



Department of Computer Engineering & Informatics



Laboratory for Signal Processing and Communications



Wireless and Mobile Communications

Key Technologies:

*Multiple-Input Multiple Output (MIMO) Communications
(or Space-Time Communications)*



Τι θα δούμε στο μάθημα



- Η έννοια της ποικιλομορφίας
 - Μακροσκοπικές, μικροσκοπικές
- Ποικιλομορφία ως προς το χρόνο, την συχνότητα, τον χώρο
- Προσεγγίσεις χωρικής ποικιλομορφίας
 - Λήψης (SIMO), εκπομπής (MISO)
- Συστήματα MIMO
 - Χωρητικότητα καναλιού
 - Προσανατολισμένη ποικιλομορφία
 - Πολυπλεξία και ποικιλομορφία
- Συνεργατικές επικοινωνίες

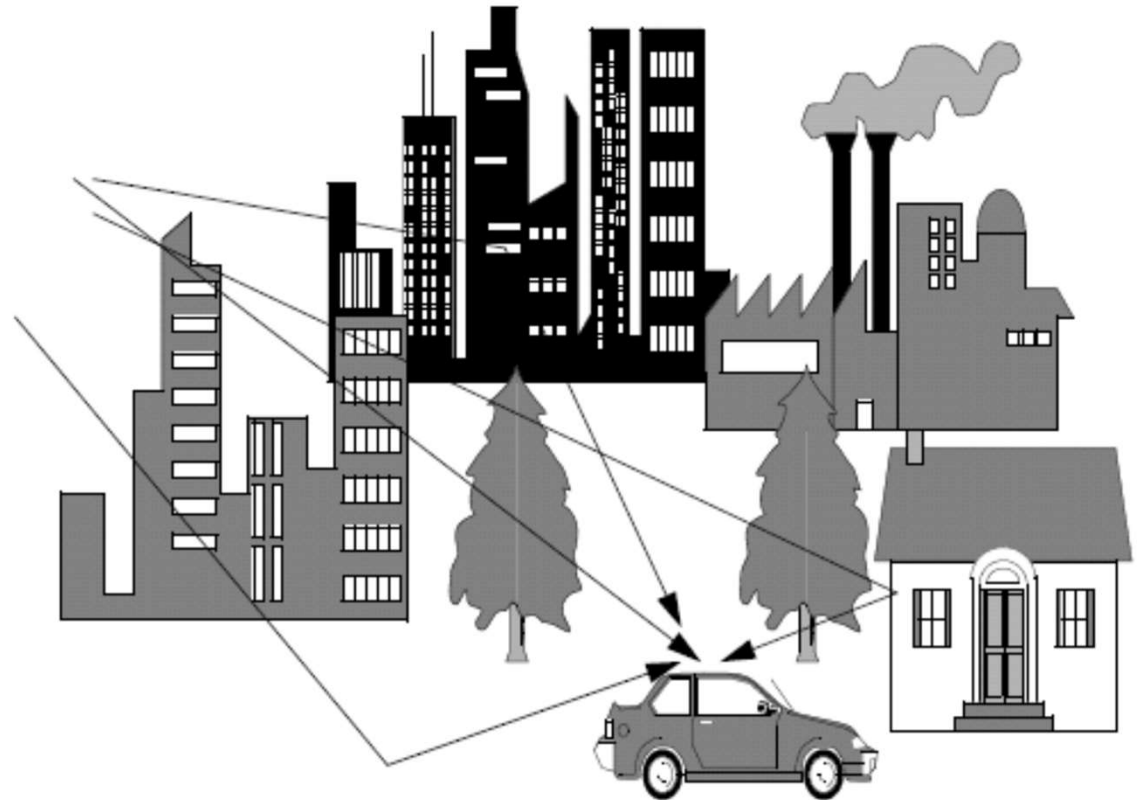


Multipath and Doppler



In wireless communications the propagation channel is characterized by:

- multipath propagation due to reflections and scattering
- Doppler effect due to relative motion



Resulting problems:

- Time spread of the channel impulse response \Rightarrow frequency selectivity
- Time variations: Fading \Rightarrow SNR variations



Μετάδοση δεδομένων σε ασύρματο κανάλι



- Η κρουστική απόκριση ενός καναλιού επίπεδης εξασθένησης μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα συντελεστή που είναι τ.μ.: $h \sim CN(0, \sigma_h^2)$.
- Η πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση με διαμόρφωση BPSK μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι:

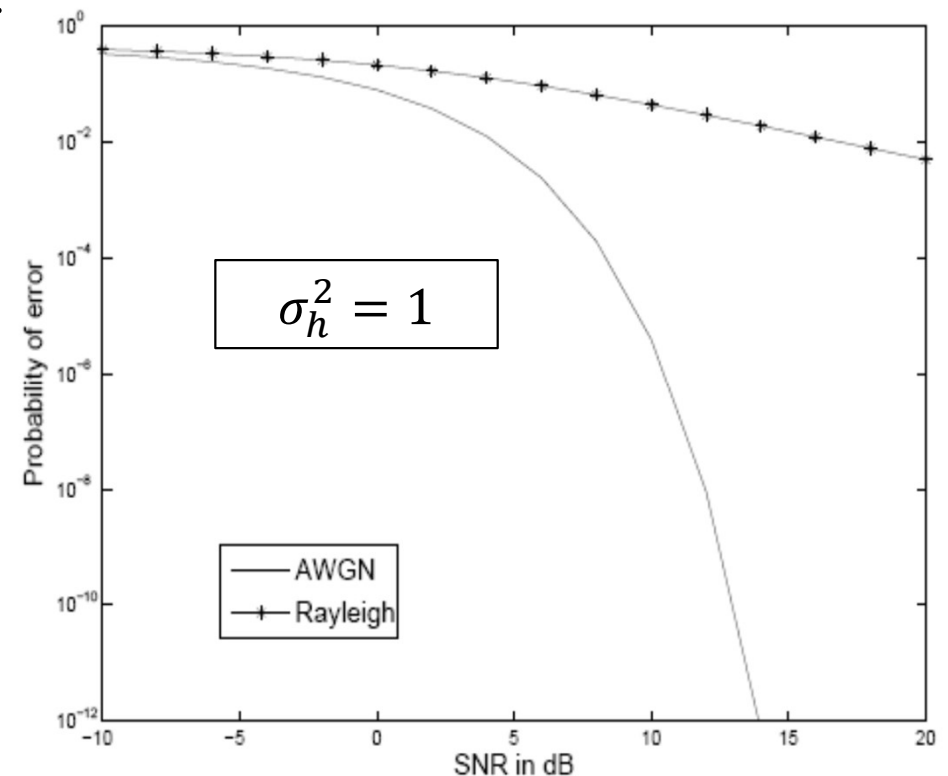
$$P(e) = E_h \left\{ Q \left(\sqrt{2|h|^2 SNR} \right) \right\} \sim \frac{1}{4SNR}$$

- Η πιθανότητα σφάλματος κατά την μετάδοση σε κανάλι AWGN (όπου $h=1$) είναι:

$$P(e_{AWGN}) = E_h \left\{ Q \left(\sqrt{2SNR} \right) \right\} \sim 0.5e^{-SNR}$$

- Λόγω της μεταβλητής του φύσης το ασύρματο κανάλι μπορεί να βρεθεί με σχετικά υψηλή πιθανότητα σε κακή κατάσταση (Deep Fading).
- Το αποτέλεσμα είναι η γραμμική εξάρτηση της πιθανότητας σφάλματος από το SNR.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$$





Τεχνικές ποικιλομορφίας



- Εκμεταλλεύονται την τυχαία φύση της ασύρματης διάδοσης βρίσκοντας ανεξάρτητες διαδρομές σήματος για την επικοινωνία, με διαφορετικά χαρακτηριστικά εξασθένησης.
- Η αξιοποίηση της ποικιλομορφίας γίνεται στον πομπό, στο δέκτη ή και στα δύο.
- **Μακροσκοπικές τεχνικές ποικιλομορφίας:** Χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της εξασθένησης ευρείας κλίμακας. Σε συνθήκες επισκίασης, το κινητό επιλέγει ανάμεσα στους σταθμούς βάσης εκείνον που δεν επισκιάζεται ή ο σταθμός βάσης επιλέγει ανάμεσα σε πολλές κεραιές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, εκείνη από την οποία λαμβάνει το ισχυρότερο σήμα.
- **Μικροσκοπικές τεχνικές ποικιλομορφίας:** Χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της εξασθένησης μικρής κλίμακας. Διακρίνονται σε τεχνικές ποικιλομορφίας στο χώρο (space diversity), στη συχνότητα (frequency diversity) ή στο χρόνο (time diversity).
- Υπάρχουν και άλλα είδη ποικιλομορφίας, όπως: **multiuser diversity, cooperative diversity, etc.**



