

ΕΕ725 - Ειδικά Θέματα Ψηφιακών  
Επικοινωνιών

Δημήτρης - Αλέξανδρος Τουμπακάρης

9ο Μάθημα – 4 Μαΐου 2009

## Περιεχόμενα σημερινού μαθήματος

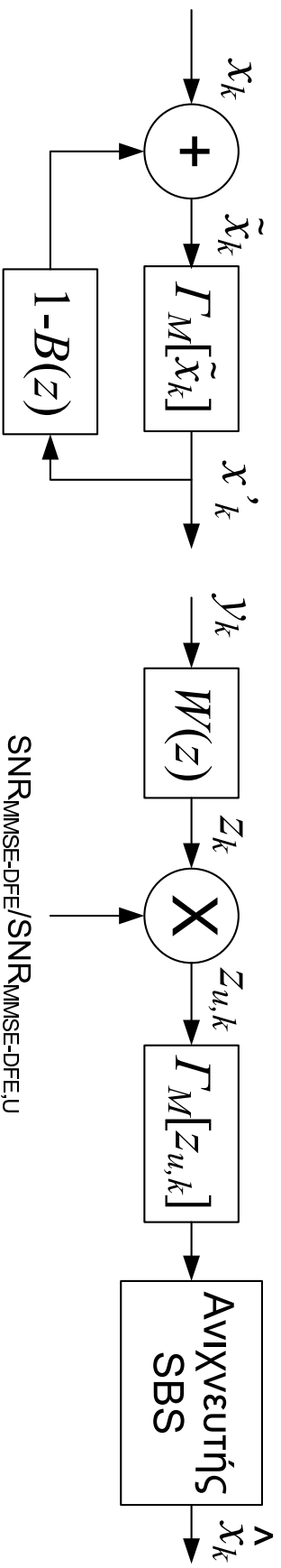
---

- Tomlinson-Harashima Precoder
  - Cioffi Ch. 3
- Το ασύρματο (wireless) κανάλι

## Ο προκωδικοποιητής (precoder) Tomlinson-Harashima

---

- Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί η διάδοση σφαλμάτων στο DFE είναι με χρήση προκωδικοποιητή Tomlinson-Harashima.
- Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο συνδυασμός πομπού και δέκτη του σχήματος έχει ίδια απόδοση με τον DFE, χωρίς να εμφανίζεται διάδοση σφάλματος. Ο  $\Gamma_M(\cdot)$  είναι ο τελεστής υπολοίτου (modulo operator).  $\Gamma_M(x) = x - Md \lfloor \frac{x + \frac{Md}{2}}{Md} \rfloor$  για PAM και SQ-QAM.
- Το κόστος: Μικρή αύξηση της απαιτούμενης ισχύος για τη μετάδοση: κατά  $\frac{M^2}{M^2-1}$  για QAM, περισσότερο για μη τετραγωνικούς αστερισμούς.
- Πάντως, η αύξηση της ισχύος είναι της τάξης των λίγων dB.



## Το ασύρματο ( **wireless** ) κανάλι

---

- Tomlinson-Harashima Precoder
- Το ασύρματο ( **wireless** ) κανάλι
  - Tse & Vishwanath, Ch.2

## Το ασύρματο (**wireless**) κανάλι

---

- Μέχρι τώρα είδαμε πώς μπορούμε να μεταδώσουμε από ένα σημείο σε ένα άλλο (**point-to-point**). Θεωρήσαμε σταθερό και δεδομένο κανάλι, γνωστό τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Η μόνη άγνωστη ποσότητα (επιπλέον των μεταδιδόμενων μηνυμάτων) ήταν ο θόρυβος.
- Στην πράξη, το κανάλι μπορεί να μην είναι γνωστό στον πομπό ή στο δέκτη ή και στους δύο. Για να επιτευχθεί επικοινωνία με σύμφωνη (**coherent**) μετάδοση πρέπει να εκτιμηθεί το κανάλι στο δέκτη, αλλιώς πρέπει χρησιμοποιηθεί ασύμφωνη (**non-coherent**) μετάδοση.
- Εάν το κανάλι είναι γνωστό όχι μόνο στο δέκτη, αλλά και στον πομπό, ενδέχεται να είναι δυνατή περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης με χρήση βελτιστοποίησης εκπεμπόμενου σήματος (**transmit optimization**).
- Πολλά ασύρματα κανάλια όχι μόνο δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων, αλλά, επιπλέον, μεταβάλλονται στο χρόνο.

