

ΕΕ725 - Ειδικά Θέματα Ψηφιακών

Επικοινωνιών

Δημήτρης - Αλέξανδρος Τουμπακάρης

3ο Μάθημα – 12 Μαρτίου 2009

Περιεχόμενα σημερινού μαθήματος

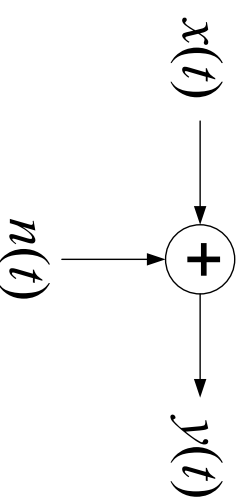
- Θόρυβος στις Ψηφιακές Επικοινωνίες (συνέχεια)
- Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση: Αναπαράσταση με διανύσματα

Αευκός Προσθετικός Γκαουσιανός Θόρυβος (**AWGN**)

- Το γεγονός ότι η αυτοσυσχέτιση του λευκού θορύβου ισούται με $\frac{N_0}{2}\delta(t)$ δε δίνει καμία πληροφορία για την κατανομή των τιμών του. Για παράδειγμα, μια λευκή στοχαστική ανάλιξη ενδέχεται να παίρνει τιμές μόνο 0 και 1 (**Bernoulli**).
- Αευκός Προσθετικός Γκαουσιανός Θόρυβος: Αευκός θόρυβος τα δείγματα του οποίου είναι ανεξάρτητες ομοίως κατανεμημένες (**i.i.d.**) γκαουσιανές μεταβλητές.
- Ο **AWGN** είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο θορύβου. Ο λόγος είναι ότι μοντελοποιεί πολύ καλά ένα μεγάλο ποσοστό κυματομορφών θορύβου που εμφανίζεται στις Ψηφιακές Επικοινωνίες.
 - Αευκότητα: Αποτέλεσμα της τυχαιότητας της κίνησης των ηλεκτρονίων.
 - Γκαουσιανός: Δικαιολογείται από το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα: Ο συνολικός θόρυβος είναι αποτέλεσμα της αθροιστικής συμβολής ενός πολύ μεγάλου αριθμού (**i.i.d.**) πηγών θορύβου.
 - Ο θερμικός θόρυβος μοντελοποιείται ως **AWGN**.
- Έγχρωμος (**colored**) Προσθετικός Γκαουσιανός Θόρυβος: Η **PSD** δεν είναι επίπεδη. Μοντελοποιεί θόρυβο λόγω διαφωνίας (**crosstalk**), θόρυβο λόγω φίλτρων.

Θερμικός θόρυβος σε μικροκυματικά συστήματα

- Στα μικροκυματικά συστήματα διακρίνουμε δύο πηγές θορύβου: την κεραία και τα εσωτερικά κυκλώματα του δέκτη.
 - Ο θόρυβος λόγω της κεραίας εξαρτάται από το φυσικό περιβάλλον και τον προσανατολισμό της κεραίας.
 - Ο θόρυβος λόγω των κυκλωμάτων του δέκτη εξαρτάται από τη σχεδίασή τους (και τα υλικά που χρησιμοποιούν).
- Συνήθως ο συνολικός θερμικός θόρυβος του δέκτη ανάγεται στην είσοδό του, όπως φαίνεται στο σχήμα (όπου δεν εμφανίζεται η επίδραση του καναλιού).



Σημείωση σχετικά με τις Οπτικές Επικοινωνίες

Στις οπτικές συχρότητες ο θερμικός θόρυβος είναι αμελητέος. Επομένως, σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών ο θερμικός θόρυβος εμφανίζεται κυρίως σε μεταγενέστερα στάδια επεξεργασίας στο δέκτη όπου το σήμα έχει μεταφερθεί σε χαμηλότερες συχρότητες (για παράδειγμα στο στάδιο προενίσχυσης του σήματος στην έξοδο του φωτοαιχνηστή).

