

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

Εργαστήριο Επεξεργασίας Σημάτων και Τηλεπικοινωνιών



Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

Μέρος Α: Τηλεπικοινωνιακά Θέματα:

Πολλαπλές Κεραίες και Επικοινωνίες Χώρου - Χρόνου



Μετάδοση Δεδομένων σε Ασύρματο Κανάλι



- Η κρουστική απόκριση ενός καναλιού επίπεδης εξασθένησης μπορεί να περιγραφεί από ένα συντελεστή:
$$h : C N (0, s_h^2)$$

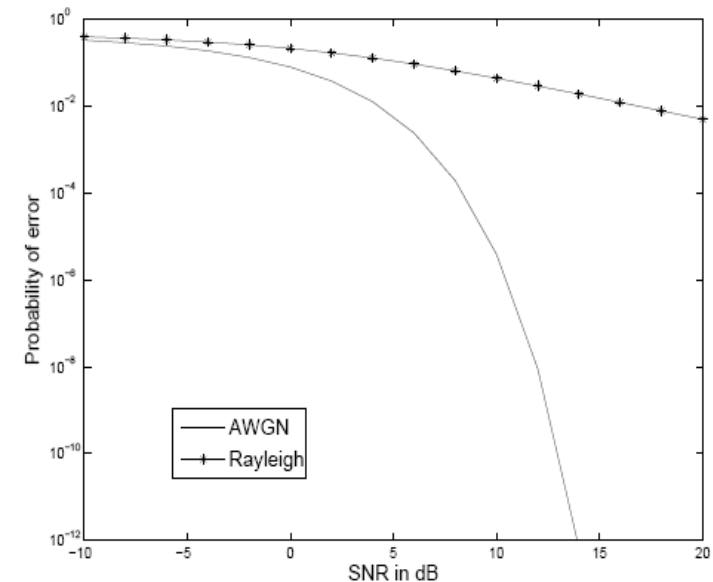
- Η πιθανότητα σφάλματος κατά τη μετάδοση με διαμόρφωση BPSK μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι:

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

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

$$P(e_{\text{AWGN}}) = Q(\sqrt{2\text{SNR}}) \approx \frac{1}{2} e^{-\text{SNR}}$$

- 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.



$$s_h^2 = 1$$



Τεχνικές Ποικιλομορφίας (ή Διαφοροποίησης)



- Εκμεταλλεύονται την τυχαία φύση της ασύρματης διάδοσης βρίσκοντας ανεξάρτητες διαδρομές σήματος για την επικοινωνία, με διαφορετικά χαρακτηριστικά εξασθένησης.
- Η αξιοποίηση της ποικιλομορφίας μπορεί να γίνει 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 κεραίες που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, εκείνη που 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).



Μικροσκοπικές τεχνικές ποικιλομορφίας



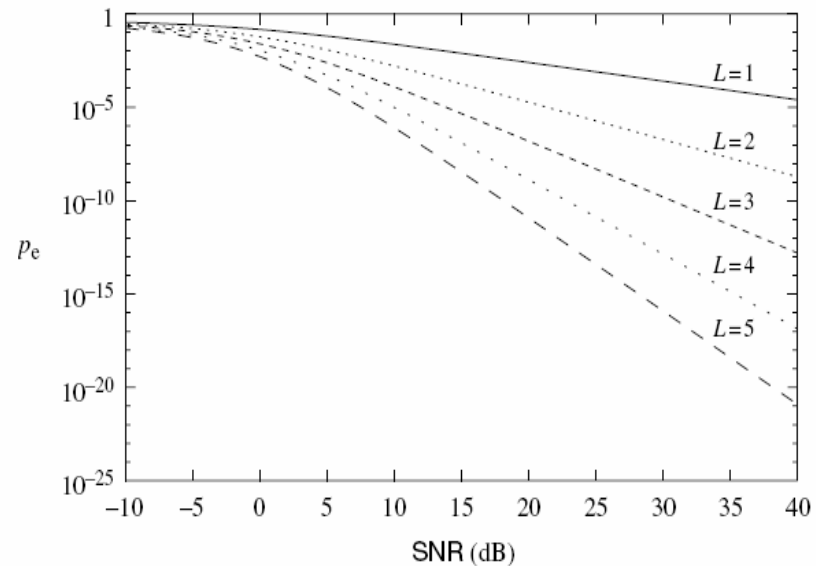
- **Space diversity (antenna diversity):** Χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία κεραίες που απέχουν μεταξύ τους μισό μήκος κύματος ή παραπάνω (κινητό) ή δεκάδες μήκη κύματος (σταθμός βάσης).
- **Frequency diversity:** Η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα σε περισσότερες από μία φέρουσες συχνότητες που 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 SS-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 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:

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

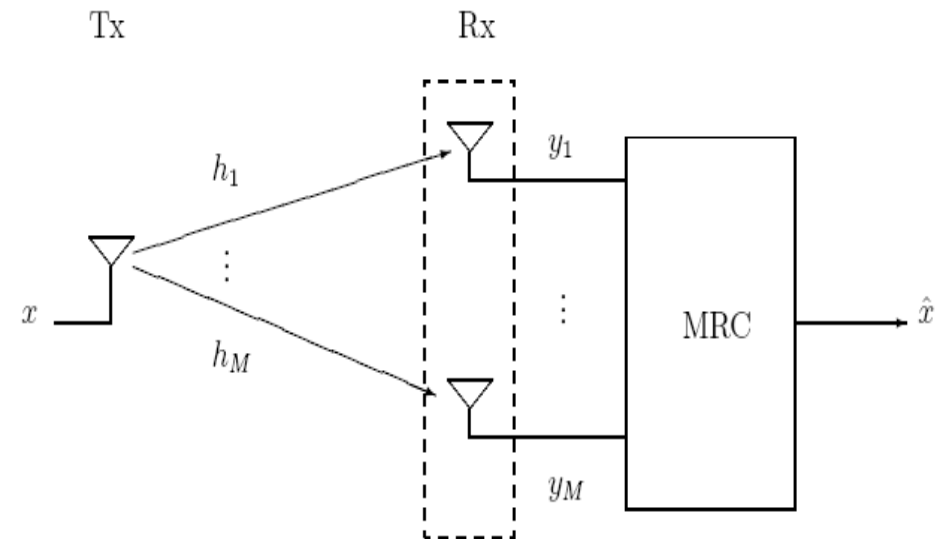


Χωρική Ποικιλομορφία Λήψης (1/2)

- 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

$$\|h\|^2 \text{SNR} = \underbrace{M \text{SNR}}_{\text{array gain}} \underbrace{\frac{1}{M} \|h\|^2}_{\text{diversity gain}}$$

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



- Για μεγάλο M, το συνολικό σύστημα μετατρέπεται σε AWGN

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

- Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του δέκτη λόγω των πολλαπλών κεραιών 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)