## Το ασύρματο (**wireless**) κανάλι (2)

---

Στη συνέχεια θα δούμε

- Ποια φαινόμενα επηρεάζουν τα σήματα στα ασύρματα κανάλια;
- Πώς μοντελοποιούμε τα ασύρματα κανάλια;
- Τι είδους προβλήματα και προκλήσεις παρουσιάζει η χρήση ασύρματων καναλιών;

Μετά τη (σχετικά σύντομη) αναφορά στα ασύρματα κανάλια, θα ολοκληρώσουμε το μάθημα με περιγραφή της μεθόδου διαμόρφωσης **OFDM** (**Orthogonal Frequency Division Multiplexing**) η οποία χρησιμοποιείται τόσο σε ενσύρματα (και σχετικά αμετάβλητα) κανάλια, όσο και σε ασύρματα (και, γενικά, μεταβαλλόμενα) κανάλια.

Εάν μείνει χρόνος, ίσως επιστρέψουμε και πάλι στα ασύρματα κανάλια για να μιλήσουμε για συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (**Multiple Input Multiple Output – MIMO**).

## Το ασύρματο κανάλι κινητών τηλεπικοινωνιών (mobile wireless channel)

---

- Θα επικεντρωθούμε σε αυτό το κανάλι λόγω της μεγάλου πεδίου εφαρμογής των συστημάτων κινητών επικοινωνιών (κινητή τηλεφωνία, ασύρματα τοπικά/μητροπολιτικά δίκτυα).
- Το ασύρματο κανάλι κινητών τηλεπικοινωνιών μεταβάλλεται στο χρόνο και στη συχνότητα.
- Δύο βασικά φαινόμενα:
  - Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading): λόγω απωλειών διαδρομής (**path loss**) και σκίασης (**shadowing**) λόγω απορρόφησης ενέργειας από εμπόδια όπως κτίρια και φυσικά εμπόδια (π.χ. λόφοι). Το κανάλι μεταβάλλεται σε αποστάσεις της τάξης του μεγέθους της κυψέλης και, συνήθως, η μεταβολή του δεν εξαρτάται από τη συχνότητα.
  - Διαλείψεις μικρής κλίμακας (small-scale fading): λόγω συμβολής πολλαπλών ανακλάσεων του ίδιου σήματος. Το κανάλι μεταβάλλεται σε αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος της φέροντας συχνότητας και η μεταβολή εξαρτάται από τη συχνότητα.

## Απώλειες διαδρομής και σκίαση

---

- Απώλειες διαδρομής: Λόγω σφαιρικής διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
  - Στον ελεύθερο χώρο, η ισχύς μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης  $r$  από την πηγή:  $P(r) \sim \frac{1}{r^2}$ .
  - Σε περιβάλλοντα με ανακλάσεις η απόσβεση ενδέχεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη· της τάξης του  $\frac{1}{r^4}$  (ύψαιθρος), ακόμα και  $\frac{1}{r^6}$ , ανάλογα με την πυκνότητα των εμποδίων που συναντούν τα κύματα.
- Σκίαση: Με τον όρο αυτό εννοούμε τις (τυχαίες) διακυμάνσεις της ενέργειας του σήματος λόγω των αλλαγών στο περιβάλλον (αριθμός εμποδίων, θέση, συντελεστής απορρόφησης κλπ.).



## Απώλειες διαδρομής και σκίαση (2)

---

- Η μεταβολή του καναλιού λόγω σκίασης και απωλειών διαδρομής είναι της τάξης δευτερολέπτων ή ακόμα και λεπτών, σε αντίθεση με τις διαλείψεις μικρής κλίμακας.
- Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας λαμβάνονται υπόψη κυρίως για τον καθορισμό της τοπολογίας του συστήματος (αριθμός κυβελών, τοποθέτηση σταθμών βάσης), για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής καθώς και για την επιλογή μεθόδων πολυπλεξίας, αντιμετώπισης διακυβελικής παρεμβολής κλπ.
- Αντίθετα, όπως θα δούμε, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας επηρεάζουν τις μεθόδους (απο)διαμόρφωσης και (απο)κωδικοποίησης.

