

Σύγχρονα Δίκτυα και Διασύνδεση ΔτΠ

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

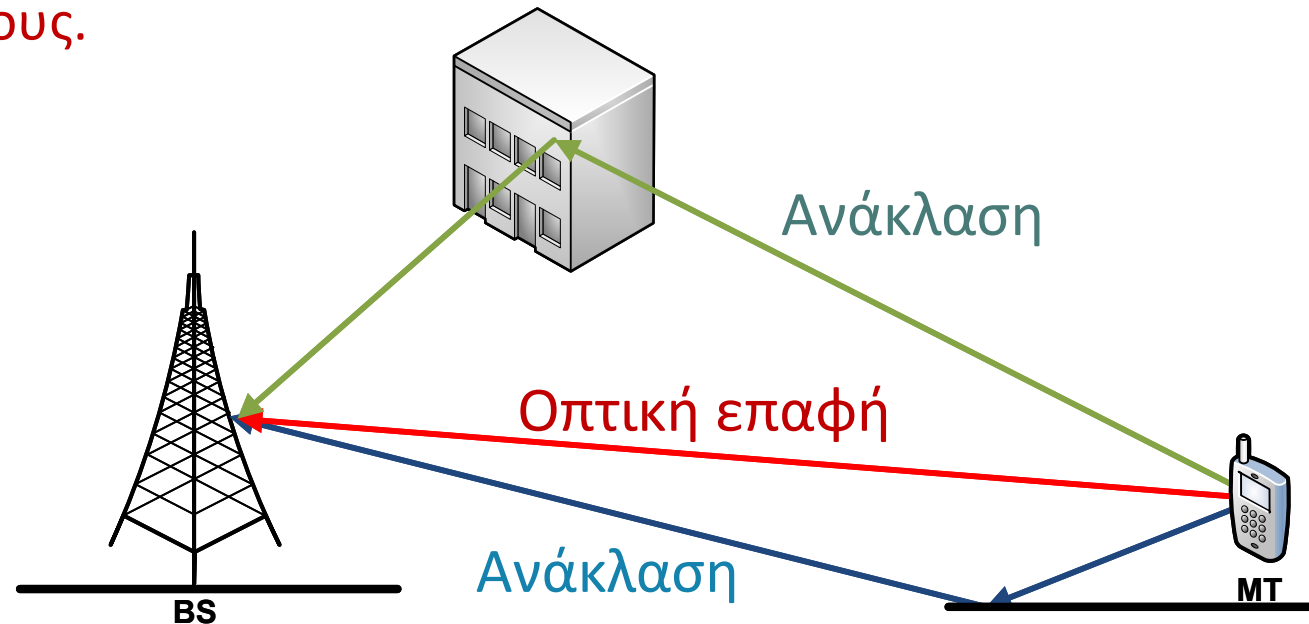
Μετάδοση στο ασύρματο περιβάλλον

Ραδιοδίαιυλοι

- Προκειμένου να έχουμε αξιόπιστη και υψηλού ρυθμού μετάδοσης επικοινωνία είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του ραδιοδιαύλου.
- Σημαντικότερα προβλήματα στην διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος είναι:
 - Φυσικά ή τεχνητά εμπόδια.
 - Πολυδιαδρομική (multipath) μετάδοση.
 - Θόρυβος και παρεμβολές.
- Επιπλέον, κυρίως εξαιτίας της κίνησης του τερματικού, τα φαινόμενα αυτά μεταβάλλονται χρονικά με απρόβλεπτο τρόπο.

Ραδιοδίαιλοι

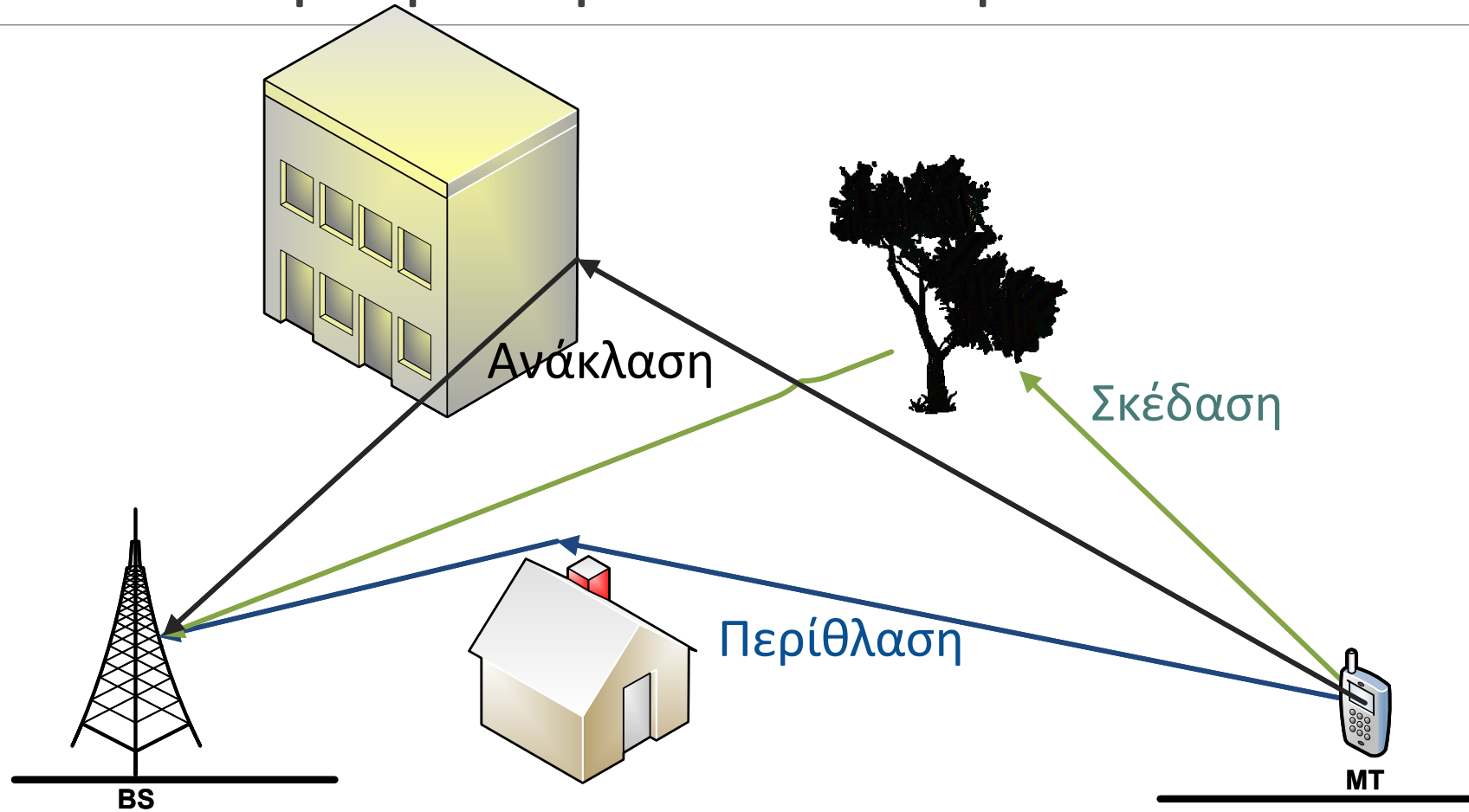
- Το ραδιοσήμα φτάνει στον δέκτη ακολουθώντας **διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης**.
- Ως αποτέλεσμα τα ραδιοκύματα φτάνουν στον δέκτη από **διαφορετική κατεύθυνση** και με **διαφορετική χρονική καθυστέρηση**. Το τελικό λαμβανόμενο σήμα είναι το **άθροισμα τους**.



Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης

- Οι μηχανισμοί διάδοσης, εκτός της απευθείας LOS διάδοσης, είναι:
- **Ανάκλαση (Reflection)**
 - Συμβαίνει όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε εμπόδιο με λεία επιφάνεια και **πολύ μεγάλου μεγέθους σε σχέση με το μήκος κύματός** του σήματος.
- **Περίθλαση ή διάθλαση (Diffraction)**
 - Συμβαίνει μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμβάλλεται **εμπόδιο μεγάλου μεγέθους σε σχέση με το μήκος κύματός** του σήματος και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών σημάτων πίσω από το εμπόδιο.
 - Ερμηνεύει την **χωρίς οπτική επαφή** επικοινωνία πομπού και δέκτη

Πολυδιαδρομική Διάδοση



Μηχανισμοί Ραδιοδιάδοσης

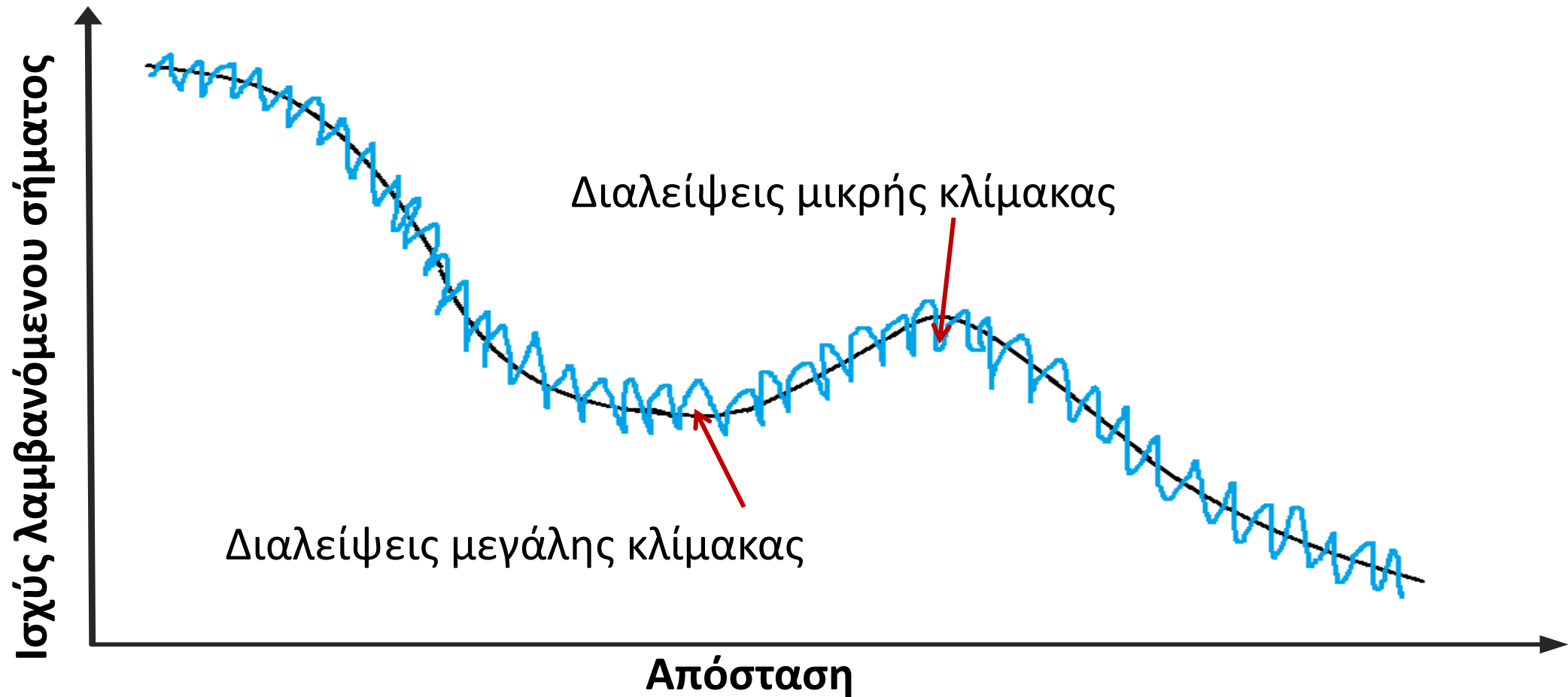
- **Σκέδαση ή διάχυση (Scattering)**

- Συμβαίνει όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε εμπόδιο με τραχιά επιφάνεια ή σε εμπόδιο με **μέγεθος συγκρίσιμο ή μικρότερο από το μήκος κύματός του** σήματος.
- Έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια να διασκορπίζεται σε πολλές κατευθύνσεις.
- Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε πολλαπλά αντίγραφα του σήματος στον δέκτη **με φάση, πλάτος και χρόνο άφιξης μετατοπισμένα** σε σχέση με την απευθείας συνιστώσα του σήματος.

