



# Προοπτικές των μελλοντικών ασυρμάτων δικτύων και παραδοσιακές λύσεις

Τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα αναμένεται να προσφέρουν:

Παγκόσμια κάλυψη για κάθε χρήστη σε οποιαδήποτε στιγμή σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους

+

Μεγάλο πλήθος υπηρεσιών με εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας

+

Αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν



**Παραδοσιακές Λύσεις:** Αναβαθμισμένες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, νέες τεχνικές κωδικοποίησης πηγής και καναλιού και χρήση σύγχρονων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος.

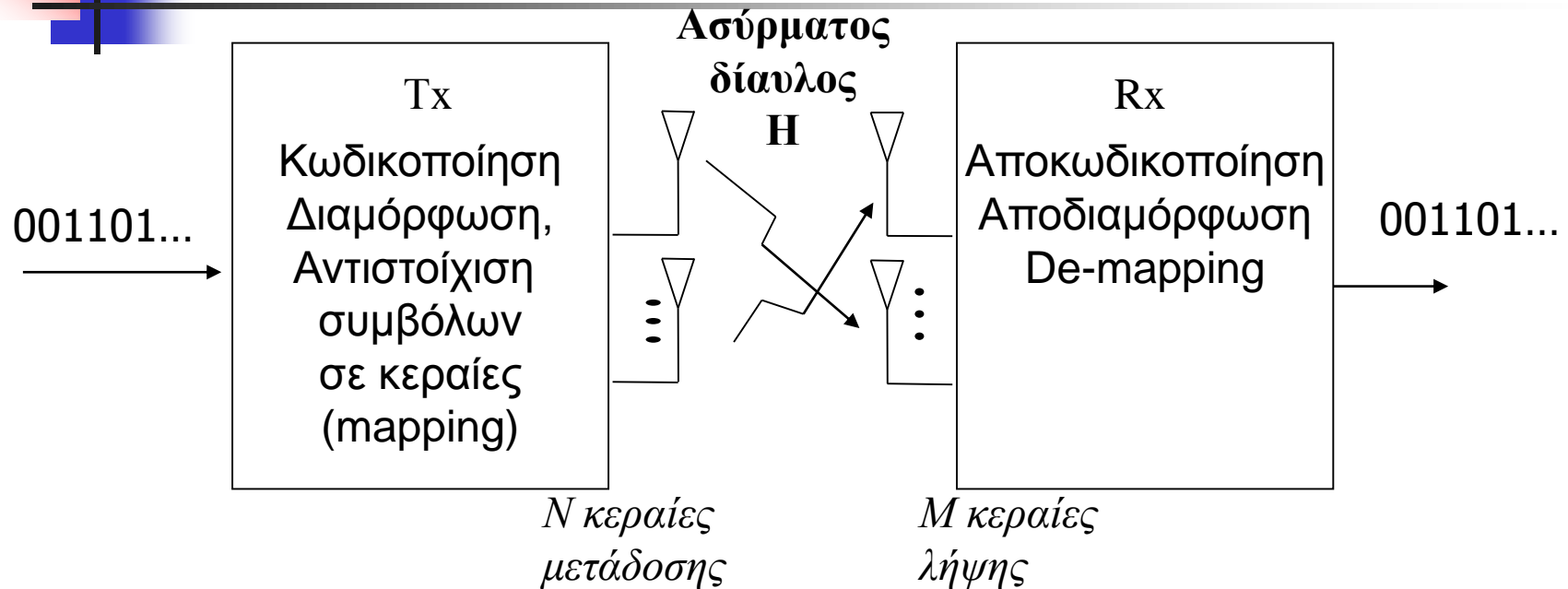


# Τεχνικές πολλαπλής μετάδοσης – πολλαπλής λήψης (MIMO)

---

- Χρήση πολλαπλών κεραιών στην εκπομπή και τη λήψη
- Βασική ιδέα: Συνδυασμός των σημάτων των κεραιών μετάδοσης/λήψης για βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος (πιθανότητα σφάλματος, ρυθμός μετάδοσης).
- Χρήση της χωρικής διάστασης (διάνυσμα θέσης κεραιών εκπομπής και λήψης) σε συνδυασμό με την αντίστοιχη χρονική (διαμόρφωση και κωδικοποίηση) για τη βελτίωση των επιδόσεων του συστήματος
  - Επέκταση των συστημάτων ευφυών κεραιών (smart antennas)
- Διαλείψεις δεν θεωρούνται πλέον απαραίτητα αίτιο για τον περιορισμό των επιδόσεων ενός ασύρματου συστήματος
- Σε πολλές περιπτώσεις οι διαλείψεις μπορούν να *βελτιώσουν* τις επιδόσεις του συστήματος, *πολλαπλασιάζοντας* τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων

# Σύστημα MIMO



- Mapping: Γραμμικός συνδυασμός των αποκρίσεων των κεραιών με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας ή γραμμική προ-κωδικοποίηση).
- Παράγοντες που λαμβάνονται υπ' όψιν στο σχεδιασμό του δέκτη: Πολυπλοκότητα, ευφυΐα, *a-priori* γνώση του καναλιού.



## Συμβατικές τεχνικές ευφυών κεραιών

---

- Μόνο ο πομπός ή μόνο ο δέκτης είναι εφοδιασμένοι με πολλαπλές κεραιές.
- Beamforming: Αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο εστιάζοντας την ισχύ πομπού ή δέκτη σε συγκεκριμένη κατεύθυνση
- Διαφορισμός ως προς το χώρο (spatial diversity):
  - Η πιθανότητα εσφαλμένου σήματος μειώνεται εκθετικά με τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται
  - Τάξη διαφορισμού: Αριθμός των διαθέσιμων κεραιών (μη συσχετισμένων στον πομπό ή στο δέκτη)
- Συστήματα MIMO διατηρούν τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ευφυών κεραιών.