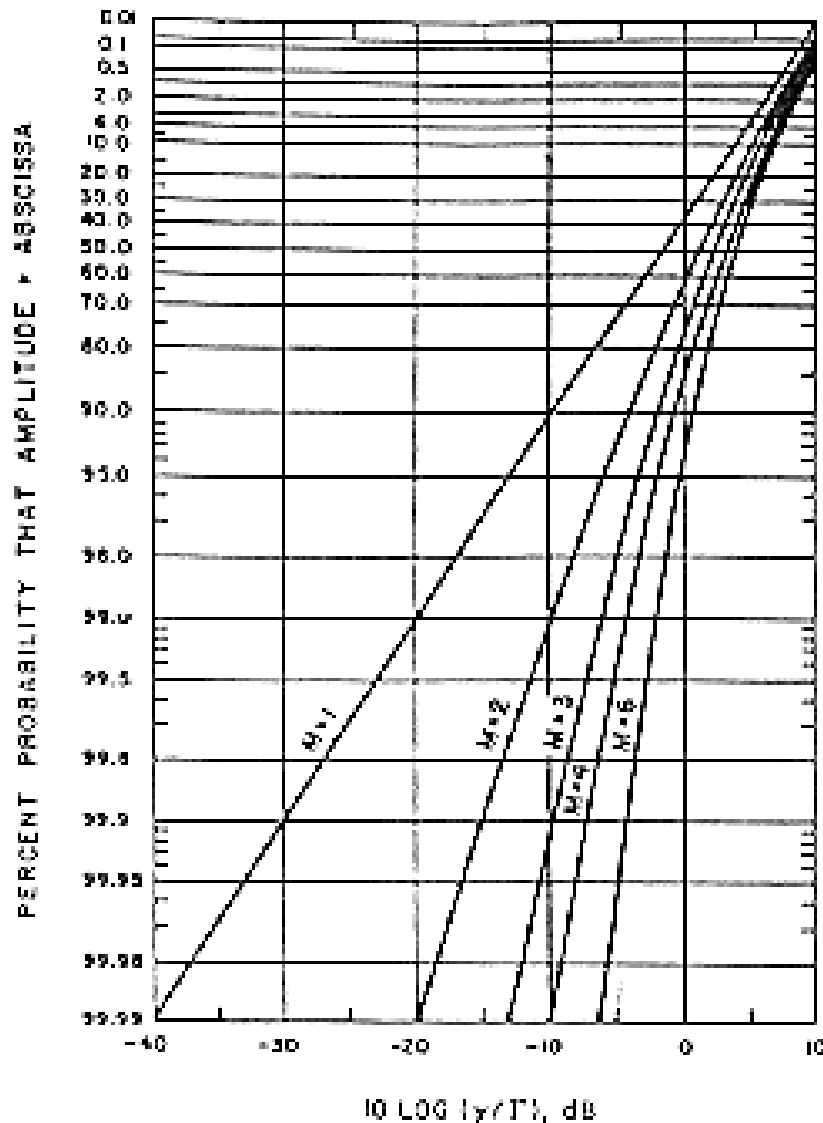
Ποικιλομορφία Επιλογής (1/2)

- Η απλούστερη τεχνική: σε κάθε χρονική στιγμή επιλέγεται εκείνη η κεραία της οποίας η έξοδος παρουσιάζει το μεγαλύτερο SNR.
- Η πιθανότητα να βρεθούν όλες οι κεραίες σε σημεία μεγάλης εξασθένησης είναι πολύ μικρή.
- Προσφέρει σημαντική βελτίωση στη σύνδεση χωρίς να απαιτεί πρόσθετη μεταδιδόμενη ισχύ ή πολύπλοκα κυκλώματα.
- Δεν είναι η βέλτιστη τεχνική, γιατί γίνεται σπατάλη πόρων, καθώς δεν χρησιμοποιούνται όλοι οι κλάδοι ταυτόχρονα.



Ποικιλομορφία Επιλογής (2/2)