Τα οπτικά συστήματα υπόκεινται, επιπλέον, σε πολλαπλασιαστικό θόρυβο βολής. Στο μάθημα δε θα ασχοληθούμε αναλυτικά με οπτικά συστήματα. Παρόλο που η σχεδίαση οπτικών συστημάτων διαφέρει από αυτή των μικροκυματικών και βαθυπερατών συστημάτων (εν μέρει λόγω του διαφορετικού θορύβου) υπάρχουν κάποιες βασικές αρχές οι οποίες διέπουν όλα τα συστήματα επικοινωνιών. Επομένως, κάποια από τα θέματα που θα καλύψουμε εφευρόζονται και σε οπτικά συστήματα (ιδιαίτερα στο κομμάτι μετά το φωτοαιχνηστή).

Σημείωση σχετικά με τα Μαγνητικά Κανάλια

Τα μαγνητικά συστήματα χαρακτηρίζονται από αθροιστικό και πολλαπλασιαστικό θόρυβο καθώς και από θόρυβο χρονισμού (jitter).

Ο αθροιστικός θόρυβος οφείλεται στην επίδραση των μαγνητικών διπλών στην κεφαλή ανάγνωσης/εγγραφής. Ο πολλαπλασιαστικός θόρυβος οφείλεται σε ανομοιογένειες της πυκνότητας του υλικού οι οποίες προκαλούν μεταβολή του πλάτους του σήματος. Τέλος, ο θόρυβος χρονισμού προκαλείται από τη μεταβολή της απόστασης μεταξύ της κεφαλής και της επιφάνειας εγγραφής. Επιπρόσθετα, στα μαγνητικά συστήματα εμφανίζεται διαφωνία (crosstalk) λόγω παρεμβολών από γειτονικά κανάλια.

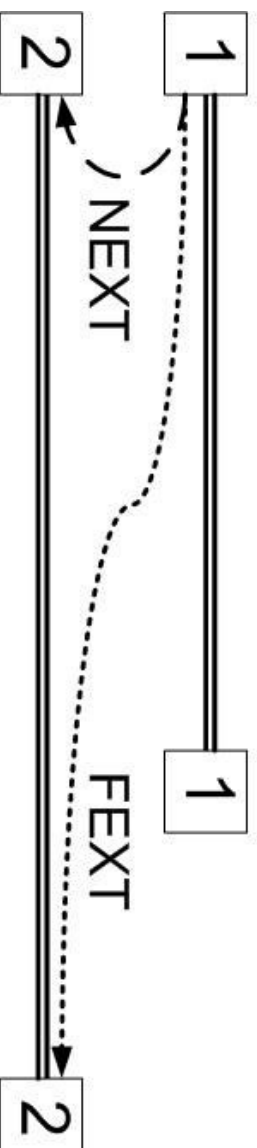
Όπως και στην περίπτωση οπτικών συστημάτων, δε θα ασχοληθούμε με τα μαγνητικά κανάλια. Ωστόσο, πολλές από τις αρχές και τεχνικές σχεδίασης ψηφιακών συστημάτων εφαρμόζονται και σε αυτά τα συστήματα.

Θόρυβος σε τηλεφωνικά κανάλια

- Επιπλέον του θερμικού θορύβου, άλλες πηγές θορύβου σε τηλεφωνικά κανάλια είναι:
 - Θόρυβος από γειτονικά κανάλια λόγω διαφωνίας (crosstalk)
 - Θόρυβος λόγω κβαντισμού (quantization noise)
 - Κρουστικός θόρυβος (impulse noise)
 - Θόρυβος λόγω παρεμβολών σε ραδιοσυχνότητες (Radio Frequency Ingress - RFI)

Διαφωνία (Crosstalk)

- Οφείλεται σε παρεμβολές από γειτονικά κανάλια. Αποτελεί πρόβλημα σε συνεστραμμένα ζεύγη τα οποία ανήκουν σε ομάδες καλωδίων (binders).
- Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της διαφωνίας, πολλές φορές χρησιμοποιείται διαφορική μετάδοση (π.χ. DSL), δηλαδή το μεταδιδόμενο σήμα ισούται με τη διαφορά τάσης μεταξύ δύο γραμμών.
- Διακρίνεται σε παραδιαφωνία (Near-End Crosstalk – NEXT) και τηλεδιαφωνία (Far-End Crosstalk – FEXT).