Επίδραση του Ραδιοδιαύλου

- Καθώς **ο χρήστης κινείται** μεταβάλλεται ο τρόπος με τον οποίο οι μηχανισμοί διάδοσης επιδρούν στο λαμβανόμενο σήμα.
- Επιπλέον είναι δυνατόν **να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος** εξαιτίας της κίνησης των σκεδαστών οι οποίοι συμμετέχουν στην διάδοση του σήματος (π.χ. αυτοκίνητα).
- Το αποτέλεσμα είναι ο ραδιοδιάυλος να αποκτά τα χαρακτηριστικά ενός **τυχαία χρονικά μεταβαλλόμενου φίλτρου** το οποίο **μειώνει την αξιοπιστία της μετάδοσης**.

Επίδραση του Ραδιοδιαύλου



Είδη διαλείψεων

- Η στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύ συναρτήσει της απόστασης χαρακτηρίζεται από:
 - Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading)
 - Οφείλονται σε: **α) απώλειες διάδοσης** οι οποίες αυξάνονται με την απόσταση και **β) Σκίαση (shadowing)**: τυχαία μεταβολή της εξασθένησης για δεδομένη απόσταση (συχνά μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας **lognormal κατανομή**).
 - Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading) για μετατοπίσεις του κινητού της τάξης του **$\lambda/2$** .
 - Οφείλονται σε: **α) πολυδιαδρομική διάδοση** και **β) χρονική μεταβολή του διαύλου** λόγω μετατόπισης του δέκτη και των σκεδαστών που συμμετέχουν στην διάδοση.

Επίδραση του Ραδιοδιαύλου

- Εκτός από το ωφέλιμο σήμα στο δέκτη θα πρέπει να συμπεριλάβουμε επίσης την ύπαρξη:
 - Λευκού Προσθετικού Θορύβου Gauss (Additive White Gaussian Noise - AWGN), ο οποίος έχει σταθερή φασματική πυκνότητα και κανονική (normal ή αλλιώς Gaussian) κατανομή πλάτους.
 - Την παρουσία παρεμβολών από χρήστες του ίδιου ή άλλου συστήματος.
- Ακόμα υπάρχουν απώλειες διάδοσης (Path Loss) οι οποίες μειώνουν την μέση ισχύ του λαμβανόμενου σήματος και οι οποίες εξαρτώνται από την απόσταση πομπού – δέκτη και το είδος των χρησιμοποιούμενων κεραιών.

Σχετική στάθμη ισχύος

- Χρησιμοποιώντας την παρακάτω λογαριθμική σχέση μπορούμε να εκφράσουμε σε **decibel (dB)** την αναλογία της ισχύος P ως προς μια συγκεκριμένη στάθμη αναφοράς P_{ref} :

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 10 \log_{10} P - 10 \log_{10} P_{ref}$$

- Αν $P_{ref}=1\text{mW}$ τότε η παραπάνω σχέση μας δίνει **dBm** $P_{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P}{1\text{mW}}$
- Αν $P_{ref}=1\text{W}$ τότε η παραπάνω σχέση μας δίνει **dBW** $P_{dBW} = 10 \log_{10} \frac{P}{1\text{W}}$

Απώλειες Διάδοσης στον Ελεύθερο Χώρο

- Η μέση ισχύς P_r που λαμβάνεται στον δέκτη δίνεται από την σχέση:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{c/f}{4\pi d} \right)^2$$

- P_t είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, G_t και G_r τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα και d η απόσταση πομπού -δέκτη.
- Όταν χρησιμοποιούνται ιστροπικές κεραιές τα αντίστοιχα κέρδη G_t και G_r είναι μοναδιαία και η προηγούμενη σχέση γίνεται :

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_t \left(\frac{c/f}{4\pi d} \right)^2$$

Απώλειες Διάδοσης στον Ελεύθερο Χώρο

- Ονομάζουμε **απώλειες διάδοσης** (**propagation loss**) ή **απώλειες διαδρομής** (**path loss**) τον λόγο της ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία του πομπού προς την ισχύ που λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη.
- Όταν το σύστημα λειτουργεί στον ελεύθερο χώρο οι απώλειες διάδοσης L_f για ισοτροπικές κεραίες δίνονται από την σχέση:

$$L_f = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right)^2$$

- Η οποία σε dB είναι:

$$L_f [dB] = 2 * 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 2 * 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right)$$

Απώλειες Διάδοσης στον Ελεύθερο Χώρο

- Η προηγούμενη σχέση δείχνει ότι οι **απώλειες διάδοσης** είναι **ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης d** πομπού - δέκτη.
- Οι **απώλειες διάδοσης** είναι επίσης **αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου του μήκους κύματος λ** ή **ισοδύναμα ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας εκπομπής f** .
- Οι **απώλειες διάδοσης** μπορούν να αντισταθμιστούν με **χρήση κατευθυντικών κεραιών με κέρδος εκπομπής και λήψης μεγαλύτερο από μονάδα**.
- Το κέρδος στην κεραία του δέκτη εξαρτάται από την **ενεργή επιφάνεια** της A_r . Η ενεργή επιφάνεια με την σειρά της εξαρτάται **από τις φυσικές διαστάσεις της κεραίας καθώς και από το σχήμα** της. Ισχύει η σχέση:

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

Απώλειες διάδοσης μη-οπτικής επαφής

- Βάσει εμπειρικών δεδομένων για τις απώλειες διάδοσης N-LOS ισχύει:

$$L(d) = L(d_0) + 10 \cdot \log_{10} (d/d_0)^n$$

- d : Απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.
- d_0 : Απόσταση αναφοράς ή απόσταση μέχρι την οποία έχω διάδοση LOS.

$$L(d_0)[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

- Τυπικές τιμές: **1Km** (μακροκυψέλες), **100m** (μικροκυψέλες), **1m** (πικοκυψέλες).
- n : Συντελεστής απωλειών διάδοσης ή συντελεστής εξασθένησης.
 - Τυπικές τιμές: $2 \leq n \leq 4$, (μακροκυψέλες–αστικές περιοχές), $1,6 \leq n \leq 8$ (μικροκυψέλες).