Γράφημα πιθανοτήτων υπέρβασης ενός κατώφλιου

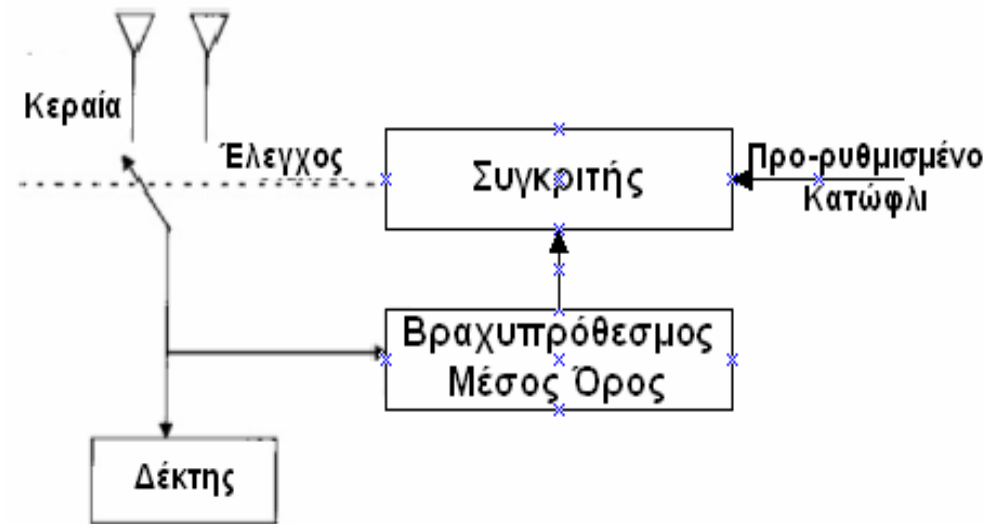


- G το μέσο SNR στην έξοδο κάθε κλάδου
- γ το κατώφλι

Έχει σχεδιαστεί η πιθανότητα το στιγμιαίο SNR σε τουλάχιστον ένα κλάδο να ξεπερνάει το κατώφλι γ , συναρτήσει του λόγου γ/G .



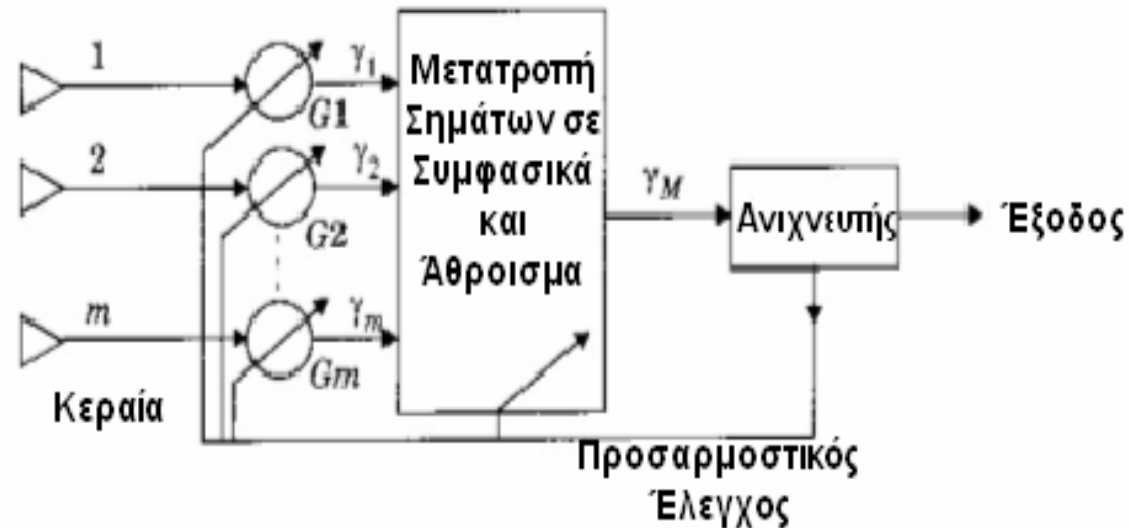
Ποικιλομορφία Ανατροφοδότησης /Σάρωσης



- 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.



Ποικιλομορφία Συνδυασμού Μέγιστου Λόγου



- Η έξοδος είναι κατάλληλος γραμμικός συνδυασμός των εξόδων όλων των κεραιών.
- Το SNR εξόδου είναι το άθροισμα των επιμέρους SNRs.
- 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.
- 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