Μικροσκοπικές τεχνικές ποικιλομορφίας



- **Space diversity (antenna diversity):** Χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία κεραίες που απέχουν μεταξύ τους μισό μήκος κύματος ή παραπάνω (κινητό) ή δεκάδες μήκη κύματος (σταθμός βάσης).
- **Frequency diversity:** Η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα σε περισσότερες από μία φέρουσες συχνότητες που απέχουν περισσότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού. Σημαντικό μειονέκτημα η σπατάλη εύρους ζώνης.
- **Time diversity:** Η πληροφορία μεταδίδεται επαναληπτικά σε χρονικά διαστήματα που απέχουν περισσότερο από το χρόνο συνοχής του καναλιού (π.χ. Δέκτης Rake στο DS-CDMA)



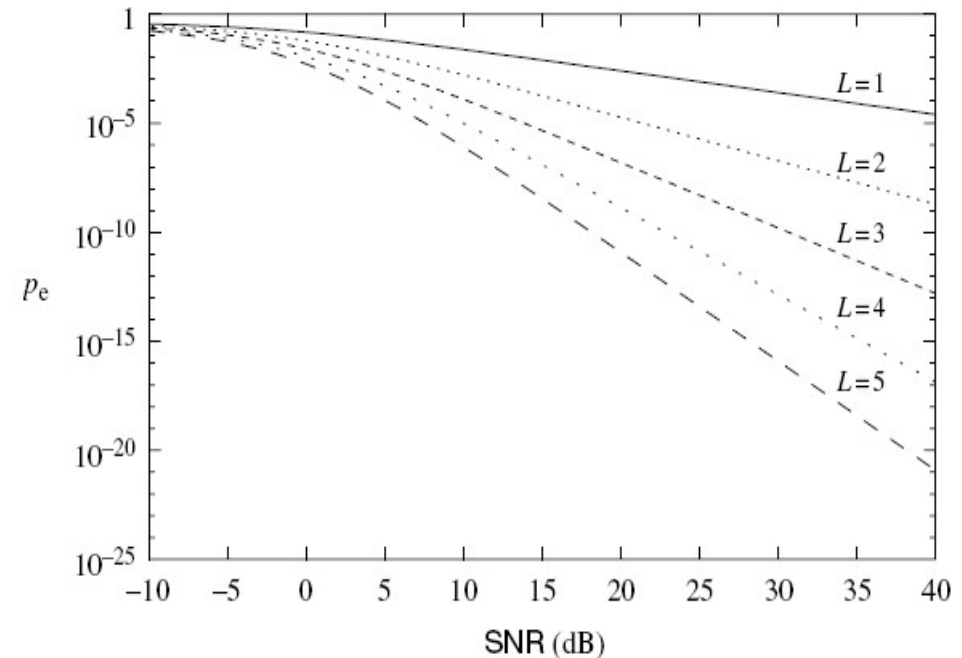
Χρονική ποικιλομορφία (με επανάληψη)



■ Επιτυγχάνει L ανεξάρτητες μεταδόσεις για κάθε σύμβολο με την επανάληψη της μετάδοσης κάθε συμβόλου σε L χρονικές στιγμές που απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον όσο ο χρόνος συνοχής του ασύρματου καναλιού (coherence time).

■ Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας καλείται και κωδικοποίηση επανάληψης (repetition coding).

■ Η μέθοδος είναι μη αποδοτική ως προς το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας αλλά μπορεί να μειώσει σημαντικά τη πιθανότητα σφάλματος



■ Στο δέκτη το σήμα σταθμίζεται κατάλληλα με ένα προσαρμοσμένο φίλτρο (matched filter) και μπορεί να αποδειχθεί ότι η πιθανότητα σφάλματος είναι:

$$P(e) = \binom{2L-1}{L} \frac{1}{(4SNR)^L}$$



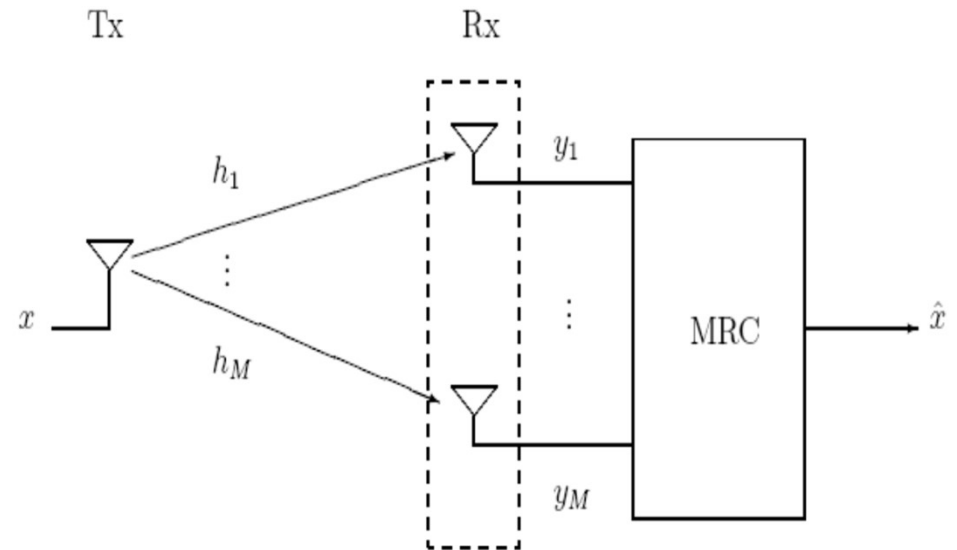
Χωρική ποικιλομορφία λήψης (1/2)

- Με την εισαγωγή πολλαπλών κεραιών στο δέκτη μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή διάδοση μέσω ανεξάρτητων μονοπατιών χωρίς απώλειες σε ρυθμό μετάδοσης
- Το συνολικό λαμβανόμενο SNR για ένα **προσαρμοσμένο δέκτη** μπορεί να εκφραστεί ως

array gain diversity gain

$$\|\mathbf{h}\|^2 SNR = (M \times SNR) \left(\frac{1}{M} \|\mathbf{h}\|^2 \right)$$

- Κέρδος διάταξης κεραιών (array gain):
Οι πολλαπλές κεραιές στο δέκτη έχουν σαν αποτέλεσμα την γραμμική αύξηση της λαμβανόμενης χρήσιμης ισχύος με τον αριθμό των κεραιών
- Κέρδος ποικιλομορφίας (diversity gain):
Λαμβάνοντας τη μέση τιμή σε πολλά ανεξάρτητα κανάλια η πιθανότητα το μέτρο του καναλιού να είναι μικρό γίνεται πολύ μικρή.



- Με προσαρμοσμένο δέκτη (MRC) το συνολικό σύστημα τείνει σε AWGN (για μεγάλο M)

$$\frac{1}{M} \|\mathbf{h}\|^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |h_i|^2 = 1$$

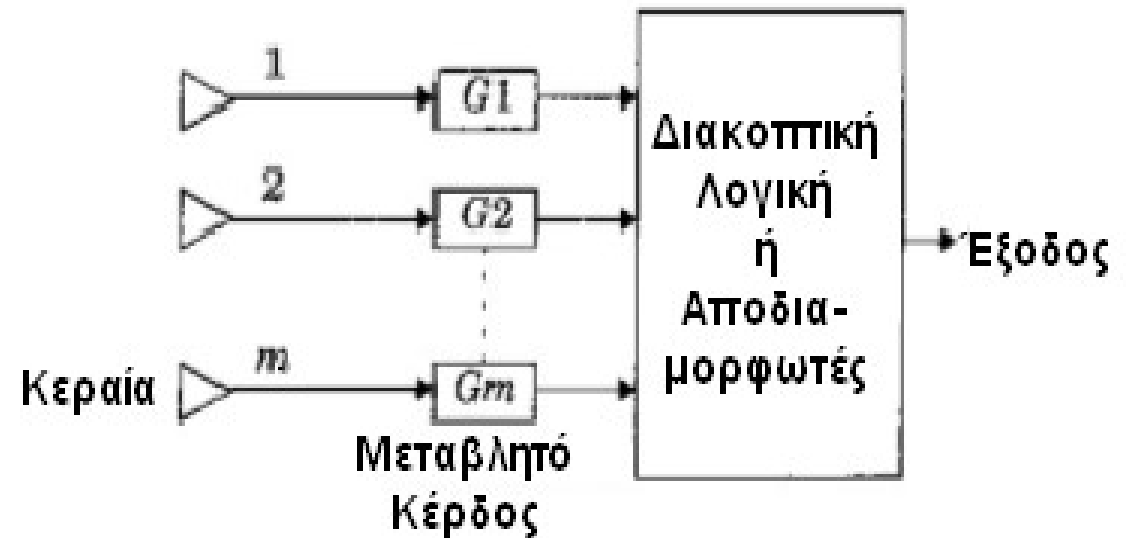
Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του δέκτη λόγω των πολλαπλών κεραιών και η δυσκολία τοποθέτησής τους σε συσκευές μικρού μεγέθους (π.χ. κινητά τηλέφωνα).