Ζώνες Συχνοτήτων

- Η συχνότητα εκπομπής είναι ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τον τρόπο μετάδοσης των ραδιοσημάτων.
- Για τις κινητές επικοινωνίες έχουν επιλεγεί οι ζώνες **Very High Frequency - VHF** (30 MHz – 300 MHz) και **Ultra High Frequency - UHF** (300 MHz – 3GHz).
- Στις ζώνες αυτές τα σήματα δεν ανακλώνται στην ιονόσφαιρα αλλά την διαπερνούν προς το διάστημα.
- Επιτρέπουν την **χρήση κεραιών με μικρές φυσικές διαστάσεις** και μικρότερο κόστος ενώ
- έχουν και **περιορισμένη έκταση διάδοσης** η οποία είναι επιθυμητή για την δημιουργία κελιών.

Ζώνες Συχνοτήτων

- Το **GSM-900** χρησιμοποιεί την ζώνη **890-915 MHz** για την σύνδεση από το κινητό προς τον σταθμό βάσης (ανερχόμενη ζεύξη - uplink) και την ζώνη **935-960 MHz** για την κατερχόμενη ζεύξη (downlink).
- Το **GSM-1800** χρησιμοποιεί την ζώνη **1710-1785 MHz** για την σύνδεση από το κινητό προς τον σταθμό βάσης και την ζώνη **1805-1880 MHz** για την κατερχόμενη ζεύξη.
- Το **UMTS-FDD (3G)** και **LTE-FDD 2100** χρησιμοποιεί την ζώνη **1920-1980 MHz** για την **ανερχόμενη ζεύξη** και την ζώνη **2110-2170 MHz** για την **κατερχόμενη ζεύξη**.
- https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_frequency_bands

Ολίσθηση Doppler

- Ονομάζουμε **ολίσθηση Doppler** τη μεταβολή της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με το εκπεμπόμενο εξαιτίας της κίνησης του τερματικού από ή προς τον πομπό.
- Όταν το τερματικό κινείται προς τον πομπό το λαμβανόμενο σήμα **έχει συχνότητα υψηλότερη από το εκπεμπόμενο**, ενώ
- όταν το τερματικό απομακρύνεται από τον πομπό το λαμβανόμενο σήμα **έχει συχνότητα χαμηλότερη από το εκπεμπόμενο**.

Ολίσθηση Doppler

- Έστω ένα κινητό τερματικό το οποίο σε χρόνο Δt μετακινείται μεταξύ των σημείων X και Y με ταχύτητα u ($d = u \cdot \Delta t$).

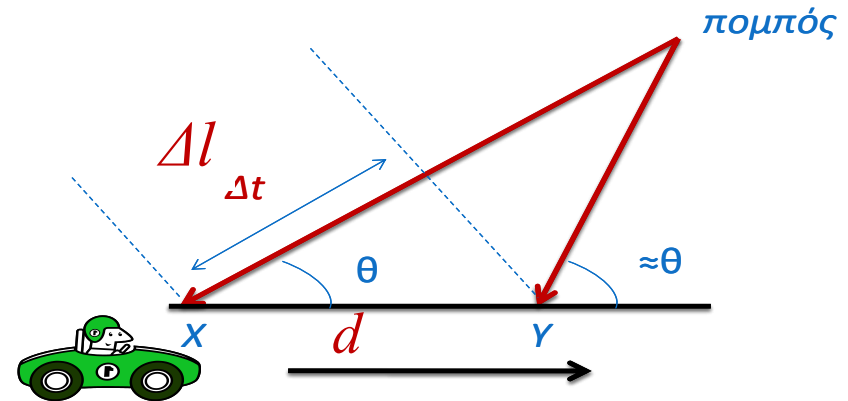
- Αν λ το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος η

ολίσθηση Doppler (μετατόπιση της συχνότητας) δίνεται από την σχέση:

$$f_D = \frac{u}{\lambda} \cos \theta$$

- Επομένως

- για $\theta = 0^\circ$ έχουμε την μέγιστη ολίσθηση Doppler $f_m = u/\lambda$, ενώ
- για $\theta = 90^\circ$ δεν υπάρχει ολίσθηση Doppler αφού έχουμε $f_D = 0$



Ολίσθηση Doppler

- Σε μεγάλες ταχύτητες έχουμε **μεγάλες ολισθήσεις Doppler** και έντονη αποσυσχέτιση της φάσης διαδοχικών συμβόλων (**διασυμβολική παρεμβολή**).
- Ως αποτέλεσμα ο **ρυθμός σφαλμάτων** (Bit Error Rate - BER) μπορεί να παραμένει υψηλός **ανεξάρτητα του λόγου σήματος προς θόρυβο** (Signal to Interference and Noise Ratio - SINR).
- *Αυτό το φαινόμενο θα επηρέαζε τον ρυθμό μετάδοσης ενός αισθητήρα τοποθετημένου σε κινούμενο όχημα (π.χ. **UAV**) που μεταδίδει πληροφορία (π.χ. **εικόνα πλοήγησης**) σε πραγματικό χρόνο.*

Ολίσθηση Doppler

- Ο **χρόνος συνοχής** C_T είναι μια στατιστική μέτρηση του χρονικού διαστήματος στο οποίο η **κρουστική απόκριση του διαύλου θεωρείται αμετάβλητη**.
- Ο χρόνος συνοχής είναι αντίστροφα ανάλογος προς την μέγιστη ολίσθηση Doppler ($f_m = v/\lambda$). Για τον προσδιορισμό του έχει προκύψει ο εξής **εμπειρικός νόμος**:

$$C_T = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = 0,423 \cdot \left(\frac{\lambda}{v}\right)$$

- *Δυο σήματα που φτάνουν στον δέκτη με καθυστέρηση μεταξύ τους μεγαλύτερη από C_T επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο από τον ραδιοδίαυλο.*

Παρεμβολές

Παρεμβολές (περίπτωση FDMA)

