάλια.

*(Το ελάχιστο δηλώνει ότι σε έναν τομέα  
δεν θα υπάρχουν δύο κυψέλες που θα  
έχουν το ίδιο κανάλι)*



Μέγεθος τομέα  $K=7$  (κυψέλες)

*Τυπικά μεγέθη για clusters 4, 7, 12.*

Συντελεστής επαναχρησιμοποίησης:  $1/7$

Διότι κάθε κυψέλη έχει το  $1/7$  των διαθέσιμων καναλιών του συστήματος

# Κυψέλες

16

- **Cluster** : Το σύνολο των κυψελών που αθροιστικά χρησιμοποιούν όλες τις ομάδες διαύλων.
- Ο **αριθμός των κυψελών στο cluster** καθορίζει πόσες διαφορετικές ομάδες διαύλων πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

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

- **Απόσταση επαναχρησιμοποίησης**

$$D = \sqrt{K} = \sqrt{i^2 + ij + j^2}$$



# Κυψέλες

17

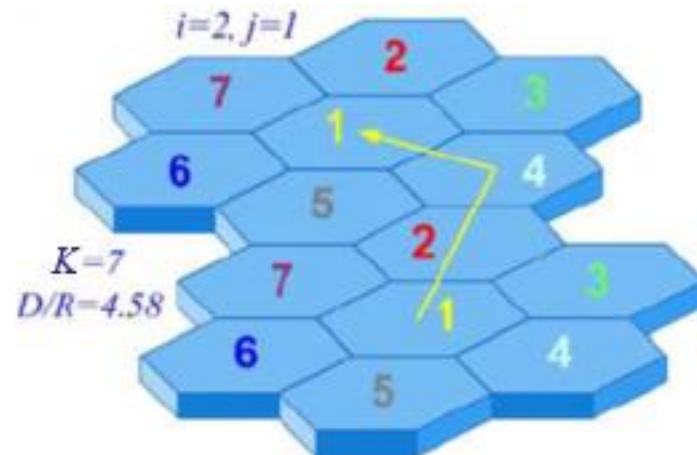
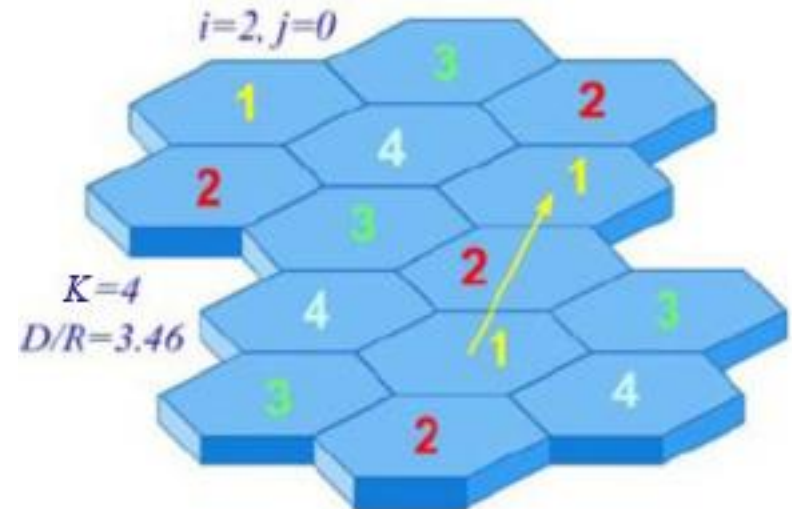
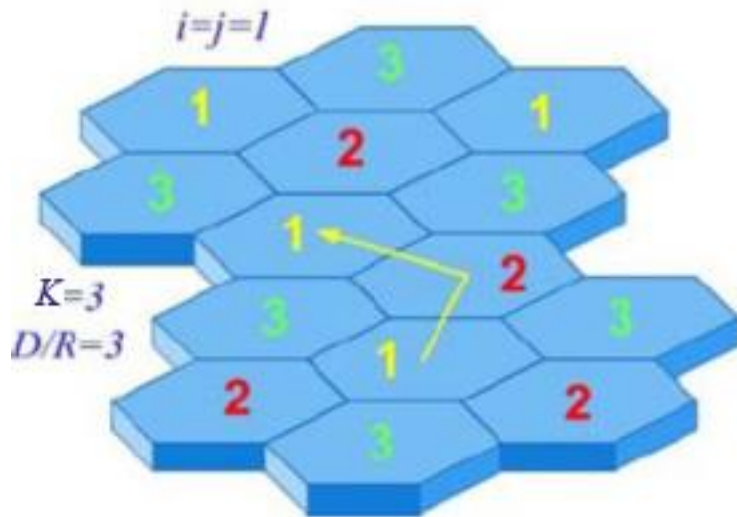
- Λόγος ομοδιαυλικής επαναχρησιμοποίησης (co-channel reuse ratio)

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

$i$	$j$	$K$	$D/R$
1	0	1	1.73
1	1	3	3
2	0	4	3.46
2	1	7	4.58
2	2	12	6
3	0	9	5.2
3	1	13	6.24
3	2	19	7.55
3	3	27	9

# Κυψέλες

18



# Κυψέλες

19

- Θεωρώ δεδομένα
  - ▣  $A$  : Εμβαδόν περιοχής εφαρμογής
  - ▣  $S$  : Συνολικός αριθμός διαθέσιμων διαύλων
  - ▣  $R$  : Ακτίνα κυψέλης (ισχύς για δεδομένη συχνότητα και περιβάλλον)
- Αν ένα cluster επαναλαμβάνεται  $M$  φορές
  - ▣ Ο συνολικός αριθμός διαύλων λόγω επαναχρησιμοποίησης είναι :  $C=M*S$
- Για να μεγιστοποιήσω το  $C$ , πρέπει να αυξήσω το  $M$ .

# Κυψέλες

20

- Αφού  $R$  γνωστό, και εμβαδόν κυψέλης γνωστό.
- Άρα θα έχω δεδομένο (σταθερό) συνολικό αριθμό κυψελών στο σύστημα.

- **Συνολικός Αριθμός Κυψελών:**

$$\frac{A}{\text{Εμβαδο Κυψελης}} = \frac{A}{\frac{3\sqrt{3}}{2} R^2} = M \square K$$

- Άρα αύξηση του  $M$ , σημαίνει μείωση του μεγέθους του cluster  $K$ .

- Άρα μείωση του:  $\frac{D}{R} = \sqrt{3K}$

# Παράδειγμα

21

Διαθέτουμε φάσμα 33MHz για ένα FDD κυψελοειδές σύστημα που χρειάζεται *simplex* κανάλι 25kHz για να μεταφέρει φωνή και σήματα ελέγχου.

Υπολογίστε τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών ανά κυψέλη για  $K=4$ ,  $K=7$  και  $K=12$ .

Ολικό Εύρος Φάσματος: 33MHz.

Εύρος Φάσματος Αμφίδρομου Καναλιού:

$$25\text{kHz} \times 2 \text{ μονόδρομα κανάλια} = 50 \text{ KHz}$$

Ολικά διαθέσιμα κανάλια:  $33000\text{KHz} / 50\text{KHz} = 660$ .

Κανάλια ανά κυψέλη:

$$\underline{K=4}: \quad 660/4 = 165$$

$$\underline{K=7}: \quad 660/7 = 94$$

$$\underline{K=12}: \quad 660/12 = 55$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

22

- 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

23

- Τηλεπικοινωνιακή κίνηση είναι το σύνολο (σχετικά με το πλήθος και τη διάρκεια) των κλήσεων από και προς τα κινητά τερματικά, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω ενός αριθμού διαύλων.
- Εξαρτάται από το φορτίο ενός συστήματος εξυπηρετητών (servers).
- Η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι ένα θέμα που έχει μελετηθεί εκτενώς στα τηλεφωνικά συστήματα, όπου χρησιμοποιείται η μεταγωγή κυκλώματος.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

24

- Η μεταφερόμενη κίνηση είναι καθαρός αριθμός, αλλά του δόθηκε η μονάδα **Erlang**, από τον θεμελιωτή της θεωρίας τηλεπικοινωνιακής 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).
- Δύο εξυπηρετητές 9.6kbps ο ένας και 64kbps ο άλλος, που είναι πλήρως κατειλημμένοι, μεταφέρουν ο καθένας 1Erlang κίνησης.
- Ένας ραδιοδίαυλος, ο οποίος π.χ. είναι κατειλημμένος 30 λεπτά κατά τη διάρκεια μιας ώρας, μεταφέρει 0.5 erlang κίνησης.
- Στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών εξυπηρετητές είναι οι ραδιοδίαυλοι.