Χωρική ποικιλομορφία λήψης (2/2)



Γενικό διάγραμμα βαθμίδων ενός σχήματος με χωρική ποικιλομορφία



Κατηγορίες τεχνικών :

- Selection Diversity
(Ποικιλομορφία Επιλογής)
- Feedback Diversity / Scanning Diversity
(Ποικιλομορφία Ανατροφοδότησης / Σάρωσης)
- Maximal Ratio Combining Diversity
(Ποικιλομορφία Συνδυασμού Μέγιστου Λόγου)
- Equal Gain Combining Diversity
(Ποικιλομορφία Συνδυασμού Ίσου Κέρδους)



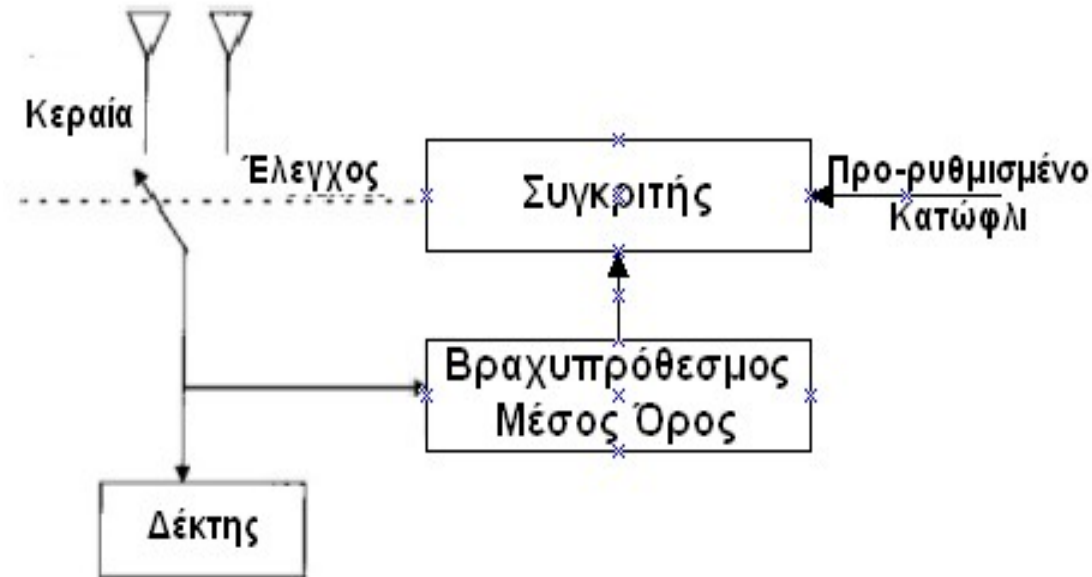
Ποικιλομορφία επιλογής (Selection Diversity)



- **Η απλούστερη τεχνική:** σε κάθε χρονική στιγμή επιλέγεται εκείνη η κεραία της οποίας η έξοδος παρουσιάζει το μεγαλύτερο SNR. Σε κάθε κλάδο υπάρχει δέκτης και επίσης απαιτείται η εφαρμογή κάποιας τεχνικής εκτίμησης του SNR.
- Η πιθανότητα να βρεθούν όλες οι κεραίες σε σημεία μεγάλης εξασθένησης (deep fading) είναι πολύ μικρή.
- Προσφέρει σημαντική βελτίωση στη σύνδεση χωρίς να απαιτεί πρόσθετη μεταδιδόμενη ισχύ ή πολύπλοκα συστήματα επεξεργασίας.
- Δεν είναι η βέλτιστη τεχνική, διότι γίνεται **σπατάλη πόρων** και δεν χρησιμοποιούνται όλοι οι κλάδοι ταυτόχρονα.



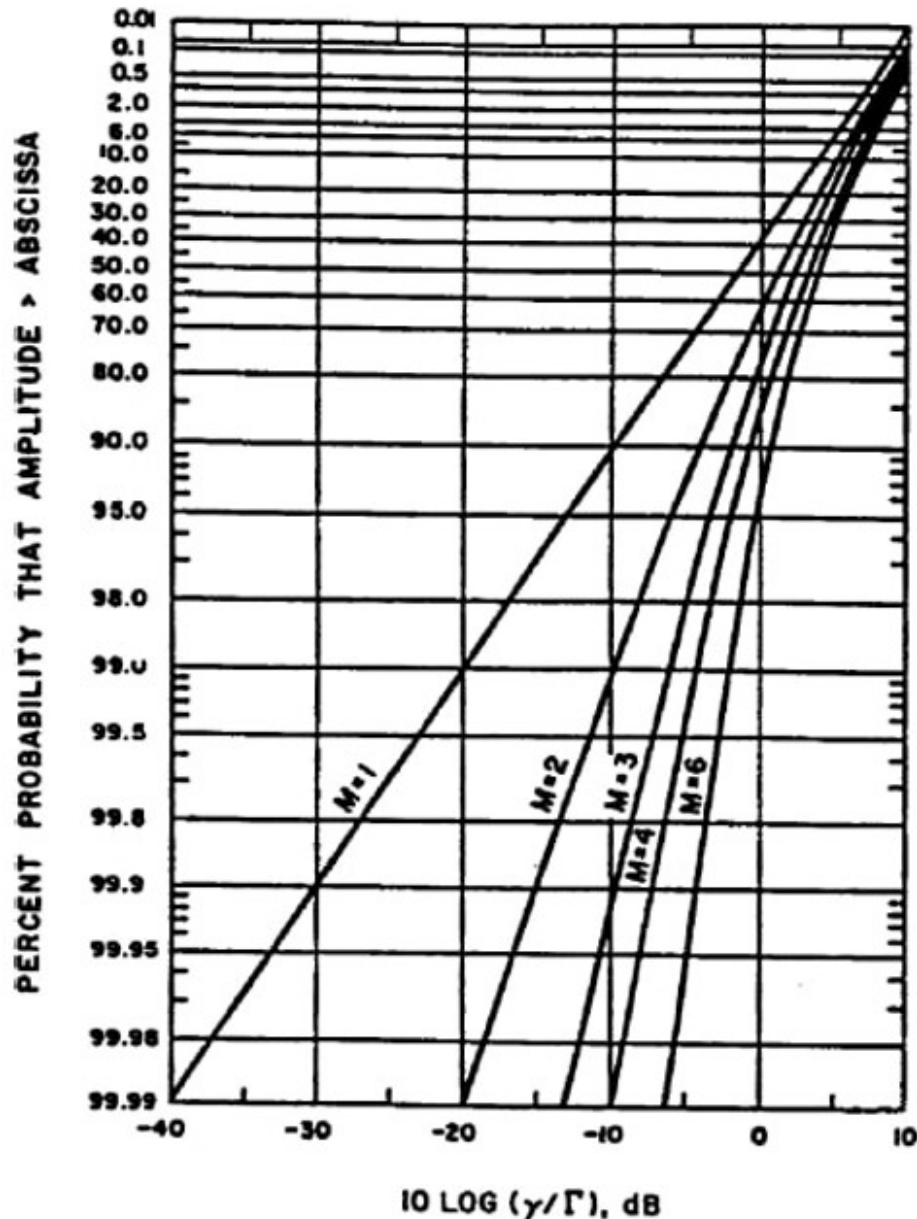
Ποικιλομορφία ανατροφοδότησης / σάρωσης (Feedback Diversity / Scanning Diversity)



- Τα σήματα από κάθε κεραία διατρέχονται με σταθερή σειρά μέχρι να βρεθεί κάποιο που βρίσκεται πάνω από κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι. Χρησιμοποιείται αυτό το σήμα μέχρι η ισχύς του να πέσει κάτω από το κατώφλι, οπότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται.
- Παρουσιάζει κάπως **χειρότερη απόδοση** αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι **απαιτείται μόνο ένας δέκτης** και επομένως είναι πολύ απλή στην υλοποίηση.