## Τα δύο βασικά φαινόμενα σε ένα κανάλι κινητών επικοινωνιών

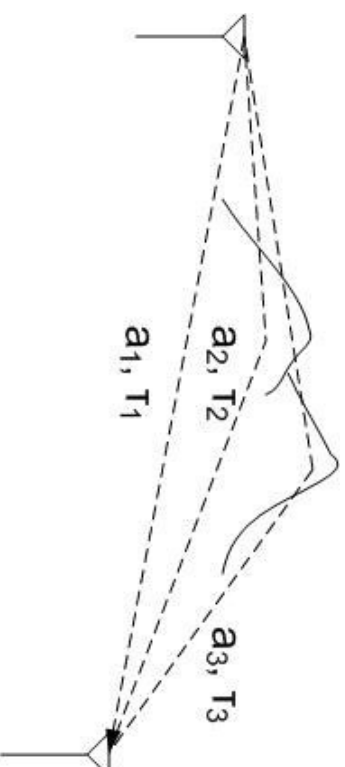
---

- Σε ένα κανάλι κινητών επικοινωνιών διακρίνουμε δύο βασικά φαινόμενα τα οποία, γενικά, εμφανίζονται ταυτόχρονα.
- Λόγω της κίνησης του πομπού ή/και του δέκτη ή/και των αντικειμένων πάνω στα οποία αναλλάται ή σκεδάζεται το σήμα, το κανάλι μεταβάλλεται στο χρόνο (**fading**) και έχουμε εμφάνιση φαινομένου **Doppler**.
- Λόγω των πολλών μονοπατιών που ενδέχεται να ακολουθεί κάθε σήμα στη διαδρομή του μεταξύ πομπού και δέκτη (πολυδιαδρομική διάδοση) εμφανίζεται διαστορά της χρονικής απόκρισης (**multipath delay spread**), με αποτέλεσμα το κανάλι να μην είναι επίπεδο στη συχνότητα (**frequency selectivity**).
- Η μεταβολή στο χρόνο και στη συχνότητα δεν είναι, απαραίτητα, επιβλαβής. Πολλές φορές προσφέρει τη δυνατότητα να βελτιώσουμε τη μετάδοση/λήψη με χρήση τεχνικών διαφορισμού (**diversity**).

## Πολυδιαδρομική διάδοση (Multipath propagation)

---

- Έστω ότι ένα σήμα διέρχεται από διαφορετικά μονοπάτια, με αποτέλεσμα διαφορετικά αντίγραφα του να φτάνουν στο δέκτη με διαφορετικό πλάτος και φάση, καθώς και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
- Έστω ότι μεταδίδουμε μια εκθετική συνάρτηση (θεωρούμε το βαθυπερατό ισοδύναμο ζωνοπερατού συστήματος)  $\phi(t) = \exp(j2\pi f_c t)$ ,  $y(t) = \sum_i a_i(t, f_c)\phi(t - \tau_i(t, f_c))$ , όπου η μιγαδική σταθερά  $a_i(t, f_c)$  (πλάτος και φάση) και η καθυστέρηση  $\tau_i(t, f_c)$  αντιστοιχούν στο μονοπάτι  $i$ .



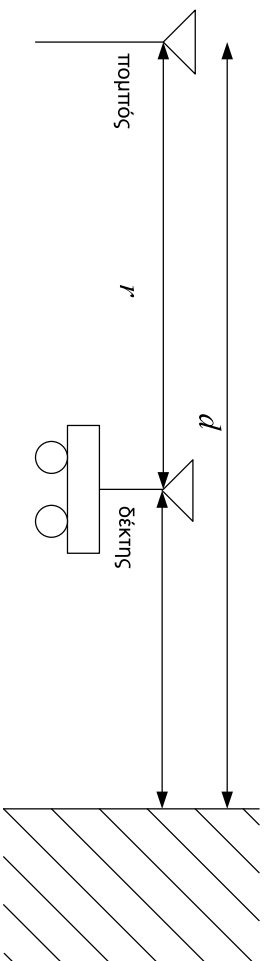
## Πολυδιαδρομική διείσδυση (Multipath propagation) (2)

