

# **Ασύρματος Περιβάλλον στις Κινητές Επικοινωνίες**

## **Κυψελωτά Συστήματα και Παρεμβολές**

Οι διαφάνειες στηρίζονται σε υλικό από διαλέξεις του κ. Ρούσκα (Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων Πανεπιστήμιο Πειραιώς) και τα κεφάλαια 2 και 3 του βιβλίου «Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών» του Καθηγητή ΕΜΠ κ. Θεολόγου

# Περιβάλλον με θόρυβο και παρεμβολές

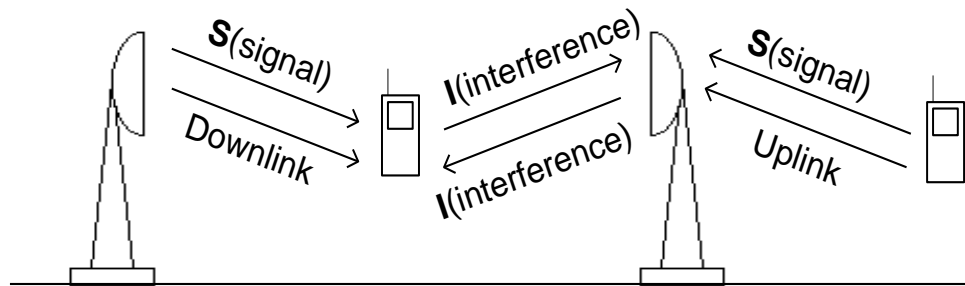
- Περιβάλλον δύο πομποδεκτών
  - Ακίνητοι με οπτική επαφή:
    - Η ποιότητα της επικοινωνίας επηρεάζεται από τον θόρυβο, ο οποίος μπορεί να είναι εξωτερικός, θερμικός η σε άλλα συστήματα, κρουστικός κ.λ.π.
  - Κινούμενοι (ο ένας η και οι δύο):
    - Παραμένει η επίδραση του θορύβου
    - Η ποιότητα επηρεάζεται και από τις διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών

# Περιβάλλον με θόρυβο και παρεμβολές

- Περιβάλλον πολλαπλών πομποδεκτών
  - Επαναχρησιμοποίηση διαύλων ίδιας συχνότητας
  - Χρησιμοποίηση διαύλων με παραπλήσιες συχνότητες
    - Εξωτερικός θόρυβος
    - Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών
    - Εσωτερικός θόρυβος
- Πηγή εσωτερικών παρεμβολών (Σύστημα GSM)
  - Uplink: χαμηλό μέρος συχνοτήτων
  - Downlink: υψηλό μέρος συχνοτήτων
  - Uplink: κινητά τερματικά που χρησιμοποιούν ίδιες η παραπλήσιες συχνότητες (σήματα κινητών παρεμβάλλουν σήματα άλλων κινητών )
  - Downlink: σταθμοί βάσης που χρησιμοποιούν ίδιες η παραπλήσιες συχνότητες (σήματα σταθμών βάσης παρεμβάλλουν σήματα άλλων σταθμών βάσης)
- Πηγή εξωτερικών παρεμβολών
  - Μικροκυματικές ζεύξεις
  - Οι πομποί από ανταγωνιστικά κυψελωτά συστήματα

# Επιπτώσεις παρεμβολών

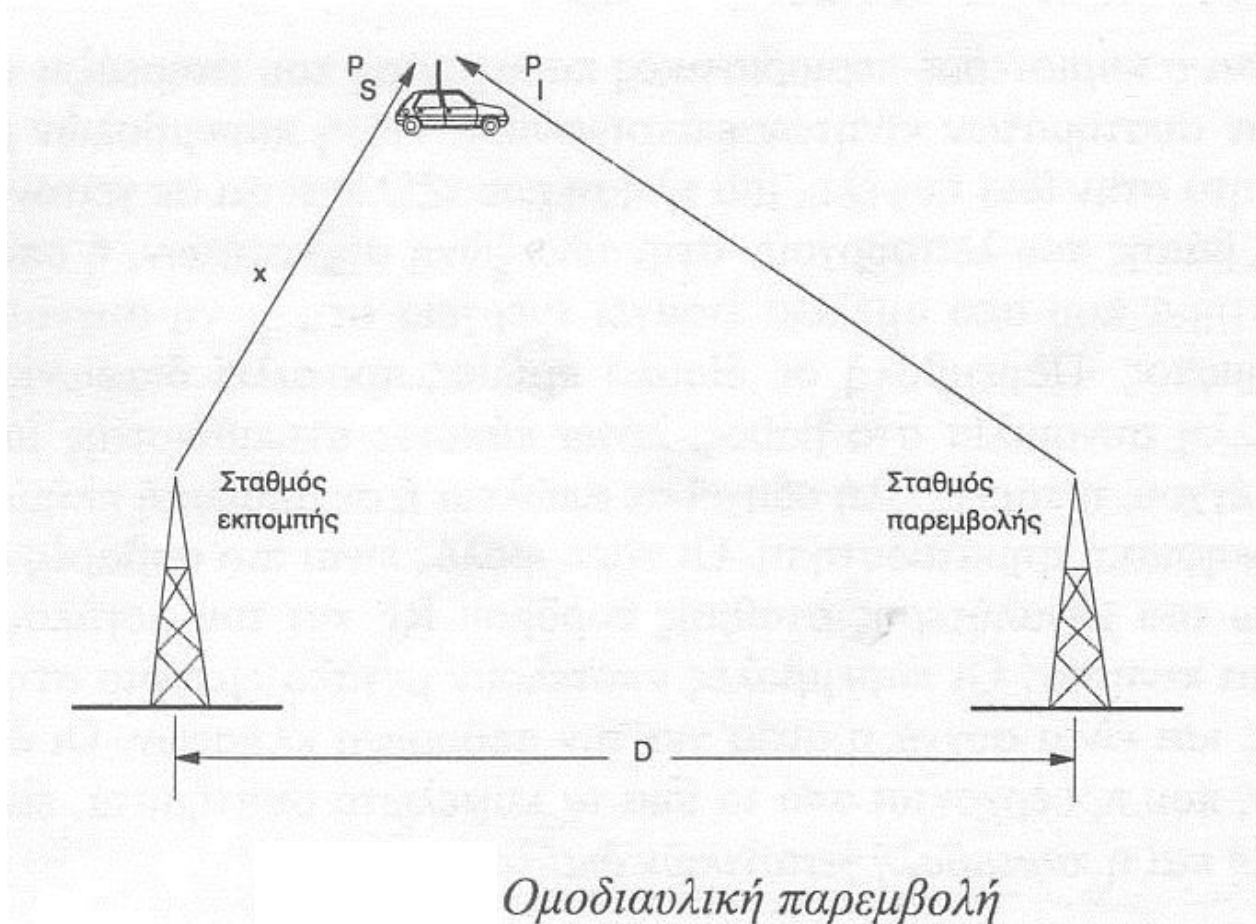
- Παρεμβολή σε δίαυλο ομιλίας
  - Στα αναλογικά συστήματα προκαλεί διαφωνία: Ο χρήστης ακούει άλλη συνομιλία στο βάθος, λόγω κάποιας ανεπιθύμητης μετάδοσης
  - Στα ψηφιακά συστήματα αύξηση του BER
- Παρεμβολή σε δίαυλο ελέγχου
  - Οδηγεί σε απώλεια κλήσης, λόγω σφαλμάτων στη σηματοδοσία