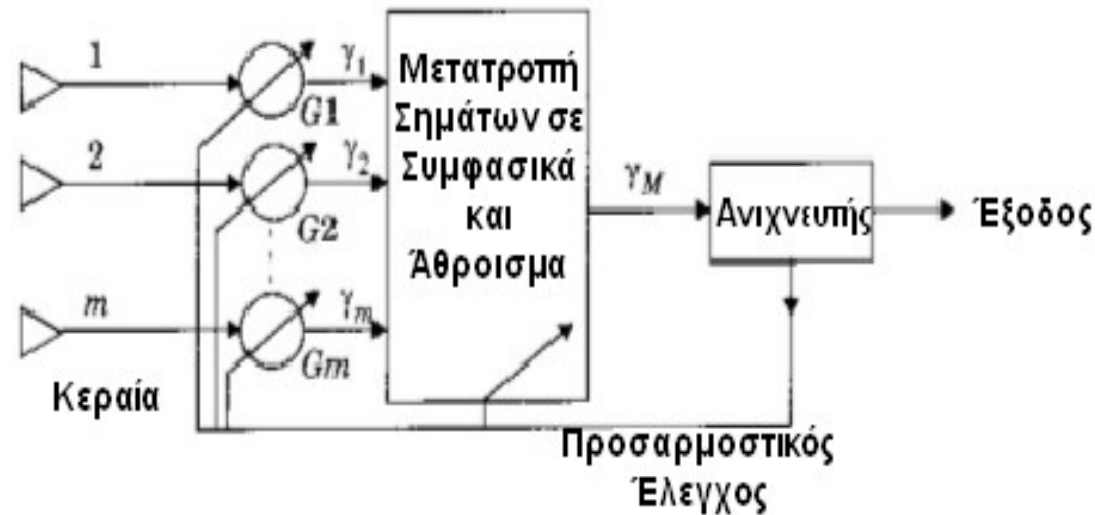
Γράφημα πιθανοτήτων υπέρβασης κατωφλίου



- Γ το μέσο SNR στην έξοδο κάθε κλάδου.
- γ το κατώφλι.
- Στο γράφημα έχει σχεδιαστεί η πιθανότητα το στιγμιαίο SNR σε τουλάχιστον ένα κλάδο να ξεπερνάει το κατώφλι γ , συναρτήσει του λόγου γ/Γ .
- Όταν το M αυξάνεται, τότε μπορεί να αυξηθεί και η τιμή του κατωφλιού γ (για την ίδια πιθανότητα υπέρβασής του).
- Η, αντίστροφα, για ίδια τιμή κατωφλιού θα έχουμε μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασής του όσο αυξάνεται το M.
- Π.χ. Όταν γ/Γ είναι -10dB τότε με μία κεραία η πιθανότητα να έχουμε έξοδο με $\text{SNR} > \gamma$ είναι μόλις 90% ενώ με 4 κεραίες είναι 99.99%.



Ποικιλομορφία συνδυασμού μέγιστου λόγου (Maximal Ration Combining – MRC)



- Η έξοδος είναι κατάλληλος γραμμικός συνδυασμός των εξόδων όλων των κεραιών.
- Το SNR εξόδου είναι το άθροισμα των επιμέρους SNR (!)
- Απαιτεί ένα δέκτη και ένα κύκλωμα χειρισμού φάσης για κάθε κεραία (τα σήματα πρέπει να γίνουν συμφασικά), καθώς και κάποιο κύκλωμα για τη ρύθμιση των βαρών.
- Απαιτεί επίσης και γνώση όλων των εμπλεκόμενων καναλιών.
- Είναι η καλύτερη από τις γραμμικές τεχνικές χωρικής ποικιλομορφίας αλλά και η πιο πολύπλοκη. Γίνεται πρακτική με την βελτίωση των τεχνικών επεξεργασίας σήματος και της τεχνολογίας των δεκτών.



Ποικιλομορφία συνδυασμού ίσου κέρδους (Equal Gain Combining Diversity)



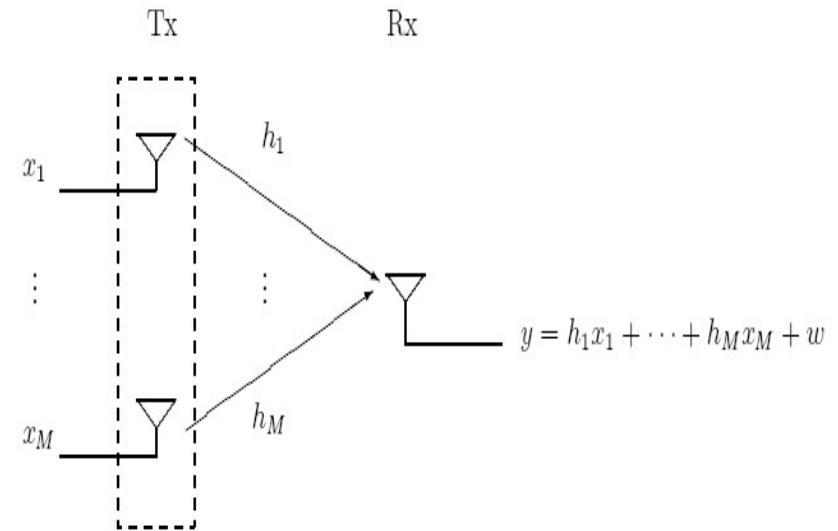
- Παρόμοια τεχνική με την τεχνική συνδυασμού μεγίστου λόγου, αλλά χωρίς μεταβλητά βάρη, για μεγαλύτερη ευκολία.
- Τα σήματα εξόδου των κλάδων απλώς γίνονται συμφασικά πριν προστεθούν.
- Η απόδοση είναι φυσικά κατώτερη (αλλά όχι κατά πολύ).



Χωρική ποικιλομορφία εκπομπής (1/2)



- Εναλλακτικά μπορούμε να τοποθετήσουμε πολλαπλές κεραιές στο πομπό.
- Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:
 - Το κανάλι είναι **γνωστό** στον πομπό
 - Το κανάλι είναι **άγνωστο** στον πομπό
- Στη πρώτη περίπτωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την βέλτιστη τεχνική της **προσανατολισμένης εκπομπής (transmit beamforming)** με προκωδικοποίηση των συμβόλων.
- Η τεχνική προσανατολισμένης εκπομπής επιτρέπει «ευθυγράμμιση» της εισόδου του καναλιού με το κανάλι και έχει ίδια επίδοση με το MRC.
- Όπως αναφέρθηκε και πριν (Χωρική Ποικιλομορφία Λήψης), το συνολικό λαμβανόμενο SNR θα είναι ίσο με: $\|\mathbf{h}\|^2 SNR$



Από τον πομπό ετοιμάζεται προς αποστολή ένα σύμβολο (x) σε κάθε time slot. Από το ένα αυτό σύμβολο δημιουργούνται M εκδοχές του που εκπέμπονται από τις αντίστοιχες κεραιές.

$$x' := \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \mathbf{h}^* x$$
$$y = \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} (h_1 h_1^* + \dots) x + w$$
$$= \|\mathbf{h}\| x + w$$



Χωρική ποικιλομορφία εκπομπής (2/2)



- Στη περίπτωση που δεν γνωρίζουμε το κανάλι στο πομπό μπορούμε επιτύχουμε το κέρδος ποικιλομορφίας με την χρήση *τεχνικών κωδικοποίησης χώρου - χρόνου (Space-Time Coding)*
- Οι κώδικες που χρησιμοποιούνται προκύπτουν με βάση κάποια σχεδιαστικά κριτήρια
- Επιτυγχάνουν το μέγιστο δυνατό κέρδος ποικιλομορφίας που παρέχει το σύστημα, χωρίς απώλειες ρυθμού μετάδοσης δεδομένων
- Η επίδοση τους όμως είναι χειρότερη από αυτή της προσανατολισμένης εκπομπής



Κωδικοποίηση Χώρου - Χρόνου



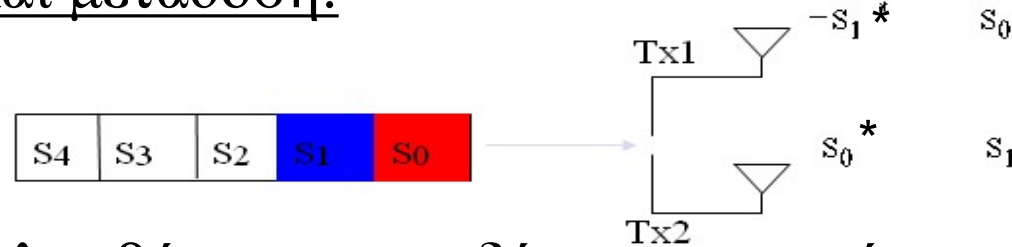
- Αύξηση της αξιοπιστίας της ασύρματης μετάδοσης.
- Εκμετάλλευση της χωρικής ποικιλομορφίας για παροχή κέρδους ποικιλομορφίας και κωδικοποίησης σε σχέση με την μη κωδικοποιημένη μετάδοση.
- **Κώδικες Μπλοκ:** Μεταδίδονται χρησιμοποιώντας μια ορθογώνια δομή μπλοκ η οποία δίνει την δυνατότητα απλής αποκωδικοποίησης στο δέκτη.
- **Κώδικες Trellis:** Επέκταση συνελκτικών κωδικών στην περίπτωση των πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης .



Η τεχνική Alamouti



■ Κωδικοποίηση και μετάδοση:



■ Τα δείγματα που λαμβάνονται στο δέκτη, στα αντίστοιχα time slots, είναι:

$$y_0 = h_1 s_0 + h_2 s_1 + n_0 \quad y_1 = -h_1 s_1^* + h_2 s_0^* + n_1$$

■ Αποκωδικοποίηση:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

■ Με Φώραση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (ουσιαστικά είναι MRC)

■ Επιτυγχάνεται αποσύζευξη των συμβόλων

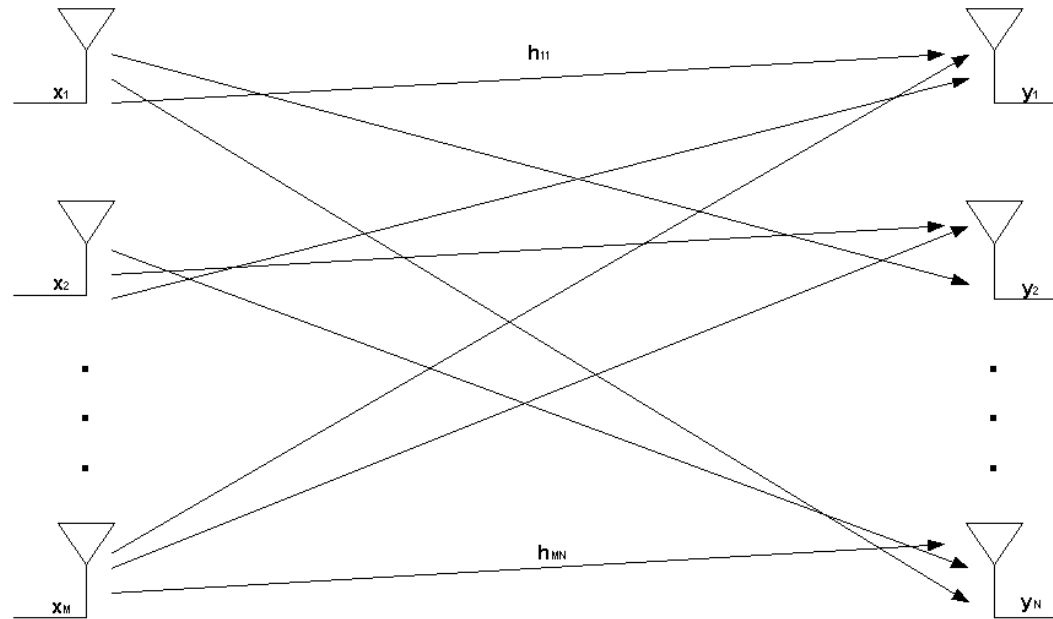
$$\mathbf{z} = [z_0 \ z_1]^T = \mathbf{H}^H \mathbf{y} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \mathbf{I}_2 \mathbf{s} + \tilde{\mathbf{n}}$$

■ Κέρδος ποικιλομορφίας: Ίδιο με “transmit beamforming” με 2 κεραίες

■ Υστέρηση κατά 3 dB (σε ισχύ) σε σχέση με το transmit beamforming (για ίδια ολική ισχύ εκπομπής έχει τη μισή ισχύ σε κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο)



Συστήματα MIMO



- Τα συστήματα MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) έχουν πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη (έστω M στον πομπό και N στον δέκτη).
- Οι κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κέρδος πολυπλεξίας ή/και κέρδος ποικιλομορφίας.
- Ο σχεδιασμός των συστημάτων MIMO μπορεί να είναι πολύπλοκος αφού απαιτεί διανυσματική επεξεργασία σήματος.
- Η απόδοση και η πολυπλοκότητα ενός συστήματος MIMO εξαρτάται από το τι είναι γνωστό για το κανάλι σε πομπό και σε δέκτη.



Χωρητικότητα MIMO (με κανάλι **άγνωστο** στον TX)



- Η **χωρητικότητα** του καναλιού MIMO (με άγνωστο κανάλι στον πομπό) έχει βρεθεί ότι δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{E_S}{MN_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right),$$

SISO channel (M=N=1)

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

όπου N_0 η πυκνότητα ισχύος του θορύβου

- Ανάλυση της χωρητικότητας μέσω διάσπασης του καναλιού MIMO σε $Rank(\mathbf{H})$ παράλληλα (ανεξάρτητα) υπο-κανάλια.

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{E_S}{MN_0} \mathbf{\Lambda} \right) = \sum_{i=1}^{Rank(\mathbf{H})} \log_2 \left(1 + \frac{E_S}{MN_0} \lambda_i \right)$$

- Παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^H = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^H, \quad \mathbf{H}: N \times M \text{ πίνακας του καναλιού MIMO}$$

$$\det(\mathbf{I}_N + \mathbf{A}\mathbf{B}) = \det(\mathbf{I}_M + \mathbf{B}\mathbf{A}), \quad \mathbf{A}: N \times M, \mathbf{B}: M \times N$$

$$\det(\text{diag}([a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_M])) = a_1 a_2 \cdots a_M$$

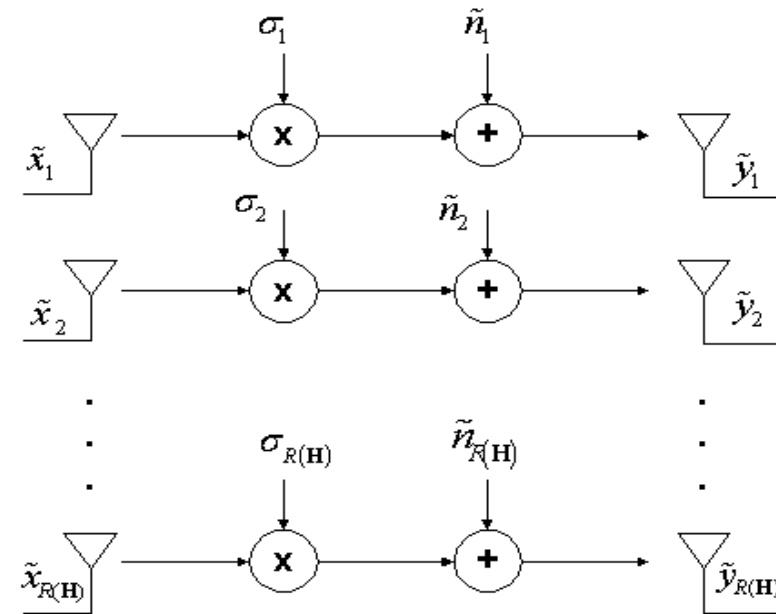
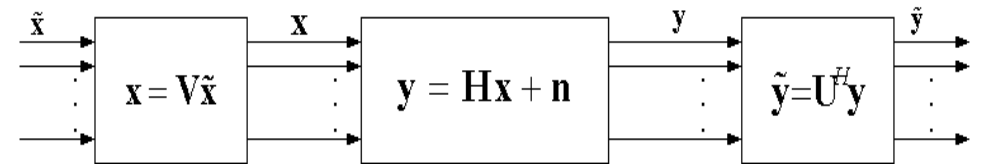


Χωρητικότητα MIMO (με κανάλι γνωστό στον TX) (1/2)



- Διάσπαση του καναλιού MIMO σε $Rank(\mathbf{H})$ παράλληλα υπο-κανάλια με προ-κωδικοποίηση στον πομπό και αντίστοιχη “μετα-κωδικοποίηση” στον δέκτη.
- Ο αριθμός των συμβόλων που μεταδίδονται ταυτόχρονα είναι ίσος με $Rank(\mathbf{H})$ (κέρδος πολυπλεξίας).
- Προκύπτουν $Rank(\mathbf{H}) < \min(M, N)$ ανεξάρτητα κανάλια με κέρδος σ_i (σ_i : i -οστη ιδιάζουσα τιμή του \mathbf{H}).
- Η ανάλυση της χωρητικότητας του συστήματος των ανεξάρτητων καναλιών περιγράφεται στην επόμενη διαφάνεια

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H$$





Χωρητικότητα MIMO (με κανάλι γνωστό στον TX) (2/2)

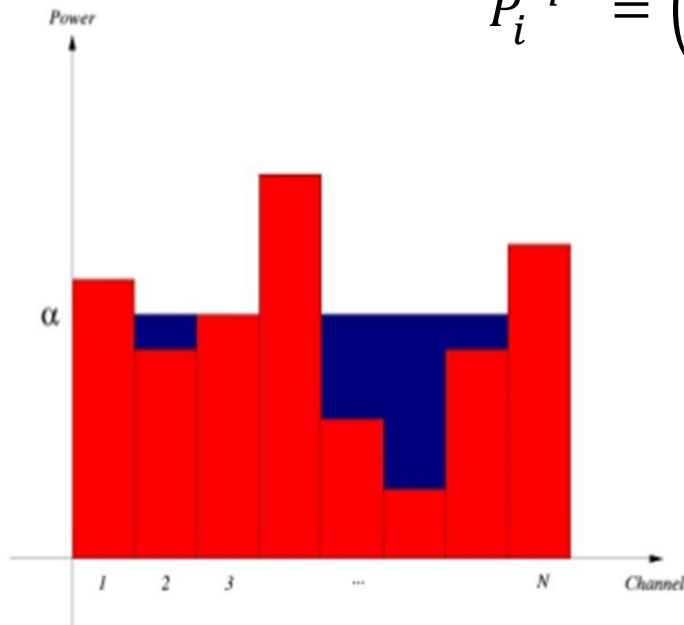


- Για στατικά κανάλια με πλήρη CSI σε πομπό και δέκτη, είναι βέλτιστο να μοιράσουμε την ισχύ μετάδοσης με εφαρμογή του αλγόριθμου **water-filling** στον χώρο:

$$C = \max_{P_i: \sum_i P_i = P} \sum_{i=1}^{\text{Rank}(H)} \log_2 \left(1 + \frac{P_i E_S \sigma_i}{M N_0} \right)$$

$$P_i^{\text{opt}} = \left(\alpha - \frac{M N_0}{E_S \sigma_i} \right)_+, \quad (x)_+ = \begin{cases} x, & \text{if } x \geq 0 \\ 0, & \text{if } x \leq 0 \end{cases}$$