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

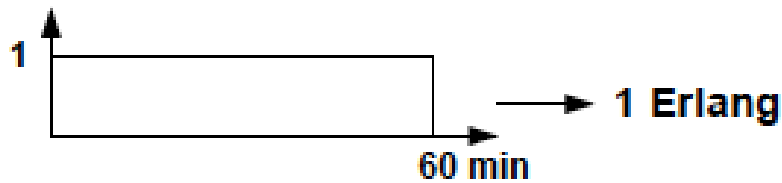
25

- Ονομάζουμε **κίνηση** το σύνολο των τηλεφωνικών κλήσεων ή κλήσεων μετάδοσης δεδομένων με μεταγωγή κυκλώματος προς κάποιον σταθμό βάσης.
- Θεωρούμε έναν σταθμό βάσης που διαθέτει συγκεκριμένο αριθμό διαύλων για εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών.
- Η φορά 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 στο δίαυλο.

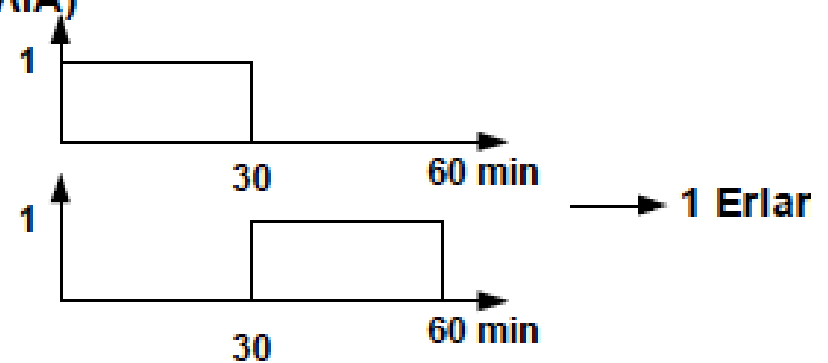
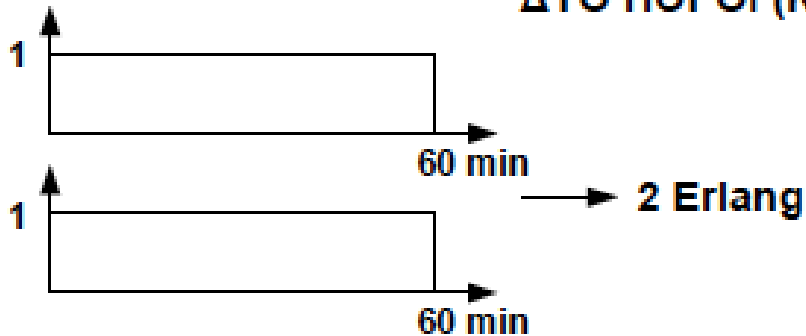
# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

26

## ΕΝΑΣ ΠΟΡΟΣ (ΚΑΝΑΛΙ)



## ΔΥΟ ΠΟΡΟΙ (ΚΑΝΑΛΙΑ)



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

27

- Η θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης ασχολείται με τα προβλήματα αναμονής ή/και απωλειών κλήσεων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.
- Η άφιξη και η λήξη μιας τηλεφωνικής κλήσης είναι στοχαστικές διαδικασίες και η μονάδα Erlang **δεν** μας υποδεικνύει πώς συμπεριφέρεται στατιστικά η κίνηση γύρω από τη μέση τιμή.
- Οι χρήστες στα συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι πολύ περισσότεροι από τους διαθέσιμους διαύλους.
- Όταν η προσφερόμενη κίνηση αυξηθεί, είναι φυσικό μια κλήση να αφιχθεί ενώ όλοι οι δίαυλοι είναι κατειλημμένοι.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

28

- 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 αποκλειόμενων κλήσεων

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

29

## Παράδειγμα

□ Έστω χρήστες με τις εξής συνήθειες:

- 20 κάνουν 1 κλήση ανά ώρα διάρκειας 6 min
- 20 κάνουν 3 κλήσεις ανά ώρα διάρκειας 30 sec
- 60 κάνουν 1 κλήση ανά ώρα διάρκειας 1 min.

□ Πόσος ο φόρτος και πόση είναι η παραγόμενη κίνηση ανά χρήστη?

□ Λύση

- $20 \times 1 \times 6/60 = 2 \text{ E}$
- $20 \times 3 \times 0.5/60 = 0,5 \text{ E}$
- $60 \times 1 \times 1/60 = 1 \text{ E}$
- Συνολικός φόρτος = 3,5 E
- Ο μέσος χρήστης παράγει: 35mE

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

30

- 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

31

- **Ερώτηση** : Ποια είναι η δυνατότητα του χρήστη να προσπελάσει το σύστημα κατά την ώρα μέγιστου προσφερόμενου φορτίου;
- **Βαθμός Εξυπηρέτησης (Grade of Service, GoS)** : Το μέτρο της μέγιστης αποδεκτής πιθανότητας μια κλήση είτε να χαθεί, είτε να βρίσκεται σε αναμονή για περισσότερο από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- **Στόχος σχεδιαστή** : Απόφαση για τον αριθμό των ραδιοδιαύλων που θα ικανοποιεί ένα προκαθορισμένο GoS, με δεδομένο το μέγιστο προσφερόμενο φορτίο.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

32

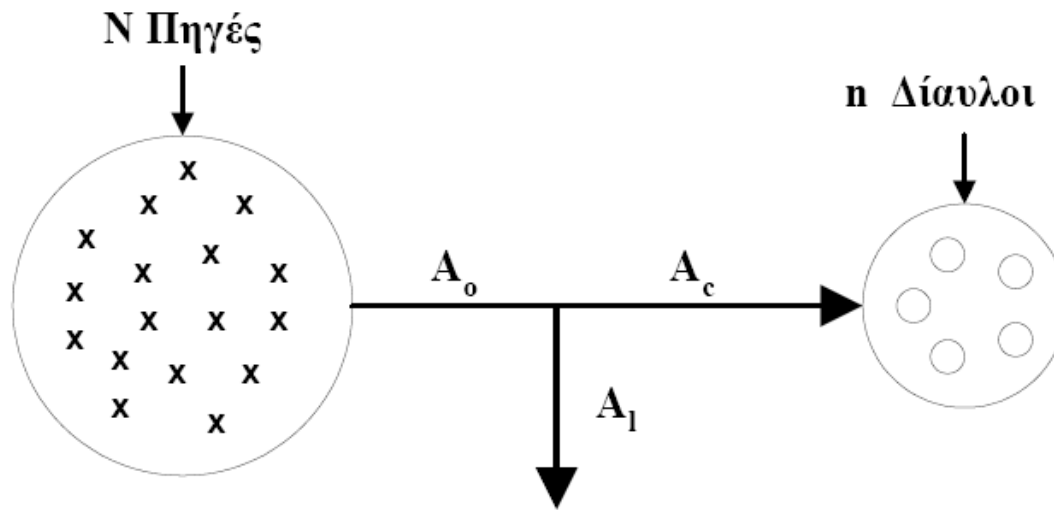
- Η μέγιστη μεταφερόμενη κίνηση είναι ίση με τον αριθμό των διαύλων  $C$ , σε erlangs.
- Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων με συγκέντρωση, που χρησιμοποιούνται στην πράξη.
- Χωρίς αναμονή στις κλήσεις που αποκλείονται.
  - $GoS$  = η πιθανότητα να αποκλειστεί μια κλήση.
- Ουρά αναμονής για τις κλήσεις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



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

33

## □ Μοντέλο χαμένων κλήσεων



$A_0$ : Προσφερόμενη Κίνηση

$A_1$ : Χαμένη Κίνηση

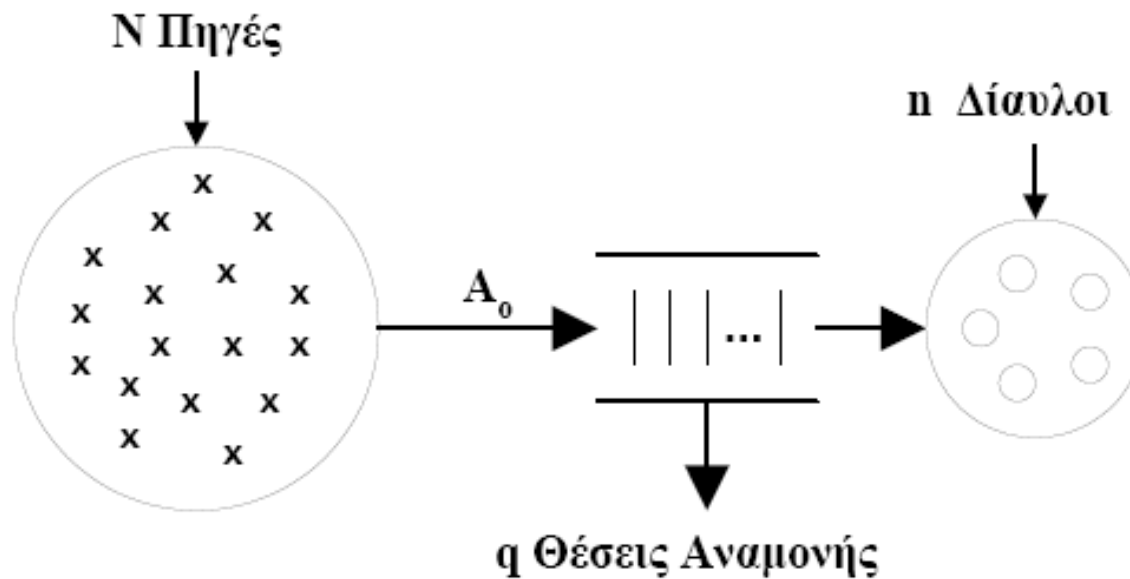
$A_c$ : Μεταφερόμενη Κίνηση

Η διαφορά μεταξύ προσφερόμενης και μεταφερόμενης κίνησης ονομάζεται αποκλειόμενη κίνηση και εξαρτάται από το βαθμό εξυπηρέτησης