- Τα στατιστικά της διαφωνίας εξαρτώνται από τη διαμόρφωση που χρησιμοποιούν οι γραμμές που παρεμβάλλονται στο υπό εξέταση κανάλι και στην απόστασή τους από αυτό.

Διαφωνία (2)

- Σε πολλές περιπτώσεις, η παραδιαφωνία μοντελοποιείται με αρκετή ακρίβεια από τη σχέση

$$S_{NEXT}(j\omega) = K_{NEXT}|\omega|^{1.5} S_{interf}(j\omega),$$

όπου $S_{interf}(j\omega)$ η PSD του σήματος από το οποίο προέρχεται η παρεμβολή. Ο συντελεστής K_{NEXT} εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το κανάλι (π.χ. δομή του binder). Παρατηρούμε ότι η παραδιαφωνία αποτελεί μεγαλύτερο πρόβλημα στις υψηλές συχνότητες.

- Αντίστοιχα, η τηλεδιαφωνία μοντελοποιείται από τη σχέση

$$S_{FEXT}(j\omega) = K_{FEXT} \cdot d \cdot |\omega|^2 |H(j\omega)|^2 S_{interf}(j\omega).$$

d είναι το μήκος της γραμμής. Σε κανάλια συνεστραμμένων ζευγών (**twisted pairs**) ο θόρυβος λόγω τηλεδιαφωνίας αρχικά αυξάνει με τη συχνότητα, αλλά στη συνέχεια μειώνεται λόγω του πολλαπλασιασμού με την $|H(j\omega)|^2$ η οποία είναι φθίνουσα (στα συνεστραμμένα ζεύγη η απόσβεση αυξάνεται με τη συχνότητα).

Θόρυβος λόγω κβαντισμού

- Για να μεταδώσουμε ένα αναλογικό σήμα (π.χ. φωνή) με χρήση ενός ψηφιακού συστήματος αναγκαστικά πρέπει να περιορίσουμε (να κβαντίσουμε) τις πιθανές τιμές του σήματος.
- Ο κβαντισμός παραμορφώνει το σήμα.
- Μερικές φορές, και για ορισμένες περιοχές σηματοθορυβικού λόγου, η παραμόρφωση λόγω κβαντισμού μοντελοποιείται ικανοποιητικά ως αθροιστικός θόρυβος κβαντισμού και η απόδοση του συστήματος εξετάζεται με χρήση του λόγου σήματος ως προς θόρυβο κβαντισμού (**SQNR**).
- Τα χαρακτηριστικά του θορύβου κβαντισμού διαφέρουν από το θερμικό θόρυβο. Για περισσότερες λεπτομέρειες δείτε π.χ. **Lee & Messerschmitt 2nd ed. Ch. 5.**

Κρουστικός Θόρυβος (**Impulse/Burst Noise**)

- Εμφανίζεται με τη μορφή ξαφνικών και σύντομων κυματομορφών με μεγάλη, πολλές φορές, ενέργεια.
- Οφείλεται σε φυσικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνοί), σε ανθρωπίνη δραστηριότητα (π.χ. κινήτηρες, άνοιγμα διακοπών), στο τηλεφωνικό δίκτυο (π.χ. μηχανικοί διακόπτες).
- Είναι μη στάσιμος και δε μοντελοποιείται εύκολα. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα (π.χ. παλμός **Cook**), αλλά κανένα μοντέλο λογικής πολυπλοκότητας δεν περιγράφει με ακρίβεια την επίδρασή του κρουστικού θορύβου στα κανάλια.
- Στα συστήματα **DSL** αντιμετωπίζεται με χρήση κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων (**Error-Correcting Codes**).

