

# Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

Τεχνικές Μετάδοσης και Λήψης

Πέτρος Μπίθας  
Αναπληρωτής Καθηγητής Παν. Αθηνών  
[pbithas@diind.uoa.gr](mailto:pbithas@diind.uoa.gr)  
Δημοσθένης Βουγιούκας  
Καθηγητής Παν. Αιγαίου  
[dvougiou@aegean.gr](mailto:dvougiou@aegean.gr)

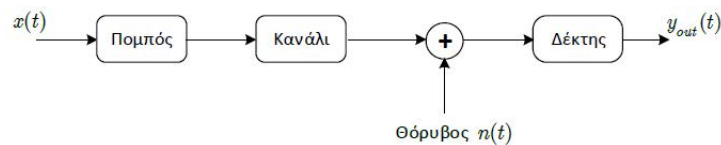
ΕΚΠΑ

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

1

## Τηλεπικοινωνιακό Μοντέλο

- Τα μοντέρνα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα
  - Όμως μερικά απλά τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα
- Όλα υπακούν στο παρακάτω γενικό μοντέλο τηλεπικοινωνιακού συστήματος



- Θα μελετήσουμε τόσο τη σκοπιά του πομπού όσο και του δέκτη
- Θα αγνοήσουμε το κανάλι επικοινωνίας ... θεωρώντας το ιδανικό
  - Ο δέκτης λαμβάνει ακριβώς το σήμα που εξέπεμψε ο πομπός
  - Δεν υπάρχουν αλλοιώσεις λόγω καναλιού ή λόγω θορύβου

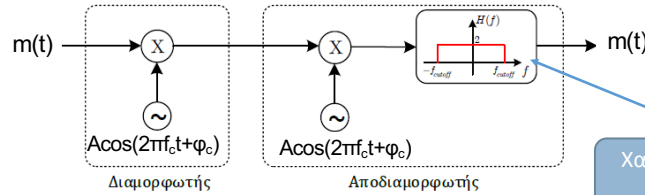
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

2

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)

### Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης Κατεσταλμένου Φέροντος (double sideband suppressed carrier DSB-SC)

- Ο διαμορφωτής και ο αποδιαμορφωτής φαίνονται στο σχήμα



- Ας θεωρήσουμε  $\phi_c = 0$  για απλούστευση (δεν ισχύει στην πράξη)
- Το εκπεμπόμενο σήμα είναι της μορφής

$$x_{DSBSC}(t) = Am(t) \cos(2\pi f_c t)$$

με  $A > 0$  και  $m(t)$  το σήμα πληροφορίας, και  $f_c \gg 2f_{max}^{m(t)}$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

3

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)

### Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης Κατεσταλμένου Φέροντος (DSB-SC)

- Ο δέκτης λαμβάνει το σήμα  $x_{DSBSC}(t)$  το οποίο έχει μετασχ. Fourier

$$X_{DSBSC}(f) = \frac{A}{2} M(f) * (\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)) = \frac{A}{2} M(f - f_c) + \frac{A}{2} M(f + f_c)$$

όπου  $M(f)$  είναι ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος  $m(t)$

$$A \cos(2\pi f_c t) \leftrightarrow \frac{A}{2} (\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c))$$

$$x(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \leftrightarrow \frac{1}{2} X(f - f_c) + \frac{1}{2} X(f + f_c)$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

4

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)

### Αποδιαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης Κατεσταλμένου Φέροντος (DSB-SC)

- Πως λαμβάνουμε το σήμα πληροφορίας?
  - Πολλαπλασιάζουμε αρχικά το ληφθέν σήμα με το ίδιο συνημίτονο με το οποίο διαμορφώθηκε!

$$y_r(t) = Ax_{DSBSC}(t) \cos(2\pi f_c t) = A^2 m(t) \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t)$$

$$\cos^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 + \cos \theta}{2}$$

$$= A^2 m(t) \cos^2(2\pi f_c t) = \frac{A^2}{2} m(t) + \frac{A^2}{2} m(t) \cos(2\pi 2f_c t)$$

- Παρατηρήστε ότι εμφανίστηκε το σήμα πληροφορίας αλλά κι ένας όρος γύρω από τη συχνότητα  $2f_c$
- Αφού  $f_c \gg 2f_{max}^{m(t)}$ , οι δυο όροι του αθροίσματος θα βρίσκονται «αρκετά μακριά»

#### Σύγχρονη Αποδιαμόρφωση

Ο δέκτης δημιουργεί ένα φέρον σήμα που χαρακτηρίζεται από συγχρονισμό ως προς τη φάση και τη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

5

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)

- Στο χώρο της συχνότητας

$$Y_r(f) = \frac{A^2}{2} M(f) + \frac{A^2}{2} M(f) * \left( \frac{1}{2} \delta(f - 2f_c) + \frac{1}{2} \delta(f + 2f_c) \right)$$

$$= \frac{A^2}{2} M(f) + \frac{A^2}{4} M(f - 2f_c) + \frac{A^2}{4} M(f + 2f_c)$$

- Πολλαπλασιάζοντας με ένα ιδανικό χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής  $f = f_c$ , λαμβάνουμε

$$Y(f) = Y_r(f) H_{LP}(f) = \frac{A^2}{2} M(f)$$

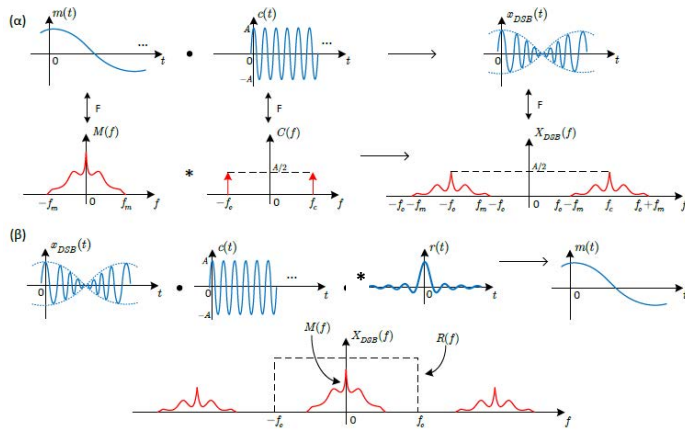
- Στο χώρο του χρόνου, η πράξη αυτή ισοδυναμεί με συνέλιξη με ένα σήμα  $\text{sinc}(\cdot)$

$$y_r(t) = \left( \frac{A^2}{2} m(t) + \frac{A^2}{2} m(t) \cos(2\pi 2f_c t) \right) * 2f_c \text{sinc}(2f_c t) = \frac{A^2}{2} m(t)$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

6

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)



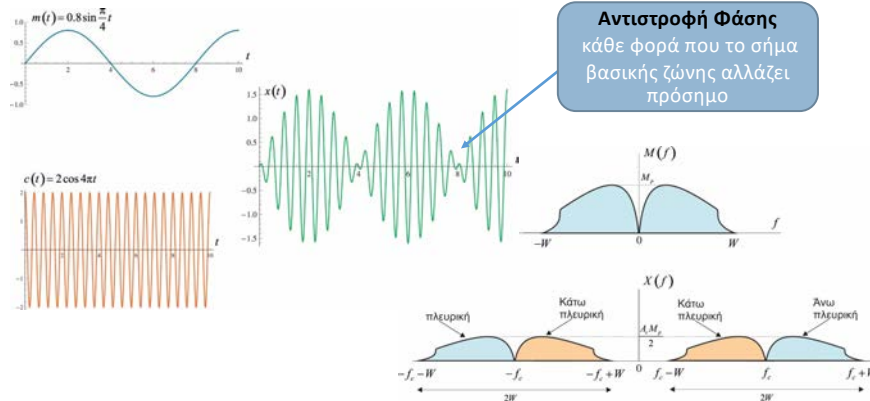
Εάν το εύρος ζώνης του σήματος  $m(t)$  είναι το  $f_m$   
Το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου είναι  $2f_m$

**Απόλυτο Εύρος Ζώνης:** Η διαφορά της μικρότερης θετικής συχνότητας από τη μεγαλύτερη

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεσκομπής

7

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)



**Αντιστροφή Φάσης**  
κάθε φορά που το σήμα βασικής ζώνης αλλάζει πρόσημο

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεσκομπής

8

## Διαμόρφωση Πλάτους (DSB-SC)

### Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης Κατεσταλμένου Φέροντος (double sideband suppressed carrier DSB-SC)

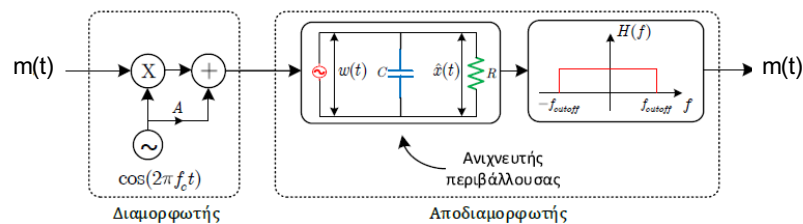
- Όπως αναφέραμε, ένα σημαντικό πρόβλημα της διαμόρφωσης αυτής είναι η ανάγκη συγχρονισμού συχνότητας και φάσης στον δέκτη
  - ▣ Σύγχρονη Αποδιαμόρφωση
- Μπορούμε να την αποφύγουμε?
- Ναι, χρησιμοποιώντας ένα ιδιαίτερα απλό κύκλωμα για την αποδιαμόρφωση, το οποίο ονομάζεται *ανιχνευτής περιβάλλουσας*

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

9

## Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

- Διαμόρφωση Πλάτους (amplitude modulation)
- Ο διαμορφωτής και ο αποδιαμορφωτής φαίνονται στο σχήμα