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

34

- Μοντέλο Αναμονής Κλήσεων (Υπόθεση  $q+N < n$  και οι χρήστες απεριόριστη υπομονή)



$A_0$ : Προσφερόμενη Κίνηση

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

35

- Θεωρούμε σύστημα με  $N$  χρήστες
- Η μέση χρονική διάρκεια μια κλήσης είναι  $H$
- Ο μέσος ρυθμός άφιξης κλήσεων από κάθε χρήστη είναι  $\lambda$ , (κλήσεις / μονάδα χρόνου).
- Κάθε χρήστης παράγει κίνηση (προσφερόμενη)

$$A_u = \lambda H \text{ (Erlangs)}$$

- Συνολική κίνηση

$$A = N A_u = N\lambda H \text{ (Erlangs)}$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

36

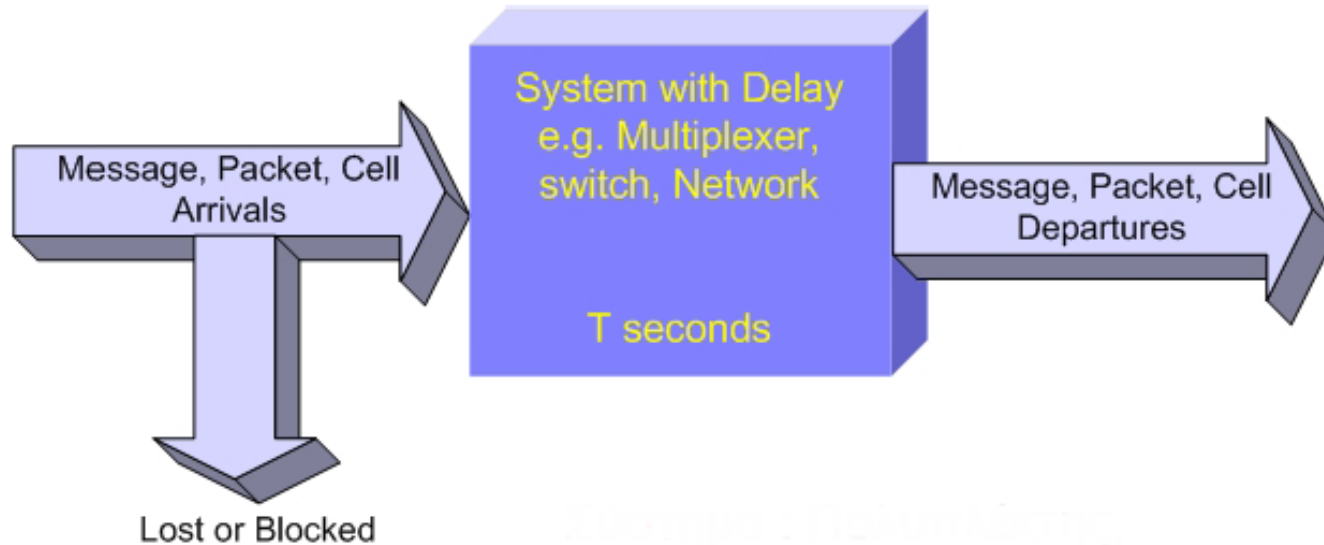
- **Παράδειγμα:** Υπολογίστε το φορτίο από 1000 χρήστες αν η μέση διάρκεια κλήσης είναι 90sec και ο ρυθμός κλήσεων είναι 2 κλήσεις/ώρα
- **Λύση:**

$$A_u = \lambda H = \frac{2}{3600} 90 = 0.05 \text{ (Erlangs)}$$

$$A = NA_u = N\lambda H = 1000 * 0.05 = 50 \text{ (Erlangs)}$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

37



**Σύστημα** : Πολυπλέκτης, μεταγωγέας, ραδιοδίαυλος, ολόκληρο δίκτυο

**Πελάτης** : Μήνυμα, πακέτο, cell

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

38

## □ Παράμετροι που ενδιαφέρουν

- Η καθυστέρηση  $T$  (seconds) στο σύστημα (χρόνος αναμονής και χρόνος εξυπηρέτησης)
- Ο αριθμός των πελατών στο σύστημα
- Ποσοστό πελατών που χάνονται (απορρίπτονται)
- Ο μέσος αριθμός πελατών/second που περνούν από το σύστημα (system throughput).
- Συμφόρηση (Congestion,  $P_C$ ): το ποσοστό του χρόνου στο οποίο κανένα κανάλι δεν είναι ελεύθερο (όλα τα κανάλια είναι κατειλημμένα)
- Πιθανότητα απώλειας κλήσης (Blocking,  $P_B$ ): Είναι η πιθανότητα μια εισερχόμενη κλήση να βρει όλα τα κανάλια κατειλημμένα

## □ Υποθέσεις που γίνονται συνήθως

- Κατανομή Poisson για αφίξεις με ρυθμό  $\lambda$
- Κατανομή Poisson για αναχωρήσεις με ρυθμό  $\mu$

$$P_B \leq P_C$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

39

- Έστω  $C$  ο συνολικός αριθμός των διαύλων
- $t_n$  το συνολικό άθροισμα των χρονικών διαστημάτων, όπου οι  $n$  από τους  $C$  διαύλους είναι κατειλημμένοι κατά τη διάρκεια μίας μακράς χρονικής περιόδου  $T$  (ισχύει  $t_n \leq T$ )

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

- Ο όγκος της κίνησης είναι το άθροισμα όλων των χρόνων κατάληψης για τη θεωρούμενη χρονική περίοδο  $T$  και ισούται με :  $\sum_{n=0}^C n \cdot t_n$   
Άθροισμα όλων των χρόνων κατάληψης

- Η **μεταφερόμενη κίνηση** ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου κίνησης προς τη χρονική περίοδο κατά την οποία μετριέται ο όγκος κίνησης

$$\text{Μεταφερομενη Κινηση} = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^C n \cdot t_n = \sum_{n=0}^C n \cdot \left( \frac{t_n}{T} \right)$$

- Η μεταφερόμενη κίνηση αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το μέσο αριθμό των ταυτόχρονων καταλήψεων διαύλων κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου  $T$  (συνήθως  $T=1$ ώρα) και εκφράζεται σε **Erlangs**.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

40

- **Κατανομή Poisson:** Η πιθανότητα για  $k$  αφίξεις σε διάστημα  $T$ , είναι:

$$p(k) = (\lambda T)^k \frac{e^{-\lambda T}}{k!} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- **Ιδιότητα κατανομής Poisson:** Αν  $N$  ανεξάρτητες πηγές ακολουθούν κάθε μια κατανομή Poisson με ρυθμούς άφιξης  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ , τότε η συνολική (αθροιστικά) πηγή ακολουθεί κατανομή Poisson με ρυθμό:

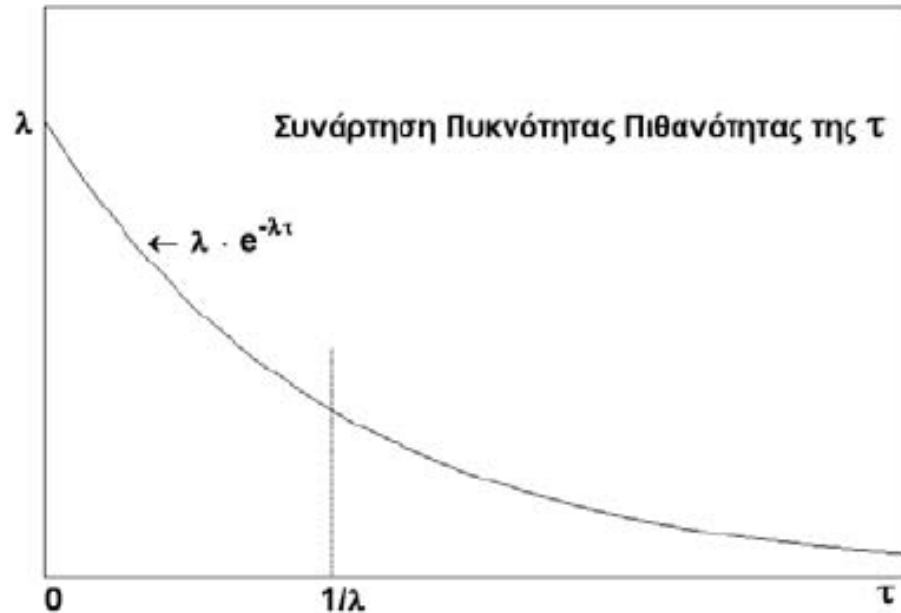
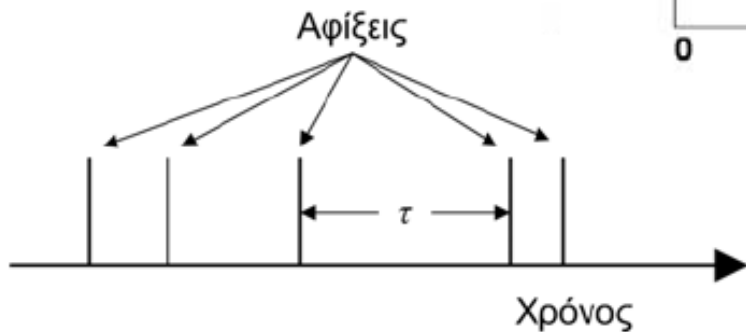
$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

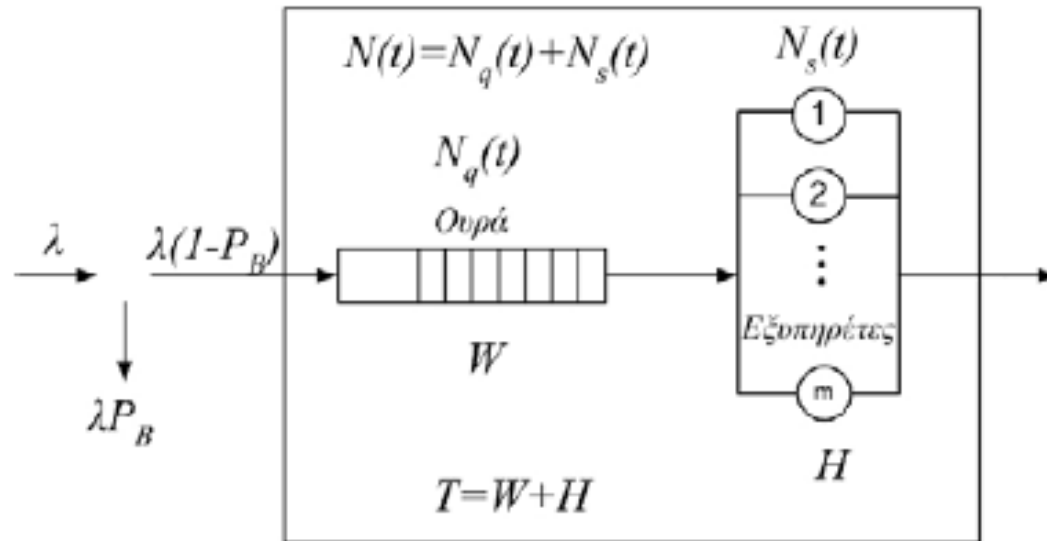
41

Εκθετική Κατανομή  
για τους χρόνους  
μεταξύ διαδοχικών  
αφίξεων



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση - Ουρές

42



Προσφερόμενο φορτίο :

$$A = \lambda E[H] = \lambda / \mu$$

Μεταφερόμενο φορτίο :

$$E[H] \lambda (1 - P_B) = A (1 - P_B)$$

Βαθμός Κατάληψης :

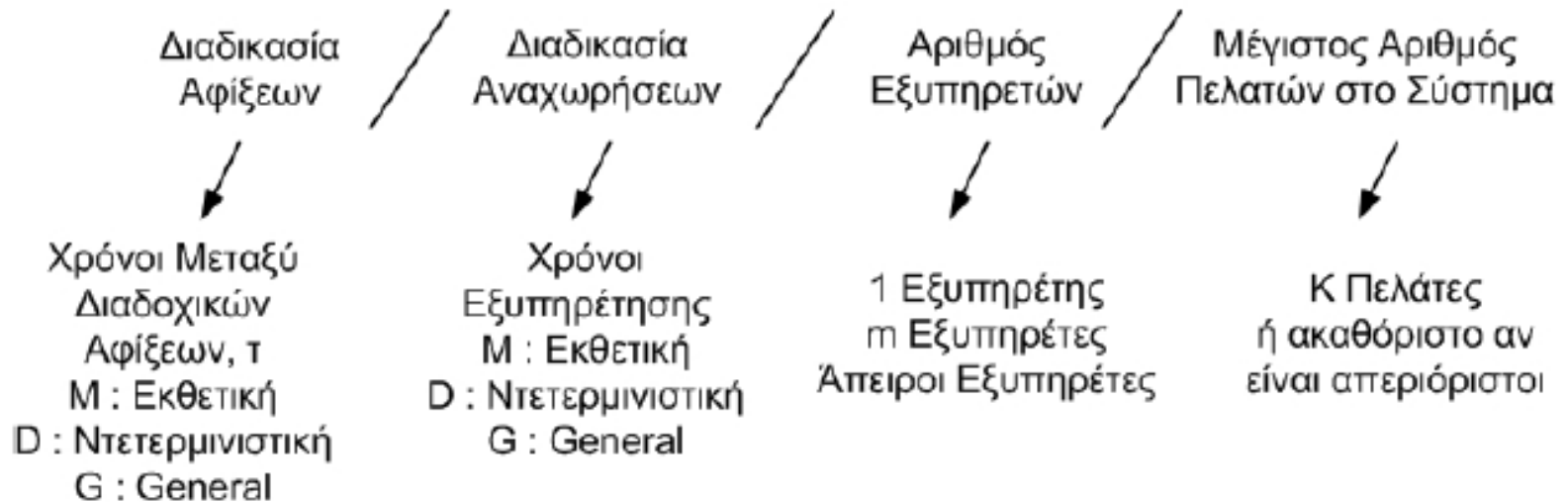
$$\rho = E[N_s] / m = \lambda (1 - P_B) / m \mu$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση - Ουρές

43

## Αναπαράσταση Συστήματος Ουράς

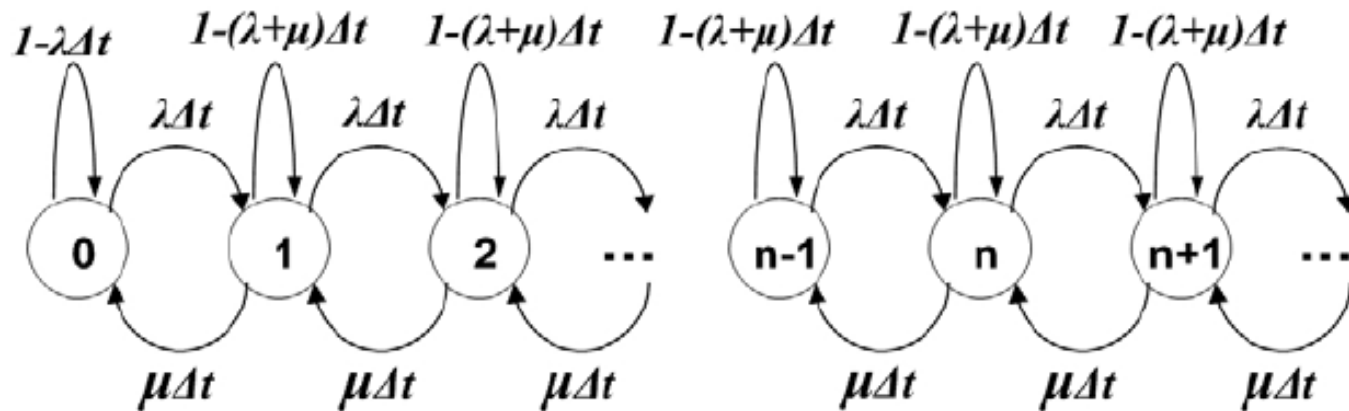
A/B/C/D



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση - Ουρές

44

- Διαγράμματα Κατάστασης
- Παράδειγμα M/M/1



$$\begin{aligned}(\lambda + \mu) p_n &= \lambda p_{n-1} + \mu p_{n+1} \\ \lambda p_n &= \mu p_{n+1}\end{aligned}$$

$$p_n = A^n (1 - A)$$

# Παράδειγμα

45

- Σε μια κυψέλη έχουμε 4 συχνότητες. Έγιναν μετρήσεις διάρκειας 1 λεπτού σε διάρκεια 10 ωρών μέγιστης αιχμής και παρατηρήθηκε ότι
  - 0 ραδιοδίαυλοι κατειλημμένοι σε 89 παρατηρήσεις
  - 1 ραδιοδίαυλος κατειλημμένος σε 164 παρατηρήσεις
  - 2 ραδιοδίαυλοι κατειλημμένοι σε 173 παρατηρήσεις
  - 3 ραδιοδίαυλοι κατειλημμένοι σε 114 παρατηρήσεις
  - 4 ραδιοδίαυλοι κατειλημμένοι σε 60 παρατηρήσεις
- Ο συνολικός αριθμός των κλήσεων που έφθασαν και δεν εξυπηρετήθηκαν (απωλεσθείσες κλήσεις) είναι 34
- Υποθέτοντας ότι  $P(\text{συμφόρησης}) = P(\text{αποκλεισμού})$  ( $P_C = P_B$ ) και χωρίς τη χρήση του τύπου του Erlang να εκτιμηθούν
  1. Η μεταφερόμενη κίνηση
  2. Το προσφερόμενο φορτίο
  3. Η μέση διάρκεια της κλήσης.