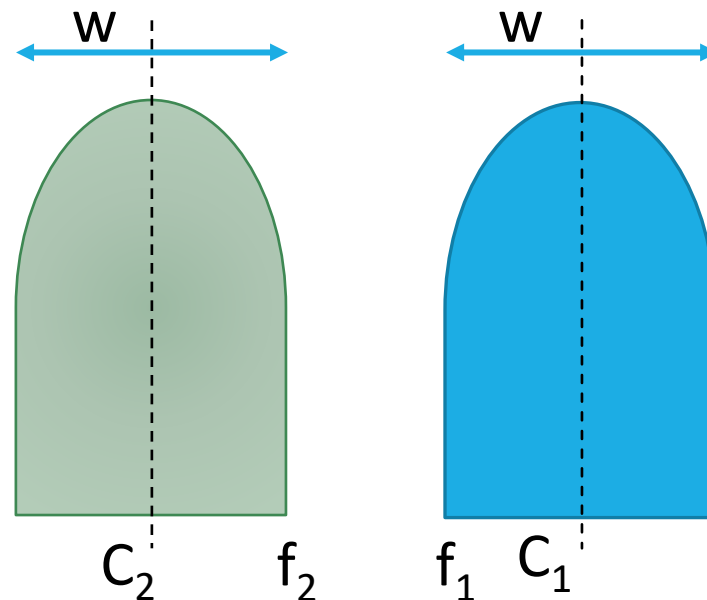
- Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται εκτός από την ισχύ εκπομπής και από την **παρουσία παρεμβολών**.
- Η ποιότητα της ζεύξης θεωρείται αποδεκτή όταν **ο μέσος λαμβανόμενος λόγος ισχύος φέροντος προς παρεμβολή** συν θόρυβο υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου ($SINR > T_h$).
- Όταν οι **παρεμβολές** προέρχονται **από γειτονικούς διαύλους** έχουμε μερική επικάλυψη της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού σήματος με ανεπιθύμητα σήματα.
- Για πρακτικούς λόγους οι ραδιοδιάυλοι δεν μπορούν να έχουν αυστηρά περιορισμένο εύρος ζώνης (**ατελή φίλτρα**).
- Έτσι διακρίνουμε **Παρεμβολή Γειτονικών Διαύλων εντός και εκτός ζώνης**.

Παρεμβολή Γειτονικών Διαύλων

- Οι παρεμβολές αυτού του είδους αντιμετωπίζονται
 - i. Με χρήση **ζωνών προστασίας (guard bands)** μεταξύ των ραδιοδιαύλων.
 - ii. Κατανέμοντας τους διαύλους στα κελιά με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν στο ίδιο κελί **διάυλοι οι οποίοι είναι γειτονικοί στο φάσμα συχνοτήτων**.
- Η **Παρεμβολή Γειτονικών Διαύλων εντός ζώνης** δεν μπορεί να φιλτραριστεί.
- Με βάση όμως τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα μπορούμε να υπολογίσουμε την απαιτούμενη απόσταση των διαύλων έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την **Παρεμβολή Γειτονικών Διαύλων**.

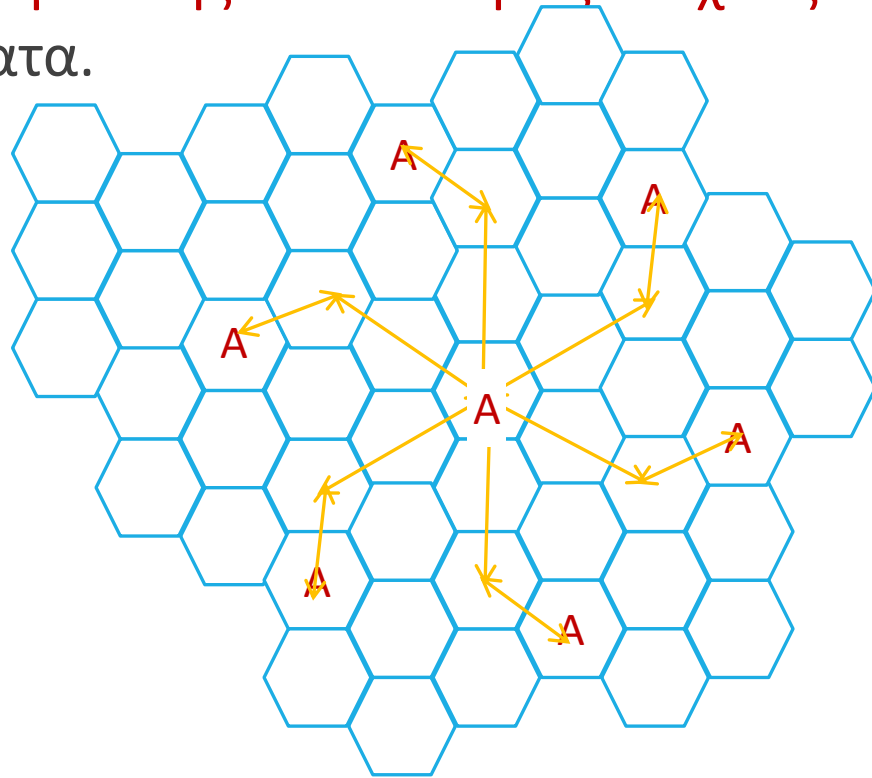
Παρεμβολή Γειτονικών Διαύλων

- Στην περίπτωση μας, θεωρούμε ότι η f_1 είναι η συχνότητα στην άκρη του διαύλου (η οποία απέχει $W/2$ kHz από την κεντρική συχνότητα του φέροντος) και η f_2 είναι η συχνότητα που ξεκινά ο επόμενος δίαυλος.