Θόρυβος φάσης/χρονισμού

- Δεν είναι προσθετικός.
- Είναι μια άγνωστη διαταραχή του χρονισμού του σήματος (**timing jitter**) ή της φάσης του (**phase jitter**).
- Μια από τις αιτίες του **jitter** είναι το μη τέλει ρολόι που χρησιμοποιεί ο δέκτης για αποδιαμόρφωση και δειγματοληψία.
- Αντιμετωπίζεται με χρήση κυκλωμάτων στο δέκτη (π.χ. **Phase-Locked Loops (PLLs)** σε συνδυασμό με φίλτρα). Η αντιμετώπιση του είναι πιο εύκολη όταν έχει σχετικά μικρό εύρος ζώνης (δηλαδή όταν διαδοχικές τιμές του **jitter** είναι συσχετισμένες).

Επίδραση καναλιού στο μεταδιδόμενο σήμα

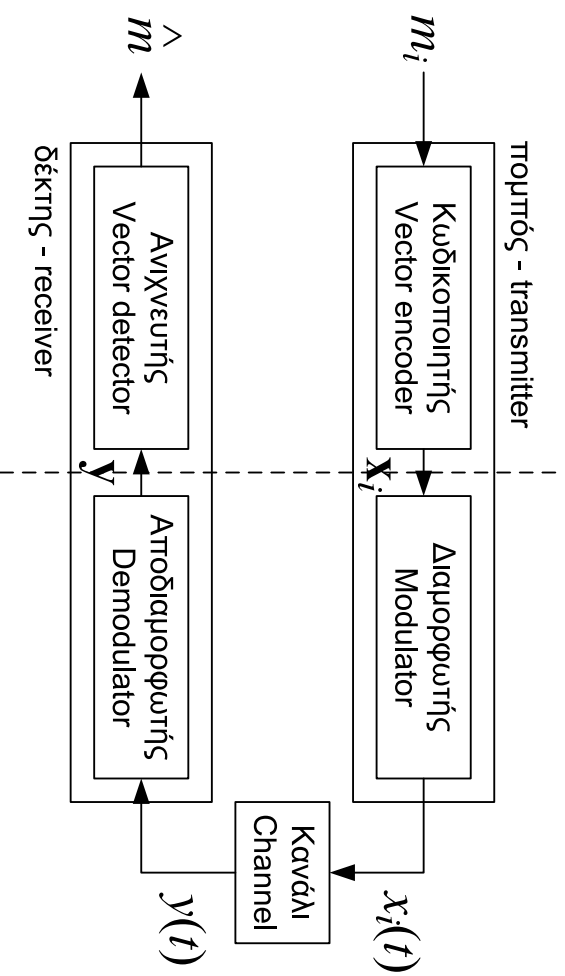
Το μεταδιδόμενο σήμα δέχεται τόσο την επίδραση του θορύβου όσο και την επίδραση του καναλιού. Η τιμή του θορύβου είναι άγνωστη. Αντίθετα, σε μερικές περιπτώσεις (όχι, όμως, πάντα) ο τρόπος που επιδρά το κανάλι στο σήμα ενδέχεται να περιγράφεται με ακρίβεια από κάποιο μοντέλο. Παραθέτουμε, χωρίς να τους αναλύσουμε, μερικούς από τους τρόπους με τους οποίους επιδρά το κανάλι στο μεταδιδόμενο σήμα. Θα επανέλθουμε σε κάποιους από αυτούς σε επόμενα μαθήματα.

- Απόσβεση
- Καθυστέρηση
- Παραμόρφωση (πλάτους/φάσης)
- Απόλωση φάσης/συχνότητας (phase/frequency offset), φαινόμενο doppler
- Διαλείψεις (fading), shadowing
- Διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference – ISI)
- Ηχώ

Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση: Αναπαράσταση με διανύσματα