# Παράδειγμα

46

- Σύνολο παρατηρήσεων:
  - ▣ 60 παρατηρήσεις/ώρα επί 10 ώρες = 600 παρατηρήσεις
- Μεταφερόμενη κίνηση = Μέσος όρος κατειλημμένων καναλιών

$$\begin{aligned} A_c &= 0 \cdot \frac{89}{600} + 1 \cdot \frac{164}{600} + 2 \cdot \frac{173}{600} + 3 \cdot \frac{114}{600} + 4 \cdot \frac{60}{600} = \\ &= \frac{164 + 346 + 342 + 240}{600} = \frac{1092}{600} = 1.82 \end{aligned}$$

- Αν  $A_o$  είναι το προσφερόμενο φορτίο, τότε το φορτίο που δεν εξυπηρετείται δίνεται από τον τύπο:

$$A_o - A_c = A_o p_4, A_o > A_c \quad \text{γιατί } P(\text{συμφόρησης}) = P(\text{αποκλεισμού})$$

# Παράδειγμα

47

$$\Rightarrow A_o = \frac{A_c}{1 - p_4} = \frac{1.82}{1 - \frac{60}{600}} = \frac{1.82}{0.9} = 2.02 \text{Erlang}$$

- Όλοι οι ραδιοδίαυλοι είναι κατειλημμένοι σε 60 περιπτώσεις (παρατηρήσεις) δηλ σε 60 λεπτά και οι απωλεσθείσες κλήσεις είναι 34
- Άρα ο ρυθμός άφιξης κλήσεων είναι  $\lambda = 34/60 = 0.567$  κλήσεις/λεπτό
- Ξέρουμε επίσης ότι το προσφερόμενο φορτίο δίνεται από τον τύπο  $A_o = \lambda/\mu$
- Οπότε:  $H = \frac{1}{\mu} = \frac{A_o}{\lambda} = \frac{2.02}{0.567} = 3.57$
- Οπότε η μέση διάρκεια κλήσης  $H$  είναι 3.57 λεπτά.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

48

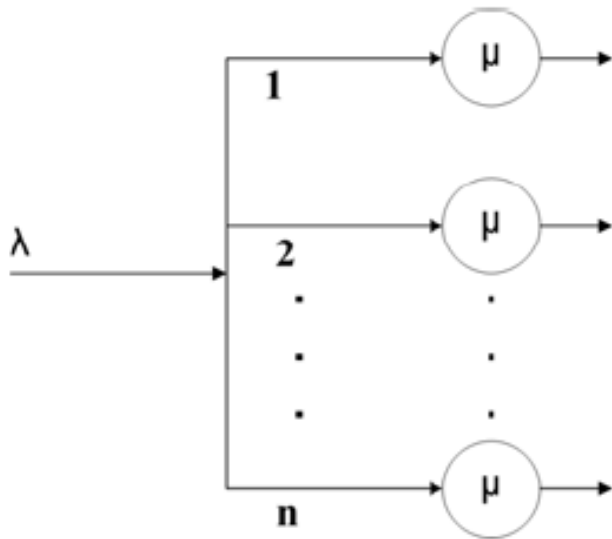
## □ Μοντέλο Erlang B

- Οι κλήσεις αφικνούνται και εξυπηρετούνται κατά Poisson, με μέσους ρυθμούς  $\lambda$  και  $\mu$  αντίστοιχα.
- Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση είναι :  $A = \lambda / \mu$
- Βρίσκουν πάντα διαθέσιμο δίαυλο, μέχρι ένας μέγιστος αριθμός διαύλων είναι κατειλημμένος.
- Στη συνέχεια όποιες κλήσεις αφικνούνται, απορρίπτονται και υποθέτουμε ότι ο χρήστης δεν προσπαθεί ξανά.
- Το σύστημα είναι με πεπερασμένο αριθμό διαύλων χωρίς θέσεις αναμονής.



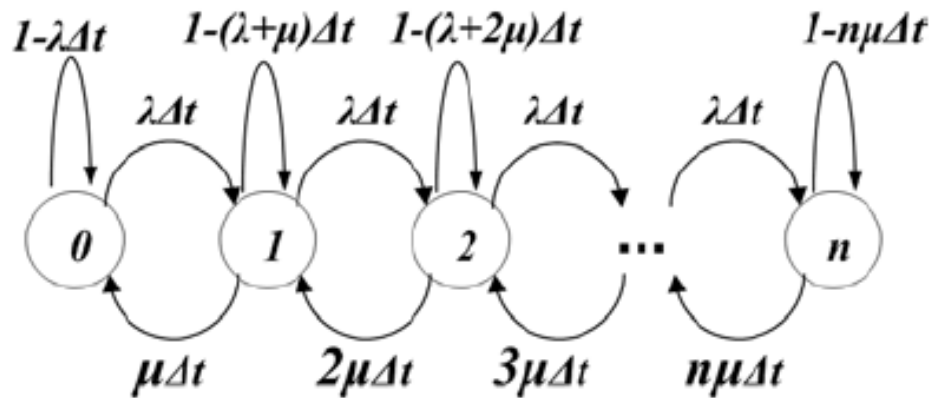
# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

49



Το σύστημα θεωρείται ότι έχει πεπερασμένο αριθμό διαύλων χωρίς θέσεις αναμονής.

Διάγραμμα Κατάστασης για Erlang B



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

50

- Πιθανότητα Απόρριψης Κλήσεων
- Όσο αυξάνεται η κίνηση  $A$  τόσο  $P_B \rightarrow 1$
- Ο μέσος αριθμός κλήσεων στο σύστημα είναι