- Το εκπεμπόμενο σήμα είναι αυτή τη φορά το

$$x_{AM}(t) = [A + m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

με  $A > 0$  και  $A + m(t) > 0$

$A(t)$ : Περιβάλλουσα

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

10

## Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

11

- Ο δέκτης λαμβάνει το σήμα  $x_{AM}(t)$  και χρησιμοποιεί τον ανιχνευτή περιβάλλουσας, ο οποίος δεν απαιτεί σύγχρονη αποδιαμόρφωση
- Η πληροφορία  $m(t)$  βρίσκεται στην περιβάλλουσα του σήματος εκπομπής
- Οπότε ο ανιχνευτής περιβάλλουσας αναλαμβάνει να εξάγει την ποσότητα  $A + m(t)$
- Το χαμηλοπερατό φίλτρο που ολοκληρώνει τον αποδιαμορφωτή αναλαμβάνει να απαλύνει τις αυξομειώσεις του ανιχνευτή, όπως αυτές θα φανούν παρακάτω

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

11

## Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

12

- Το σήμα  $x_{AM}(t)$  στο χώρο της συχνότητας

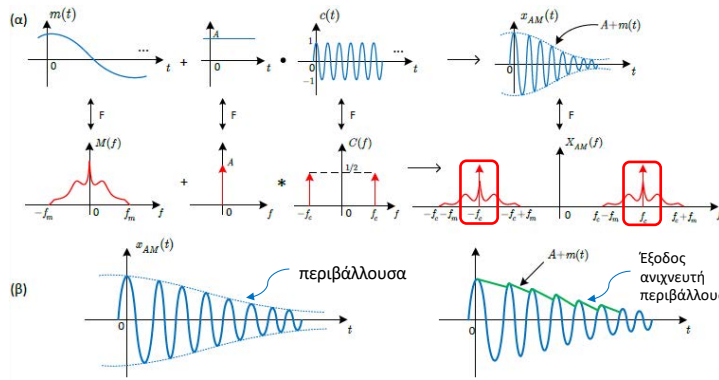
$$X_{AM}(f) = \frac{1}{2}[A + M(f)] * (\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c))$$
$$= \frac{1}{2}M(f - f_c) + \frac{1}{2}M(f + f_c) + \frac{A}{2}\delta(f - f_c) + \frac{A}{2}\delta(f + f_c)$$

- Δυο **συναρτήσεις Δέλτα** που δεν υπήρχαν στη Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης Κατεσταλμένου Φέροντος
  - Οι συναρτήσεις αυτές βρίσκονται στη συχνότητα  $\pm f_c$ , δηλ. στη φέρουσα συχνότητα
  - Γι'αυτό και η προηγούμενη μέθοδος διαμόρφωσης (DSB-SC) έχει τον όρο «κατεσταλμένου φέροντος»
- Για την αποδιαμόρφωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική της DSB-SC
- Μπορούμε όμως αντί αυτής να χρησιμοποιήσουμε τον ανιχνευτή περιβάλλουσας, η λειτουργία του οποίου φαίνεται σε επόμενο σχήμα, ακολουθούμενο από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

12

# Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

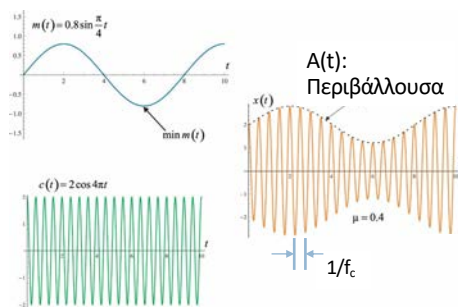


Εάν το εύρος ζώνης του σήματος  $m(t)$  είναι το  $f_m$ , το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου είναι  $2f_m$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

13

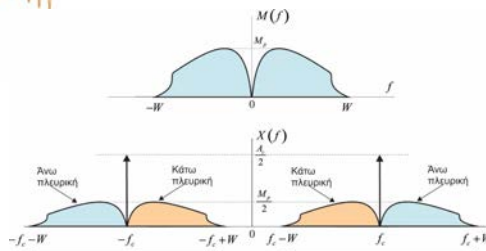
# Διαμόρφωση Πλάτους (AM)



Δείκτης Διαμόρφωσης  

$$\mu = \frac{|\min m(t)|}{A}$$

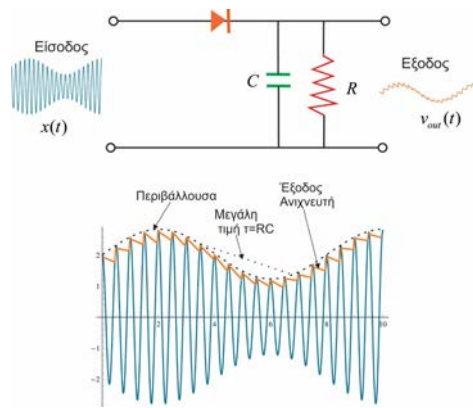
Για να μη συμβεί υπερδιαμόρφωση (αντιστροφή φάσης) θα πρέπει  $\mu < 1$



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

14

## Διαμόρφωση Πλάτους (AM)



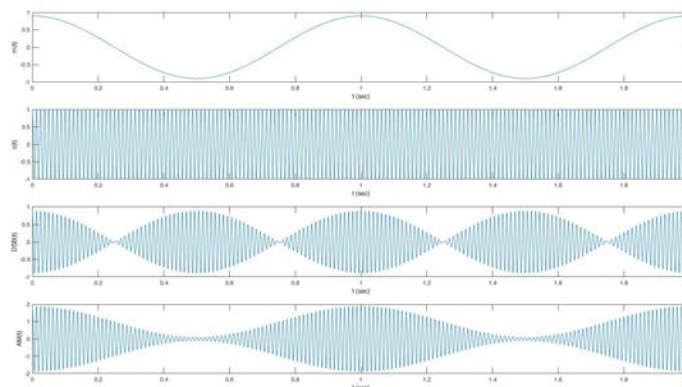
### Φορατής Περιβάλλουσας (envelope detector)

- Μικρές τιμές του  $\tau$  (γρήγορη εκφόρτιση) οδηγούν σε κυματισμό
- Μεγάλες τιμές του  $\tau$  οδηγούν σε αναξιόπιστη ανίχνευση

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

15

## Διαμόρφωση Πλάτους (AM)



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

16

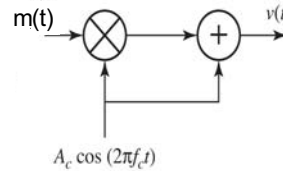


## Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

- Διαμόρφωση Πλάτους (amplitude modulation)
- Ο διαμορφωτής φαίνεται στο σχήμα
- Το εκπεμπόμενο σήμα είναι αυτή τη φορά το

$$x_{AM}(t) = A_c [1 + m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

με  $A_c > 0$  και  $1 + m(t) > 0$  A(t): Περιβάλλουσα



- Το σήμα  $x_{AM}(t)$  στον χώρο της συχνότητας

$$X_{AM}(f) = \frac{A_c}{2} [1 + M(f)] * (\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c))$$

$$= \frac{A_c}{2} M(f - f_c) + \frac{A_c}{2} M(f + f_c) + \frac{A_c}{2} \delta(f - f_c) + \frac{A_c}{2} \delta(f + f_c)$$

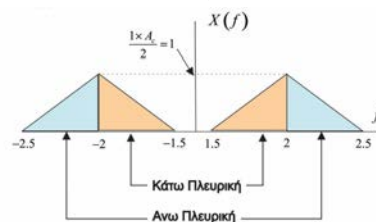
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

17

## Διαμόρφωση Πλάτους (SSB)

### Διαμόρφωση Μονής Πλευρικής Ζώνης (single side band-SSB)

- Και οι δυο τρόποι που συζητήσαμε έχουν το ίδιο «ελάττωμα»: έχουν πλεονασματική πληροφορία
  - Γιατί? Αφού  $X(f) = X^*(-f)$
  - Το διαμορφωμένο σήμα έχει διπλάσιο φάσμα από εκείνο της βασικής ζώνης
- Με άλλα λόγια, αν χωρίσουμε το φάσμα του σήματος πληροφορίας σε δυο περιοχές, την άνω πλευρική ζώνη και την κάτω πλευρική ζώνη, μπορούμε να μεταδώσουμε μόνο τη μια ζώνη



Πως μπορούμε να το κάνουμε αυτό?

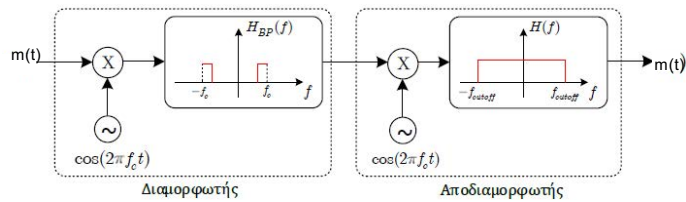
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

18

## Διαμόρφωση Πλάτους (SSB)

19

- Ένα SSB σήμα μπορεί να δημιουργηθεί μέσω DSB-SC διαμόρφωσης και στη συνέχεια καταστολής μίας εκ των δύο πλευρικών ζωνών με ένα ζωνοπερατό φίλτρο
- Στο δέκτη γίνεται χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου
- Ένας πρακτικά πιο εύκολα υλοποιήσιμος τρόπος είναι με τη μέθοδο ολίσθησης φάσης