- Downlink Interference: Αυξάνει με το πλήθος των Σταθμών Βάσης
- Uplink Interference: Αυξάνει με το πλήθος των κινητών τερματικών

# Ομοδιαυλική παρεμβολή

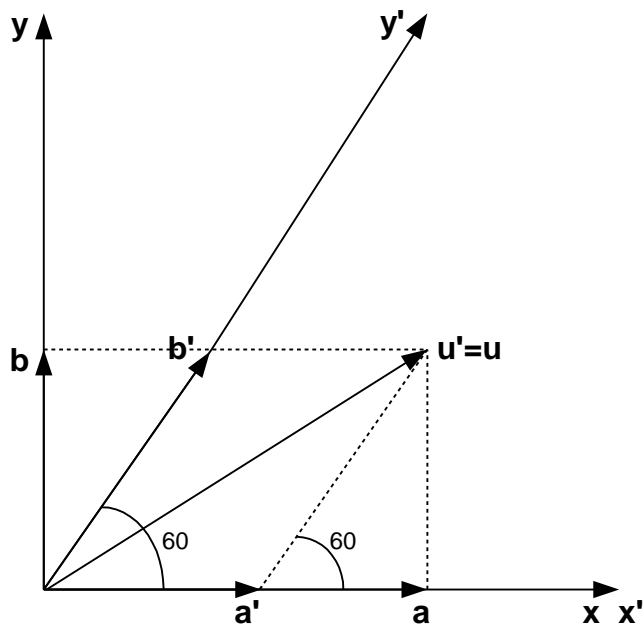
- Για να επιτευχθεί όπως ξέρουμε καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος που διατίθεται, επαναχρησιμοποιούνται ραδιοδίαυλοι της ίδιας συχνότητας. Έτσι δημιουργούνται ομοδιαυλικές κυψέλες. Η παρεμβολή μεταξύ σημάτων που προέρχονται από τέτοιες κυψέλες ονομάζεται *ομοδιαυλική παρεμβολή*.



# Υπολογισμός απόστασης ( $d_{1,2}$ ) μεταξύ δύο σημείων $(u_1, v_1)$ $(u_2, v_2)$

- Ορθογώνιο σύστημα:  $d_{1,2}^2 = (u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2$
- Σύστημα  $60^\circ$ : Μετατρέποντας το ορθογώνιο σύστημα σε σύστημα  $60^\circ$  προκύπτει ο εξής τύπος

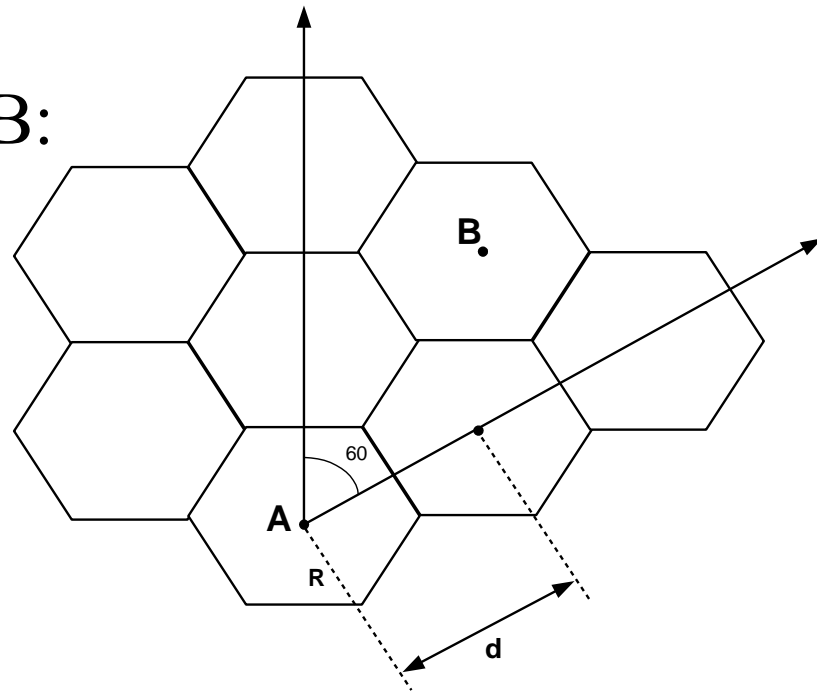
$$d_{1,2}^2 = (u_1 - u_2)^2 + (u_1 - u_2)(v_1 - v_2) + (v_1 - v_2)^2$$



# Απόσταση μεταξύ κέντρων κυψελών

- Δεδομένου ότι έχουμε εξαγωνικές κυψέλες ακτίνας  $R$  και σύστημα αξόνων  $60^\circ$ , οι διαφορές των συντεταγμένων των κέντρων των κυψελών εκφρασμένες συναρτήσει της διακέντρου  $d$ , μπορεί να γραφούν ως  $i \cdot d$  και  $j \cdot d$ , όπου  $i, j$  ακέραιοι αριθμοί.
- Απόσταση  $D$  μεταξύ των  $A$  και  $B$ :

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



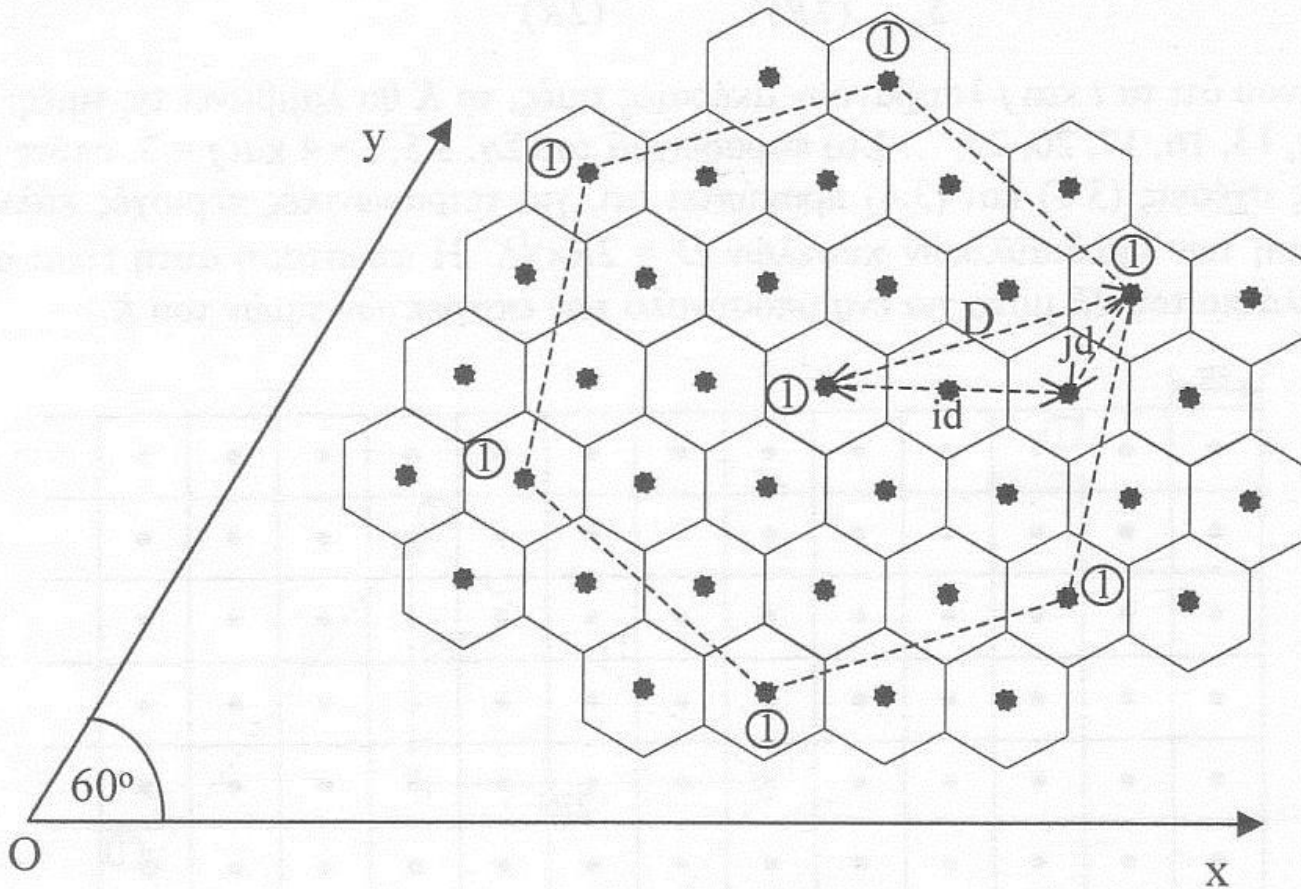
# Υπολογισμός ομοδιαυλικών κυψελών με διαφορά συντεταγμένων $(i, j)$