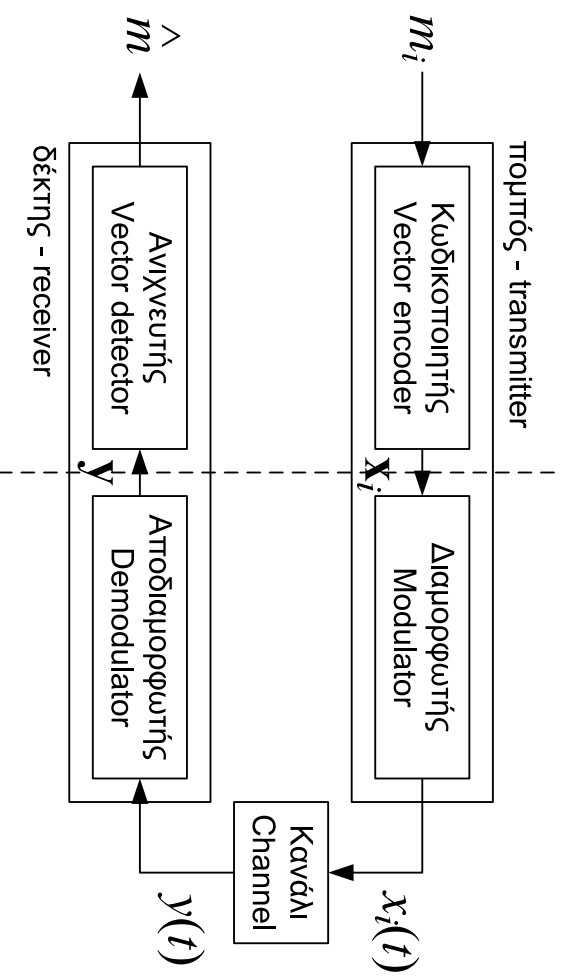
- Θόρυβος στις Ψηφιακές Επικοινωνίες (συνέχεια)
- Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση: Αναπαράσταση με διανύσματα
 - Cioffi Ch. 1, Lee & Messerschmitt 2nd ed. Ch. 7

Ψηφιακή Μετάδοση



- m_i : Ένα από M πιθανά μηνύματα. Αντιστοιχίζεται από τον κωδικοποιητή σε ένα διάνυσμα (σύμβολο) \mathbf{x}_i . Ο διαμορφωτής επιλέγει μια αναλογική κυματομορφή $x_i(t)$ με βάση την έξοδο του κωδικοποιητή. Στο δέκτη η ληφθείσα κυματομορφή αποδιαμορφώνεται στο διάνυσμα \mathbf{y} . Ο ανιχνευτής αποφασίζει ποιο μήνυμα μεταδόθηκε με βάση το \mathbf{y} και, στην γενική περίπτωση, πληροφορία από προηγούμενες λήψεις.

Ψηφιακή Μετάδοση (2)



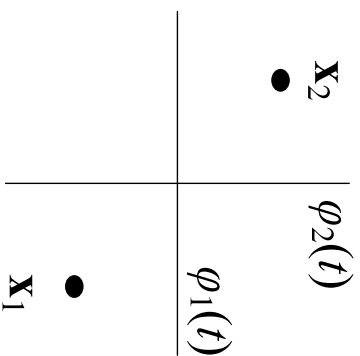
- Εάν δουλέψουμε με διανύσματα, μπορούμε να διαχωρίσουμε τη διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση από την κωδικοποίηση/ανίχνευση \rightarrow πλεονέκτημα αναπαράστασης με διανύσματα.
- Έστω ότι ο πομπός στέλνει ένα μήνυμα ανά T s (symbol period). Ο ρυθμός μετάδοσης (data rate) ισούται με $R = \frac{\log_2 M}{T}$ bits/s.