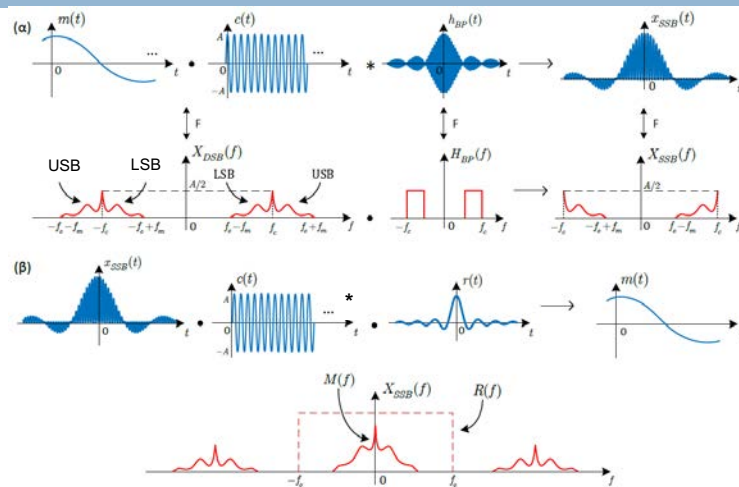


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

19

## Διαμόρφωση Πλάτους (SSB)

20



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

20

# Διαμόρφωση Γωνίας

21

- Στη διαμόρφωση γωνίας, η πληροφορία «κρύβεται» στη στιγμιαία φάση του σήματος εκπομπής, δηλ.

$$x(t) = A \cos(\theta(t)) = A \cos(\underbrace{2\pi f_c t + \phi(t)}_{\theta(t)})$$

- Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο «κρύβουμε» το σήμα πληροφορίας μέσα στην ποσότητα  $\theta(t)$  **-τη στιγμιαία φάση-** η διαμόρφωση γωνίας χωρίζεται σε:
  - Διαμόρφωση Φάσης (PM)
  - Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)
- Σε σχέση με τη διαμόρφωση πλάτους, η διαμόρφωση γωνίας πλεονεκτεί στην ευρωστία στο θόρυβο, αλλά μειονεκτεί
  - στο εύρος ζώνης (αυξημένο σε σχέση με τη διαμόρφωση πλάτους)
  - στην πολυπλοκότητα υλοποίησης (σε σχέση με τα συστήματα διαμόρφωσης πλάτους)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

21

# Διαμόρφωση Γωνίας

24

## Διαμόρφωση Φάσης (PM)

- Η φάση του εκπεμπόμενου

$$\phi(t) = k_p m(t)$$

οπότε

$$x_{PM}(t) = A \cos(2\pi f_c t + k_p m(t))$$

και

$$f_i(t) = f_c + \frac{1}{2\pi} k_p \frac{d}{dt} m(t)$$

- Η διαμόρφωση γωνίας στενής ζώνης γράφεται ως

$$x_{NBPM}(t) \approx A \cos(2\pi f_c t) - A k_p m(t) \sin(2\pi f_c t)$$

Σταθερά απόκλισης φάσης

Το σήμα πληροφορίας είναι κρυμμένο στη στιγμιαία φάση  $\phi(t)$  του εκπεμπόμενου

Στιγμιαία συχνότητα

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

24

## Διαμόρφωση Γωνίας

25

### Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)



$$\phi(t) = 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(u) du$$

Σταθερά  
απόκλισης  
συχνότητας

- Το διαμορφωμένο σήμα γράφεται ως

$$x_{FM}(t) = A \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(u) du\right)$$

οπότε η στιγμιαία συχνότητα θα είναι

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t)$$

- Η διαμόρφωση γωνίας στενής ζώνης γράφεται ως

$$x_{NBPM}(t) \approx A \cos(2\pi f_c t) - A \left(2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(u) du\right) \sin(2\pi f_c t)$$

Το σήμα πληροφορίας  
είναι κρυμμένο στη  
παράγωγο της φάσης  
 $d\phi(t)/dt$  του  
εκπεμπόμενου

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

25

## Πολυπλεξία-Multiplexing

26

- Η πολυπλεξία (multiplexing) σημάτων επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση σημάτων μέσα από το ίδιο κανάλι
- Υλοποιείται με συνδυασμό (combining) όλων των σημάτων σε ένα σήμα  $s(t)$  με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί ο δέκτης να τα διαχωρίσει μέσω της αντίστροφης διαδικασίας (από-πολυπλεξία - demultiplexing)
- Υπάρχουν διαφορετικές τεχνικές πολυπλεξίας
  - Πολυπλεξία με διαίρεση στο χρόνο
  - Πολυπλεξία με διαίρεση στη συχνότητα
  - Στατιστική Πολυπλεξία
- Στην πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας πολλά σήματα εκπέμπονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές συχνότητες
- Αρχικά θα μελετήσουμε τη πολυπλεξία με διαίρεση στη συχνότητα

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

26

## Πολυπλεξία-Multiplexing

27

- Το κάθε σήμα διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας μία διαφορετική φέρουσα συχνότητα
- Τα φέροντα σήματα είναι επαρκώς διαχωρισμένα έτσι ώστε να αποφευχθεί η επικάλυψη ανάμεσα στα φάσματα των διαμορφωμένων σημάτων
- Το κάθε σήμα μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης, πχ DSB-SC, AM, SSB
- Όλα τα διαμορφωμένα σήματα προστίθενται μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα σύνθετο σήμα
- Στην πλευρά του δέκτη χρησιμοποιείται μία τράπεζα από ζωνοπερατά φίλτρα για να διαχωρίσουν τα σήματα πληροφορίας με βάση τη ζώνη των συχνοτήτων που καταλαμβάνουν
- Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης (ξεχωριστά για κάθε σήμα)

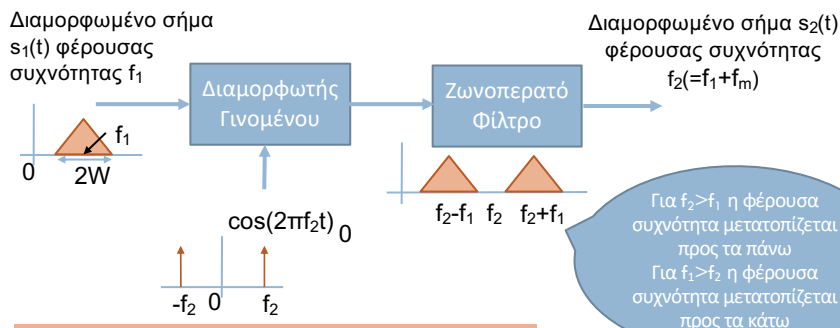
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

27

## Μετατόπιση Συχνότητας

28

- Έστω το διαμορφωμένο σήμα  $s_1(t)$  απαιτείται να μετατοπιστεί προς τα πάνω (ή προς κάτω) ώστε να αλλάξει η συχνότητα του φορέα σε  $f_2$
- Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα μίκτη



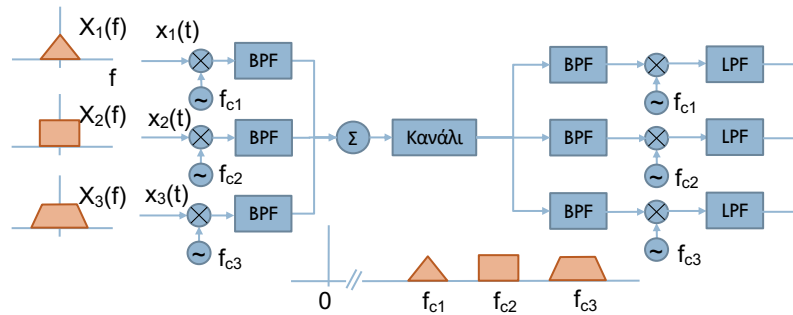
Η διάταξη που μετατοπίζει τις συχνότητες μίας διαμορφωμένης κυματομορφής ονομάζεται μίκτης

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

28

# Πολυπλεξία με Διαίρεση στη Συχνότητα

29



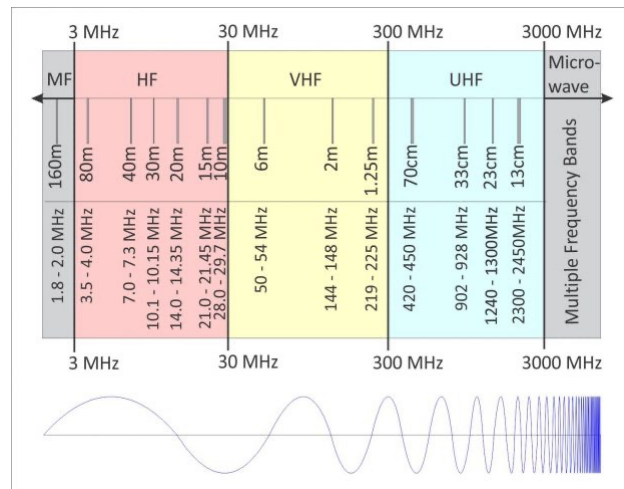
Οι τιμές των  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ ,  $f_{c3}$  έχουν επιλεγεί κατάλληλα έτσι ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη των φασμάτων

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

29

# Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

30



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

30

## Standards Αναλογικής Τηλεόρασης

31

### **NTSC** (National Television System Committee)

Αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ήταν το πρώτο σύστημα έγχρωμης τηλεόρασης. Ξεκίνησε η εκπομπή το 1954

### **PAL** (Phase Alternation Line)

Αναπτύχθηκε στη Γερμανία. Βασίστηκε στο σύστημα NTSC, αλλά τροποποιήθηκε για να αποφεύγεται η παραμόρφωση στο χρώμα. Ξεκίνησε η εκπομπή το 1967. Χρησιμοποιήθηκε σε ολόκληρη την Ευρώπη

### **SECAM** (Sequential Couleur Avec Memoire)

Αναπτύχθηκε στη Γαλλία. Ξεκίνησε η εκπομπή το 1967. Χρησιμοποιήθηκε στη Γαλλία και στη Μέση Ανατολή