Το α είναι σταθερά που σχετίζεται με την ολική ισχύ που διαθέτουμε

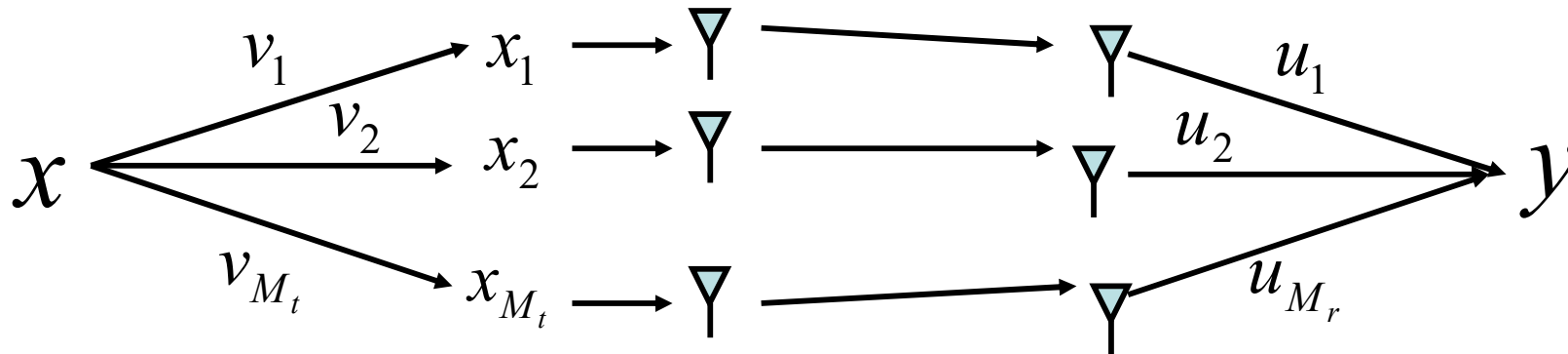


Δηλαδή, στα καλύτερα υπο-κανάλια (modes) εκπέμπουμε με μεγαλύτερη ισχύ.

Ενδεχομένως υπάρχουν modes που μένουν αχρησιμοποίητα.



Προσανατολισμένη επικοινωνία με μέγιστο κέρδος ποικιλομορφίας



$$y = \mathbf{u}^H \mathbf{H} \mathbf{v} x + \mathbf{u}^H \mathbf{n}$$

Τα ιδιάζοντα διανύσματα \mathbf{u} και \mathbf{v} αντιστοιχούν στη μέγιστη ιδιάζουσα τιμή

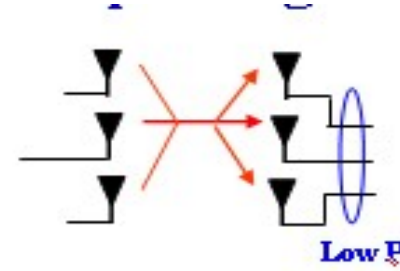
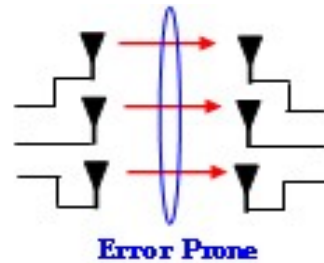
- Σε μία δεδομένη χρονική στιγμή όλες οι κεραιές μεταδίδουν το ίδιο σύμβολο.
- Μετασχηματίζει το σύστημα MIMO σε ένα σύστημα SISO με ποικιλομορφία.
- Κέρδος ποικιλομορφίας MN (το μέγιστο που μπορεί να επιτευχθεί).
- Απλοποιημένη κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση.
- Πρέπει να έχουμε επαρκή γνώση της κατάστασης του καναλιού σε πομπό και δέκτη για βέλτιστα αποτελέσματα.



Ποικιλομορφία vs Πολυπλεξία



- Χρήση των κεραιών είτε για κέρδος ποικιλομορφίας είτε για κέρδος πολυπλεξίας. Το τι είναι καλύτερο καθορίζεται από τις ανάγκες της εφαρμογής.

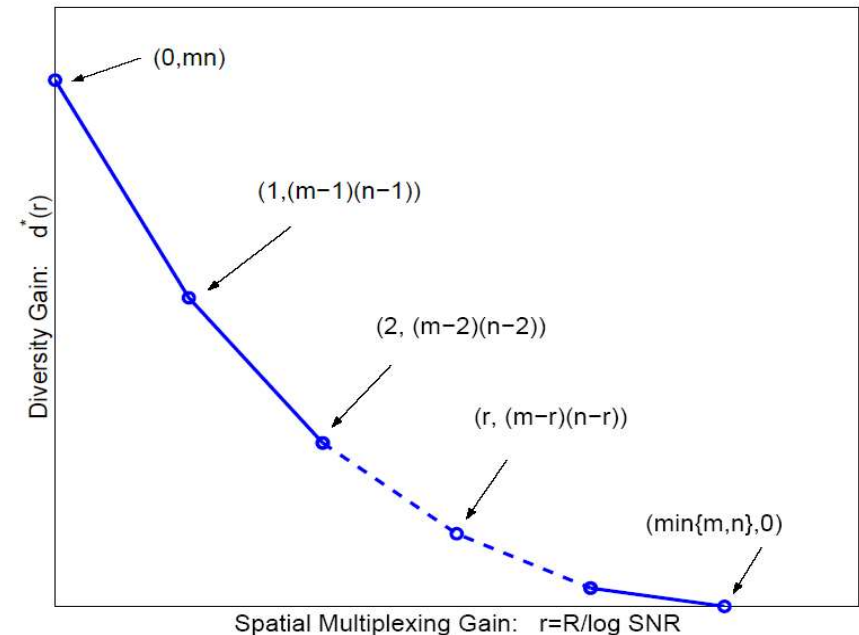


- Tradeoffs μεταξύ ποικιλομορφίας και πολυπλεξίας

$$\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log P_e(SNR)}{\log SNR} = -d$$

$$\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{R(SNR)}{\log SNR} = r$$

$$d^*(r) = (M - r)(N - r)$$

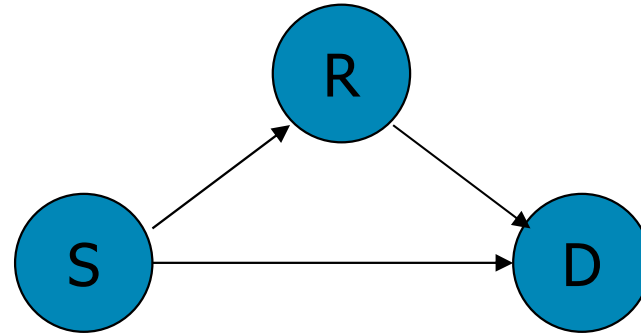




Συνεργατικές επικοινωνίες (1/2)



Το πιο απλό
σχήμα
συνεργασίας



S: Source

R: Relay

D: Destination

- Το Relay συνεργάζεται με το Source για να βοηθήσει την επικοινωνία του με το Destination (κατανεμημένο MIMO).
- Οι θεωρητικές μελέτες πάνω στο ζήτημα αυτό ξεκίνησαν ήδη από τη δεκαετία του '70 (van der Meulen, Cover – El Gamal).
- Η ανάπτυξη των MIMO δημιούργησε νέο αυξανόμενο ενδιαφέρον για το θέμα αυτό κατά την τελευταία δεκαετία+.
- Το αρχικό θεωρητικό ερώτημα που αφορά την χωρητικότητα του συστήματος παραμένει αναπάντητο.
- Ωστόσο αυτό δεν εμπόδισε την ανάπτυξη χρήσιμων συνεργατικών τεχνικών επικοινωνίας (που βασίστηκαν σε προσεγγιστικές θεωρητικές επιδόσεις).