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

$$E[N] = A(1 - P_B) \quad \max\{N\} = n$$

$n$  είναι ο αριθμός των διαύλων

$k$  ο αριθμός των κατειλημμένων διαύλων

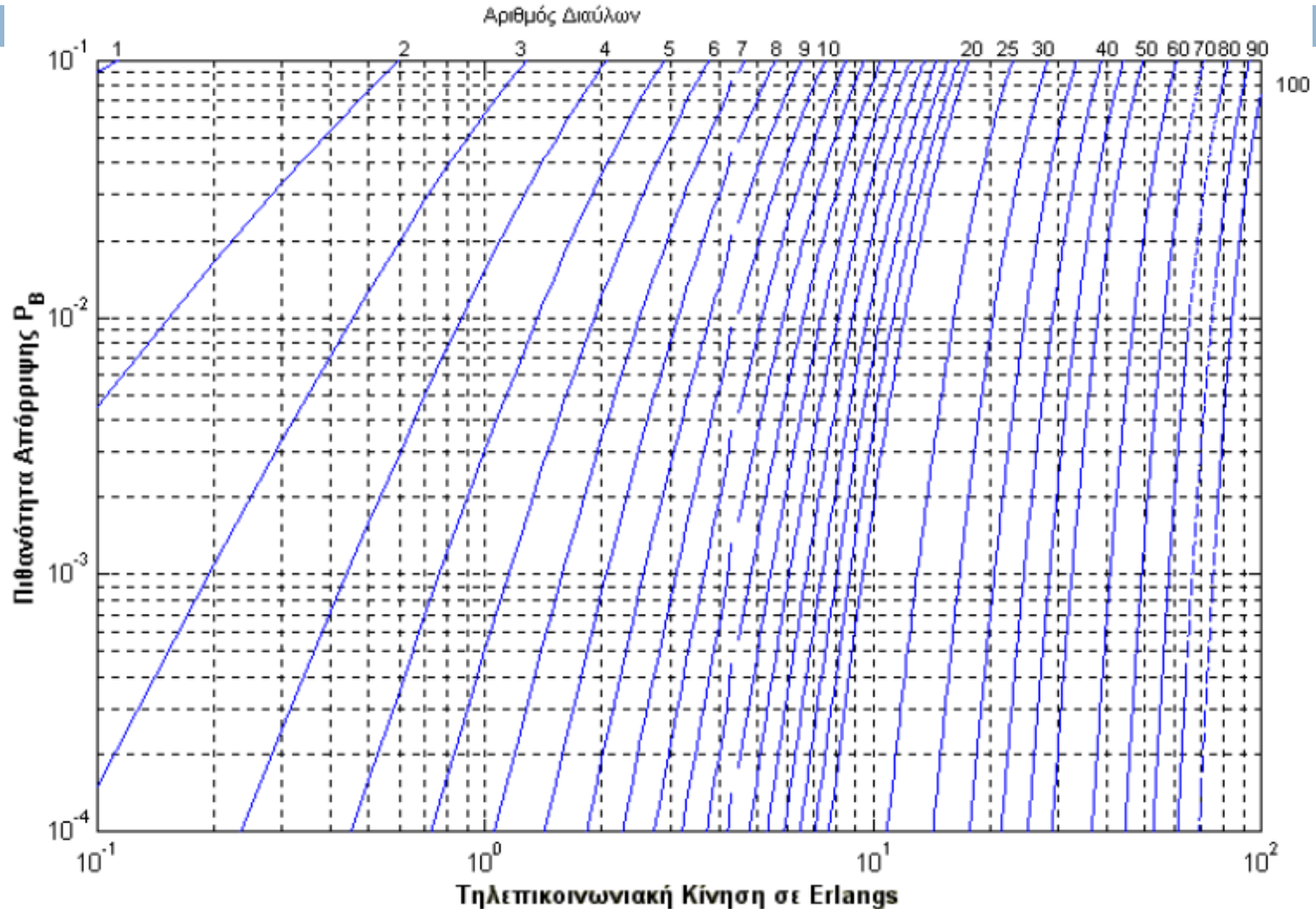
$N$  ο αριθμός των χρηστών

- Η δυνατότητα διεκπεραίωσης κλήσεων (throughput)

$$\gamma = \lambda(1 - P_B) \quad \max\{\gamma\} = n\mu$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

51



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

52

$n$	$P_b=0,01$	$P_b=0,02$	$P_b=0,03$
1	0,010103	0,020405	0,030934
2	0,152596	0,223471	0,281556
3	0,455481	0,60221	0,715132
4	0,86942	1,092257	1,258905
5	1,360778	1,657145	1,875209
6	1,909031	2,275874	2,54306
7	2,500934	2,935403	3,249651
8	3,127566	3,627053	3,986547
9	3,782541	4,344723	4,747879
10	4,461182	5,084009	5,529414

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

53

- **Παράδειγμα** : Αν σε ΣΚΕ η πιθανότητα απόρριψης είναι 0.03 και κάθε χρήστης παράγει κίνηση 0.1Erlangs, υπολογίστε πόσοι δίαυλοι απαιτούνται για την υποστήριξη 20, 40 και 50 χρηστών
- **Λύση** : Κίνηση για 20 χρήστες  $A=2$  Erlangs, για 40 χρήστες  $A=4$  Erlangs, και για 50 χρήστες  $A=5$  Erlangs. Άρα απαιτούνται (από πίνακα)  $n=6$ ,  $n=9$  και  $n=10$  δίαυλοι αντίστοιχα

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

54

- **Παράδειγμα** : Αν σε ΣΚΕ με 100 κυψέλες και κατά μέσο όρο 10 διαύλους ανά κυψέλη, η πιθανότητα απόρριψης είναι 2%, υπολογίστε πόσοι χρήστες υποστηρίζονται, αν κάθε χρήστης παράγει κίνηση 0.1Erlangs.
- **Λύση** : Κάθε κυψέλη μπορεί να υποστηρίξει  $A=5,08$  Erlangs. Άρα  $5,08/0,1=50,8$  δηλαδή 50 χρήστες. Άρα σε όλο το σύστημα  $50*100=5000$  χρήστες.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

55

- Κατά κύριο λόγο στα ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα χρησιμοποιείται ο πίνακας Erlang-B.
- Τα περισσότερα συστήματα δεν θέτουν σε αναμονή τις κλήσεις όταν δεν μπορούν να τις εξυπηρετήσουν (blocked calls), και αν εξαιρέσουμε τους χρήστες που κάνουν επανειλημμένες απόπειρες να πιάσουν γραμμή, η κίνηση προσεγγίζεται καλύτερα με τον τύπο του Erlang-B.

## Παράδειγμα:

Πόσα κανάλια απαιτούνται για την εξυπηρέτηση 100 συνδρομητών με GoS= 2%, αν η μέση κίνηση ανά χρήστη είναι 30 mE?

### Χρήση πίνακα:

100 x 30mE = 3 Erlangs

3 Erlang στο GOS = 2%

**8 κανάλια**

n	Loss probability (E)						
	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04
1	.00705	.00806	.00908	.01010	.02041	.03093	.05204
2	.12600	.13532	.14416	.15259	.22347	.28155	.38155
3	.39664	.41757	.43711	.45549	.60221	.71513	.89900
4	.77729	.81029	.84085	.86942	1.0923	1.2589	1.5200
5	1.2362	1.2810	1.3223	1.3608	1.6571	1.8752	2.2100
6	1.7531	1.8093	1.8610	1.9090	2.2759	2.5431	2.9600
7	2.3149	2.3820	2.4437	2.5009	2.9354	3.2497	3.7300
8	2.9125	2.9902	3.0615	3.1276	3.6271	3.9865	4.5400
9	3.5395	3.6274	3.7080	3.7825	4.3447	4.7479	5.3700
10	4.1911	4.2889	4.3784	4.4612	5.0840	5.5294	6.2100
11	4.8637	4.9709	5.0691	5.1599	5.8415	6.3280	7.0700
12	5.5543	5.6708	5.7774	5.8760	6.6147	7.1410	7.9500
13	6.2607	6.3863	6.5011	6.6072	7.4015	7.9667	8.8300
14	6.9811	7.1155	7.2382	7.3517	8.2003	8.8035	9.7200
15	7.7139	7.8568	7.9874	8.1080	9.0096	9.6500	10.6000
16	8.4579	8.6092	8.7474	8.8750	9.8284	10.505	11.5000

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

56

- Υπάρχει μια επαναληπτική σχέση που επιτρέπει τον γρήγορο και ακριβή υπολογισμό της πιθανότητας απόρριψης

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

$$P_B(0, A) = 1$$



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang B)

57

- Προσφερόμενη κίνηση ανά δίαυλο ( $G_c = A/n$ )
- Αφορά την αποδοτικότητα των διαύλων
- Παρατηρήστε ότι όσο αυξάνει το  $n$ , τόσο αυξάνει η αποδοτικότητα  $G_c$
- **Παράδειγμα** : για  $n=5$  και  $P_B=0,01$  έχω  $A=1,36$ , δηλαδή  $G_c = 0,272$  ενώ για  $n=10$ ,  $A=4,46$  και άρα  $G_c = 0,446$
- Άρα συμφέρει η χρήση μιας ομάδας των 10 διαύλων, παρά δύο ομάδων των 5 διαύλων κάθε μία.
- Άρα και πάλι προτιμάται η χρήση μικρού αριθμού κυψελών στο cluster.

# Erlang B - Παραδείγματα

58

- *Θέλουμε το σύστημα μας να έχει  $GoS = 0.5\%$ .*
- *Πόσοι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν σε αυτό, εάν το σύστημα απορρίπτει τις μπλοκαρισμένες κλήσεις και έχει  $C = 5$  κανάλια?*
- *Έστω ότι κάθε χρήστης παράγει κίνηση  $0.1$  Erlang.*

Από τον πίνακα, με  $GoS=0.005$  και με 5 κανάλια προκύπτει ότι ο φόρτος (συνολική κίνηση που μπορεί να εξυπηρετηθεί) είναι:

$$A = 1,13 \text{ Erlang}$$

$$\text{Άρα: } N = A/A_u = 1.13/0.1 = 11.3$$

**Απάντηση: 11 χρήστες**

# Erlang B - Παραδείγματα

59

Μια αστική περιοχή έχει  $N=2$  εκατομμύρια κάτοικους. Τρία ανταγωνιστικά συστήματα κυψελοειδούς τηλεφωνίας εξυπηρετούν την περιοχή:

- Το σύστημα A έχει 394 κυψέλες x 19 κανάλια. (7486 κανάλια)
- Το σύστημα B έχει 98 κυψέλες x 57 κανάλια. (5586 κανάλια)
- Το σύστημα C έχει 49 κυψέλες x 100 κανάλια. (4900 κανάλια)

Και τα τρία συστήματα έχουν  $GoS = 2\%$

Θεωρήστε ότι για κάθε χρήστη  $\lambda = 2$  κλήσεις/hr,  $H = 3$  min

Να βρεθεί ο **αριθμός των συνδρομητών** που μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε σύστημα.

**Λύση:**

Είναι:  $A_u = \lambda H = 2 \times 3/60 = 0,1$  Erlang.