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

31

## Standards Αναλογικής Τηλεόρασης

32

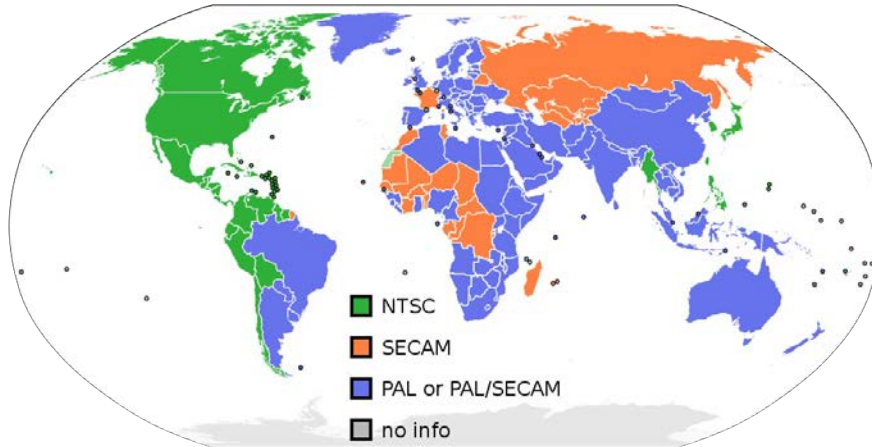
Parameters	NTSC	PAL	SECAM
Field Rate (Hz)	59.95 (60)	50	50
Line Number/Frame	525	625	625
Line Rate (Line/s)	15,750	15,625	15,625
Color Coordinate	YIQ	YUV	YDbDr
Luminance Bandwidth (MHz)	4.2	5.0/5.5	6.0
Chrominance Bandwidth (MHz)	1.5(I)/0.5(Q)	1.3(U,V)	1.0 (U,V)
Color Subcarrier (MHz)	3.58	4.43	4.25(Db),4.41(Dr)
Color Modulation	QAM	QAM	FM
Audio Subcarrier	4.5	5.5/6.0	6.5
Total Bandwidth (MHz)	6.0	7.0/8.0	8.0

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

32

# Standards Αναλογικής Τηλεόρασης

33



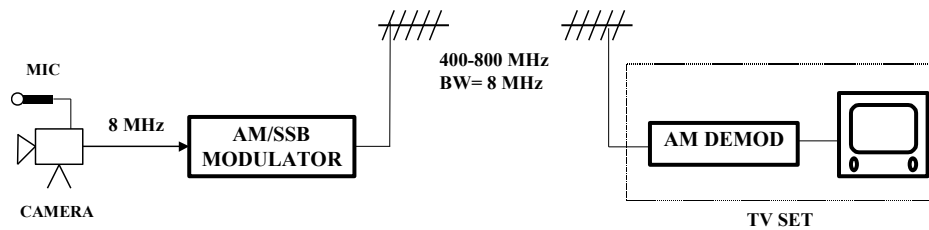
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

33

# Επίγεια Αναλογική Διανομή

34

## ΕΠΙΓΕΙΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΣΤΑ VHF/UHF (AM)



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

34



## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

35

- Το σήμα αποτελείται κατά βάση από **τρία** διακριτά σήματα (εκ των οποίων το ένα έχει δύο συνιστώσες):
  - Το **σήμα φωτεινότητας (Y)** το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί στην ασπρόμαυρη τηλεόραση και συνεχίστηκε να χρησιμοποιείται και στην έγχρωμη αναλογική, αρχικά για λόγους συμβατότητας, αλλά και για να μπορεί να υφίσταται διαφορετική διαχείριση (π.χ. αναφορικά με τη δειγματοληψία) λόγω της μεγαλύτερης σπουδαιότητάς του σε σχέση με αυτό του χρώματος για την ποιότητα της εικόνας

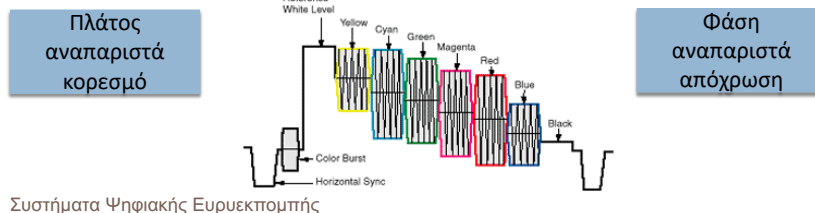
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

35

## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

36

- Το σήμα αποτελείται κατά βάση από **τρία** διακριτά σήματα (εκ των οποίων το ένα έχει δύο συνιστώσες):
  - Το **σήμα του χρώματος**, το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες και συγκεκριμένα τις χρωμοδιαφορές. Ανάλογα με το σύστημα χρώματος που χρησιμοποιείται, τα σήματα που αφορούν το χρώμα προκύπτουν με άλλο τρόπο. Στην περίπτωση του NTSC έχουμε τα I και Q, στο PAL χρησιμοποιούνται τα U και V, ενώ στην περίπτωση του SECAM χρησιμοποιούνται τα  $D_R$  και  $D_B$ . Σε όλες τις περιπτώσεις οι συνιστώσες αυτές προκύπτουν απευθείας από τις χρωμοδιαφορές με κλιμάκωση



36

## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

37

- Το σήμα αποτελείται κατά βάση από **τρία** διακριτά σήματα (εκ των οποίων το ένα έχει δύο συνιστώσες):
  - Το **σήμα του ήχου**, το οποίο διαμορφώνεται και μεταδίδεται ξεχωριστά, εντός του συγκεκριμένου καναλιού

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

37

## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

38

- Τα σήματα αυτά αθροίζονται και διαμορφώνονται και το συνολικά διαμορφωμένο σήμα εντάσσεται στο εύρος ζώνης του εκάστου καναλιού
- Το εύρος ζώνης στην περίπτωση που το κανάλι ανήκει στη ζώνη των VHF είναι 7 MHz, ενώ στην περίπτωση που ανήκει στα UHF έχει εύρος ζώνης 8 MHz
- Όσον αφορά τη μετάδοση του σήματος χρώματος, η Ελλάδα είχε υιοθετήσει αρχικά το SECAM, ωστόσο στις αρχές της δεκαετίας του 1990 έγινε μετάβαση στα συστήματα PAL B/G
- Αντίστοιχη μετάβαση έγινε για σημαντικό πλήθος χωρών που είχαν αρχικά υιοθετήσει το SECAM
- Το PAL B αντιστοιχεί στο κανάλι VHF (δηλαδή με εύρος ζώνης 7 MHz) και το PAL G σε κανάλι UHF (δηλαδή με εύρος ζώνης 8 MHz)

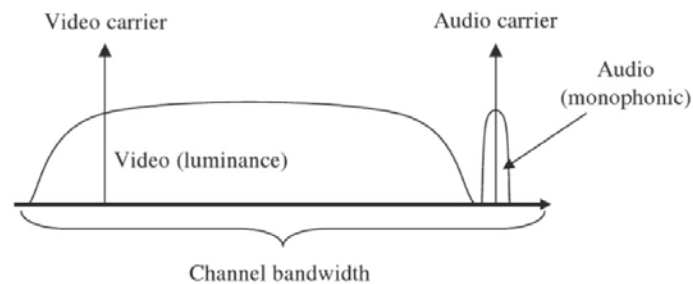
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

38

## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

39

- Φάσμα Αναλογικού Τηλεοπτικού Σήματος



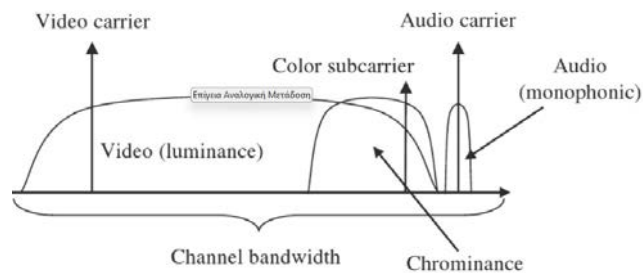
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

39

## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

40

- Το σήμα της φωτεινότητας πολυπλέκεται κατά FDM με το σήμα της χρωματικότητας και αυτό του ήχου για να σχηματιστεί το τελικό τηλεοπτικό σήμα με εύρος 8 MHz. Στην Ευρώπη ακολουθήθηκε το πρότυπο PAL όσον αφορά την τελική μορφή του σήματος.



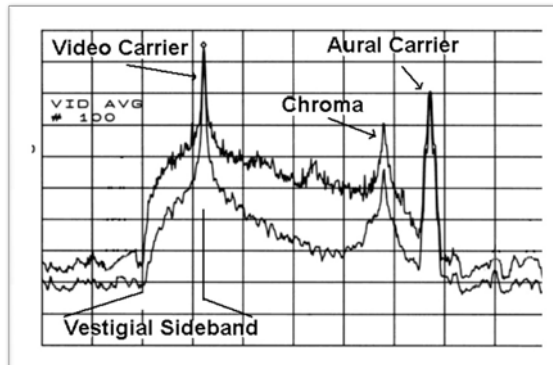
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

40

## Επίγεια Αναλογική Μετάδοση

41

- Το σήμα εκπέμπεται στον αέρα διαμορφώνοντας κατά AM-SSB ένα φέρον στην τηλεοπτική μπάντα (VHF: 174-230 MHz ή UHF: 470-862 MHz)



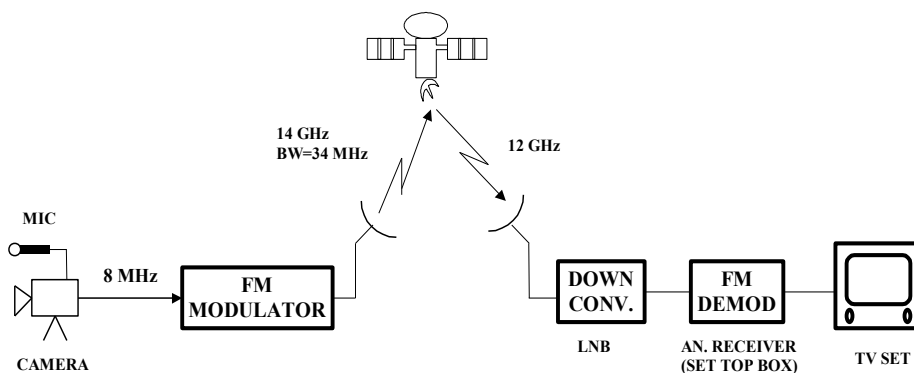
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