---

- Εάν υποθέσουμε ότι οι  $a_i(t, f)$  και  $\tau_i(t, f)$  δε μεταβάλλονται σημαντικά με τη συχνότητα  $f$  στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση και εκφράσουμε το μεταδιδόμενο σήμα ως άθροισμα συναρτήσεων της μορφής  $\phi(t) = \exp(j2\pi ft)$  (αρχή της υπέρθεσης) μπορούμε να γράψουμε  $y(t) = \sum_i a_i(t)x(t - \tau_i(t))$ .
- Παρατηρήστε ότι το κανάλι αλλάζει στο χρόνο λόγω κίνησης  $\Rightarrow$  Μοντελοποιείται ως γραμμικό, χρονικώς μεταβαλλόμενο σύστημα.
- $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau, t)x(t - \tau)d\tau$ , όπου  $h(\tau, t) = \sum_i a_i(t)\delta(\tau - \tau_i(t))$ .
- Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απόκριση συχνότητας  $H(f)$ , εκτός αν συμπεριλάβουμε την εξάρτηση από το χρόνο:  $H(f, t) = \mathcal{F}\{h(\tau, t)\}$  για δεδομένο  $t$ .
- Εάν δεν έχουμε κίνηση,  $y(t) = \sum_i a_i x(t - \tau_i)$  (γραμμικό, χρονικά αμετάβλητο).  $h(t) = \sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i)$ .
- Το κανάλι δεν είναι επίπεδο στη συχνότητα ακόμα και όταν δε μεταβάλλεται με το χρόνο (γιατί;)

## Παράδειγμα (Tse): Τοίχος με ανάκλαση

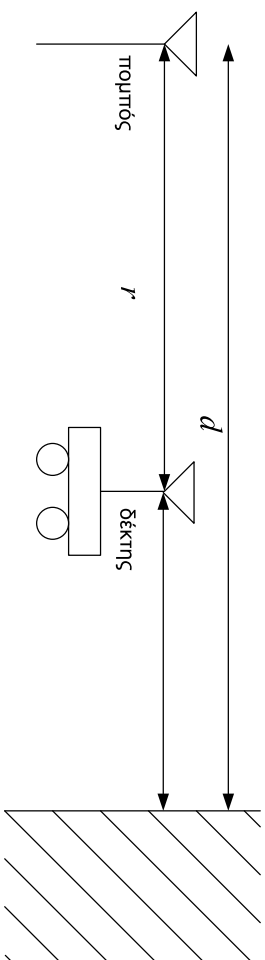
---



- Ο δέκτης δεν κινείται.
- Πεδίο στο δέκτη:  $E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos 2\pi f \left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} - \frac{\alpha \cos 2\pi f \left(t - \frac{2d-r}{c}\right)}{2d-r}$ .  $\alpha$ : Κέρδος κεραίας. Θεωρούμε ότι η απώλεια διαδρομής είναι η ίδια και για τα δύο κύματα.
- Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων ισούται με  $\Delta\theta = \left(\frac{2\pi f(2d-r)}{c} + \pi\right) - \left(\frac{2\pi f r}{c}\right) = \frac{4\pi f}{c}(d-r) + \pi$ .

## Παράδειγμα (Tse): Τοίχος με ανάλυση (2)

---



- $\Delta\theta = \frac{4\pi f}{c}(d-r) + \pi$ .
- Εάν η  $(d-r)$  αλλάξει κατά  $\frac{\lambda}{4}$  η διαφορά φάσης αλλάξει κατά  $\pi$ . Επομένως, εάν για κάποια τιμή της  $(d-r)$  η  $E_r(f, t)$  μεγιστοποιείται, σε απόσταση  $\frac{\lambda}{4}$  θα ελαχιστοποιηθεί.
- Για  $f = 2.4$  GHz (π.χ. IEEE 802.11b),  $\frac{\lambda}{4} \approx 3.1$  cm!