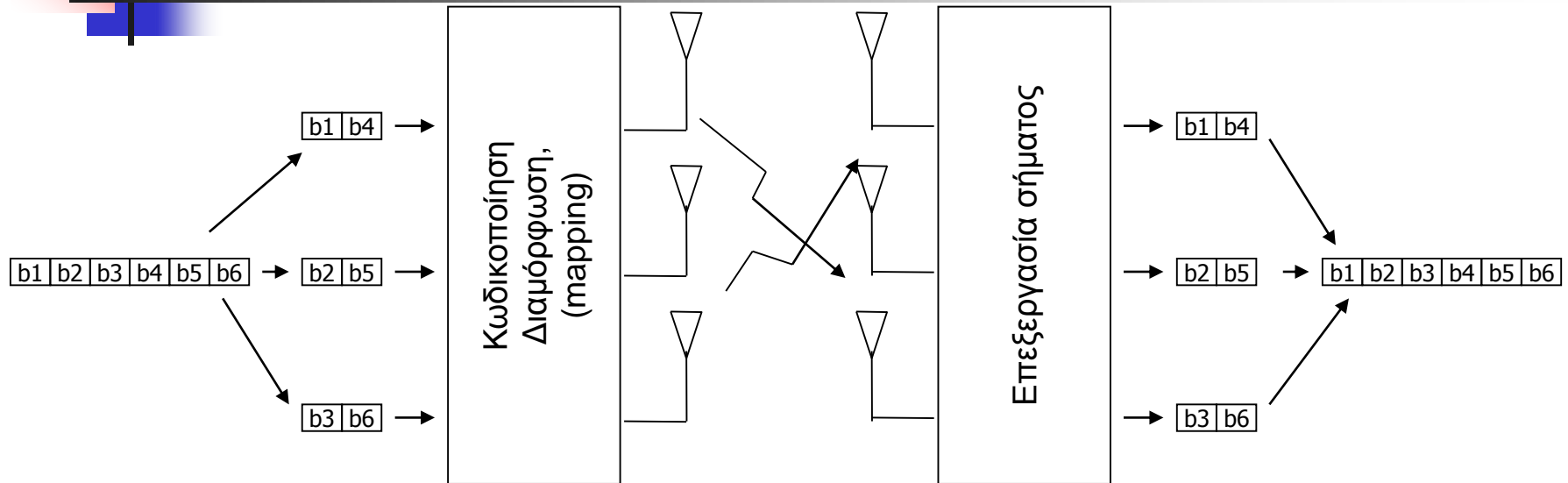
# Γενικό μαθηματικό μοντέλο καναλιού MIMO

- Η κρουστική απόκριση του καναλιού μεταξύ της  $j$ -οστής κεραίας εκπομπής ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) και της  $i$ -οστής κεραίας λήψης ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) είναι  $h_{i,j}(\tau, t)$
- Ο πίνακας της κρουστικής απόκρισης του καναλιού διαστάσεων  $M \times N$  είναι

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \cdots & h_{1,M_T}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \cdots & h_{2,M_T}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R,1}(\tau, t) & h_{M_R,2}(\tau, t) & \cdots & h_{M_R,M_T}(\tau, t) \end{bmatrix}$$

- **Κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορούν να μεταδοθούν  $\min(M, N)$  ανεξάρτητες ροές δεδομένων μέσω των ιδιαζουσών τιμών (eigen-modes) του πίνακα  $\mathbf{H}$ .**

# Παράδειγμα μετάδοσης: Vertical BLAST (1)



- Συρμός από bits διασπάται σε τρεις ανεξάρτητους συρμούς οι οποίοι μεταδίδονται ταυτόχρονα. (χρησιμοποιούν το 1/3 του διαθέσιμου φάσματος) (spatial multiplexing).
- Ο διαχωρισμός είναι δυνατός μόνο αν κάθε κεραία λήψης «βλέπει» διαφορετικό κανάλι (Πρβλ. με λύση ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων με τρεις αγνώστους)
- VBLAST Βασίζεται στην παρουσία των διαλείψεων για την επανάκτηση της αρχικής ακολουθίας εισόδου.
- **Μετατροπή των διαλείψεων προς όφελος του χρήστη!**



## Παράδειγμα μετάδοσης: Vertical BLAST (2)

---

- Ισομορφισμός συστημάτων MIMO και CDMA
  - CDMA: Πολλοί χρήστες οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο κανάλι στο πεδίο του χρόνου/συχνότητας πολυπλέκονται κατά τη μετάδοση και ανακτώνται μέσω των κωδικών τους.
  - Στα συστήματα MIMO η μοναδικότητα κάθε συρμού εισόδου (virtual users) εξασφαλίζεται από το ίδιο το σύστημα με ένα «σχεδόν» ορθογώνιο τρόπο
  - Τα συστήματα MIMO μπορούν να πραγματοποιήσουν από κοινού κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των πολλαπλών συρμών εφόσον οι συρμοί αφορούν στον ίδιο χρήστη.



## Παράδειγμα μετάδοσης: Vertical BLAST (3)

---

- Ορίζουμε το *βαθμό* του καναλιού MIMO ως τον αριθμό των γραμμικώς ανεξαρτήτων εξισώσεων που προκύπτουν από το προηγούμενο γραμμικό σύστημα
- Στο προηγούμενο παράδειγμα το κανάλι είναι πλήρους βαθμού (ίσου με 3) και το σύστημα επιτυγχάνει *κέρδος πολυπλεξίας* ίσο με 3, αγνοώντας την κωδικοποίηση σε κάθε συρμό.
- Στην πράξη *και* η κωδικοποίηση σε κάθε συρμό *και* ο αριθμός των ανεξάρτητων συρμών επηρεάζουν τις επιδόσεις του συστήματος (space-time coding)





# Χωρητικότητα καναλιού: Βασικές αρχές (1)

---

- Χωρητικότητα καναλιού SISO χωρίς μνήμη:

$$C = \log_2(1 + \rho |h|^2)$$

$h$  το κέρδος του καναλιού,  $\rho$  ο SNR μιας κεραίας λήψης

- Σύστημα SIMO

- Υποθέτουμε ότι διαθέτουμε  $M$  κεραίες λήψης
- Αύξηση του  $M$  έχει σαν αποτέλεσμα λογαριθμική αύξηση στην χωρητικότητα του καναλιού

$$C = \log_2\left(1 + \rho \sum_{i=1}^M |h_i|^2\right)$$



## Χωρητικότητα καναλιού: Βασικές αρχές (2)

---

### ■ Κανάλι MISO:

- Υποθέτουμε ότι έχουμε  $N$  κεραιές στην πομπή
- Η χωρητικότητα του καναλιού MISO είναι τελικά ίση με

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N} \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right)$$

- Αύξηση του  $N$  έχει σαν αποτέλεσμα λογαριθμική αύξηση της χωρητικότητας



## Χωρητικότητα καναλιού: Βασικές αρχές (3)

Χωρητικότητα καναλιού MIMO

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_M + \frac{\rho}{N} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (\text{A})$$

- Η χωρητικότητα αυξάνεται *γραμμικά* με τον συντελεστή  $m = \min(M, N)$ .
- Ο διάυλος αποτελείται από  $m$  παράλληλους και ανεξάρτητους διαύλους SISO
  - Το κέρδος κάθε τέτοιου διαύλου ισούται με  $\rho \cdot \lambda_i$  όπου  $\lambda_i$  ιδιοτιμή του πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ .



# Χωρητικότητα καναλιού MIMO (1)

---

- Σκοπός: Μελέτη χωρητικότητας καναλιού MIMO υποθέτοντας ότι ο πομπός έχει μία a priori γνώση του καναλιού
- Θεωρούμε τη γνωστή σχέση εισόδου-εξόδου

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n}$$

όπου  $\mathbf{r}$   $M \times 1$  διάνυσμα λήψης,  $\mathbf{s}$   $N \times 1$  διάνυσμα προς μετάδοση,  $\mathbf{n}$   $N \times 1$  διάνυσμα λευκού θορύβου Gauss.

- Έστω  $\mathbf{Q}$  ο πίνακας συνδιακύμανσης του διανύσματος  $\mathbf{s}$ , τότε η χωρητικότητα του συστήματος είναι

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_M + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H \right)$$

- Περιορισμός ως προς την κατανάλωση ισχύος:  $\text{tr}(\mathbf{Q}) \leq \rho$



## Χωρητικότητα καναλιού MIMO (2)

---

- Όταν  $\mathbf{Q} = (\rho/N)\mathbf{I}_N$  (ίση ισχύς κάθε σήματος εισόδου, μη συσχετισμένες εισοδοί) προκύπτει η (A)
- Στην περίπτωση αυτή η χωρητικότητα μεγιστοποιείται όταν ο πίνακας του καναλιού είναι άγνωστος στον πομπό και η κατανομή της εισόδου που μεγιστοποιεί την αμοιβαία πληροφορία είναι η κανονική.
- Στην πιο γενική περίπτωση η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο water-filling
- Ποια είναι η επίδραση του πίνακα  $\mathbf{Q}$ ;
  - Συγκρίνοντας την χωρητικότητα που επιτυγχάνεται όταν  $\mathbf{Q} = (\rho/N)\mathbf{I}_N$  με την αντίστοιχη για τέλεια εκτίμηση του καναλιού και ανάδραση μπορούμε να εκτιμήσουμε το κέρδος χωρητικότητας λόγω ανάδρασης



## Χωρητικότητα καναλιού MIMO (3)

---

- Ποια η επίδραση του πίνακα  $\mathbf{H}$ ;
- Για i.i.d. διαλείψεις Rayleigh έχουμε γραμμική αύξηση της χωρητικότητας
- Τι συμβαίνει στην πιο γενική περίπτωση;
- Η (A) είναι δυνατό να γραφεί ως εξής

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i \right)$$

όπου  $\lambda_i$  οι μη μηδενικές ιδιοτιμές του πίνακα

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^*, & M \leq N \\ \mathbf{H}^*\mathbf{H} & M > N \end{cases}$$

και  $r = \text{rank}(\mathbf{W})$ .

- Για διαλείψεις Rayleigh, ο  $\mathbf{W}$  είναι πίνακας *Wishart*



## Χωρητικότητα καναλιού MIMO (4)

---

- Εναλλακτικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μετασχηματισμό SVD στον πίνακα  $\mathbf{H}$ . Ο δίαυλος αποτελείται από  $r$  παράλληλους και ανεξάρτητους διαύλους SISO

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^H$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^H \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

όπου  $\mathbf{D} = \text{diag}(\lambda_1^{1/2}, \lambda_1^{1/2}, \dots, \lambda_r^{1/2}, 0, 0, \dots, 0)$  και  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$  ορθογώνιοι πίνακες

- Θεωρούμε γραμμικούς μετασχηματισμούς:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{U}^H \mathbf{r}$$

$$\mathbf{s}' = \mathbf{V}^H \mathbf{s}$$

$$\mathbf{n}' = \mathbf{U}^H \mathbf{n}$$

- Σχέση εισόδου-εξόδου:  $\mathbf{r}' = \mathbf{D} \cdot \mathbf{s}' + \mathbf{n}'$

# Ανάθεση ισχύος με τεχνική water-filling (1)

- $\gamma_i = E\{|x_i|^2\}$  η μεταφερόμενη ισχύς μέσω κάθε παράλληλης συνιστώσας του διαύλου MIMO (Υποθέτουμε ότι το κανάλι είναι γνωστό στον πομπό).
- Πρόβλημα βελτιστοποίησης: Μεγιστοποιήσε την χωρητικότητα με τον περιορισμό:  $\sum_{i=1}^r \gamma_i = N$
- Διατύπωση του προβλήματος: 
$$C = \max \sum_{i=1}^r \log_2 \left( 1 + \frac{\rho \gamma_i}{N} \lambda_i \right)$$
$$\sum_{i=1}^r \gamma_i = N$$
- Αναλυτική λύση: 
$$\gamma_i^{opt} = \left( \mu - \frac{N}{\rho \lambda_i} \right)_+$$
$$(x)_+ = \begin{cases} x & \text{αν } x \geq 0 \\ 0 & \text{αν } x < 0 \end{cases}$$
- Αριθμητική λύση με αλγόριθμο water-filling