41

## Δορυφορική Αναλογική Διανομή

42

### ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΝΟΜΗ (FM)

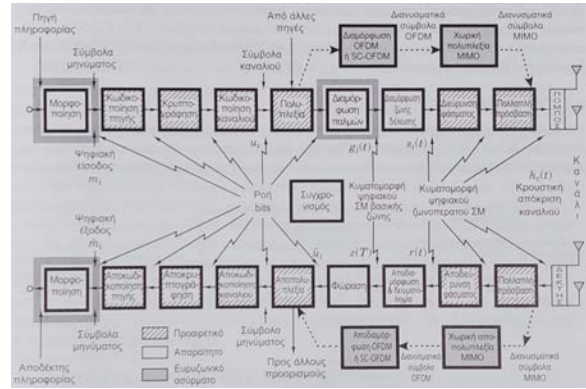


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

42

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

43

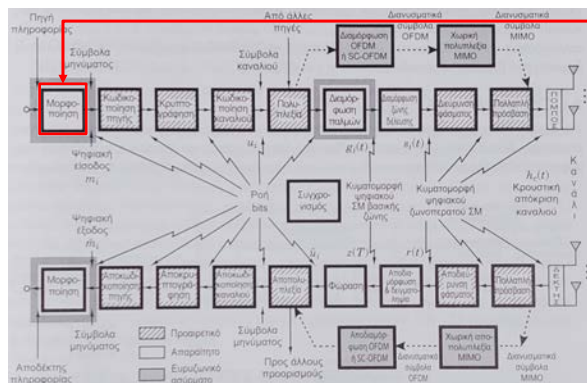


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

43

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

44



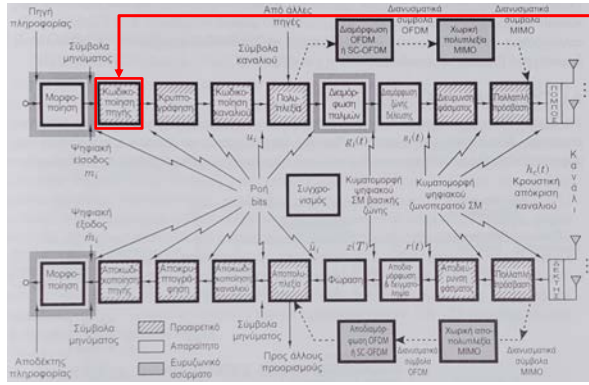
Η πληροφορία από την πηγή εισόδου μετατρέπεται σε δυαδικά ψηφία (bits) και στη συνέχεια σε ψηφιακά μηνύματα

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

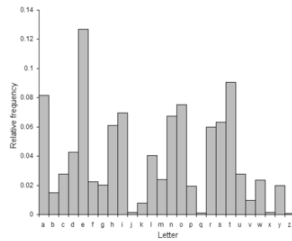
44

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

45



Αφαιρεί την αχρείαστη πληροφορία με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων

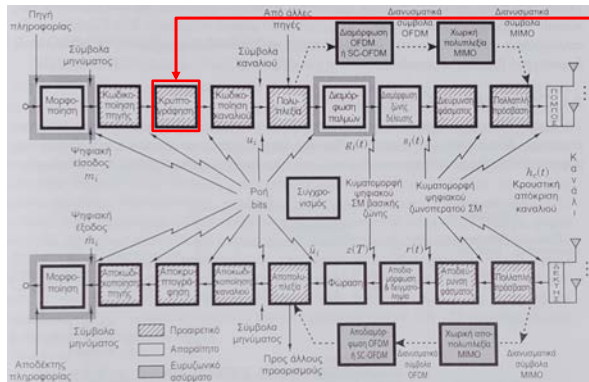


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

45

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

46



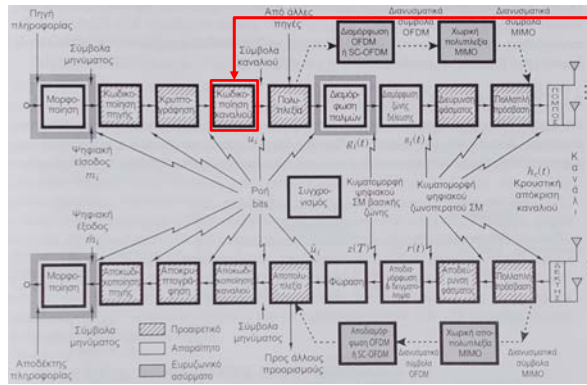
Μετατροπή της αρχικής πληροφορίας σε μία εναλλακτική με σκοπό την αποτροπή i) της κατανόησης του περιεχομένου του κειμένου από κάποιο πιθανό εισβολέα, ii) της εισαγωγής πλαστών μηνυμάτων

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

46

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

47



Με αύξηση του εύρους ζώνης ή της πολυπλοκότητας του αποκωδικοποιητή επιτυγχάνεται η μείωση της πιθανότητας σφάλματος

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

47

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

48

- Μήνυμα  $s=0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0$ ,  $p = 0.1$ .

<b>s</b>	0	0	1	0	1	1	0
<b>t</b>	000	000	111	000	111	111	000
<b>n</b>	000	001	000	000	101	000	000
<b>r</b>	000	001	111	000	010	111	000
<b><math>\hat{s}</math></b>	0	0	1	0	0	1	0

- Πιθανότητα σφάλματος ανά bit,  $p_b = 0.028$
- Ρυθμός μετάδοσης,  $R=1/3$  bits/χρήση καναλιού
- Αποδεικνύεται ότι όταν χρησιμοποιούμε Κώδικα Επανάληψης στο BSC ο αλγόριθμος πλειοψηφίας ελαχιστοποιεί την πιθανότητα σφάλματος στο δέκτη.

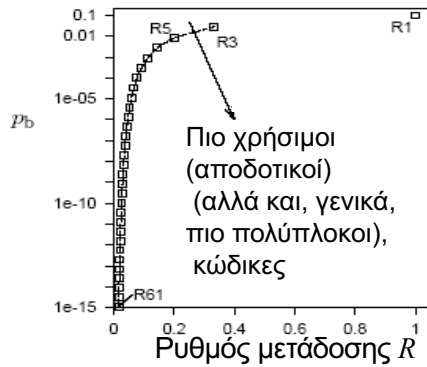
$$p^3 + 3(1-p)p^2$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

48

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

- Διάγραμμα πιθανότητας σφάλματος – ρυθμού μετάδοσης για τον Κώδικα Επανάληψης.



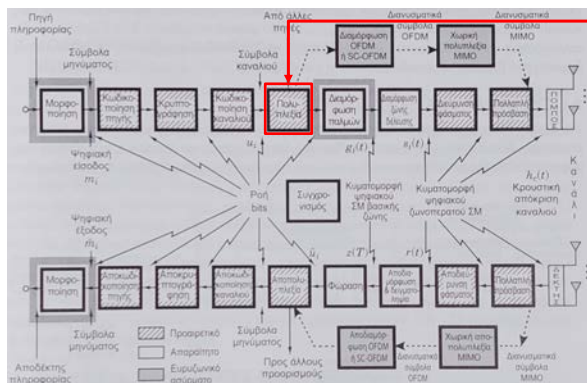
$$p_b = \sum_{n=(N+1)/2}^N \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n}$$

$N$ : αριθμός επαναλήψεων.  
(στον τύπο θεωρούμε περιπτώ  $N$ )

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

49

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών



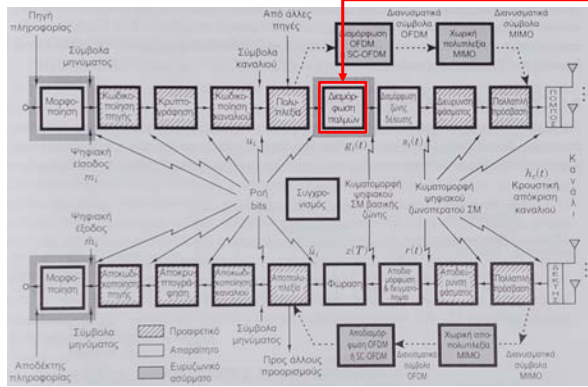
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

50



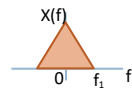
# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

51



Στη διαμόρφωση παλμών κάθε προς μετάδοση σύμβολο μετασχηματίζεται από μία διαδικασία αναπαράσταση σε μία κυματομορφή βασικής ζώνης

**Βασική Ζώνη (Baseband):**  
Το φάσμα ενός σήματος είναι συγκεντρωμένο σε χαμηλές συχνότητες

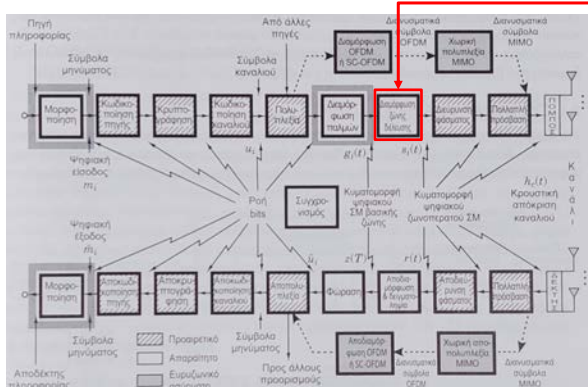


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

51

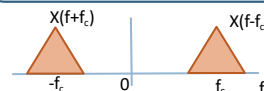
# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

52



Η διαμόρφωση ζώνης διέλευσης απαιτείται όταν το μέσο μετάδοσης δεν υποστηρίζει τη διάδοση βασικής ζώνης.