- Κινούμαστε  $i$  κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε κατεύθυνσης κάθετης προς μια πλευρά της κυψέλης
- Στρίβουμε αριστερά (ή δεξιά) κατά  $60^\circ$  και κινούμαστε  $j$  κυψέλες. Η κυψέλη που βρίσκουμε είναι ομοδιαυλική της αρχικής κυψέλης.
- Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για κάθε μια από τις υπόλοιπες πέντε πλευρές της αρχικής κυψέλης, προσδιορίζουμε τελικά τις πλησιέστερες έξι ομοδιαυλικές κυψέλες της δοθείσας κυψέλης.
- Αν επαναλάβουμε τη διαδικασία για κάθε μια από τις ευρεθείσες ομοδιαυλικές κυψέλες, προσδιορίζουμε όλες τις ομοδιαυλικές κυψέλες της αρχικής κυψέλης σε όλο το εξαγωνικό πλέγμα.
- Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η φορά της στροφής κατά  $60^\circ$  πρέπει να παραμένει η ίδια καθ' όλη τη διαδικασία



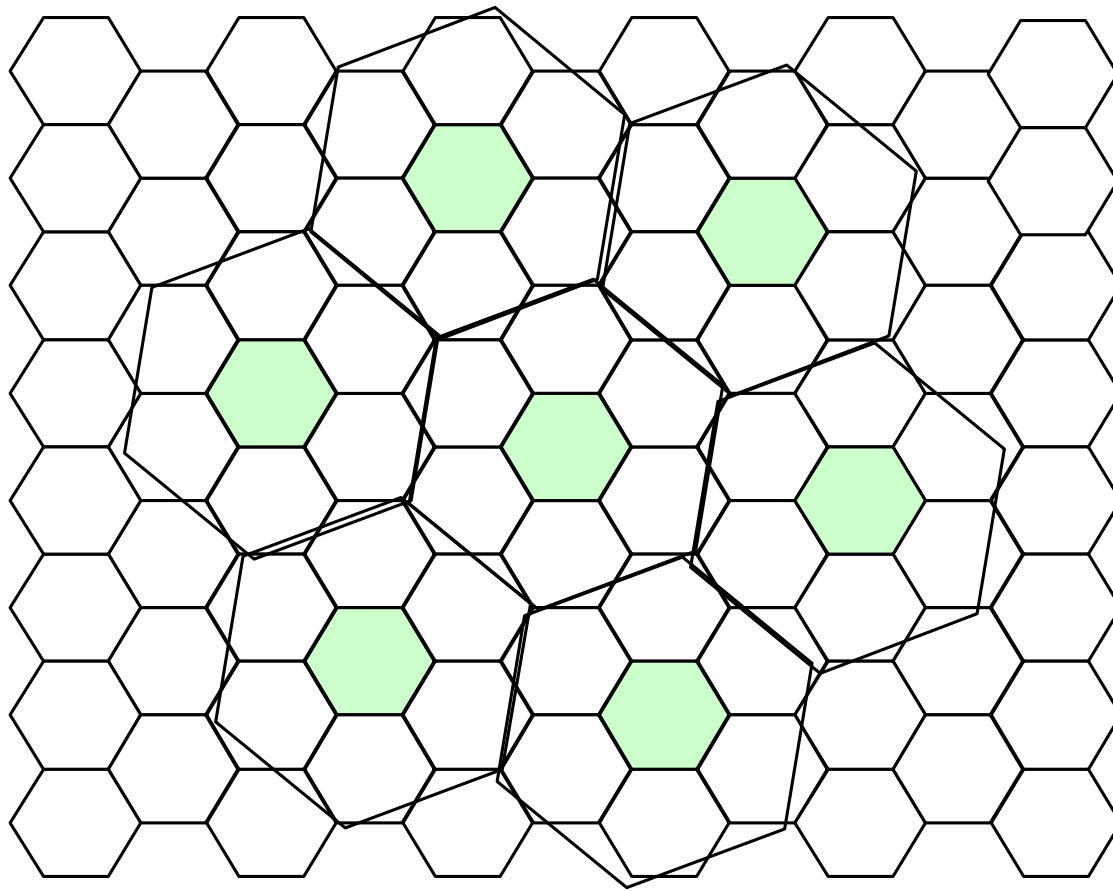
# Παράδειγμα

- Διαδικασία εύρεσης ομοδιαυλικών κυψελών για  $i=2$  και  $j=1$



*Σύστημα δύο διαστάσεων με εξαγωνικές κυψέλες*

Παράδειγμα για  $i=2, j=1$



# Σχέση D και N

- Κάθε κυψέλη έχει ακριβώς έξι ισαπέχουσες ομοδιαυλικές κυψέλες
- Τα κέντρα μεταξύ των ομοδιαυλικών κυψελών απέχουν απόσταση:

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

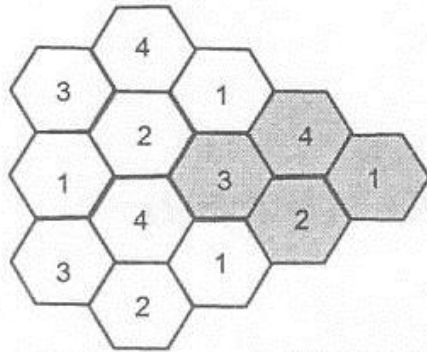
- Τα μεγάλα εξάγωνα προκύπτουν από τα μικρά με ένα γραμμικό παράγοντα πολλαπλασιασμού  $\sqrt{i^2 + i \cdot j + j^2}$ . Τόσο τα μικρά όσο και τα μεγάλα εξάγωνα καλύπτουν την ίδια περιοχή (ίδιο εμβαδόν). Άρα το πλήθος των κυψελών σε κάθε μεγάλο εξάγωνο είναι το τετράγωνο της γραμμικής αύξησης

$$N = i^2 + i \cdot j + j^2 \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{N}$$