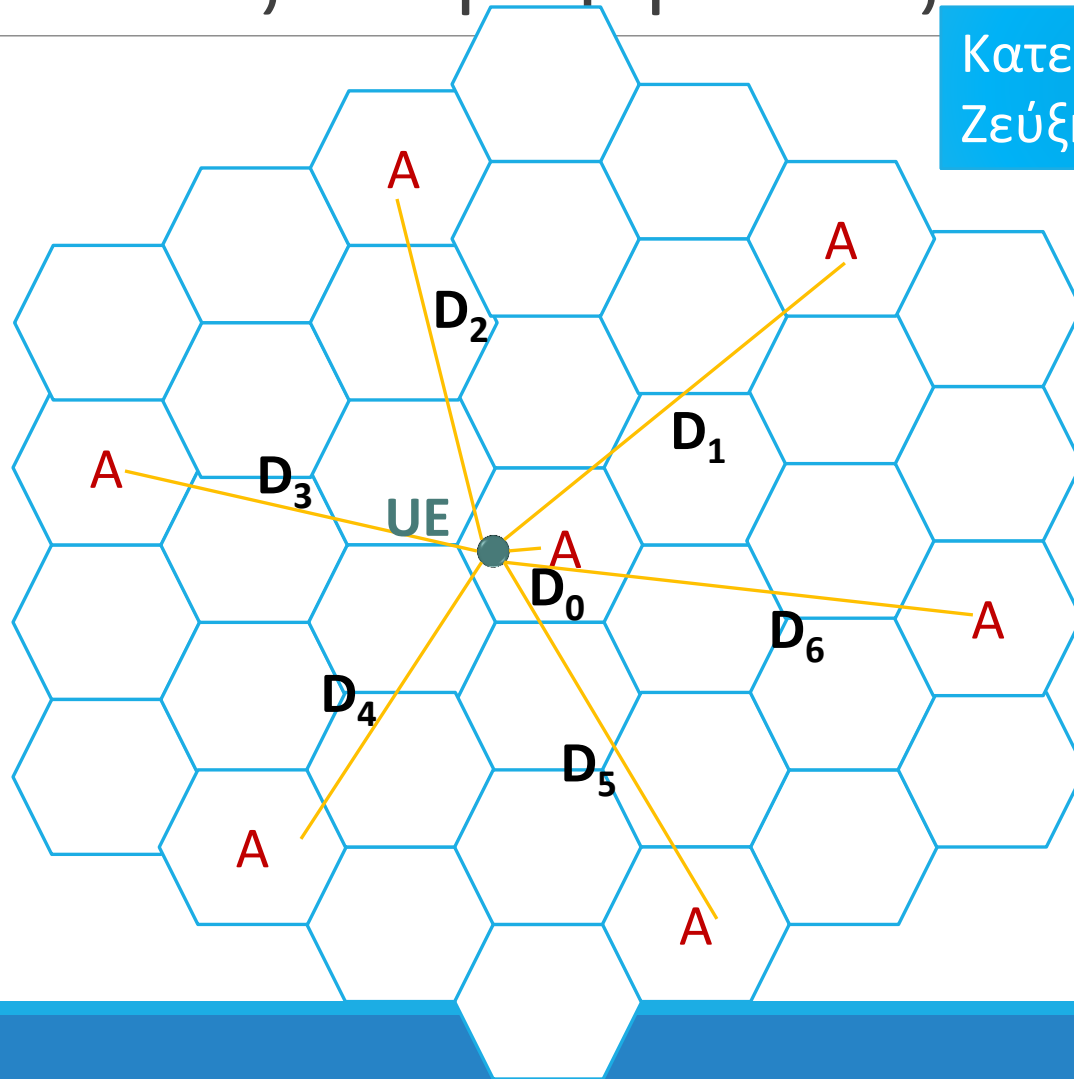
Ομοδιαυλικές Παρεμβολές

- Οι παρεμβολές ακόμα μπορεί να είναι ομοδιαυλικές οπότε έχω πλήρη ταύτιση της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού με τα ανεπιθύμητα σήματα.