# Ανάθεση ισχύος με τεχνική water-filling (2)

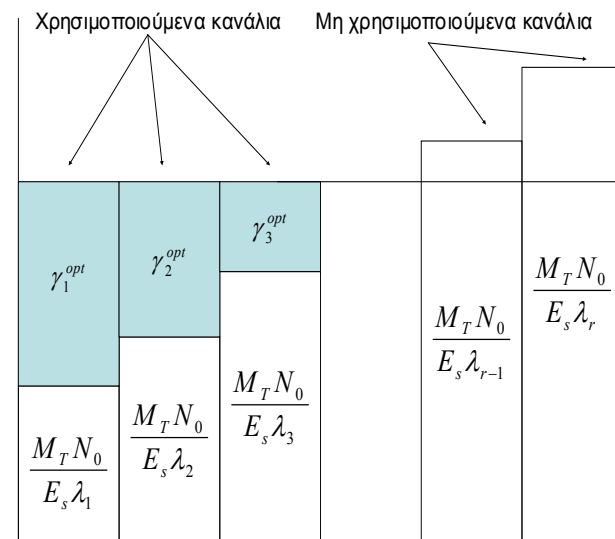
- Αρχικοποίησε μετρητή επαναλήψεων  $\rho = 1$ .
- Υπολογισμός της ποσότητας

$$\mu = \frac{N}{r-p+1} \left[ 1 + \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^{r-p+1} \frac{1}{\lambda_i} \right]$$

- Υπολογισμός ισχύος από κάθε παράλληλο δίαυλο:

$$\gamma_i = \left( \mu - \frac{N}{\rho \lambda_i} \right)_+ \quad i = 1, 2, \dots, r-p+1$$

- Αν  $\gamma_i < 0$  θέσε ως βέλτιστη τιμή τη μηδενική.  $\rho++$ .
- Επανάλαβε την ανωτέρω διαδικασία μέχρις ότου  $\gamma_i > 0$



# Ποια είναι τα πραγματικά κέρδη που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας water-filling;

- Σε κανάλια Rice αύξηση της ισχύος της οπτικής συνιστώσας για σταθερό SNR οδηγεί σε *μείωση* της χωρητικότητας
  - Εξήγηση βάσει του βαθμού του πίνακα του καναλιού και ιδιοτήτων των ιδιοτιμών τους
- Συσχετισμένες διαλείψεις: παρατηρούνται όταν τα στοιχεία των κεραιών είναι τοποθετημένα πολύ κοντά μεταξύ τους.
  - Μείωση της χωρητικότητας με τη συσχέτιση των κεραιών
- Για υψηλά SNR το κέρδος χωρητικότητας μειώνεται
  - Η γνώση του καναλιού στον πομπό προσφέρει κέρδος ισχύος μετάδοσης (transmit array gain)
  - Επίτευξη κέρδους διαφορισμού και κέρδους πολυπλεξίας δεν απαιτεί αυτή τη γνώση (πχ σε συστήματα Space-Time Block Coding, V-BLAST)
  - Κέρδος ισχύος μετάδοσης μειώνεται σε υψηλά SNR άρα και το κέρδος της ανάδρασης



# Τεχνικές μετάδοσης σε συστήματα MIMO

---

- Διακρίνουμε δύο κατηγορίες τεχνικών:
  - Μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης
  - Μεγιστοποίηση κέρδους διαφορισμού
- Μία δεύτερη προσέγγιση αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διακοπής της επικοινωνίας (outage probability)
- Space-Time Coding:
  - Ένας αριθμός από σύμβολα ίσος με τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης μεταδίδονται ταυτόχρονα, ένα από κάθε κεραία.
  - Τα σύμβολα δημιουργούνται από έναν space-time encoder
  - Στο δέκτη υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία σήματος και αποκωδικοποίηση ώστε να επιτευχθεί κέρδος διαφορισμού ή/και κωδικοποίησης



# Μεγιστοποίηση κέρδους διαφορισμού χρησιμοποιώντας space-time block codes

---

- Η πιο απλή μορφή κωδικοποίησης είναι η τεχνική Alamouti
- Ιστορικά ο πρώτος κώδικας space-time ο οποίος εκμεταλλεύεται πλήρως τα πλεονεκτήματα της διαφορικής λήψης
- Χρησιμοποιούνται δύο κεραιές εκπομπής αλλά εφαρμόζεται και με δύο κεραιές εκπομπής, δύο λήψης.
- Ένα μπλοκ δύο συμβόλων  $x_1$  και  $x_2$ , κωδικοποιείται πριν από τη μετάδοση σύμφωνα με τον πίνακα

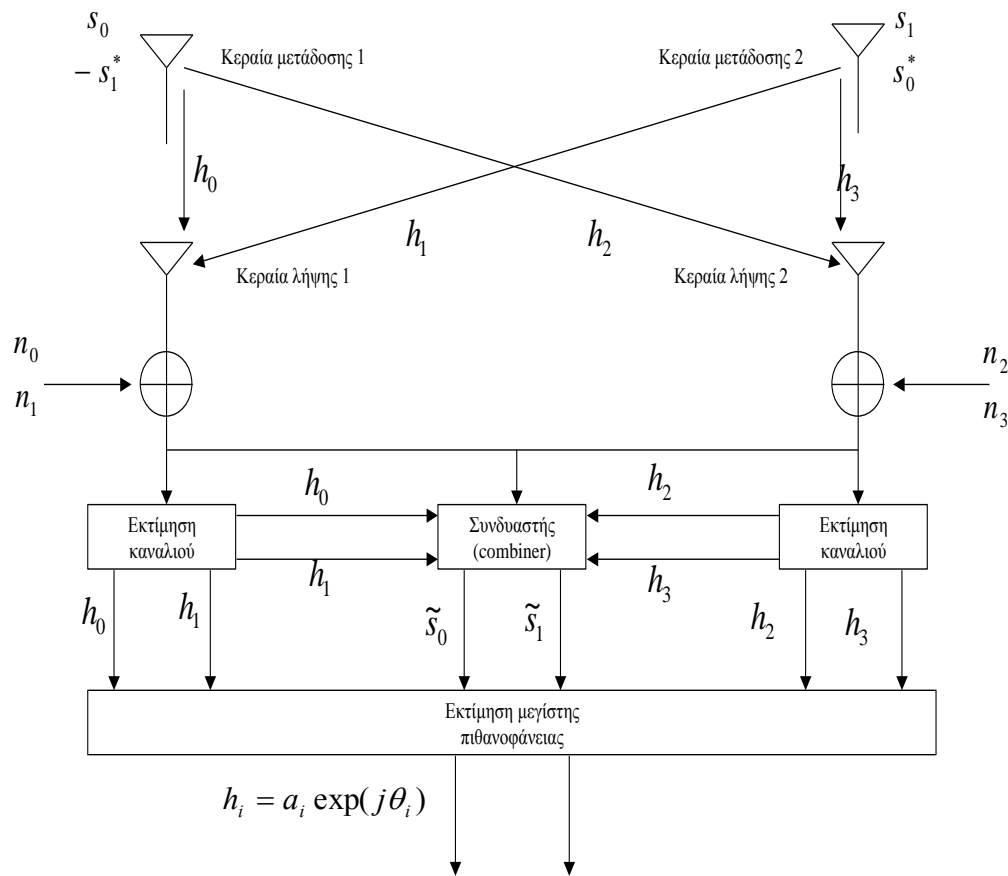
$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$