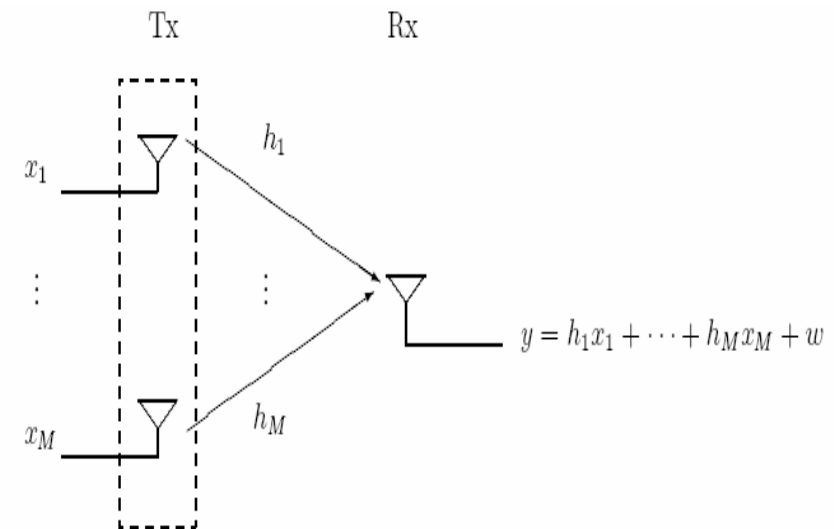
- Παρόμοια τεχνική με τεχνική συνδυασμού μεγίστου λόγου, αλλά χωρίς μεταβλητά βάρη, για μεγαλύτερη ευκολία.
- Τα σήματα εξόδου των κλάδων απλώς γίνονται συμφασικά πριν προστεθούν.
- Η απόδοση είναι οριακά κατώτερη.



Χωρική Ποικιλομορφία Εκπομπής (1/2)



- Εναλλακτικά μπορούμε να τοποθετήσουμε πολλαπλές κεραίες στο πομπό.
- Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:
 - Γνώση του καναλιού στο πομπό
 - Το κανάλι είναι άγνωστο στο πομπό
- Στη πρώτη περίπτωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την βέλτιστη τεχνική της *προσανατολισμένης εκπομπής* (transmit beamforming)
- Η τεχνική προσανατολισμένης εκπομπής επιτρέπει «ευθυγράμμιση» της εισόδου του καναλιού με το κανάλι και έχει ίδια επίδοση με το MRC



$$\mathbf{x} := \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \mathbf{h}^* x$$

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



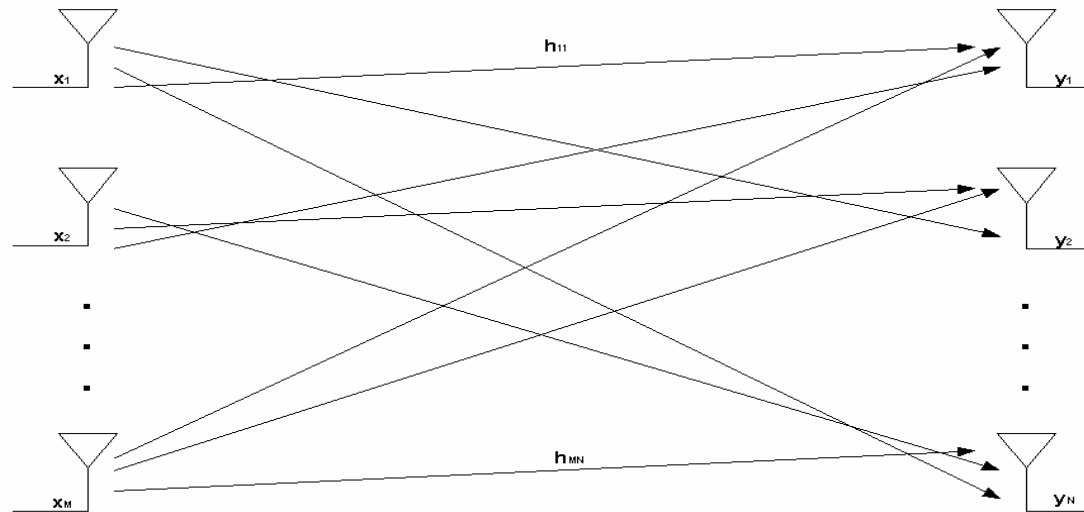
Χωρική Ποικιλομορφία Εκπομπής (2/2)