Συνεργατικές επικοινωνίες (2/2)



- Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί είναι:
 - Half-duplex (το R δεν επιτρέπεται να λαμβάνει και να μεταδίδει ταυτόχρονα)
 - Ορθογώνια (δεν υπάρχει παρεμβολή μεταξύ των μεταδόσεων $S \rightarrow D$ και $R \rightarrow D$)
 - Σημαντική έρευνα τελευταία και σε πρωτόκολλα Full-Duplex

Βασικά πρωτόκολλα:

- Time Slot 1:
 - Το S μεταδίδει μια κωδική λέξη στο D (η οποία λαμβάνεται και από το R)
- Time Slot 2 :
 - Το R αποκωδικοποιεί, επανακωδικοποιεί και αναμεταδίδει την κωδική λέξη (**decode-and-forward**)
 - Το R ενισχύει το ληφθέν σήμα και το αναμεταδίδει (**amplify-and-forward**)
 - Όπως η πρώτη περίπτωση, αλλά όταν το R δεν είναι σε θέση να κάνει καλή αποκωδικοποίηση τότε δεν στέλνει τίποτε (**selective decode-and-forward**)
 - Το S μπορεί είτε να στείλει είτε όχι μια νέα κωδική λέξη (διαφορετικές περιπτώσεις πρωτοκόλλων)



MIMO beamforming

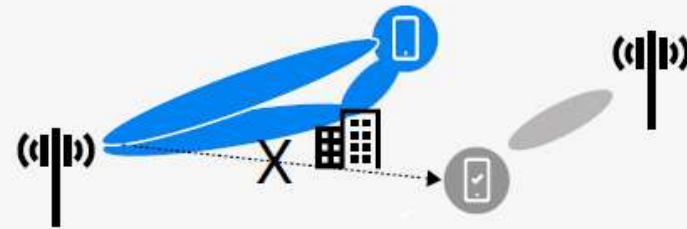
A. Beamforming

Serve single users by directing the energy toward the user.



B. Generalized beamforming

Serve single user through sending the same data stream in different directions and possibly forming zeros (nulls) in directions of other users.



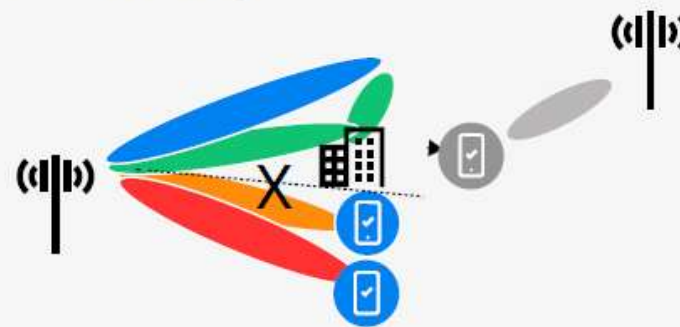
C. Single-user MIMO

Increase data rates by transmitting several data streams to a user.



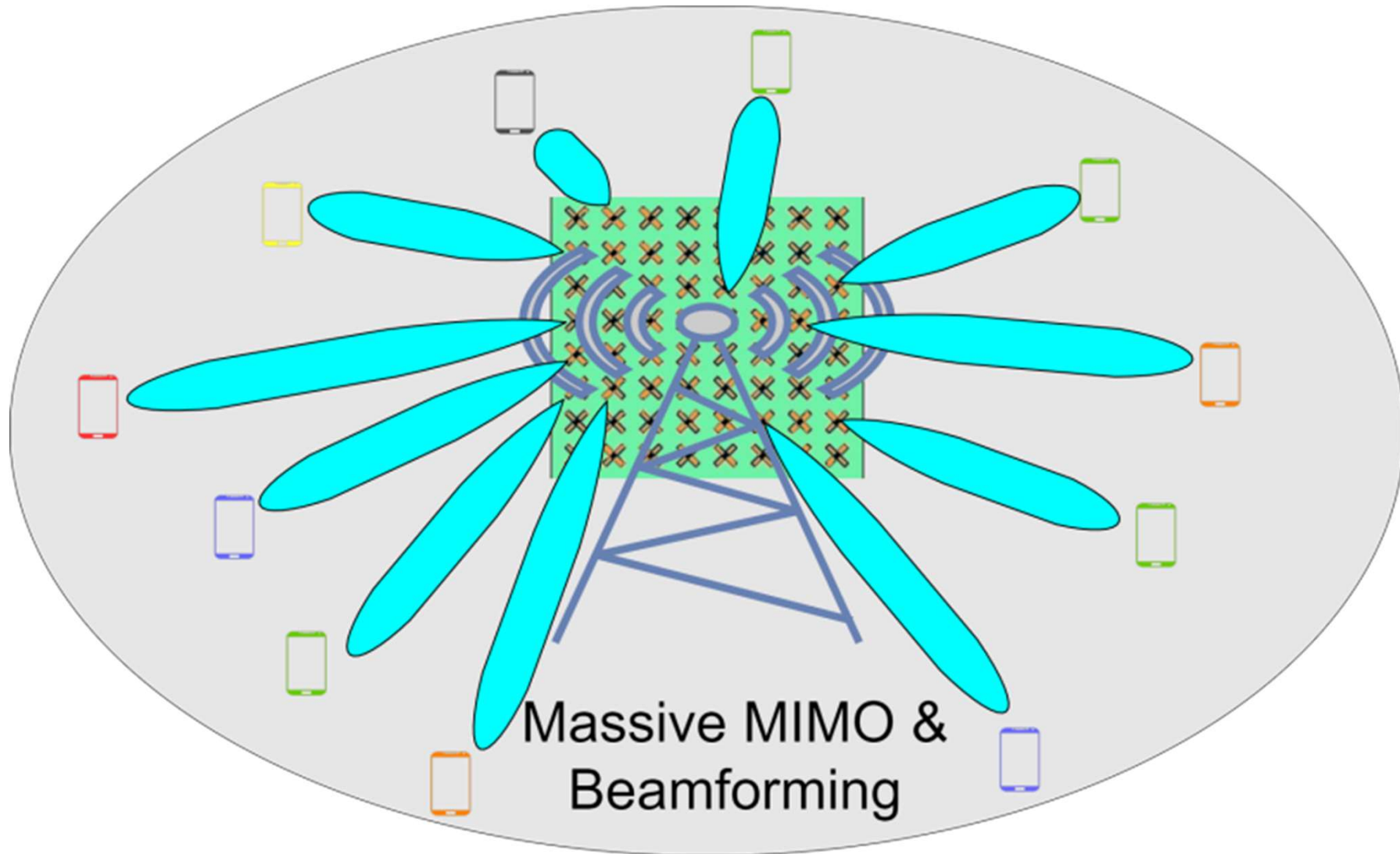
D. Multi-user MIMO

At high load, serve more users simultaneously.