- Ο πίνακας  $X$  είναι ορθογώνιος

# Τεχνική Alamouti (1)

- Κωδικοποίηση και μετάδοση των δεδομένων πληροφορίας από τον πομπό
- Συνδυασμός των σημάτων στο δέκτη
- Εκτίμηση του σήματος εκπομπής χρησιμοποιώντας αλγόριθμο μέγιστης πιθανοφάνειας

	Κεραία 1	Κεραία 2
$t$	$s_0$	$s_1$
$t + T$	$-s_1^*$	$s_0^*$





## Τεχνική Alamouti (2)

---

- Για την αποκωδικοποίηση απαιτείται γνώση του καναλιού στον πομπό
  - Χρήση συμβόλων πιλότων
- Επιτυγχάνεται μέγιστο κέρδος διαφορισμού για δύο κεραίες λήψης
- Η τεχνική αυτή επεκτάθηκε για περισσότερες από δύο κεραίες στον πομπό και το δέκτη
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε διαύλους επιλεκτικούς ως προς τη συχνότητα, πχ σε συστήματα OFDM



# Μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιώντας χωρική πολυπλεξία (1)

---

- VBLAST μία συγκεκριμένη υλοποίηση των τεχνικών αυτών
- Το παράδειγμα που δώσαμε γενικεύεται ως εξής:
  - Θεωρούμε το  $N \times L$  μπλοκ δεδομένων  $\mathbf{C}$ , το οποίο μεταδίδεται μέσω ενός συστήματος MIMO  $N \times M$
  - Η σχέση εισόδου – εξόδου είναι  $\mathbf{Y} = \mathbf{H} \mathbf{C} + \mathbf{N}$
- Για την ανίχνευση του συμβόλου στο δέκτη χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τεχνικές
  - Zero Forcing: χρησιμοποιεί απλή αντιστροφή του  $\mathbf{H}$ . Ο πίνακας είναι δυνατό να έχει κακό δείκτη κατάστασης για κάποιες συνθήκες ή παρουσία οπτικής επαφής



# Μεγιστοποίηση ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιώντας χωρική πολυπλεξία (2)

- Η βέλτιστη μέθοδος είναι η εκτίμηση μεγίστης πιθανοφανείας (ML decoding)

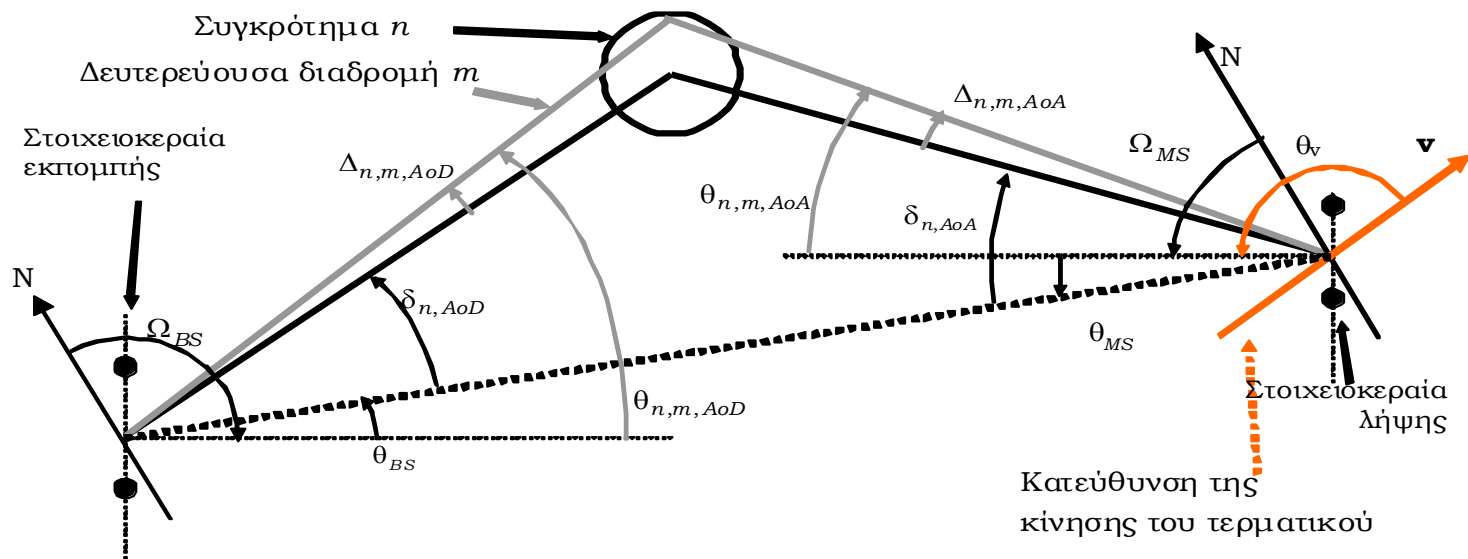
$$\hat{\mathbf{C}} = \arg \min_{\mathbf{C}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{H}\mathbf{C}\|$$