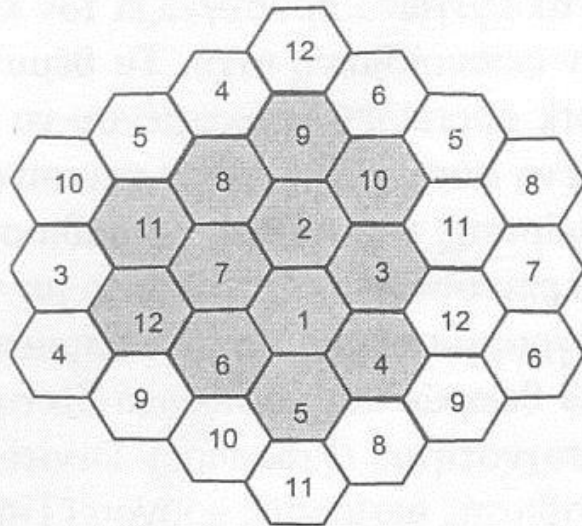
# Clusters

- Clusters ή ομάδες κυψελών: Το χαρακτηριστικό ενός cluster είναι ότι όλες οι κυψέλες που ανήκουν σε αυτό έχουν ξένες μεταξύ τους συχνότητες.
- Co-channel Reuse Distance: Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ Co-channel cells ( $D$ ) (Απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων)

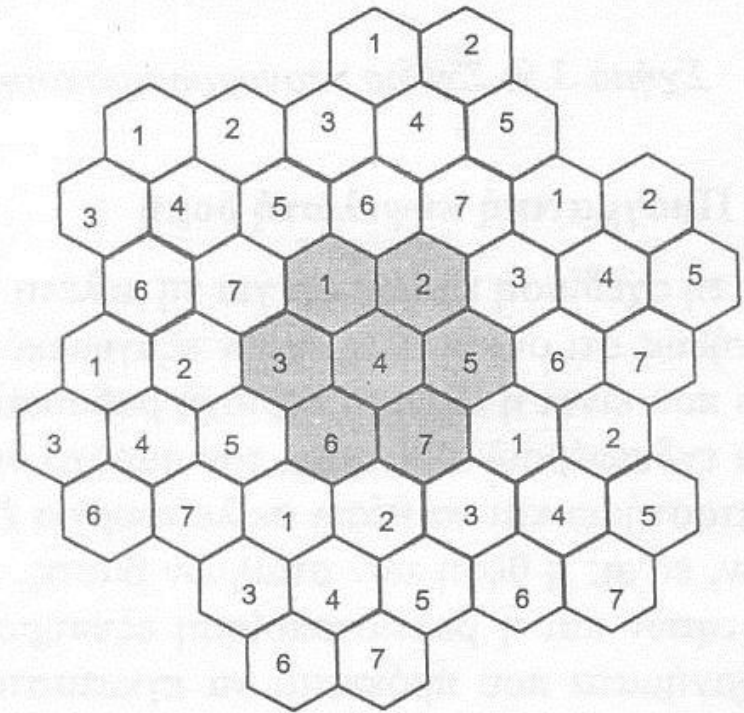
# Παραδείγματα Clusters $K=4,7,12$



$K=4$



$K=12$



$K=7$

*Εξαγωνική κυψελωτή δομή με επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων*

# Co-Channel Reuse Ratio

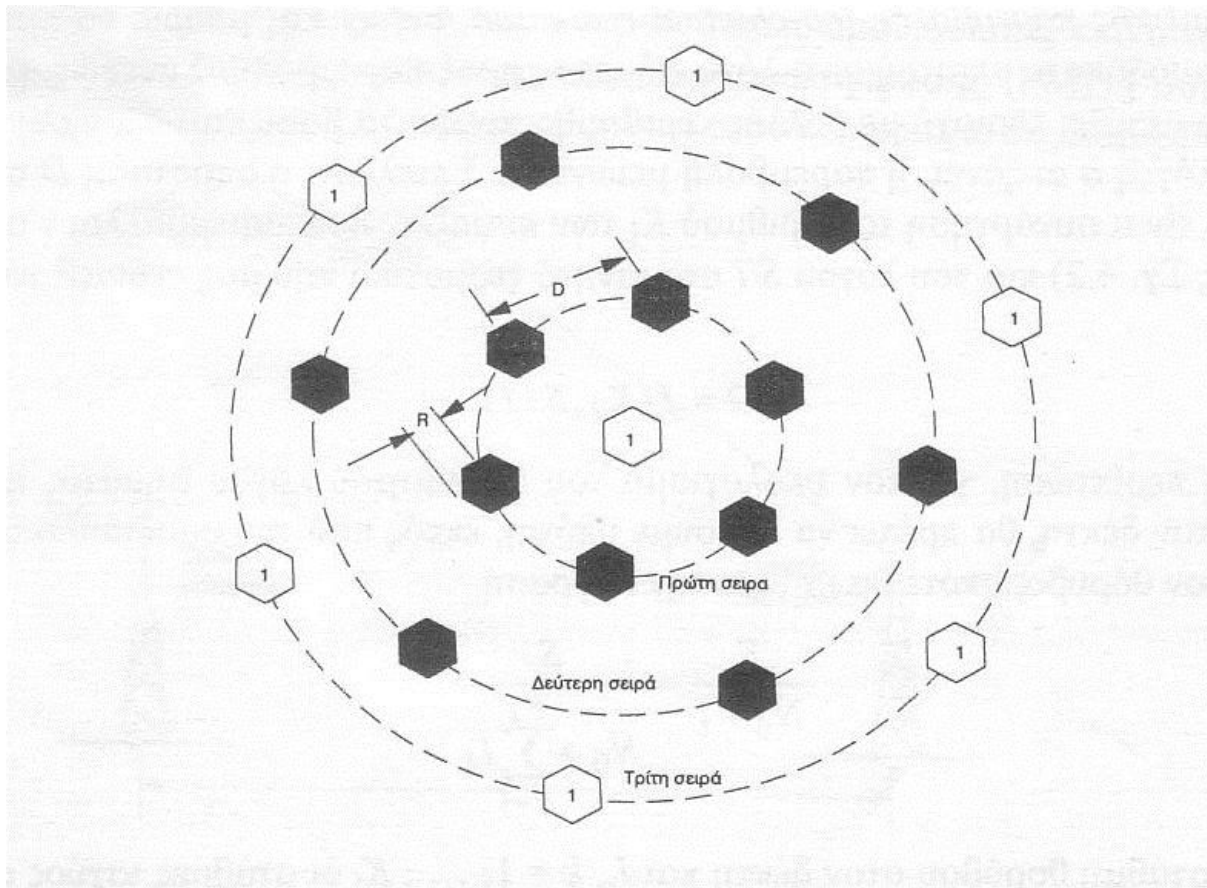
- Co-Channel Reuse Ratio

$$\frac{D}{R} = \frac{\sqrt{i^2 + i \cdot j + j^2}}{\frac{1}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{N} \cdot \sqrt{3}}{1} = \sqrt{3N}$$

- $\frac{D}{R} > 1$

# Ομοδιαυλική παρεμβολή

- Υπάρχουν πολλές σειρές ομοδιαυλικών κυψελών και πόσες σειρές ομοδιαυλικών κυψελών θα ληφθούν υπόψη έχει επίπτωση στην ακρίβεια του υπολογισμού της ομοδιαυλικής παρεμβολής