## Διαστορά λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (**multipath spread**) και εύρος ζώνης συμφωνίας (**coherence bandwidth**)

---

- **Multipath Delay Spread**  $T_d \triangleq \max_{i,j} |\tau_i(t) - \tau_j(t)|$ : Το μέγιστο μήκος καναλιού στο χρόνο. Σχετίζεται με τη διασυμβολική παρεμβολή (και την 'επιλεκτικότητα' στη συχνότητα).
- Συνήθως είναι ανάλογο του μεγέθους της κυψέλης (**cell**). Για LANs με μονοπάτια μήκους λίγων **km**,  $T_d \sim 1 - 2 \mu s$ . Τυπικές τιμές: **macro-cellular**: 100 ns - 10  $\mu s$  (μεγάλες τιμές στις αστικές περιοχές, μικρές σε ανοικτούς χώρους). **Indoor και micro-cellular**: Διότιρο από 1  $\mu s$ .
- Στο προηγούμενο παράδειγμα,  $T_d = \frac{2d-r}{c} - \frac{r}{c}$ .

## Διαστορά λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (**multipath spread**) και εύρος ζώνης συμφωνίας (**coherence bandwidth**) (2)

---

- **Coherence bandwidth**  $W_c \triangleq \frac{1}{2T_d}$ . Όσο μεγαλύτερο το μέγιστο μήκος καναλιού, τόσο πιο γρήγορα μεταβάλλεται το κανάλι στη συχνότητα. Μικρό  $W_c \rightarrow$  γρήγορη μεταβολή στη συχνότητα (**frequency selectivity**).

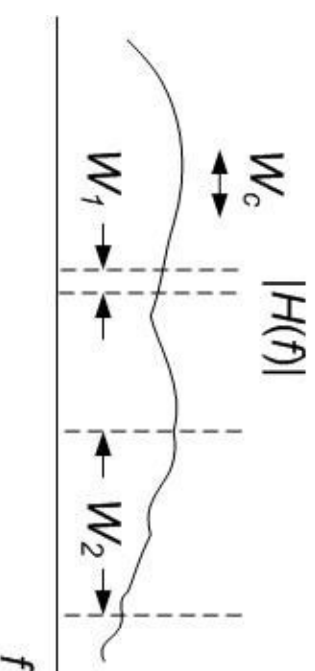
- Στο προηγούμενο παράδειγμα,  $\Delta\theta = \left( \frac{2\pi f(2d-r)}{c} + \pi \right) - \left( \frac{2\pi fr}{c} \right) = \frac{4\pi f}{c}(d-r) + \pi$ . Επομένως, η φάση αλλάζει κατά  $\pi$  εάν η συχνότητα  $f$  αλλάξει κατά  $\frac{1}{2} \left( \frac{2d-r}{c} - \frac{r}{c} \right)^{-1} = \frac{1}{2T_d}$ .



## Flat/frequency selective fading

---

- Παρατηρήστε ότι η μορφή διαλείψεων εξαρτάται τόσο από το εύρος ζώνης συμφωνίας  $W_c$  όσο και από το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται το σύστημα.
- Όταν το εύρος ζώνης  $W$  που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση είναι  $< < W_c$  (π.χ.  $W_1$ ), έχουμε επίπεδη διάλειψη (flat fading). Αλλιώς η διάλειψη ονομάζεται επιλεκτική στη συχνότητα (frequency-selective fading).
- Διαισθητικά: Όταν μεταδίδουμε αργά (και δειγματοληπτούμε αργά στην έξοδο του προσαρμωμένου φίλτρου) δεν μπορούμε να διαχωρίσουμε τα μονοπάτια μεταξύ τους και βλέπουμε απλώς την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος να μεταβάλλεται.