Ομοδιαυλικές Παρεμβολές

Κατερχόμενη Ζεύξη

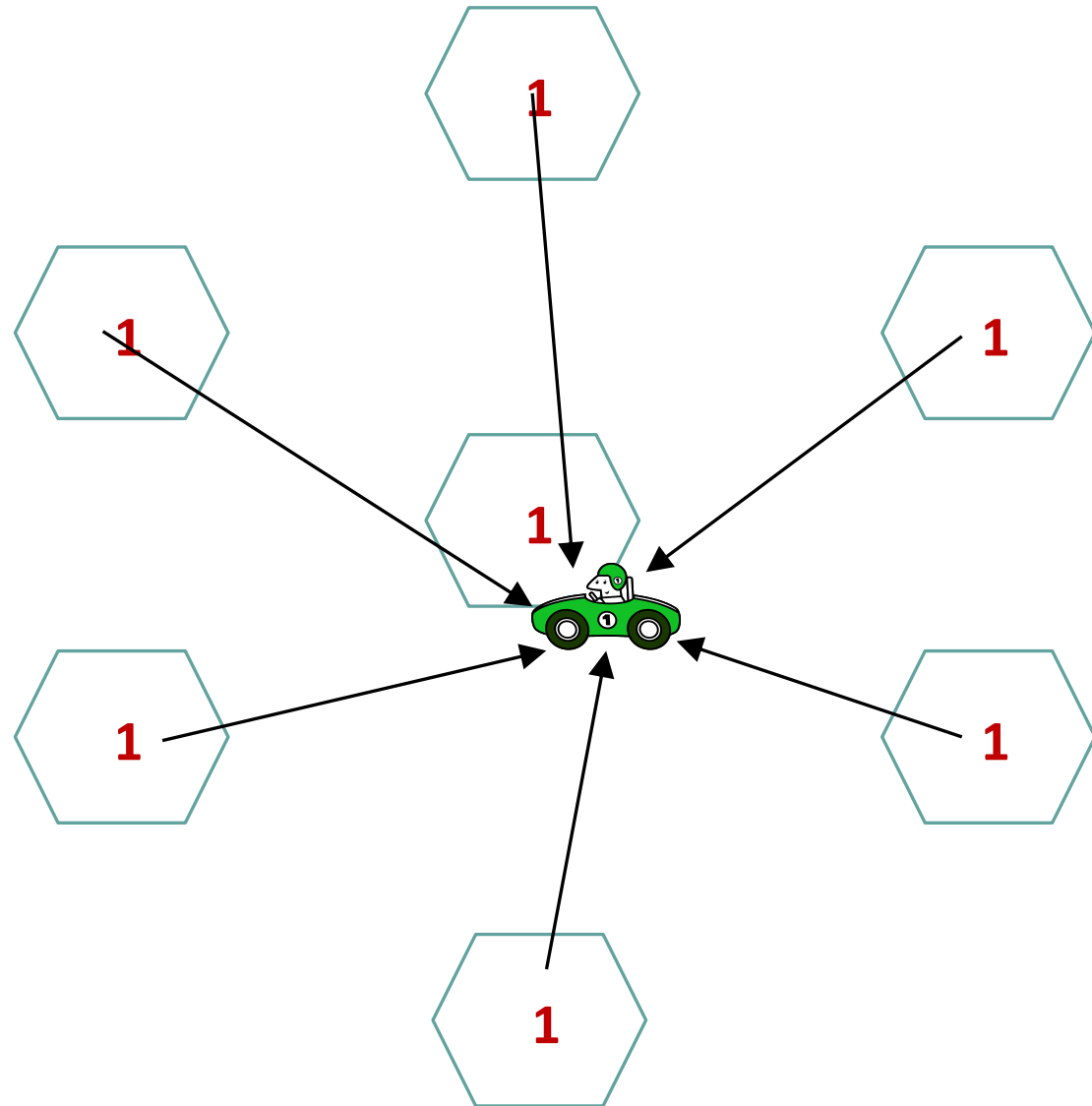


Ομοδιαυλικές Παρεμβολές

- Θεωρούμε την περίπτωση όπου το **κινητό τερματικό** βρίσκεται στα όρια του **κελιού** (δυσμενέστερη περίπτωση – worst case) :
- λαμβάνει επομένως **ασθενέστερο σήμα** από τον **σταθμό βάσης** που το εξυπηρετεί ενώ
- δέχεται ισχυρές παρεμβολές από τα **ομοδιαυλικά κελιά** πρώτης σειράς.

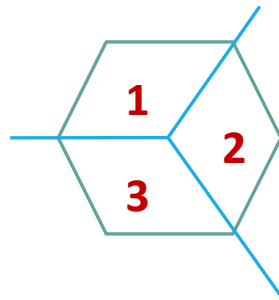
Ομοδιαυλικές Παρεμβολές

- Ισχυρές παρεμβολές από τα ομοδιαυτικά κελιά πρώτης σειράς

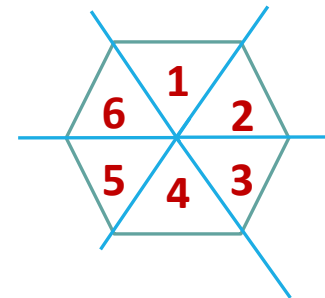


Τομεοποίηση Κελιών

- Μια συνηθισμένη μέθοδος για τον περιορισμό των ομοδιαυλικών παρεμβολών είναι η τομεοποίηση των κελιών.
- Χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες κάθε κελί χωρίζεται σε τομείς οι οποίοι είναι συνήθως 60° ή 120° μοιρών.



Τομεοποίηση 120°

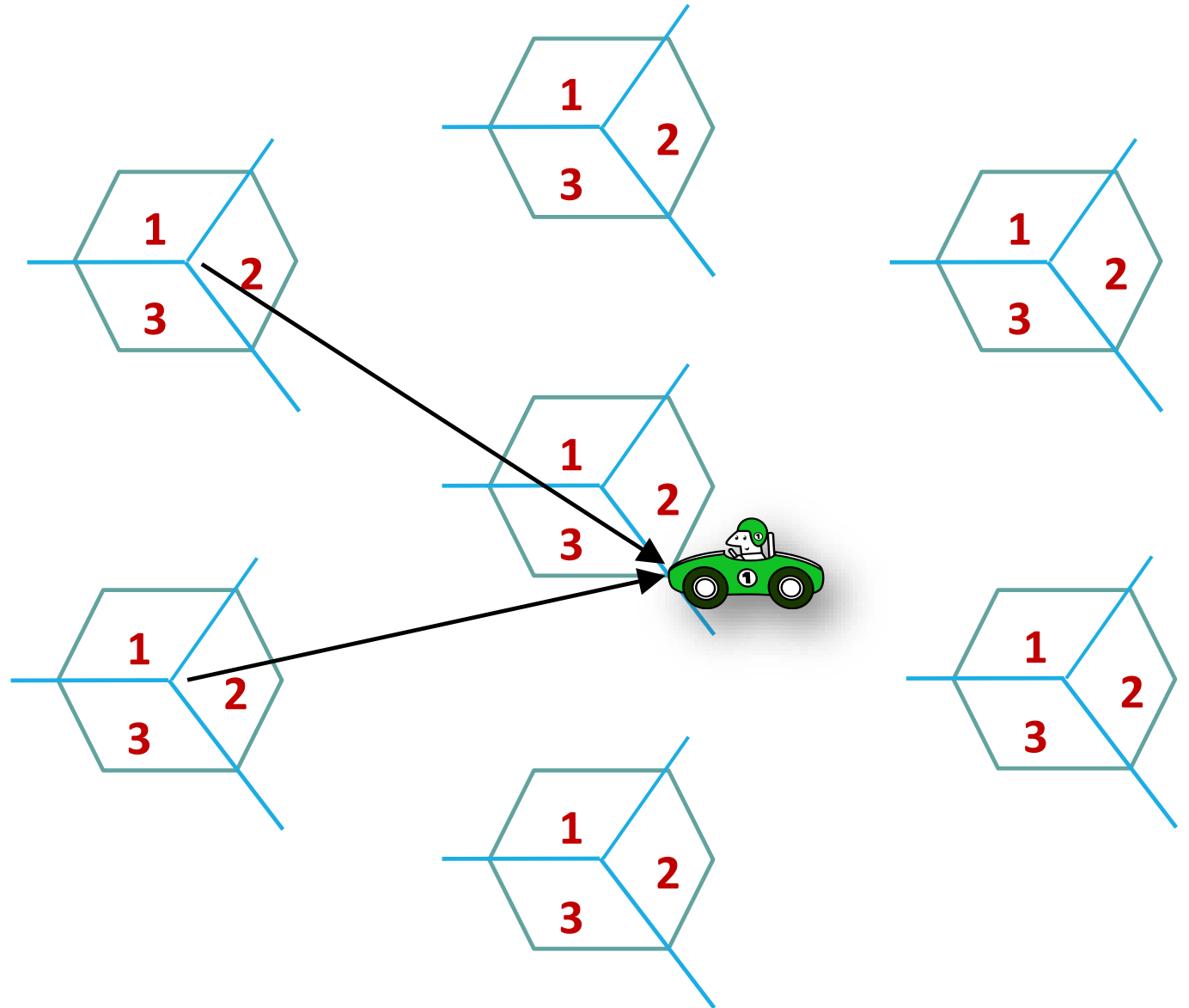


Τομεοποίηση 60°

- Οι συχνότητες που έχουν αποδοθεί στο κελί χωρίζονται σε ομάδες ανά τομέα.