*Σειρές κυψελών που παρεμβάλλουν στην κυψέλη 1*

# Λόγος σήματος προς παρεμβολή

- Αν  $S$  (Signal) η ισχύς του λαμβανόμενου επιθυμητού σήματος και  $I$  (co-channel Interference) η ισχύς του σήματος ομοδιαυλικής παρεμβολής ομοδιαυλική παρεμβολή, τότε ο λόγος σήματος προς παρεμβολή ορίζεται ως εξής:  $\frac{S}{I}$  ή  $10\log_{10}\frac{S}{I}$  (σε dB)
- Ο λόγος  $\frac{S}{I}$  πρέπει να είναι μεγαλύτερος από κάποια τιμή  $T$ . Στόχος στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας είναι ο λόγος αυτός να υπερβαίνει τα  $T$  dB για το 90% της περιοχής (γεωγραφικής ή/και πληθυσμιακής) που καλύπτει το σύστημα. Για παράδειγμα στο σύστημα GSM  $\frac{S}{I} > 9$  dB
- Ο αριθμός  $T$  dB βασίζεται στο γεγονός ότι, για τέτοιο λόγο σήματος προς παρεμβολή, σημαντικό πλήθος χρηστών θεωρούν ικανοποιητική την ποιότητα υπηρεσίας (φωνής).



# Ομοδιαυλική παρεμβολή (2 διαστάσεις)

- Υποθέτουμε ότι  $S/I$  στο UPLINK είναι ίδιο με το  $S/I$  του DOWNLINK (ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ)
- Αγνοώντας άλλες πηγές θορύβου και τις παρεμβολές της 2<sup>ης</sup> σειράς κυψελών ισχύει:

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{k=1}^6 D_k^{-n}}, \text{ γιατί } L_d = L_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^n$$

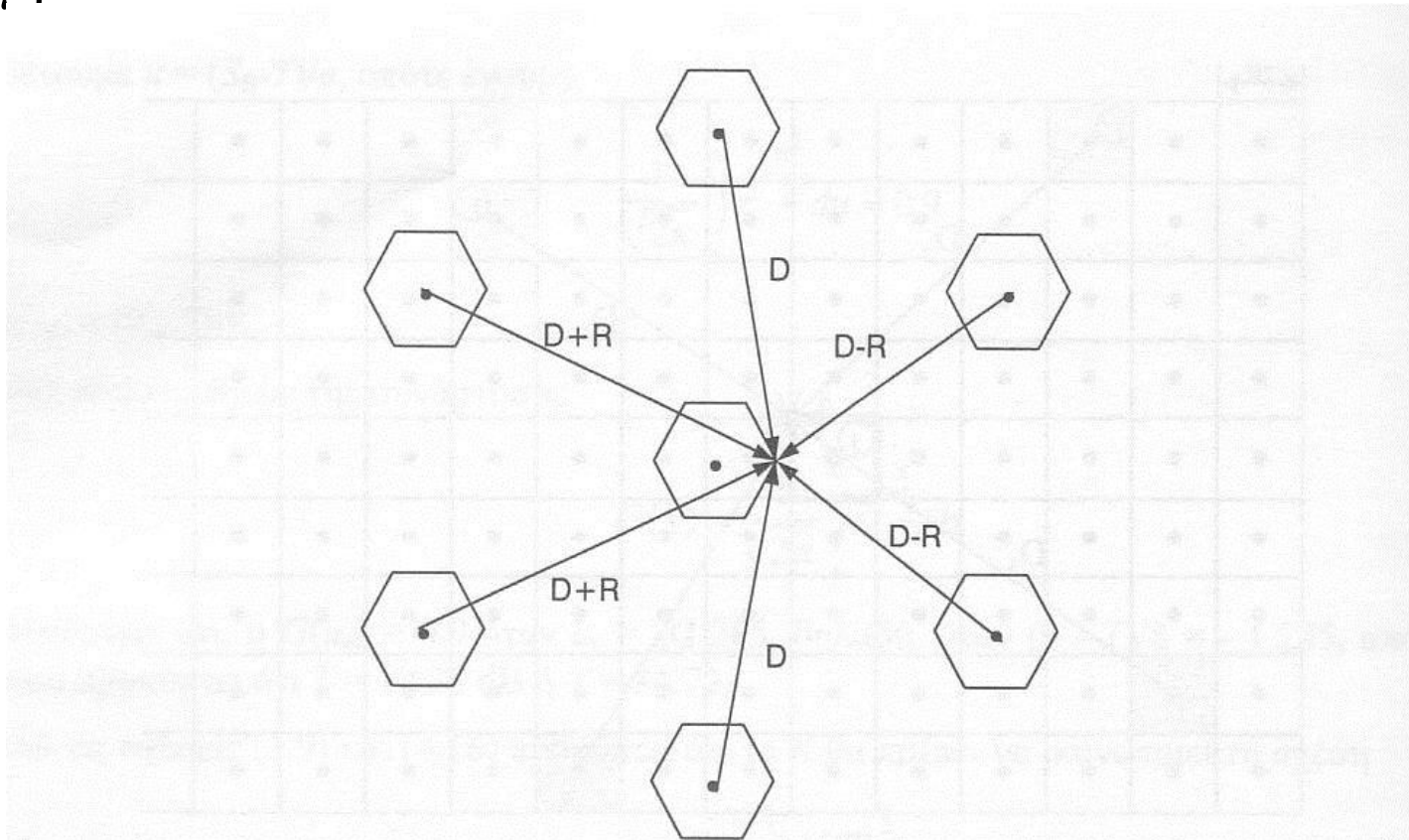
$$\text{επειδή όμως } D \cong D_k \text{ και } a = \frac{D}{R} \Rightarrow \frac{S}{I} = \frac{1}{6a^{-n}} \Rightarrow a = \left( 6 \frac{S}{I} \right)^{\frac{1}{n}}$$

όπου  $a$ : cochannel reuse ratio

$\frac{S}{I}$  προσδιορίζεται με βάση τις απαιτήσεις του συστήματος  
 $n$  καθορίζεται από τις συνθήκες διάδοσης (περιβάλλον)

# Δυσμενέστερη περίπτωση

- Το κινητό τερματικό βρίσκεται στο όριο της κυψέλης, όπου λαμβάνει το ασθενέστερο σήμα από τον ΣΒ της κυψέλης του, αλλά δέχεται ισχυρές παρεμβολές από τις κυψέλες της πρώτης σειράς που παρεμβάλλουν



*Δυσμενέστερη περίπτωση για τον λόγο  $S/I$  στην ομοδιαυλική παρεμβολή*

# Δυσμενέστερη περίπτωση

- Από τα προηγούμενα ισχύει  $\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{k=1}^6 D_k^{-n}}$