## Φαινόμενο **Doppler** και χρόνος συμφωνίας

---

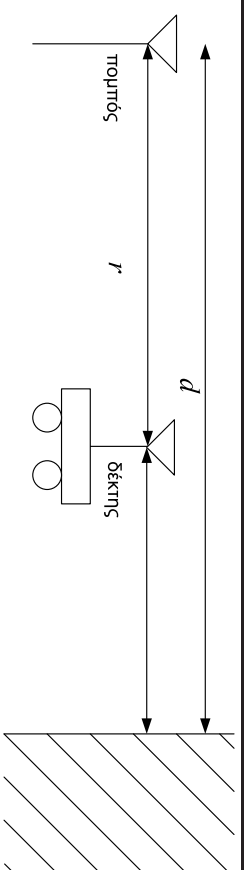
- Προθέτουμε ότι ο πομπός μεταδίδει σήμα  $x(t) = \cos(2\pi ft)$ . Ο δέκτης λαμβάνει σήμα  $y(t) = a \cos(2\pi f(t - t_d))$ , όπου  $t_d$  η καθυστέρηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος λόγω πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός  $c$ .
- Εάν η απόσταση πομπού-δέκτη ισούται με  $r$ ,  $t_d = \frac{r}{c}$ .
- Εάν ο δέκτης απομακρύνεται από τον πομπό με σταθερή ταχύτητα,  $r = r_0 + vt \Rightarrow y(t) = a \cos(2\pi f(t - \frac{r_0+vt}{c})) = a \cos(2\pi f((1 - \frac{v}{c})t - \frac{r_0}{c}))$ .
- Επομένως, ο δέκτης βλέπει το προσπίπτον σήμα μετατοπισμένο στη συχνότητα κατά  $f_D = -f \frac{v}{c} = -\frac{v}{\lambda}$ .
- Γενικά (εάν η κίνηση γίνεται υπό γωνία  $\theta$ ) η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler ισούται με  $f_D \cos(\theta) = \cos(\theta) \frac{v}{\lambda}$ .

## Φαινόμενο **Doppler** και χρόνος συμφωνίας (2)

---

- Κάθε μονοπάτι στα κανάλια πολυδιαδρομικής διάδοσης έχει διαφορετική μετατόπιση **Doppler**, ανάλογα με την ταχύτητα του πομπού, του δέκτη και των ανακλαστικών που βρίσκονται στη διαδρομή του. Επίσης, οι ταχύτητες ενδέχεται να μεταβάλλονται.
- Επομένως, οι μετατοπίσεις συχνότητας λόγω **Doppler** σχηματίζουν μια περιοχή γύρω από τη συχνότητα φέροντας  $f_c$  (**Doppler Spread**).
- Έστω ένα κανάλι με  $L$  taps τη χρονική στιγμή  $t$ :  $h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t)\delta(t - \tau_l(t))$ .
- **Doppler spread** για ένα από τα taps του καναλιού:  $D_s \triangleq \max_{i,j} f_c |\tilde{\tau}'_i(t) - \tilde{\tau}'_j(t)|$  ( $\tilde{\tau}'$ : ταχύτητες,  $\tilde{\tau}_i$ : όλα τα μονοπάτια που ενσωματώσαμε στο tap  $\tau_i$  όταν δειγματοληπτούμε το κανάλι).
- Χρόνος συμφωνίας (**Coherence Time**)  $T_c \approx \frac{1}{4D_s}$ . Είναι ένα μέτρο του πόσο γρήγορα αλλάζει η τιμή του tap  $h_l(t)$  στο χρόνο (η αλλαγή οφείλεται σε αλλαγές της φάσης του σήματος λόγω **Doppler**).

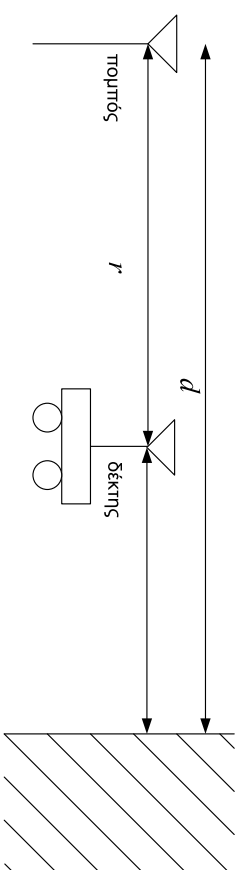
## Παράδειγμα (**Tse**): Τοίχος με ανάκλαση (επιστροφή)



- Ο δέκτης κινείται με σταθερή ταχύτητα  $v$ :  $r = r_0 + vt$ .
- Πεδίο στο δέκτη:  $E_r(f, t) = \frac{\alpha \cos 2\pi f \left[ \left(1 - \frac{v}{c}\right)t - \frac{r_0}{c} \right]}{r_0 + vt} - \frac{\alpha \cos 2\pi f \left[ \left(1 + \frac{v}{c}\right)t + \frac{r_0 - 2d}{c} \right]}{2d - r_0 - vt}$ .
- Το απ' ευθείας κύμα υφίσταται μετατόπιση Doppler  $D_1 = -\frac{fv}{c}$ . Το ανακλώμενο κύμα υφίσταται μετατόπιση Doppler  $D_2 = +\frac{fv}{c}$ .
- Διαστορά Doppler:  $D_s = D_2 - D_1$ .