- Στη περίπτωση που δεν γνωρίζουμε το κανάλι στο πομπό μπορούμε επιτύχουμε το κέρδος ποικιλομορφίας με την χρήση *τεχνικών κωδικοποίησης χρόνου – χώρου (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 είναι χειρότερη από αυτή της προσανατολισμένης εκπομπής



Συστήματα MIMO



- Τα συστήματα MIMO έχουν πολλαπλές κεραίες σε πομπό και 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



Κανάλι άγνωστο στον πομπό

- Διάσπαση του καναλιού MIMO σε $\text{Rank}(H)$ παράλληλα υπο-κανάλια
- Τα ανεξάρτητα κανάλια οδηγούν σε απλή ανάλυση της χωρητικότητας, ως ακολούθως:

$$C = \log_2 \det \left(I_N + \frac{E_S}{MN_0} HH^H \right)$$

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

Παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

$$HH^H = QLQ^H$$

$$H : N' \times M$$

Ο πίνακας του MIMO καναλιού

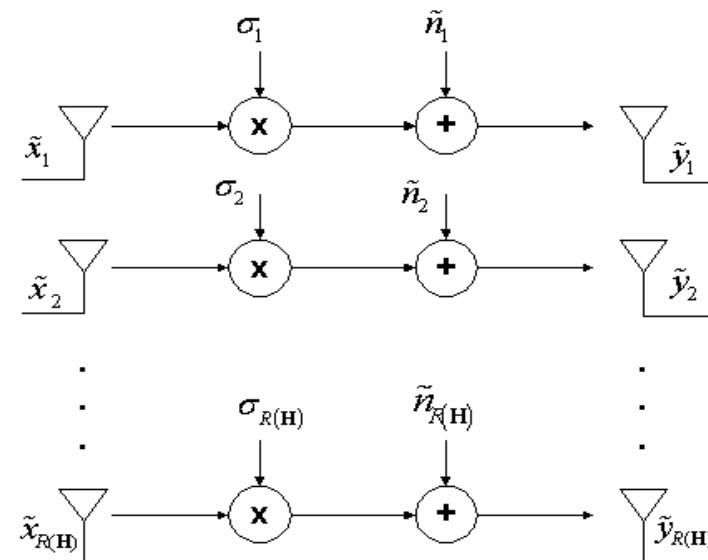
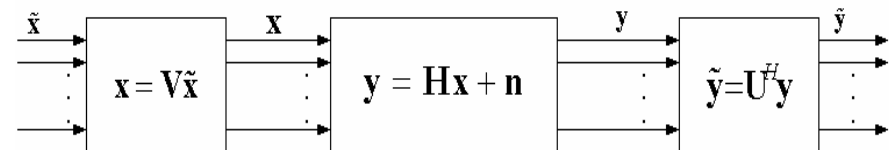
$$\det(I_m + AB) = \det(I_n + BA), \quad A : m' \times n, \quad B : n' \times m$$



Κανάλι γνωστό στον πομπό (1/2)

- Διάσπαση του καναλιού MIMO σε $\text{Rank}(H)$ παράλληλα υπο-κανάλια με προ-κωδικοποίηση στον πομπό και μορφοποίηση δέκτη
- Προκύπτουν $\text{Rank}(H) < \min(M, N)$ ανεξάρτητα κανάλια με κέρδος σ_i (i – στη ιδιάζουσα τιμή της H)
- Η ανάλυση της χωρητικότητας των ανεξάρτητων καναλιών για την περίπτωση αυτή περιγράφεται στην επόμενη διαφάνεια

$$H = U S V^H$$





Κανάλι γνωστό στον πομπό (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:

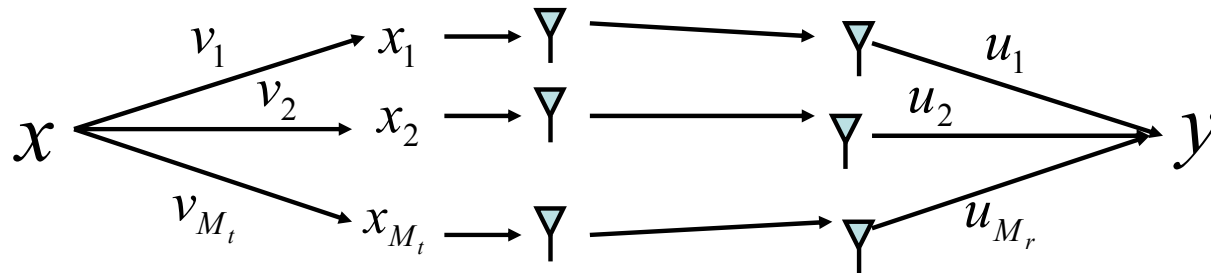
$$C = \max_{P_i: \sum_i P_i = P} \sum_{i=1}^{\text{Rank}(\mathbf{H})} \log_2 \left(1 + \frac{P_i E_s \sigma_i}{M N_0} \right)$$

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

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 κεραίες μεταδίδουν το ίδιο σύμβολο
- Μετασχηματίζει το σύστημα MIMO σε ένα σύστημα SISO με ποικιλομορφία
- Κέρδος ποικιλομορφίας MN
- Απλοποιημένη κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση
- Πρέπει να έχουμε επαρκή γνώση της κατάστασης του καναλιού σε πομπό και δέκτη για βέλτιστα αποτελέσματα



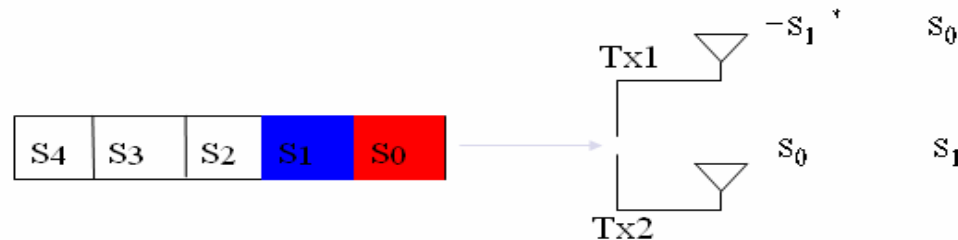
Κωδικοποίηση Χώρου - Χρόνου

- 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 του Alamouti

- Κωδικοποίηση και μετάδοση:



- Τα σύμβολα που λαμβάνονται:

$$y_0 = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0$$
$$y_1 = -h_0^* s_1 + h_1^* s_0 + n_1$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^* & -h_0^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

- Αποκωδικοποίηση:
 - Ανίχνευση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (ουσιαστικά είναι MRC)
 - Επιτυγχάνεται αποσύζευξη των συμβόλων

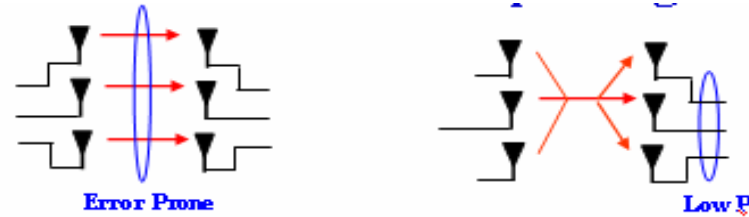
$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}^H \mathbf{y} = \left(|h_0|^2 + |h_1|^2 \right) \mathbf{I}_2 \mathbf{s} + \tilde{\mathbf{n}}$$

- Κέρδος ποικιλομορφίας: $2N$
- Υστέρηση κατά 3dB (σε ισχύ) σε σχέση με το transmit beamforming (για ίδια ολική ισχύ εκπομπής έχει τη μισή ισχύ σε κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο)