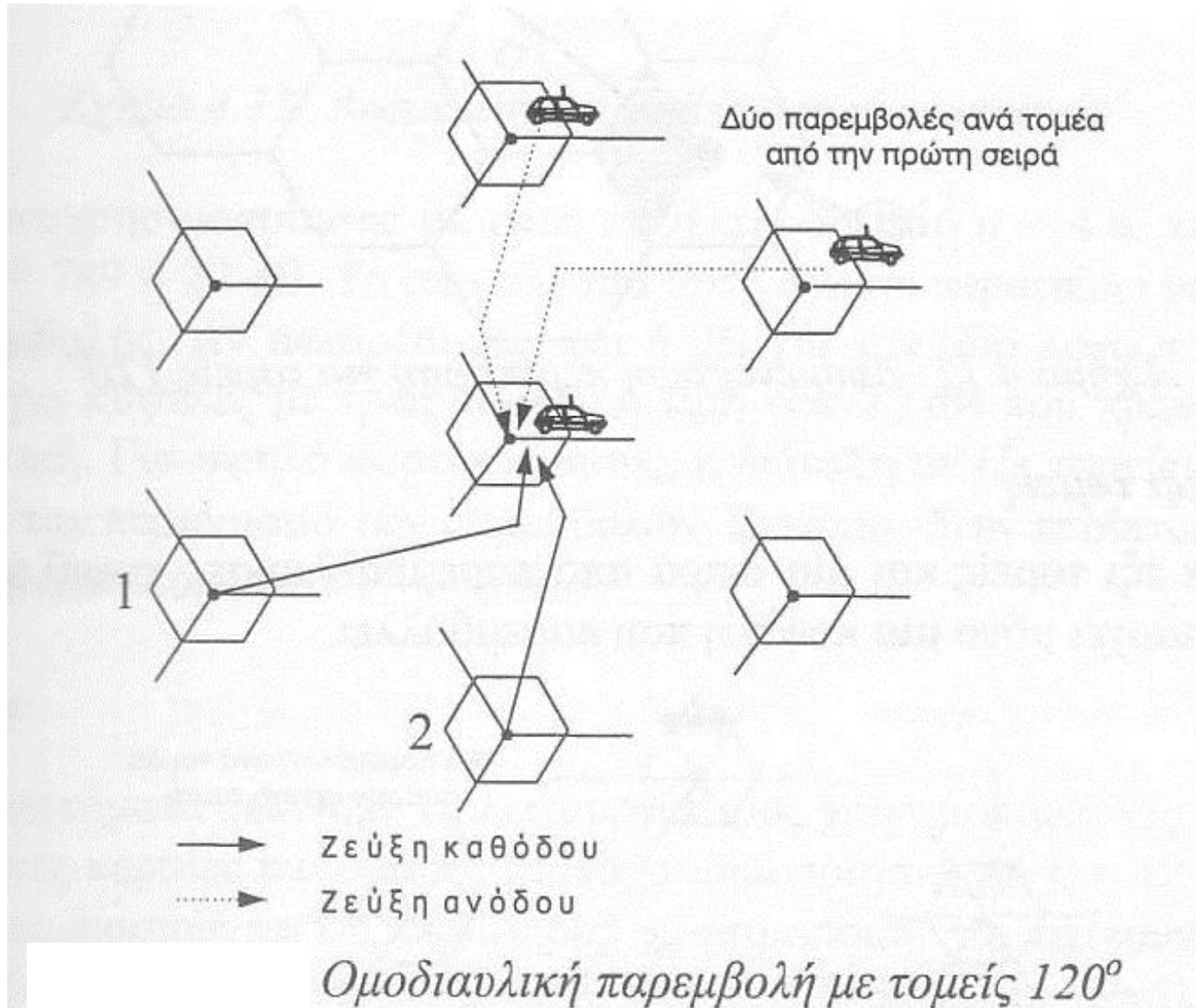
επειδή όμως τώρα  $D \neq D_k$

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{2(D-R)^{-n} + 2D^{-n} + 2(D+R)^{-n}}$$

Άρα στην περίπτωση αυτή τελικά:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{2(a-1)^{-n} + 2a^{-n} + 2(a+1)^{-n}}$$