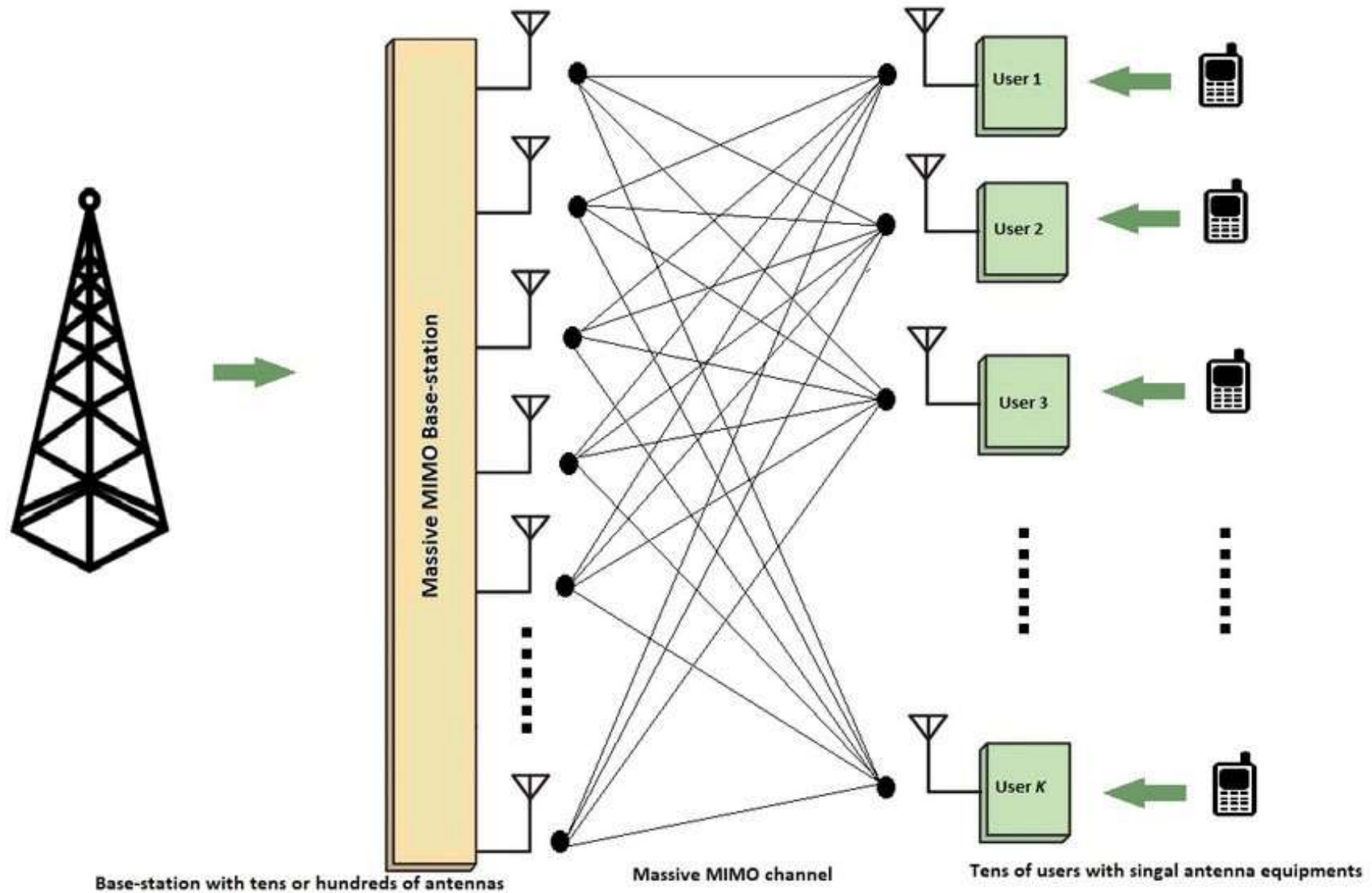


Massive MIMO





Multuser Massive MIMO





Σύγχρονες κατευθύνσεις σχετικές με MIMO



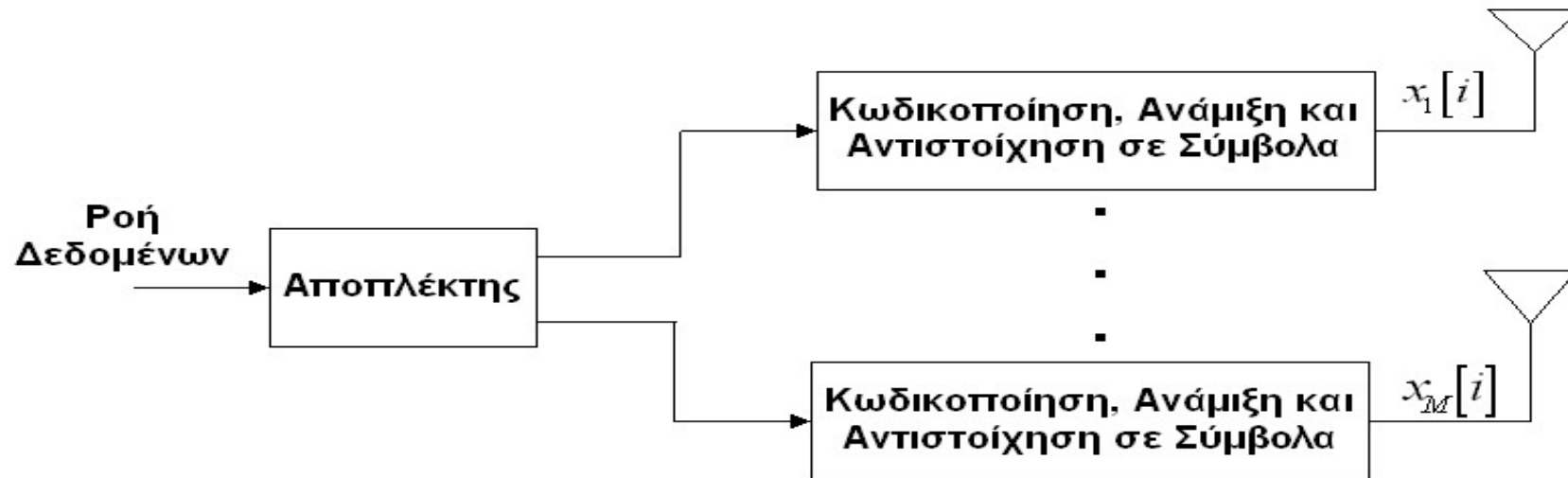
- Massive MIMO
- Reconfigurable Intelligent Surfaces
- Cooperative Communications (between users)
- Cell-free Communications (COMP transmission)
- Interference Management (ειδική περίπτωση: το Interference Alignment)
- Millimeter Wave Comm. , $f_c \rightarrow 30 - 300\text{GHz}$, $BW \rightarrow O(10\text{GHz})$!



- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης πληρώνοντας σε αξιοπιστία (diversity – multiplexing trade-off) σε συστήματα MIMO.
- Για πλήρες κέρδος πολυπλεξίας δεν έχουμε κέρδος ποικιλομορφίας εκπομπής για μη κωδικοποιημένη BLAST.
- Κατάλληλη μόνο για υψηλό SNR.
- Μεγάλο πρόβλημα αποτελεί η αποκωδικοποίηση.
 - Η βέλτιστη τεχνική αποκωδικοποίησης έχει μεγάλη πολυπλοκότητα.
 - Χρησιμοποιούνται υπο-βέλτιστες μέθοδοι (successive interference cancellation).
- Απαιτεί $N > M$



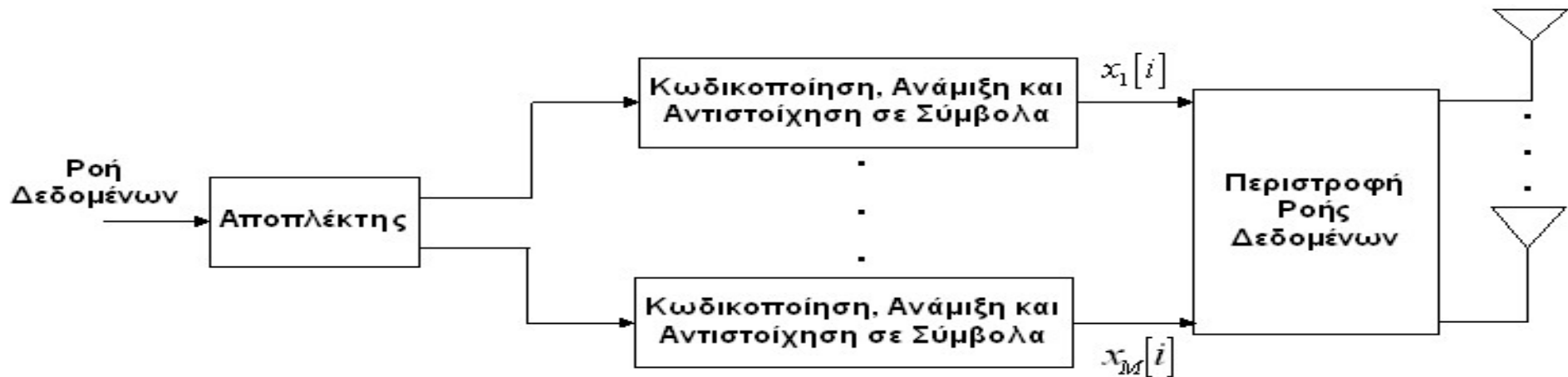
V-BLAST (OXI)



- Χωρικός Ρυθμός: M
- Μέγιστο Κέρδος Ποικιλομορφίας: Μπορεί να είναι και μεγαλύτερο του M
- Κέρδος διάταξης (array gain): N
- Κέρδος Κωδικοποίησης: Εξαρτάται από τον κωδικοποιητή



D-BLAST (OXI)



- Χωρικός Ρυθμός: M
- Μέγιστο Κέρδος Ποικιλομορφίας: Μπορεί να είναι ακόμη και MN
- Κέρδος διάταξης (array gain): N
- Κέρδος Κωδικοποίησης: Εξαρτάται από τον κωδικοποιητή
- Σπατάλη εύρους ζώνης



Η Πολυπλοκότητα του Δέκτη (ΟΧΙ)



- M κεραιές εκπομπής και ένας αστερισμός με 2^q σημεία αντιστοιχούν σε 2^{Mq} πιθανούς συνδυασμούς συμβόλων για κάθε χρονική στιγμή αν χρησιμοποιηθεί αποκωδικοποιητής μέγιστης πιθανοφάνειας.
- Η αποκωδικοποίηση σφαίρας (sphere decoding) είναι μια εναλλακτική προσέγγιση με χαμηλότερη πολυπλοκότητα.
- Χρήση τεχνικών ισοστάθμισης στο δέκτη όπως η ZF ή η MMSE με γραμμική πολυπλοκότητα στον αριθμό των κεραιών εκπομπής.
- Συνδυασμός DFE με ZF ή MMSE για την ακύρωση της παρεμβολής των συμβόλων που ανιχνεύθηκαν.
- Διάταξη των συμβόλων που πρόκειται να ανιχνευθούν κατά φθίνουσα τιμή του SNR για την επίτευξη της βέλτιστης επίδοσης.
- Ο μεγαλύτερος υπολογιστικός φόρτος τέτοιων δεκτών οφείλεται στο τρόπο διάταξης.