## Παράδειγμα (**Tse**): Τοίχος με ανάκλαση (επιστροφή)

---

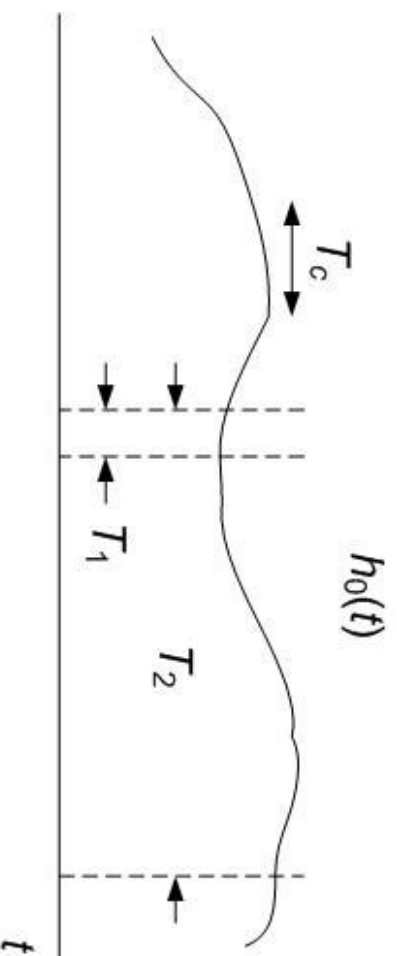


- Με πράξεις, μπορεί ναδειχθεί ότι  $E_r(f, t) \approx \frac{2\alpha \sin 2\pi f \left[ \frac{vt}{c}t + \frac{r_0 - d}{c} \right] \sin 2\pi f \left[ t - \frac{d}{c} \right]}{r_0 + vt}$ .  
Δηλαδή, η περιβάλλουσα της  $E_r(f, t)$  μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με συχνότητα  $f \frac{v}{c} = \frac{D_s}{2}$  λόγω της κίνησης του δέκτη.

## Ταχύτητα διαλείψεων (**fast/slow fading**).

---

- Η ταχύτητα διαλείψεων καθορίζεται τόσο από το φαινόμενο Doppler, όσο και από το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιούμε το κανάλι.
- Στο σχήμα απεικονίζεται το πλάτος ενός tap. Όταν το κανάλι χρησιμοποιείται για χρονικό διάστημα της τάξης του  $T_c$  (π.χ.  $T_1$ ) η διάλειψη είναι αργή, αλλιώς είναι ταχεία.



## Ανακεφαλαίωση

---

- 2 βασικά φαινόμενα στο κανάλι κινητών επικοινωνιών:
  - Πολυδιαδρομική διάδοση (**multipath**): Δημιουργεί επιλεκτικότητα καναλιού στη συχνότητα. Ποσοτικοποιείται με χρήση του εύρους ζώνης συμφωνίας ή της διαστοράς πολυδιαδρομικής διάδοσης.
  - Διαλείψεις λόγω κίνησης (φαινόμενο **Doppler**): Δημιουργεί μεταβολή των **taps** του καναλιού στο χρόνο. Ποσοτικοποιείται με χρήση του χρόνου συμφωνίας ή της διαστοράς **Doppler**.
- Η επιλεκτικότητα στο χρόνο και στη συχνότητα δημιουργεί προβλήματα στην εκτίμηση του καναλιού. Ωστόσο, από την άλλη, μπορούμε να κερδίσουμε σε αξιοπιστία μετάδοσης χρησιμοποιώντας τεχνικές διαφορισμού (**diversity**) στο χρόνο ή στη συχνότητα.