- Μειονέκτημα: μεγάλη πολυπλοκότητα όταν χρησιμοποιούνται πολλές κεραιές και υψηλή τάξη διαμόρφωσης
- Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί Sphere decoding
- Nulling and Canceling: Ικανοποιητικός συμβιβασμός μεταξύ απαιτήσεων για επιδόσεις και χαμηλή πολυπλοκότητα
  - Η διαδικασία αντιστροφής του πίνακα γίνεται σε επίπεδα (layers)
  - Επαναληπτική διαδικασία η οποία θυμίζει την αντίστοιχη για successive interference cancelling σε συστήματα CDMA
- Blind detection: Χρησιμοποιείται όταν το κανάλι δεν είναι γνωστό στο δέκτη
  - Τίμημα: Ελαφρά αύξηση της πιθανότητας εσφαλμένων bits και υψηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα



# Μοντέλα καναλιού MIMO: Στοχαστικό μοντέλο βασισμένο στη γεωμετρία (3GPP-3GPP2) (1)

- Μοντελοποίηση παραμέτρων που σχετίζονται με τη γεωμετρία του περιβάλλοντος και τη φύση των παρεμβολών
- Οι γεωμετρικές τοποθεσίες των σκεδαστών λαμβάνονται με τυχαίο τρόπο από δεδομένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.
- Κάθε σκεδαστής μεταφέρει μόνο μία πολλαπλή διαδρομή
- Το σήμα λήψης στο δέκτη αποτελείται από καθυστερημένες κατά  $N$  περιόδους εκδόχες του μεταδιδόμενου σήματος, όπου  $N$  είναι ο αριθμός των πολλαπλών διαδρομών
- Κάθε διαδρομή αποτελείται από  $M$  δευτερεύουσες διαδρομές



# Μοντέλα καναλιού MIMO: Στοχαστικό μοντέλο βασισμένο στη γεωμετρία (3GPP-3GPP2) (2)

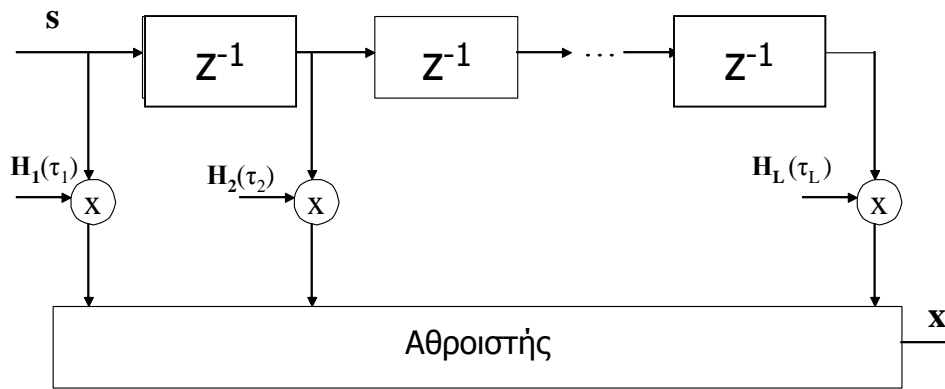
- Κρουστική απόκριση του καναλιού μεταξύ της κεραίας μετάδοσης  $t$  και της κεραίας λήψης  $r$  :

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_t(\theta_{nm,t}) \alpha_{nm} e^{-j\phi_{nm}} e^{-2j\pi \frac{v}{\lambda} t \cos \theta} \delta(t - \tau_{nm}) a_r(\theta_{nm,r})$$

- $\alpha_n$ : πλάτος του  $n$ -οστού τμήματος πολλαπλών διαδρομών
- $\phi_n$ : ολίσθηση φάσης του σκεδαστή
- $\tau_n$ : χρονική καθυστέρηση
- $\theta_n$ : Κατεύθυνση άφιξης
- $N$ : Αριθμός των τμημάτων πολλαπλών διαδρομών στο υπό θεώρηση σενάριο
- $M$ : Αριθμός ακτινών σε κάθε ομάδα συγκέντρωσης των σκεδαστών
- $a_r(\theta)$ : ισχύς της κεραίας εκπομπής υπολογιζόμενη για την κατεύθυνση άφιξης  $\theta$
- $a_t(\theta)$ : ισχύς της κεραίας λήψης υπολογιζόμενη για την κατεύθυνση αναχώρησης  $\theta$
- $\theta$ : Η γωνία που σχηματίζει η κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας στο κινητό τερματικό και της κατεύθυνσης της κίνησης

# Μοντέλα καναλιού MIMO : Στοχαστικό μοντέλο βασισμένο σε πίνακες συσχέτισης

Μοντέλο φίλτρου FIR:  $\mathbf{H}(\tau) = \sum_{l=1}^L \mathbf{H}_l \delta(\tau - \tau_l)$



- Η συσχέτιση μεταξύ των κεραιών λήψης είναι ανεξάρτητη από τη συσχέτιση μεταξύ των κεραιών μετάδοσης και αντιστρόφως
- Οι αποστάσεις μεταξύ των διπόλων κάθε στοιχειοκεραίας είναι πολύ μικρότερες από την απόσταση μεταξύ των δύο στοιχειοκεραίων
- Οι πίνακες συσχέτισης θεωρούνται σταθεροί κατά τη διάρκεια της κρουστικής απόκρισης του καναλιού