**Ζώνη Διέλευσης (Bandpass):**  
Η κυματομορφή μετατοπίζεται από το φασματικό της περιεχόμενο σε μεγαλύτερη συχνότητα

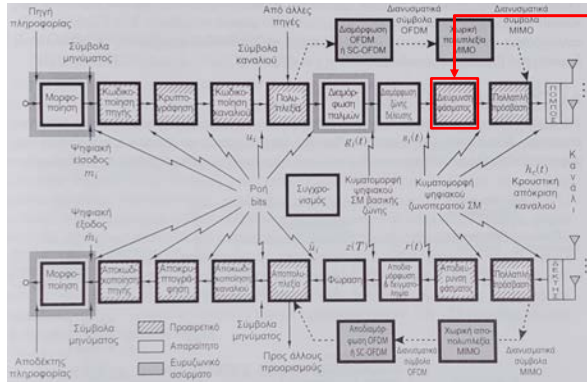


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

52

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

53



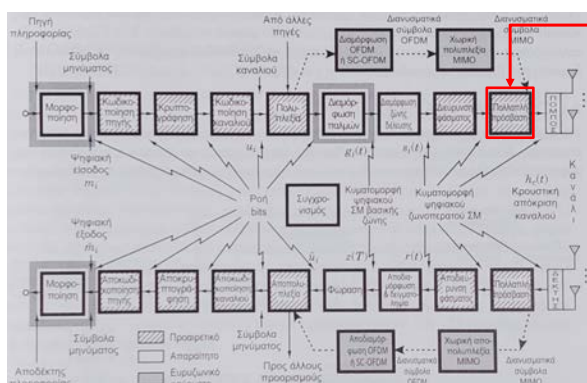
Διεύρυνση φάσματος χρησιμοποιείται για να θωρακίσει το σήμα από την επίδραση παρεμβολών (φυσικών και τεχνητών)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

53

# Ψηφιακό Σύστημα Επικοινωνιών

54

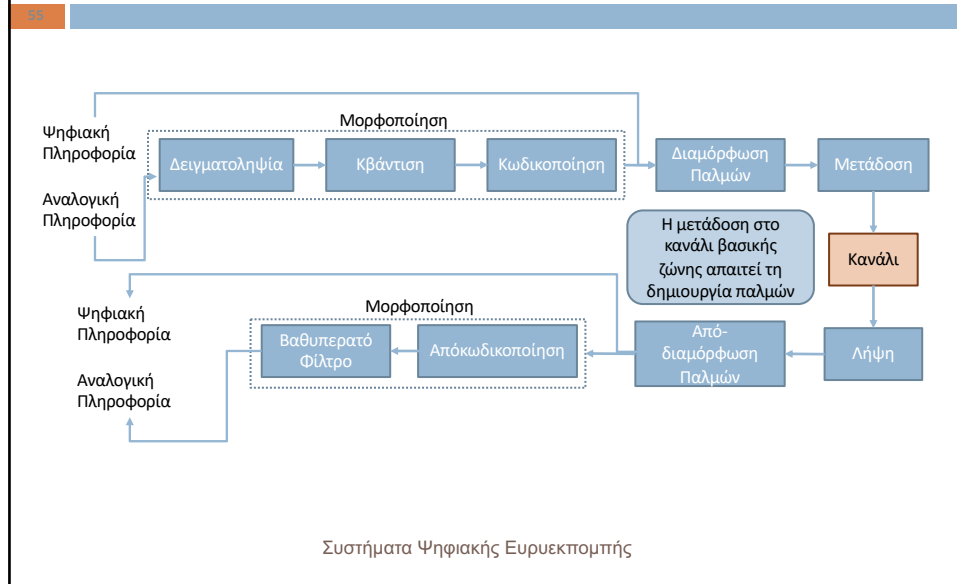


Συνδυασμός σημάτων για καλύτερη αξιοποίηση των πόρων

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

54

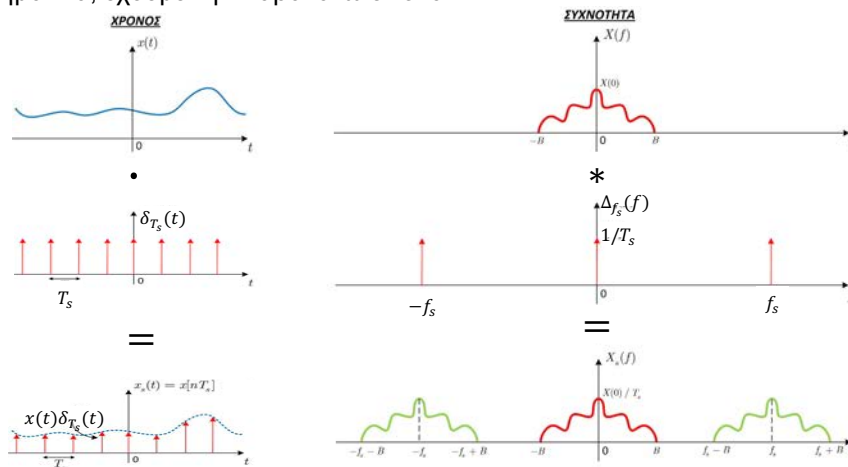
# Συστήματα Βασική Ζώνης



55

# Δειγματοληψία

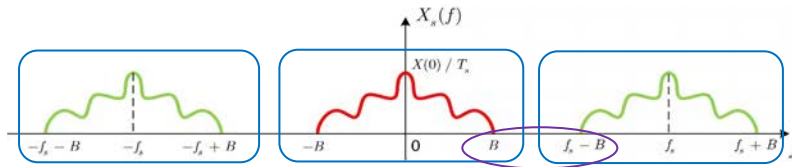
Σχηματικά, έχουμε την παρακάτω εικόνα:



56

## Δειγματοληψία

- Θα πρέπει το περιοδικό φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος να μην έχει επικαλύψεις!
- Η **συχνότητα δειγματοληψίας**  $f_s$  να είναι «αρκετά μεγάλη»



**Θεώρημα της Δειγματοληψίας:**  $f_s - B > B \Leftrightarrow f_s > 2B = 2f_{max}$

Μπορούμε να ανακατασκευάσουμε πλήρως και ακριβώς το σήμα συνεχούς χρόνου από μια δειγματοληπτημένη έκδοσή του (ένα σήμα διακριτού χρόνου) αν τα δείγματα έχουν ληφθεί με ρυθμό **μεγαλύτερο από 2B Hz**, με 2B τη διπλάσια μέγιστη συχνότητα του σήματος

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

57

## Κβαντισμός

- Τα διαφορετικά δείγματα μετά τη δειγματοληψία μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή (με άπειρη ακρίβεια)
- Τα ψηφιακά συστήματα δεν μπορούν να μεταδώσουν πραγματικούς αριθμούς (με άπειρη ακρίβεια)
- Πάρα πολύ μικρές μεταβολές στο πλάτος (σε ήχο και εικόνα) δεν γίνονται αντιληπτές από τις ανθρώπινες αισθήσεις
- Το αναλογικό σήμα συνεχούς χρόνου μπορεί να προσεγγιστεί με ένα σήμα διακριτού χρόνου (εάν το λάθος στη προσέγγιση δεν γίνεται αντιληπτό στο δέκτη)

**Κβαντισμός (Quantization)** είναι μία μη-γραμμική και μη-αντιστρέψιμη διαδικασία, η οποία μετασχηματίζει την ακολουθία εξόδου του δειγματολήπτη σε ακολουθία διακριτών τιμών που ανήκουν σε ένα πεπερασμένο σύνολο επιπέδων πλάτους

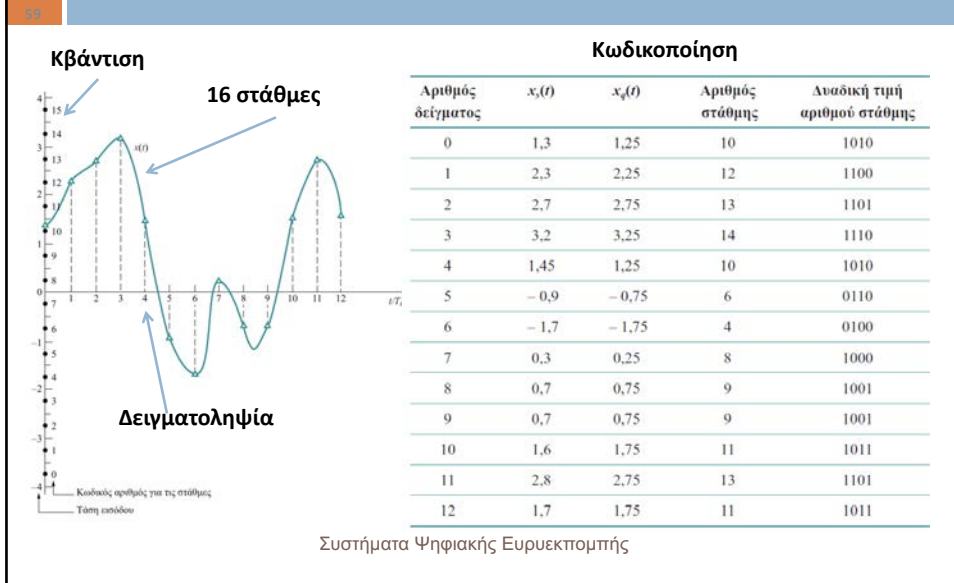
**Ομοιόμορφη Κβάντιση:** όταν τα επίπεδα είναι ισαπέχοντα