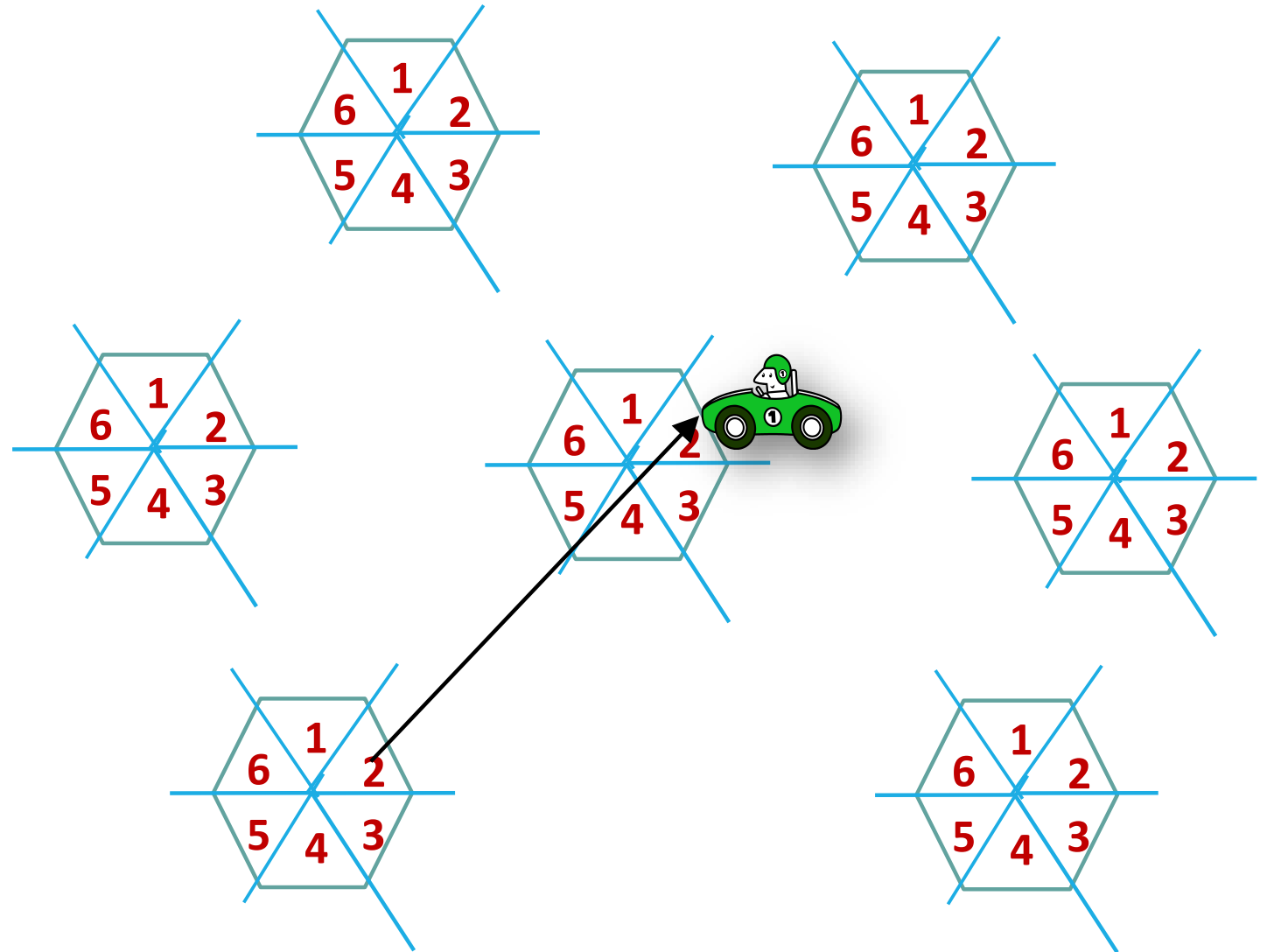
Τομεοποίηση 120ο

- Η κατευθυντικότητα των κεραιών περιορίζει τις παρεμβολές από 6 σε 2



Τομεοποίηση 60°

- Η κατευθυντικότητα των κεραιών περιορίζει τις παρεμβολές από 6 σε 1



Τομεοποίηση Κελιών

- Η **μείωση της παρεμβολής** που επιτυγχάνεται με τον χωρισμό των κυψελών σε τομείς οδηγεί σε **μείωση του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης** και σε **ταυτόχρονη αύξηση του SINR και επομένως της απόδοσης του συστήματος**.
- Μειονεκτήματα της χρήσης τομέων είναι:
 - Η **αύξηση του αριθμού των κεραιών** σε κάθε σταθμό βάσης
 - Η **μείωση της απόδοσης συγκέντρωσης** εξαιτίας της διάσπασης του συνολικού αριθμού των διαύλων σε μικρότερες ομάδες οι οποίες κατανέμονται στους τομείς.

Παρεμβολή Στενής Ζώνης

- Πέρα από τις παρεμβολές προέρχονται από γειτονικούς διαύλους και τις ομοδιαυλικές παρεμβολές μπορεί ακόμα να έχουμε **παρεμβολές από χρήστες άλλων συστημάτων (παρεμβολές στενής ζώνης)**.
- Οι παρεμβολές αυτές αντιμετωπίζονται με χρήση **κατάλληλων φίλτρων ή τεχνικών διασποράς φάσματος**.
- Τα φίλτρα είναι σχετικά απλά στην κατασκευή τους αλλά πρέπει να είναι γνωστή η θέση της παρεμβολής στο φάσμα του διαύλου.
- Οι τεχνικές διασποράς φάσματος είναι περισσότερο αποτελεσματικές και χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (**DS-CDMA**)