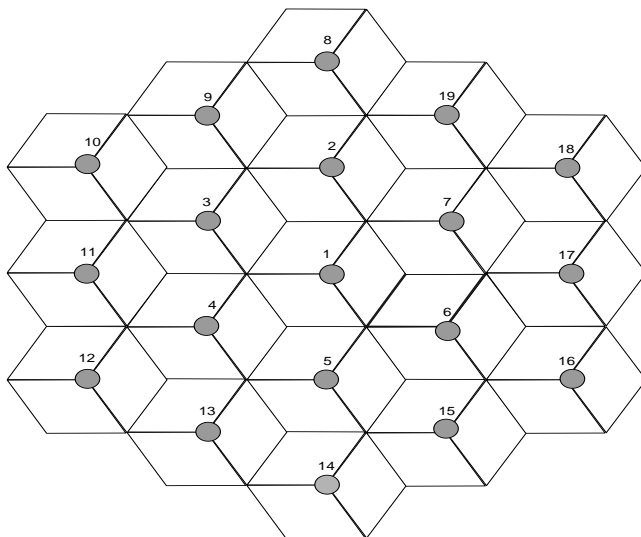
# Συστήματα MIMO σε ασύρματα δίκτυα

---

- Προς το παρόν μικρή αξιοποίηση των συστημάτων MIMO σε κυψελωτά συστήματα.
- Χρήση χωρικής πολυπλεξίας σε συστήματα WiMax
- BLAST chip από Lucent και προσομοιώσεις επιπέδου ζεύξης για αξιολόγηση επίδοσης συστημάτων MIMO.
- Προσομοιώσεις πραγματοποιούνται υπό ιδανικές συνθήκες:
  - Ευαισθησία των κερδών σε σχέση με την κατάσταση του διαύλου
  - Πολυπλοκότητα του hardware, τόσο στο BTS όσο και στο τερματικό.
  - Ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων, όπως ολίσθηση Doppler, συσχέτιση μεταξύ των κεραιών, εκτίμηση του καναλιού χειροτερεύουν την επίδοση του συστήματος.
- Οι βελτιώσεις που επιφέρουν τα συστήματα MIMO στο επίπεδο ζεύξης δεν μεταφράζονται πάντοτε σε βελτιώσεις στο επίπεδο συστήματος.

# Παράδειγμα: Σύστημα HSDPA (1)

- **HSDPA: 19 εξαγωνικές κυψέλες, ακτίνας 1400m, κεραιές τριών τομέων**
- **Περιβάλλον διάδοσης:**
  - Εξωτερικού χώρου
  - Υπηρεσίες: Web 64kbps, FTP 384kbps
- **Αριθμός κεραιών στον πομπό και το δέκτη:**
  - 2Tx, 2Rx



13	14	15	16
9	10	11	12
5	6	7	8
1	2	3	4

 Cell of interest  
 Interfering cells

## Παράδειγμα: Σύστημα HSDPA (2)

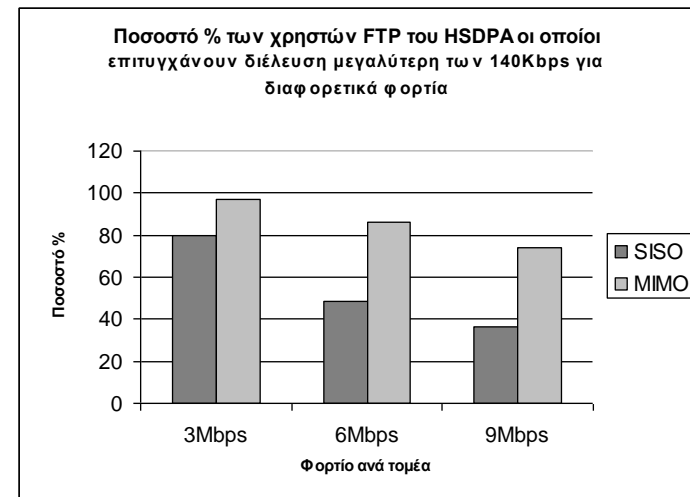
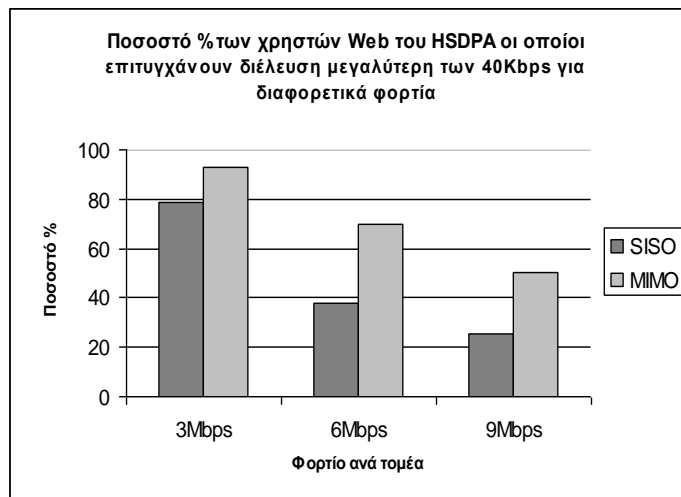
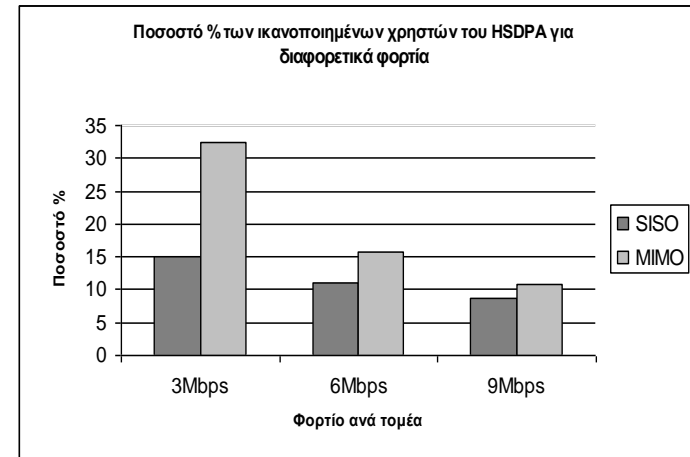
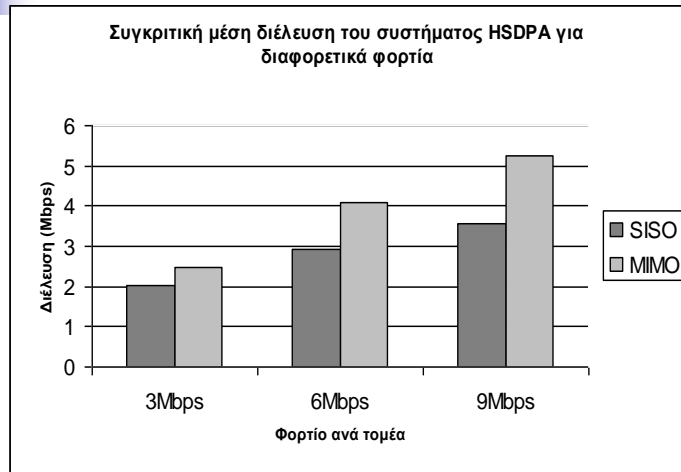
- **Διέλευση συστήματος (throughput):** ο αριθμός των bits τα οποία μεταδόθηκαν επιτυχώς για μία καθορισμένη χρονική περίοδο