# Τομείς 120°

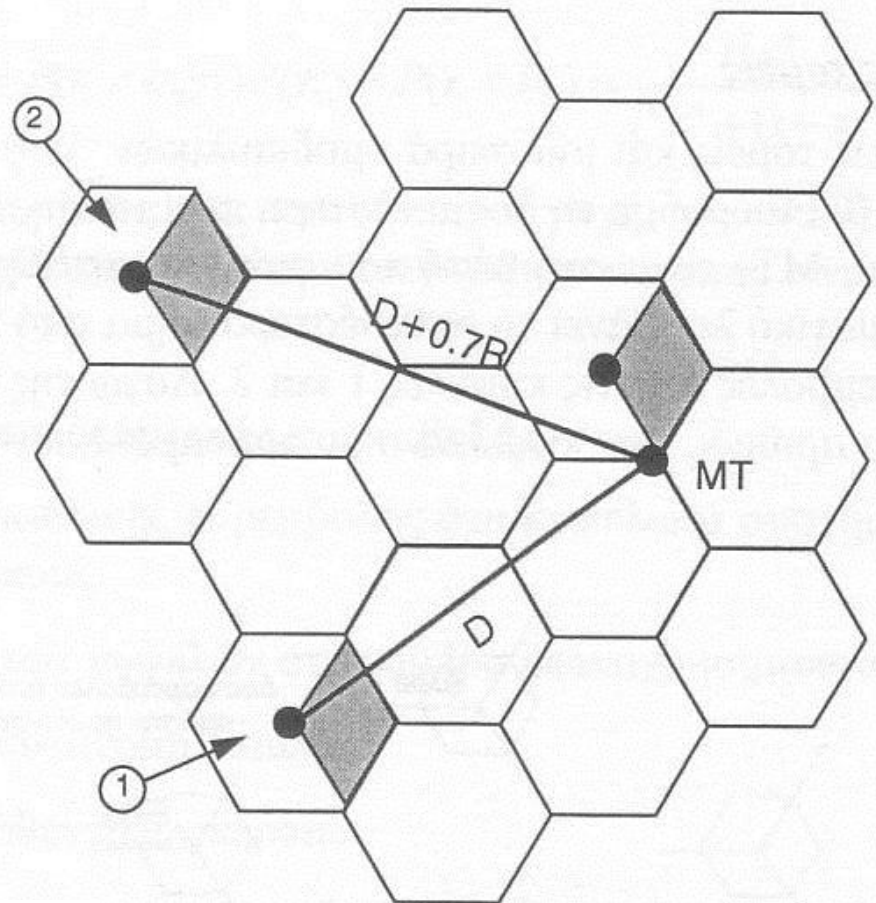


# Τομείς 120° - δυσμενέστερη περίπτωση

- Στην περίπτωση αυτή το κινητό τερματικό δέχεται παρεμβολή μόνο από δυο κεραίες

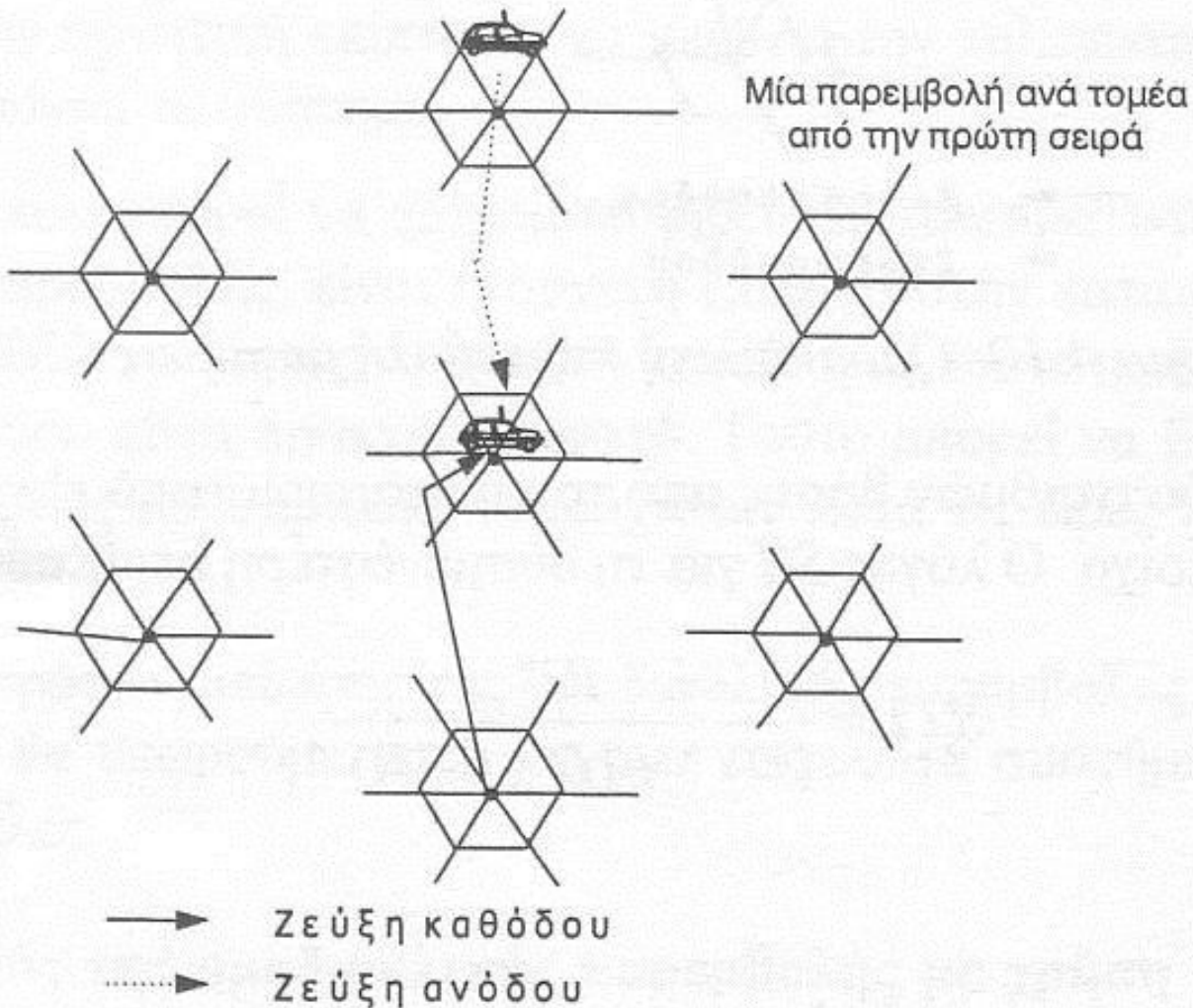
$$\frac{S}{I} \Rightarrow \frac{R^{-n}}{D^{-n} + (D+0.7R)^{-n}}$$

$\Rightarrow$



*Δυσμενέστερη περίπτωση για τομείς 120°*

# Τομείς 60°

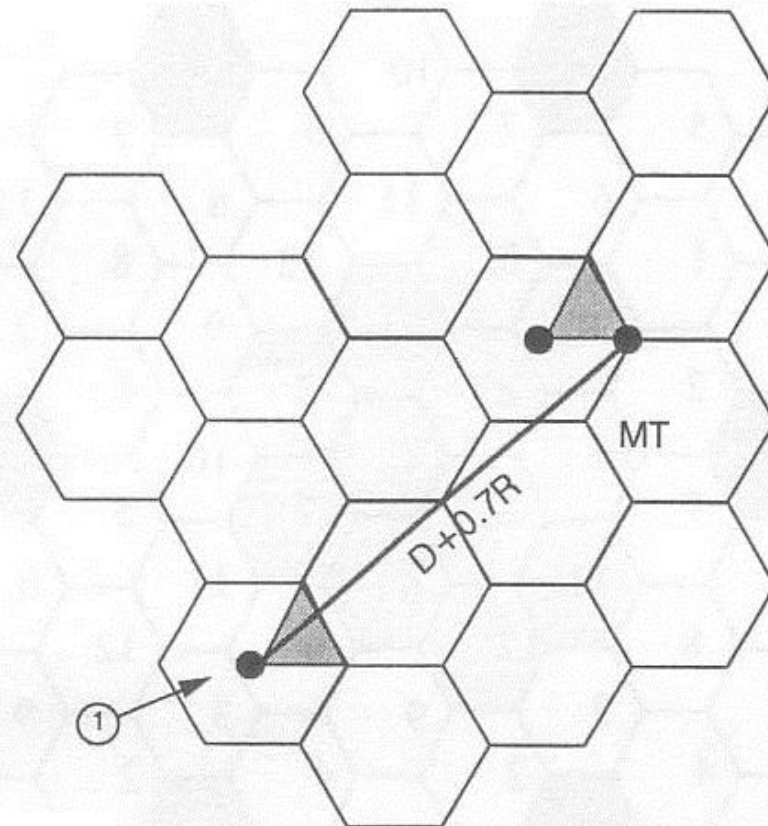


*Ομοδιαυλική παρεμβολή με τομείς 60°*

# Τομείς 60° - δυσμενέστερη περίπτωση

- Αν η κάθε κεραία διαθέτει 6 τομείς των 60° τότε το κινητό θα δεχόταν παρεμβολή από μία μόνο κεραία

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{(D+0.7R)^{-n}}$$



Δυσμενέστερη περίπτωση για τομείς 60°

# Καθορισμός μεγέθους cluster

$$a = \frac{D}{R} = \sqrt{3k} \qquad \frac{D}{R} = \left(6 \frac{S}{I}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\Rightarrow k = \frac{1}{3} \left(6 \frac{S}{I}\right)^{\frac{2}{n}}$$

- $k$ : μέγεθος cluster κυψελών με ξένες μεταξύ τους συχνότητες
- $S/I$ : εξαρτάται από τις προδιαγραφές του συστήματος
- $n$ : εξαρτάται από τη μορφολογία του περιβάλλοντος



# Παρεμβολές γειτονικών διαύλων

- Όπως είδαμε προηγουμένως για την ελαχιστοποίηση της ομοδιαυλικής παρεμβολής, οι δίαυλοι μιας κυψέλης επαναχρησιμοποιούνται σε άλλες κυψέλες που απέχουν επαρκώς
- Κατά παρόμοιο τρόπο, για να αποφευχθεί παρεμβολή μεταξύ γειτονικών διαύλων, δεν κατανέμονται στην ίδια κυψέλη δίαυλοι που είναι γειτονικοί στο φάσμα συχνοτήτων
- Ωστόσο παρεμβολή γειτονικών διαύλων υπάρχει ακόμη και αν οι παρεμβάλλοντες δίαυλοι δεν είναι γειτονικοί στο φάσμα, γιατί για πρακτικούς λόγους οι ραδιοδίαυλοι δεν έχουν αυστηρά περιορισμένο εύρος ζώνης
- Τα χαρακτηριστικά των φίλτρων στον δέκτη μπορούν να βοηθήσουν στον περιορισμό αυτής της παρεμβολής

# Εξασθένηση επίδρασης γειτονικών διαύλων

- Υποθέστε ότι το φίλτρο στην είσοδο του δέκτη έχει κλίση  $K$  dB/οκτάβα, και ότι το εύρος ζώνης κάθε ραδιοδιαύλου είναι  $W$  kHz. Η συχνότητα στην άκρη του διαύλου απέχει  $W/2$  kHz από τη συχνότητα του φέροντος
- Αρχίζοντας από την άκρη του διαύλου μπορούμε να έχουμε εξασθένηση  $K$  dB/οκτάβα και να τηρήσουμε την κλίση αυτή σε όλη την περιοχή συχνοτήτων
- Αν  $f_1$  είναι η ακραία επιθυμητή συχνότητα του διαύλου και  $f_2$  είναι η συχνότητα που παρεμβάλλει, τότε η εξασθένηση  $A_s$  της  $f_2$  λόγω απόστασής της από την  $f_1$