Χρήση διανυσμάτων για την αναπαράσταση των αναλογικών κυματομορφών μετάδοσης

- Έστω το σύνολο των πραγματικών συναρτήσεων $f(t)$ για τις οποίες ισχύει $\int_0^T |f(\tau)|^2 d\tau < \infty$. Ο χώρος Hilbert στον οποίο ανήκουν οι $f(t)$ ονομάζεται $\mathcal{L}_2[0, T]$ και έχει άπειρη διάσταση.
- Μια συνάρτηση $x(t)$ του $\mathcal{L}_2[0, T]$ μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα συναρτήσεων βάσης: $x(t) = \sum_{n=1}^N x_n \phi_n(t)$. Στην γενική περίπτωση το N ισούται με ∞ . Τα παραπάνω ισχύουν και όταν τα όρια του διαστήματος τείνουν στο ∞ (ή $-\infty$).
- Ας υποθέσουμε ότι χρησιμοποιούμε M συναρτήσεις $x(t)$ για τη διαμόρφωση, οι οποίες ανήκουν σε έναν υπόχωρο \mathcal{V} του $\mathcal{L}_2[0, T]$ διάστασης $N (\leq M - \text{γιατί;})$. Επομένως, κάθε συνάρτηση $x_m(t)$ ισούται με $\sum_{n=1}^N x_{m,n} \phi_n(t)$, όπου $\phi_n(t)$ οι συναρτήσεις βάσης του \mathcal{V} . Συνεπώς, μπορούμε να γράψουμε $x_m(t) \leftrightarrow \mathbf{x}_m = [x_{m,1} \ x_{m,2} \ \dots \ x_{m,N}]^T$.
- Τα σύμβολα \mathbf{x}_m , $m = 1, 2, \dots, M$ αποτελούν έναν αστερισμό (constellation). Με χρήση διανυσμάτων μπορούμε να αναπαραστήσουμε έναν αστερισμό στον Ευκλείδειο χώρο (παρόλο που στην πραγματικότητα ο αστερισμός είναι ένα σύνολο συνεχών κυματομορφών).

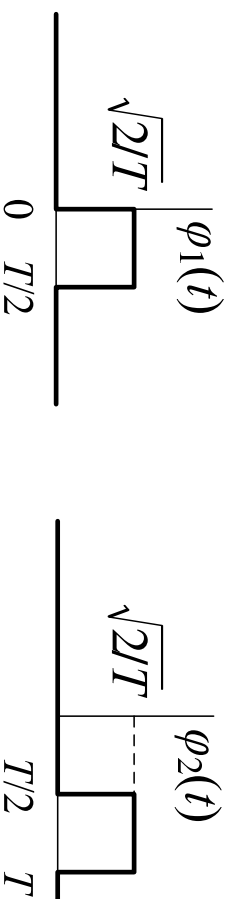
Παράδειγμα Αστερισμού

- Μετάδοση BPSK: $\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi}{4}\right)$, $\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{4}\right)$ στο διάστημα $0 \leq t \leq T$ και $\phi_1(t) = \phi_2(t) = 0$ εκτός του διαστήματος.
 - Οι συναρτήσεις βάσης είναι ορθογώνιες μεταξύ τους και το μέτρο τους ισούται με 1 \rightarrow ορθοκανονική βάση υπόχωρου διάστασης $N = 2$.
 - Χρησιμοποιούμε δύο σύμβολα: $x_1(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) = -\frac{2}{\sqrt{T}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ και $x_2(t) = \phi_2(t) - \phi_1(t) = \frac{2}{\sqrt{T}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ (Υπενθύμιση: $\cos(A) - \cos(B) = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{B-A}{2}\right)$).
 - Επομένως, $M = 2$, $\mathbf{x}_1 = [1 \ -1]^T$ και $\mathbf{x}_2 = [-1 \ 1]^T$.



Παράδειγμα Αστεισμού (συνέχεια)

- Ας θεωρήσουμε τώρα ένα άλλο σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί κωδικοποίηση Manchester.



- Υποθέτουμε και πάλι ότι χρησιμοποιούμε $x_1(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t)$ και $x_2(t) = \phi_2(t) - \phi_1(t)$. Άρα, και σε αυτήν την περίπτωση, $M = 2$, $\mathbf{x}_1 = [1 \ -1]^T$ και $\mathbf{x}_2 = [-1 \ 1]^T$.
- Παρόλο που οι κυματομορφές είναι διαφορετικές, η αναπαράστασή τους στον Ευκλείδειο χώρο είναι η ίδια!
- Εναλλακτικά, μπορούμε να αναπαράστήσουμε τις $x_1(t)$ και $x_2(t)$ τόσο στην περίπτωση BPSK όσο και στη Manchester με χρήση μίας μόνο συνάρτησης βάσης (πώς;)