**Μη-Ομοιόμορφη Κβάντιση:** όταν τα επίπεδα δεν είναι ισαπέχοντα

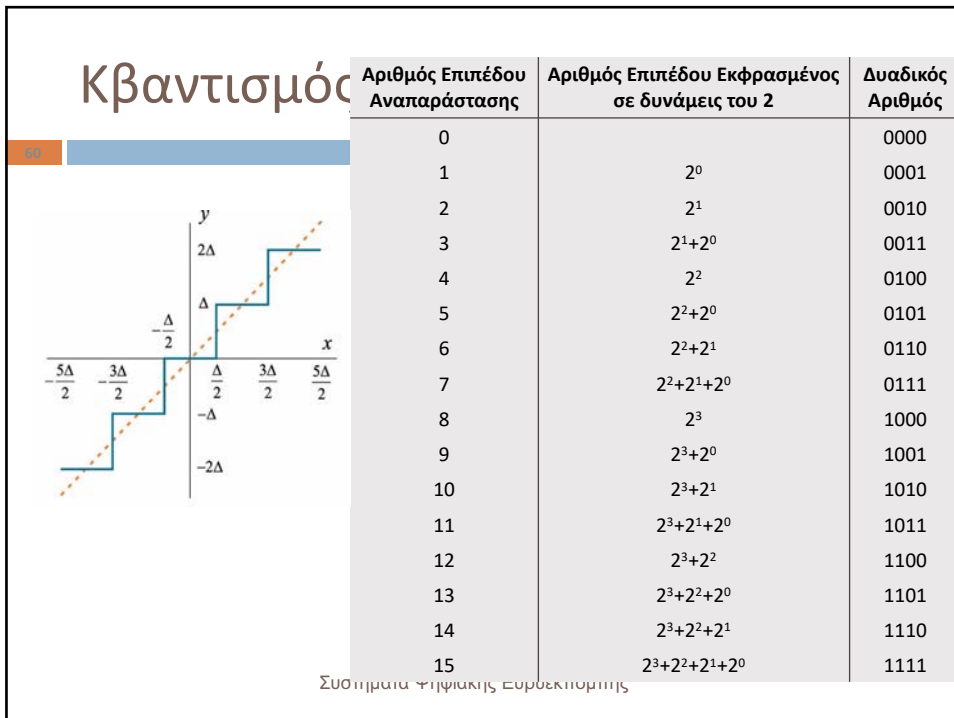
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

58

# Κβαντισμός



59

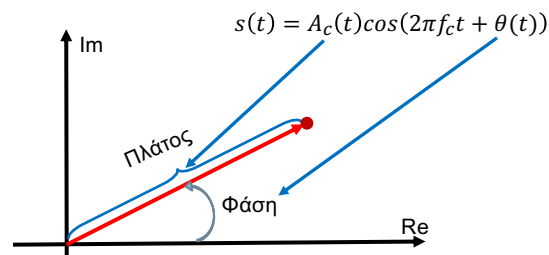


60

## Διανυσματική Θεώρηση των Σημάτων

61

- Η αντιστοίχιση σημάτων με διανύσματα, αποτελεί έναν από τους θεμέλιους λίθους της θεωρίας ψηφιακών επικοινωνιών και προτάθηκε από τους Wozencraft and Jacobs
- Με βάση αυτή, οι ιδιότητες των διανυσμάτων μεταφέρονται στον χώρο των σημάτων
- Έτσι η συμπεριφορά τους μπορεί να αξιολογηθεί με τρόπο περισσότερο εποπτικό και επομένως περισσότερο κατανοητό



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

61

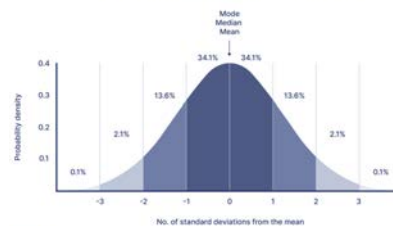
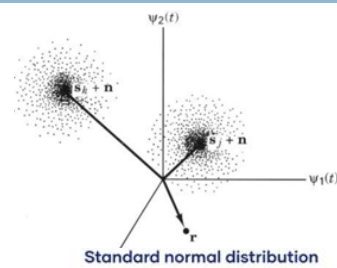
## Διανυσματική Θεώρηση των Σημάτων

62

- Έστω τα πρότυπα σήματα  $s_j$  και  $s_k$
- Ο δέκτης γνωρίζει εκ' των προτέρων, τη θέση τους στο χώρο των σημάτων
- Κατά τη μετάδοση οποιουδήποτε σήματος, αυτό διαταράσσεται από τον θόρυβο
- Το λαμβανόμενο σήμα είναι μία αλλοιωμένη έκδοση του μεταδοθέντος

$$s_j + n \text{ ή } s_k + n$$

- Ο θόρυβος είναι προσθετικός και Γκαουσιανής κατανομής και συνεπώς τα πιθανά λαμβανόμενα σήματα είναι μία συστάδα γύρω από τα  $s_j$  και  $s_k$



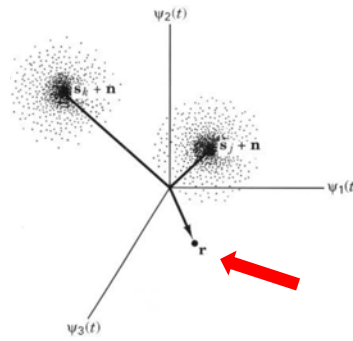
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

62

## Διανυσματική Θεώρηση των Σημάτων

63

- Το διάνυσμα  $r$  είναι ένα υποθετικό λαμβανόμενο σήμα
- Η ευθύνη του δέκτη είναι να αποφασίσει εάν το  $r$  ανήκει στο  $s_k$  ή στο  $s_j$
- Αυτή η σύγκριση ομοιότητας βασίζεται σε μία μέτρηση απόστασης
- Ο φωρατής πρέπει να επιλέξει ποιο από τα πρότυπα σήματα είναι το πλησιέστερο δυνατό
- Συνεπώς το  $r$  θα ταξινομηθεί στην ίδια κλάση με το πλησιέστερο διάνυσμα



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

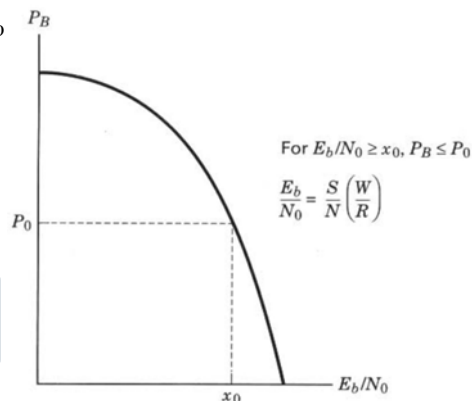
63

## SNR για Ψηφιακές Επικοινωνίες

64

- Στις ψηφιακές επικοινωνίες αντί του λόγου μέσης ισχύος σήματος προς θόρυβο, χρησιμοποιείται το  $E_b/N_0$
- $E_b$ : Είναι η μέση ενέργεια bit  
 $N_0$ : Είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου και μπορεί να περιγραφεί ως η ισχύς του θορύβου

Για δεδομένο επίπεδο πιθανότητας σφάλματος, όσο μικρότερος είναι ο λόγος  $E_b/N_0$  τόσο πιο αποδοτική είναι η διαδικασία της φώρασης



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

64

# Διαμορφώσεις

65

- Μοντέλο εκπομπής σήματος:

$$x(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \underbrace{\phi(t)}_{\theta(t)})$$

- Ορολογία:
  - $f_c$ : φέρουσα συχνότητα ή συχνότητα φέροντος → **Διαμορφώσεις Συχνότητας**
  - $A(t)$ : στιγμιαίο πλάτος (instantaneous amplitude) → **Διαμορφώσεις Πλάτους**
  - $\phi(t)$ : στιγμιαία απόκλιση φάσης (instantaneous phase deviation) → **Διαμορφώσεις Φάσης**
  - $\theta(t)$ : στιγμιαία φάση (instantaneous phase)
- Θα μελετήσουμε τρεις κατηγορίες:
  - **Διαμόρφωση Πλάτους**: το σήμα πληροφορίας βρίσκεται «κρυμμένο» στο στιγμιαίο πλάτος
  - **Διαμόρφωση Συχνότητας**: το σήμα πληροφορίας βρίσκεται «κρυμμένο» στη στιγμιαία συχνότητα
  - **Διαμόρφωση Φάσης**: το σήμα πληροφορίας βρίσκεται «κρυμμένο» στη στιγμιαία φάση

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

65

# Διαμορφώσεις

66

- **Σύμφωνη Φώραση**: Όταν ο δέκτης αξιοποιεί γνώση της φάσης του φέροντος (μειωμένη πιθανότητα σφάλματος)
- **Ασύμφωνη Φώραση**: Όταν ο δέκτης δεν αξιοποιεί γνώση της φάσης του φέροντος (μειωμένη πολυπλοκότητα)
- Βασικά σχήματα διαμόρφωσης ζώνης διέλευσης
  - PSK (phase shift keying-διαμόρφωση μεταλλαγής φάσης)
  - FSK (frequency shift keying-διαμόρφωση μεταλλαγής συχνότητας)
  - ASK (amplitude shift keying-διαμόρφωση μεταλλαγής πλάτους)

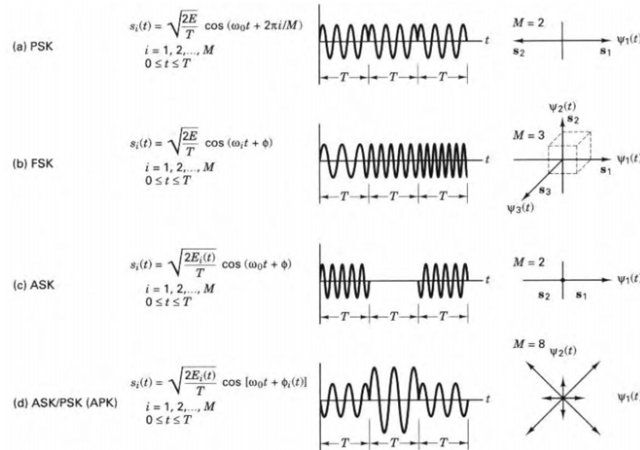
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