Σύστημα A:

Από τον πίνακα για  $GoS = 0,02$  και  $C = 19$  βρίσκουμε  $A = 12,33$  Erlangs

Ανά κυψέλη  $N = A/A_u = 12,33/0,1 = 123$  χρήστες

123 χρήστες/κυψέλη x 394 κυψέλες = **48.462** εξυπηρετούμενοι χρήστες.

Μέγιστη δυνατή εμπορική διείσδυση = 2,42%.

# Erlang B - Παραδείγματα

60

## Σύστημα B:

Από τον πίνακα για  $GoS = 0,02$  και  $C = 57$  βρίσκουμε  $A = 46,81$  Erlangs

Ανά κυψέλη  $N = A/A_v = 46,81/0,1 = 468$  χρήστες

468 χρήστες/κυψέλη x 98 κυψέλες = **45.864** εξυπηρετούμενοι χρήστες.

Μέγιστη δυνατή εμπορική διείσδυση = 2.29%.

## Σύστημα C:

Από τον πίνακα για  $GoS = 0,02$  και  $C = 100$  βρίσκουμε  $A = 87,97$  Erlangs

Ανά κυψέλη  $N = A/A_v = 87,97/0,1 = 879$  χρήστες

879 χρήστες/κυψέλη x 49 κυψέλες = **43.071** εξυπηρετούμενοι χρήστες.

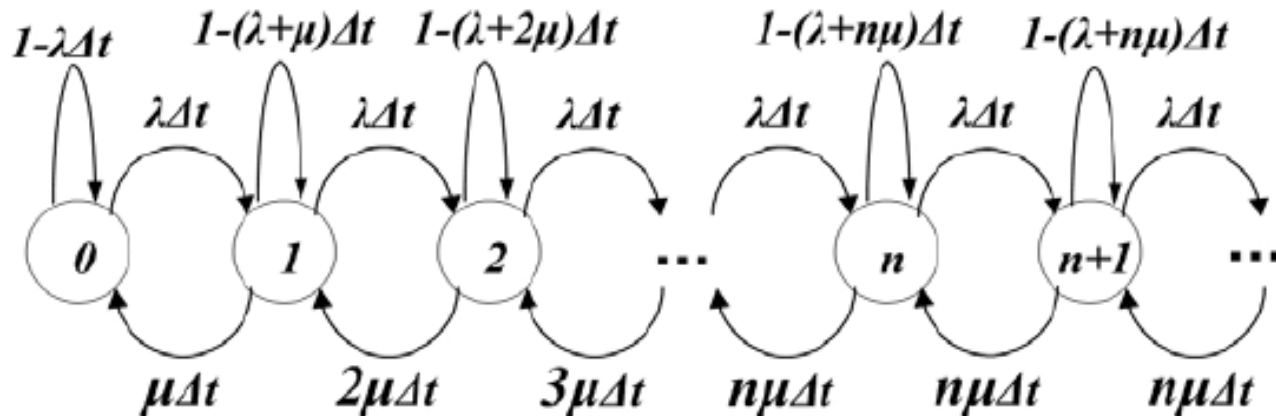
Μέγιστη δυνατή εμπορική διείσδυση = 2.15%.

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang C)

61

## □ Μοντέλο Erlang C

- Οι κλήσεις αφικνούνται και εξυπηρετούνται κατά Poisson, με μέσους ρυθμούς  $\lambda$  και  $\mu$  αντίστοιχα.
- Όταν οι δίαυλοι είναι κατειλημμένοι οι νέες κλήσεις δεν απορρίπτονται αλλά παραμένουν σε ουρά αναμονής μέχρι να βρεθεί διαθέσιμος δίαυλος.



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang C)

62

- Πιθανότητα μια κλήση να υποστεί καθυστέρηση

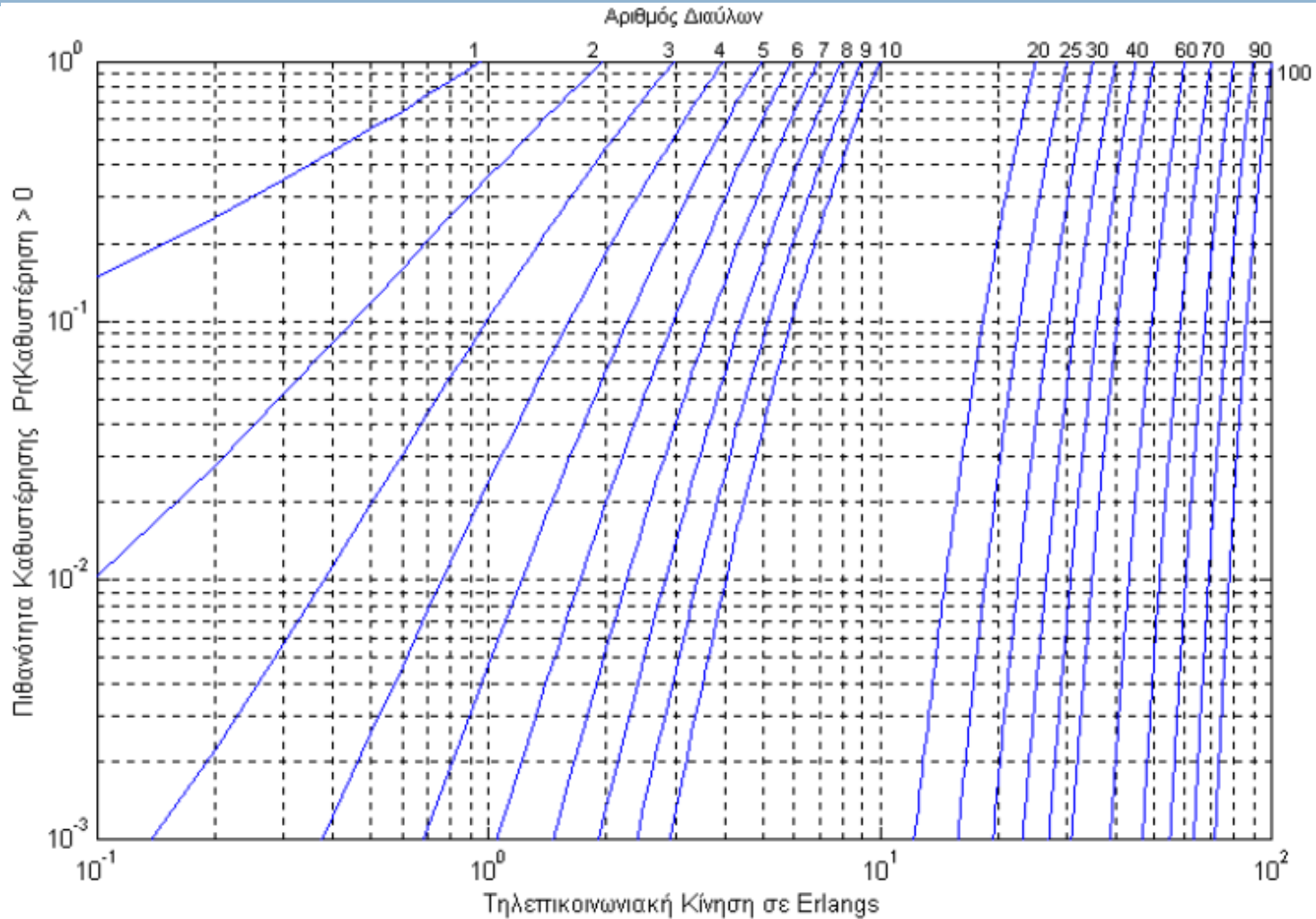
$$P_{(Delay>0)}(n, A) = \frac{A^n}{A^n + \left(1 - \frac{A}{n}\right) n! \sum_{i=0}^{n-1} \frac{A^i}{i!}}$$

- Σχετίζεται με την πιθανότητα απόρριψης του Erlang B, μέσω της οποίας υπολογίζεται εύκολα

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

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang C)

63



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang C)

64

$n$	$P_{Delay>0}=0,01$	$P_{Delay>0}=0,02$	$P_{Delay>0}=0,03$
1	0,009995	0,020000	0,030006
2	0,146507	0,210252	0,260414
3	0,429090	0,554519	0,646420
4	0,810003	0,993947	1,124187
5	1,259072	1,497356	1,662667
6	1,758362	2,047179	2,244877
7	2,296455	2,632598	2,860450
8	2,865639	3,246362	3,502545
9	3,460442	3,883410	4,166337
10	4,076804	4,539986	4,848352



# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση (Erlang C)

65

- Το GoS για συστήματα με ουρά αναμονής είναι η πιθανότητα μια κλήση να βρίσκεται στην ουρά για περισσότερο από ένα χρονικό διάστημα  $t$ .

$$\Pr(Delay > t) = \Pr(Delay > 0) \Pr(Delay > t | Delay > 0)$$

$$\Pr(Delay > t | Delay > 0) = e^{-\frac{(n-A)t}{H}}$$

# Τηλεπικοινωνιακή Κίνηση

66

- Ο αριθμός των πηγών στα δύο μοντέλα είναι άπειρος. Αν τον περιορίσουμε, προκύπτει ο τύπος του Engset.
- Το Erlang B δίνει πιο απαισιόδοξα αποτελέσματα.
- Τυπικά, τα μοντέλα Erlang B και C δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα κυψελωτά
  - Δεν λαμβάνουν υπόψη την κίνηση λόγω μεταπομπών
  - Η συνολική κίνηση ανά κυψέλη είναι χρονικά μεταβαλλόμενη λόγω χωρικής μετατόπισης των χρηστών
  - Στο Erlang B υποθέσαμε ότι οι χρήστες δεν προσπαθούν ξανά
- Είναι όμως πολύτιμα εργαλεία για τη σχεδίαση συστημάτων.