- Διέλευση ανά πλαίσιο:

$$Throughput/ frame_{[Mbps]} = \sum_{i=1}^N \rho_{Mode[Mbps]_{User(i)}} \times \left( 1 - \frac{\tau_{overhead}}{\tau_{frame}} \right) \times \beta \times (1 - PER_{user(i)})$$

- $\rho_{Mode\_User}$ : Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για κάθε χρήστη
  - $\tau_{overhead}$ : Το ποσοστό του πλαισίου MAC που δεν περιέχει πληροφορία
  - $\beta$ : Επιβάρυνση λόγω CRC.
  - PER: Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων.
- **Ικανοποιημένοι χρήστες:**
    - Ο χρήστης δεν απορρίπτεται όταν ζητά σύνδεση με το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο
    - Ο χρήστης χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική ποιότητα επικοινωνίας για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από το 95% της τηλεπικοινωνιακής συνόδου του
    - Ο χρήστης δεν απορρίπτεται από το σύστημα κατά τη διάρκεια της τηλεπικοινωνιακής συνόδου του
    - Αριθμητικό παράδειγμα: Χρήστης Web 64Kbps, χρόνος προσομοίωσης 3min, χαρακτηρίζεται ως ικανοποιημένος αν η διέλευσή του είναι μεγαλύτερη ή ίση από  $0.95 \times 64000 \times 180 \text{ bits} = 10944000 \text{ bits}$

# Παράδειγμα: Σύστημα HSDPA (3)





## Σχόλια επί των αποτελεσμάτων

---

- Για ισοδύναμο φορτίο ίσο με 3Mbps, το SISO HSDPA επιτυγχάνει μια επαρκή διέλευση (περίπου 2 Mbps) αλλά το ποσοστό των ικανοποιημένων χρηστών είναι χαμηλό
- Για το ίδιο φορτίο, το ποσοστό των χρηστών οι οποίοι επιτυγχάνουν διέλευση μεγαλύτερη από 40 kbps και μεγαλύτερη από 140kbps είναι αρκετά υψηλό.
- Μείωση των επιδόσεων του συστήματος παρατηρείται όταν το ισοδύναμο φορτίο ανά τομέα αυξηθεί στα 6 και 9Mbps





# Πρακτικά Προβλήματα για ενσωμάτωση συστημάτων MIMO σε ασύρματα δίκτυα (1)

---

- Προβλήματα σχετικά με κεραιές πομπού και δέκτη:
  - Σημαντικές παράμετροι ο αριθμός των κεραιών και η απόσταση μεταξύ των στοιχείων τους.
  - Για το BTS προβλέπονται μικροί αριθμοί (π.χ 4 κεραιές) με απόσταση 10λ στα 2GHz. (για μείωση της συσχέτισης μεταξύ των διπόλων) .
  - Τέσσερις κεραιές μπορούν να τοποθετηθούν σε μία απόσταση 1.5m
  - Για το τερματικό, απόσταση  $\lambda/2$  θεωρείται επαρκής
  - Τέσσερις κεραιές στο τερματικό μπορούν να τοποθετηθούν σε απόσταση 7.5cm (επαρκής για laptops, προβληματική για hand-sets)



## Πρακτικά Προβλήματα για ενσωμάτωση συστημάτων MIMO σε ασύρματα δίκτυα (2)

---

- Πολυπλοκότητα του δέκτη:
  - Εκτίμηση καναλιού: Πρέπει να γίνεται επεξεργασία ενός πίνακα αντί ενός βαθμωτού μεγέθους.
  - Επιπρόσθετη πολυπλοκότητα από RF, hardware για διαχωρισμό σημάτων.
  - Ένα τερματικό MIMO πρέπει να είναι dual mode για υποστήριξη SISO
    - Space-Time combiners και κυκλώματα καταστολής παρεμβολών στο MIMO mode λειτουργίας
  - Κόστος των MIMO τερματικών μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των SISO
  - Διάρκεια ζωής της μπαταρίας;



## Πρακτικά Προβλήματα για ενσωμάτωση συστημάτων MIMO σε ασύρματα δίκτυα (3)

---

- Σηματοδοσία, Ολοκλήρωση Συστημάτων:
  - Ανάγκη ολοκλήρωσης και συμβατότητας συστημάτων MIMO με ήδη υπάρχοντα SISO δίκτυα.
  - Ειδικά μηνύματα RRC:
    - Τα τερματικά πρέπει να γνωρίζουν μέσω κατάλληλης σηματοδοσίας στο downlink αν ένα BTS υποστηρίζει MIMO.
    - Ομοίως για το BTS.
    - Κατά την εγκατάσταση κλήσης διευκρινίζονται οι δυνατότητες αυτές.
    - Τερματικά δίνουν πληροφορία στο BTS σχετικά με την ποιότητα του καναλιού.
    - Αυτά τα μηνύματα RRC αντιστοιχίζονται σε μηνύματα σηματοδοσίας στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων



## Πρακτικά Προβλήματα για ενσωμάτωση συστημάτων MIMO σε ασύρματα δίκτυα (4)

---

- Μοντέλο καναλιού MIMO και εκτίμηση καναλιού:
  - Η επίδοση του συστήματος MIMO εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μοντέλο καναλιού που χρησιμοποιείται.
  - Συσχέτιση μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης, εξάπλωση καθυστέρησης επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.
  - Εκτίμηση καναλιού στον πομπό μπορεί να επιφέρει βελτίωση στη χωρητικότητα του συστήματος (πχ μέσω water-filling)
  - Γνώση του πίνακα συσχέτισης του καναλιού στον πομπό μπορεί να βελτιστοποιήσει:
    - κωδικοποίηση καναλιού
    - Αριθμός bit σε συρμούς κατά την χωρική πολυπλεξία
    - σχεδιασμό ενισχυτών ισχύος.



## Συμπεράσματα-Επίλογος

---

- Συνοπτική παρουσίαση τεχνικών MIMO για ασύρματα δίκτυα.
- Μοντέλα διαύλων, σήματος και τεχνικές μετάδοσης
- Χωρητικότητα διαύλων MIMO
- Ενσωμάτωση συστημάτων MIMO σε πρακτικά ασύρματα δίκτυα.