θα είναι:

$$A_s = K \log_2 \left( \frac{f_2}{f_1} \right) \approx \frac{K}{0.3} \log_{10} \left( \frac{f_2}{f_1} \right) (dB)$$

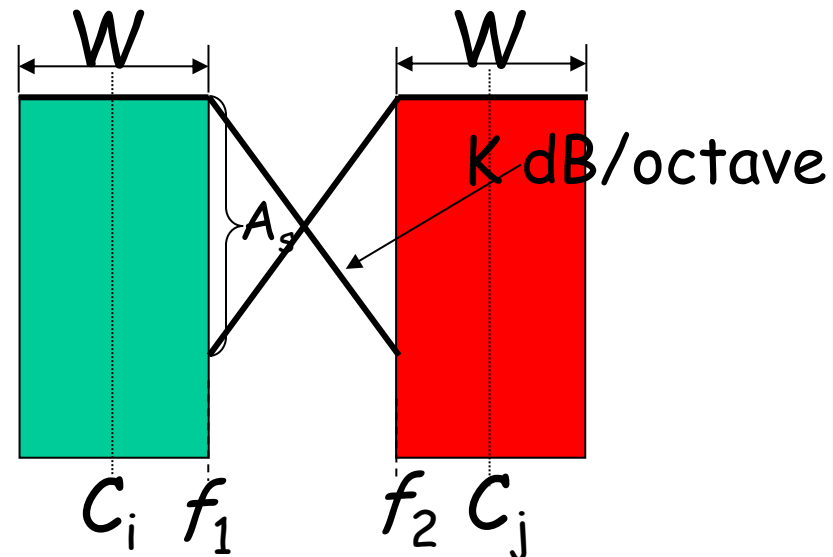
Παράδειγμα:

Για  $W = 200$  KHz,  $K=10$ dB/octave,

$$f_1 = W/2 = 100 \text{ KHz}, f_2 = 400 \text{ KHz}$$

Υπολογίζεται ότι:

$$A_s = 20\text{dB}$$



# Εξασθένηση λόγω απόστασης

- Ταυτόχρονα με την εξασθένηση λόγω απόστασης των συχνοτήτων στο φάσμα υπάρχει και η εξασθένηση λόγω της απόστασης στον χώρο. Η εξασθένηση διαδρομής  $A_d$  σε (dB) λόγω της διαφοράς απόστασης στο χώρο είναι:

$$A_d = 10 \log_{10} \left( \frac{d_2^{-n}}{d_1^{-n}} \right) = \dots = 10n \log_{10} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)$$

όπου  $d_1$  και  $d_2$  οι αποστάσεις των κινητών από τον ΣΒ, με  $d_1 > d_2$  και  $n$  προσδιορίζεται από περιβάλλον διάδοσης

- Για  $A_d = A_s$  λαμβάνουμε:

$$\left( \frac{d_1}{d_2} \right)^n = \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^{\frac{K}{3}} \quad \text{ή} \quad f_2 = f_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{3n}{K}}$$

- Μόλις βρεθεί η συχνότητα  $f_2$ , η απόσταση των διαύλων για κινητά που είναι σε απόσταση  $d_1$  και  $d_2$  από το ΣΒ, βρίσκεται από τη σχέση

$$\text{Απόσταση διαύλων} = \frac{|f_2 - f_1|}{W}$$

# Κατανομή συχνοτήτων στο cluster

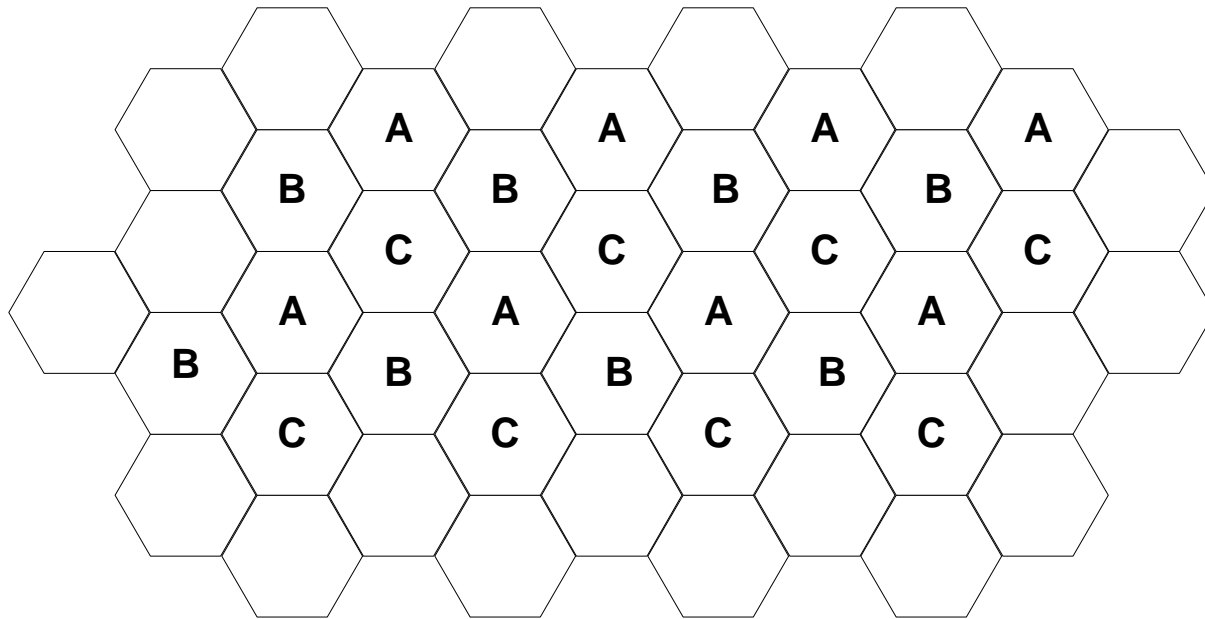
- Αν  $C$ : είναι το πλήθος των διαθέσιμων συχνοτήτων και  
 $N$ : είναι το πλήθος των κυψελών σε κάθε cluster

$$\Rightarrow S = \frac{C}{N} : \text{πλήθος συχνοτήτων σε κάθε κυψέλη}$$

- $S \rightarrow$  Ομοιόμορφη κατανομή συχνοτήτων στο επίπεδο, προϋποθέτει ομοιόμορφη κατανομή της ζήτησης (πληθυσμού)

# Κατανομή συχνοτήτων

- Π.χ.: για  $i = j = 1$  προκύπτει  $N = 3$ . Έχουμε δηλ. τρία διαφορετικά σύνολα συχνοτήτων, όπου το καθένα μπορεί να έχει συχνότητες  $n, n+N, n+2N, \dots$



- Π.χ για 30 συχνότητες το πλάνο συχνοτήτων μπορεί να είναι :  
 $A = \{1, 4, 7, 10, \dots, 28\}$   $B = \{2, 5, 8, 11, \dots, 29\}$   $C = \{3, 6, 9, 12, \dots, 30\}$