# Μεταπομπή (Handover ή Handoff)

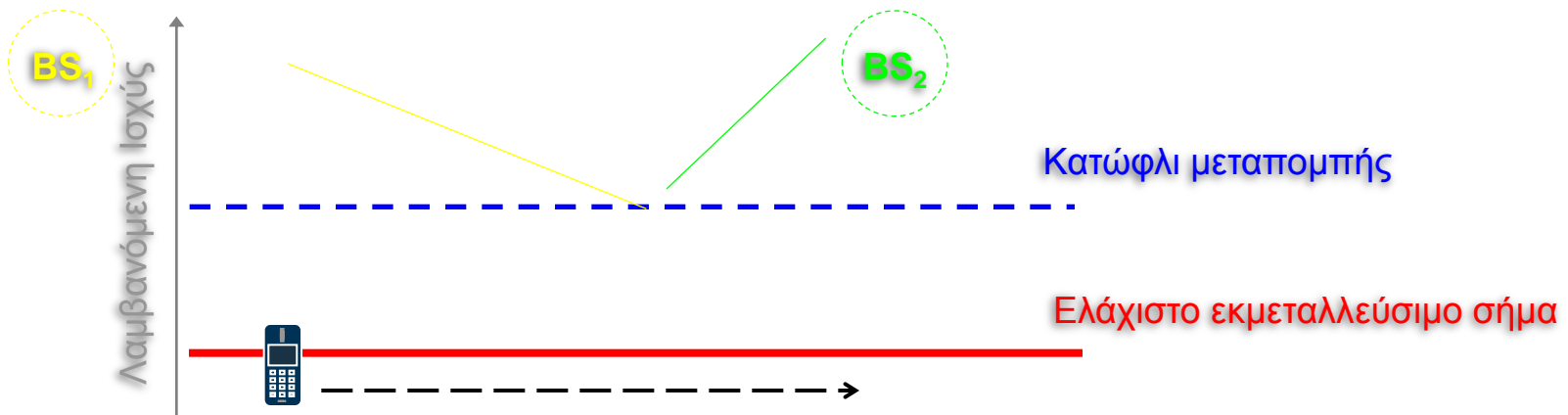
67

- Μεταπομπή (handoff): η διαδικασία μεταφοράς μιας κλήσης από τη δικαιοδοσία ενός σταθμού βάσης στη δικαιοδοσία ενός αλλού.
- Η μεταπομπή έχει προτεραιότητα ως προς τις νέες κλήσεις.
- Η μεταπομπή πρέπει να εκτελείται όσο το δυνατόν πιο σπάνια.
- Η μεταπομπή ξεκινά όταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος πέσει σε μια προκαθορισμένη τιμή πάνω από το ελάχιστο εκμεταλλεύσιμο σήμα λήψης.

# Μεταπομπή

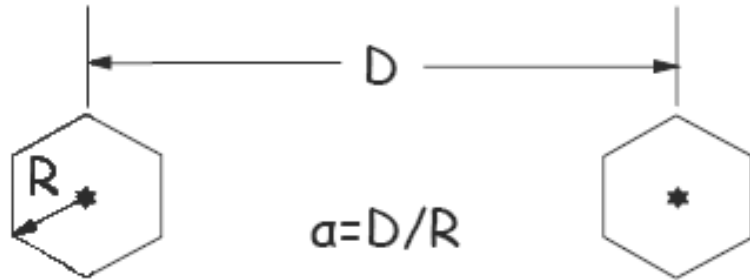
68

- Ισχύς μεταπομπής = (εκμεταλλεύσιμη ισχύς) +  $\delta$
- Όπου η «εκμεταλλεύσιμη ισχύς» είναι συνήθως -90 με -100dBm.  
[dBm:  $10\log_{10}(C / 1mW)$ ]
  - Αν το  $\delta$  είναι πολύ μεγάλο  $\rightarrow$  κίνδυνος μη αναγκαίας μεταπομπής
  - Αν το  $\delta$  είναι πολύ μικρό  $\rightarrow$  κίνδυνος απώλειας της κλήσης

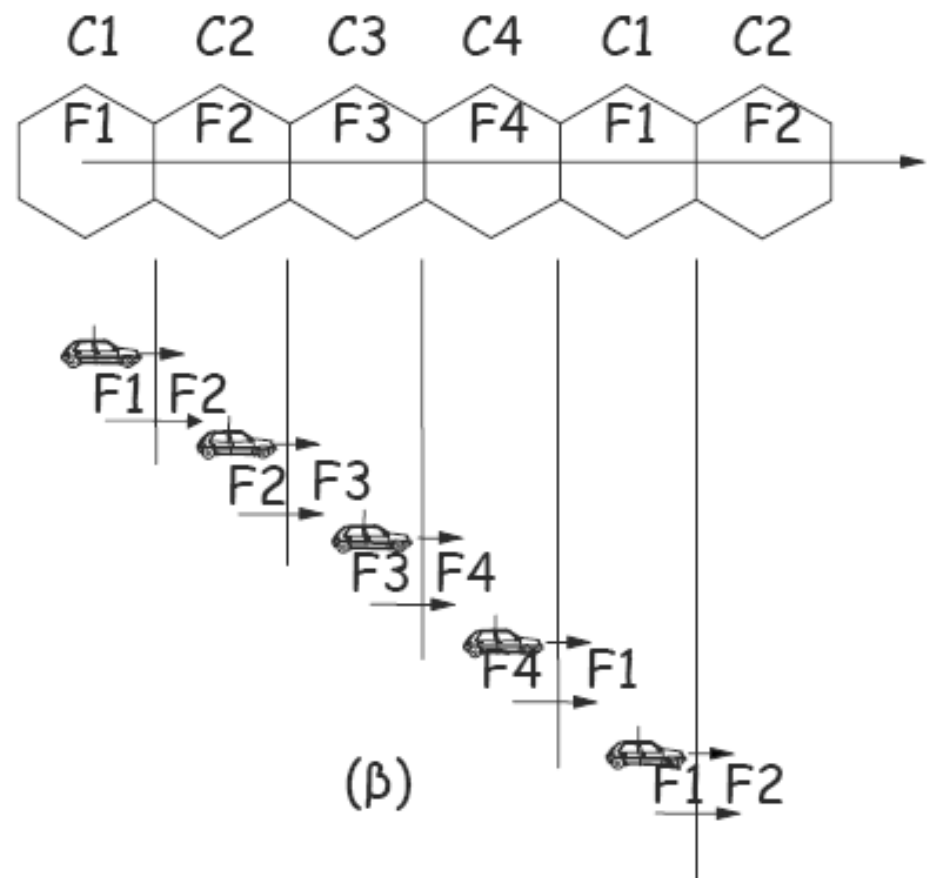


# Μεταπομπή

69



(a)



(b)

# Μεταπομπή

70

- Πρέπει να εξασφαλισθεί ότι η πτώση της ισχύος του σήματος δεν οφείλεται σε διαλείψεις. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη διαρκούς παρακολούθησης της ισχύος.
- Στα συστήματα 1<sup>ης</sup> γενιάς, κάθε BS παρακολουθούσε την ισχύ όλων των κινητών (MS).
- Ένδειξη έντασης ραδιοσήματος [ radio signal strength indication: *RSSI* ]
- Εκτός από την παρακολούθηση της *RSSI* των κλήσεων εν εξελίξει, ένας δέκτης εντοπισμού παρακολουθούσε την ένταση του σήματος στις γειτονικές κυψέλες. Όλη αυτή η πληροφορία διοχετευόταν στο MSC, το οποίο αποφάσιζε για το ποτέ θα γίνει το handoff.
- Στα συστήματα 2<sup>ης</sup> γενιάς έχουμε μεταπομπή υποβοηθούμενη από το κινητό (mobile assisted handoff - MAHO).
  - Το κινητό μετρά την ισχύ του BS.
  - Η μεταπομπή γίνεται όταν ένας γειτονικός BS είναι ισχυρότερος.Αυτή η κατανομημένη λειτουργία βοήθα στην απλοποίηση της δομής του MSC.

# Ασύρματη Πρόσβαση

71