Ποικιλομορφία vs Πολυπλεξία

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

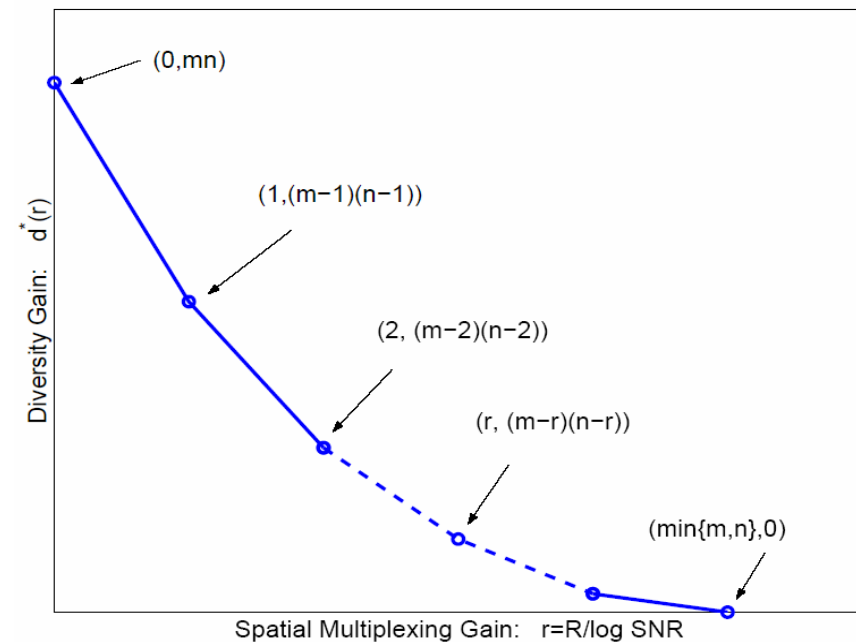


- Tradeoffs μεταξύ ποικιλομορφίας και πολυπλεξίας

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

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

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





Bell Laboratories Layered Space Time (BLAST)



- 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 $N > M$



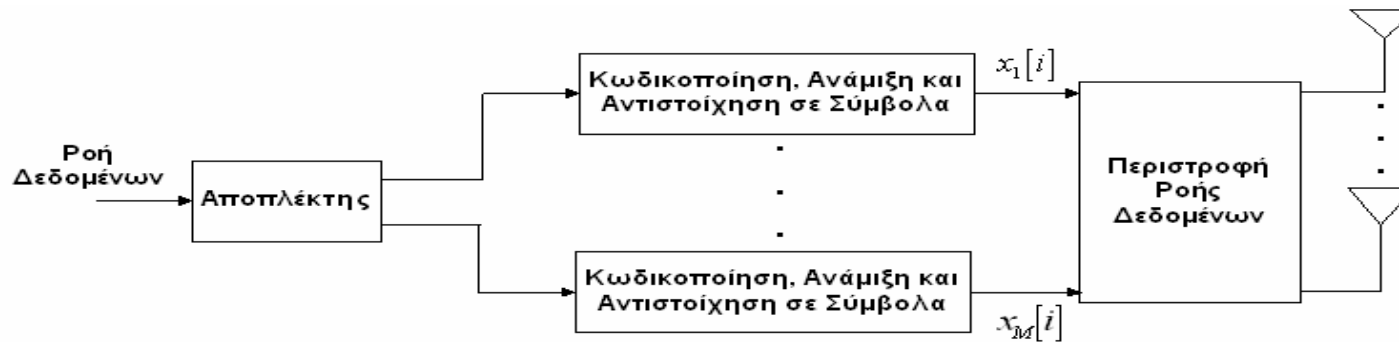
V-BLAST



- 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



- Χωρικός Ρυθμός: M
- Μέγιστο Κέρδος Ποικιλομορφίας: Μπορεί να είναι ακόμη και MN
- Κέρδος Πίνακα: N
- Κέρδος Κωδικοποίησης: Εξαρτάται από τον κωδικοποιητή
- Σπατάλη εύρους ζώνης



Η Πολυπλοκότητα του Δέκτη

- Μ κεραίες 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 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



Σύγχρονες Κατευθύνσεις



- Smart Antennas, MIMO Systems
- Cross-layer optimization
- Software Radio (SWR)
- Software Defined Radio (SDR)
- Turbo-like schemes and LDPC codes
- Opportunistic communications
- Cooperative Communications
- Cognitive Radio