66



# Διαμορφώσεις

67



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

67

# Διαμορφώσεις Μεταλλαγής Φάσης

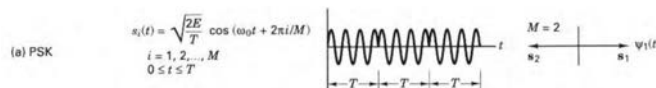
68

- Η γενική μορφή της αναλυτικής έκφρασης της Phase Shift Keying-PSK είναι

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi_i(t)) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

Όπου ο όρος  $\varphi_i(t)$  θα έχει M διακριτές τιμές, οι οποίες δίνονται από

$$\varphi_i(t) = \frac{2\pi i}{M}, i = 1, \dots, M$$



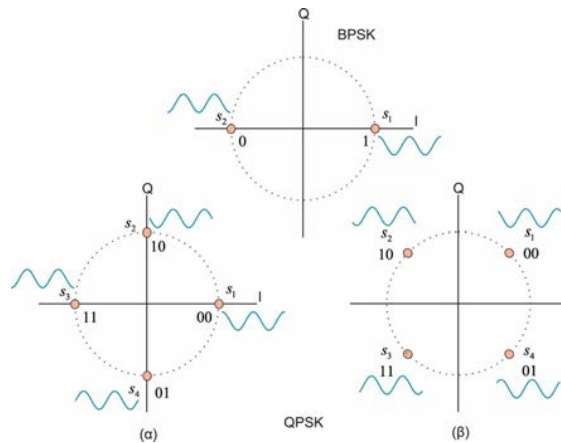
Χρησιμοποιείται τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε εμπορικές εφαρμογές

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

68

## Διαμορφώσεις Μεταλλαγής Φάσης

69



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

69

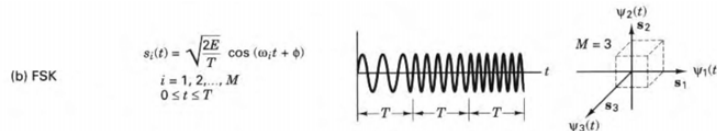
## Διαμορφώσεις Μεταλλαγής Συχνότητας

70

- Η γενική μορφή της αναλυτικής έκφρασης είναι

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \varphi) \quad \begin{matrix} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{matrix}$$

Όπου ο όρος  $\omega_i$  θα έχει  $M$  διακριτές τιμές και ο όρος φάσης  $\varphi$  είναι μια σταθερά



Ομαλή μετατόπιση στα σημεία εναλλαγής → FSK συνεχούς φάσης

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

70

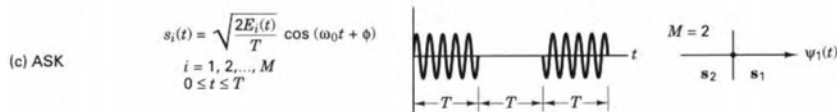
## Διαμορφώσεις Μεταλλαγής Πλάτους

71

- Η γενική μορφή της αναλυτικής έκφρασης είναι

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{array}$$

Όπου ο όρος  $\sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}}$  θα έχει  $M$  διακριτές τιμές και ο όρος φάσης  $\varphi$  είναι μια σταθερά



Ήταν μία από τις πρώτες μορφές ψηφιακής διαμόρφωσης

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

71

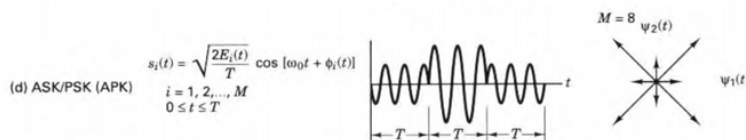
## Διαμορφώσεις Μεταλλαγής Πλάτους και Φάσης

72

- Η γενική μορφή της αναλυτικής έκφρασης είναι

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi_i(t)) \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{array}$$

Συνδυασμένη μεταβολή πλάτους και φάσης



Όταν το σύνολο των  $M$  συμβόλων είναι διευθετημένα σε αστερισμό ορθογωνικού σχήματος-εγκάρσια διαμόρφωση πλάτους -QAM

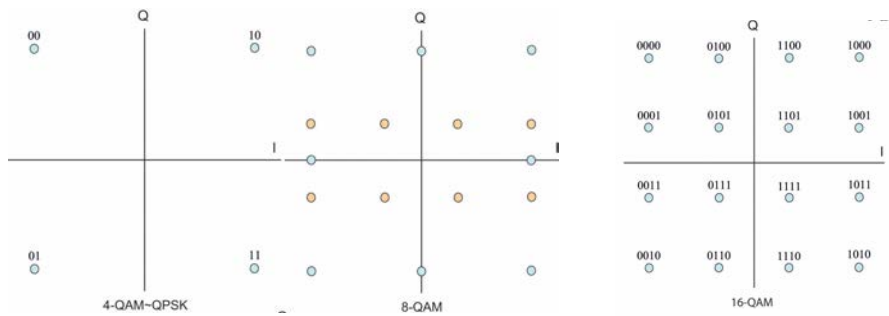
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

72

## Διαμορφώσεις Μεταλλαγής Πλάτους και Φάσης

73

### Ορθογώνιοι Αστερισμοί QAM



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

73

## Φώραση Σημάτων Παρουσία Θορύβου

74

- Το μοντέλο της διαδικασίας φώρασης είναι πανομοιότυπο με εκείνο της σηματοδότησης βασικής ζώνης
- Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία λαμβανόμενη ζωνοπερατή κυματομορφή σχηματίζεται κατ' αρχάς σε μια κυματομορφή βασικής ζώνης
- Για γραμμικά συστήματα, τα μαθηματικά φώρασης δεν επηρεάζονται από μια μετατόπιση στη συχνότητα

Η επίδοση των περισσότερων ψηφιακών συστημάτων επικοινωνίας περιγράφεται συχνά σαν το κανάλι να ήταν βασικής ζώνης

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

74

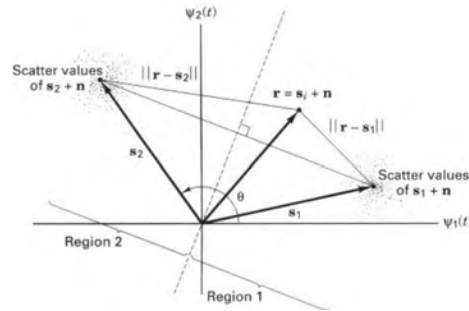
## Περιοχές Απόφασης

75

- Ο διδιάστατος χώρος είναι ο γεωμετρικός τόπος των διανυσμάτων που αναπαριστούν τα διαταραγμένα από το θόρυβο πρότυπα δυαδικά σήματα

$$s_1 + n \text{ και } s_2 + n$$

- Το διάνυσμα του θορύβου  $n$  είναι ένα τυχαίο διάνυσμα με μέση τιμή μηδέν
- Το διάνυσμα του λαμβανόμενου σήματος  $r$  θα έχει μέση τιμή  $s_1$  ή  $s_2$
- Η ευθύνη του φωρατή είναι αφού λάβει το σήμα  $r$  να αποφασίσει ποιο από τα σήματα  $s_1$  και  $s_2$  μεταδόθηκε πραγματικά



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

75

## Περιοχές Απόφασης

76

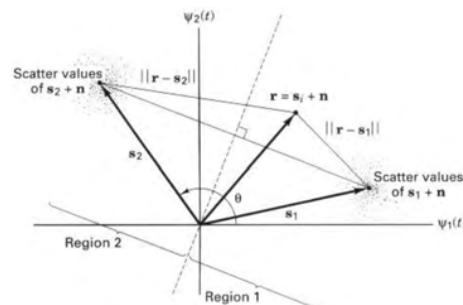
- Όταν  $M=2$ , τα  $s_1$  και  $s_2$  είναι ισοπίθανα και ο θόρυβος είναι AWGN, ο κανόνας απόφασης βασίζεται στο κριτήριο ελαχίστου σφάλματος
- Επιλογή εκείνης της κλάσης σημάτων που ελαχιστοποιεί την απόσταση

$$d(r, s_i) = \|r - s_i\|$$

Όπου η νόρμα ενός διανύσματος  $x$  με συντεταγμένες  $x_1$  και  $x_2$  δίνεται από

$$\|x\| = (x_1^2 + x_2^2)^{1/2}$$

Περιοχές απόφασης (decision regions)



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

76

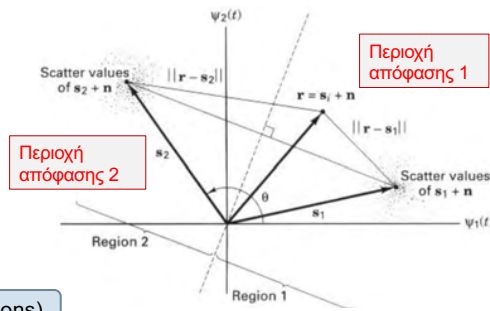
# Περιοχές Απόφασης

77

- Σχεδιάζουμε μία γραμμή που συνδέει τις απολήξεις των διανυσμάτων πρότυπων σημάτων  $s_1$  και  $s_2$
- Στη συνέχεια κατασκευάζουμε τη μεσοκάθετο της γραμμής ένωσης
- Εάν τα  $s_1$  και  $s_2$  είναι ίσου πλάτους, η γραμμή διέρχεται από την αρχή των αξόνων
- Εάν  $M=2$ , η μεσοκάθετος περιγράφει το όριο απόφασης που χρησιμοποιεί ο φωρατής

$$d(r, s_i) = \|r - s_i\|$$

Περιοχές απόφασης (decision regions)

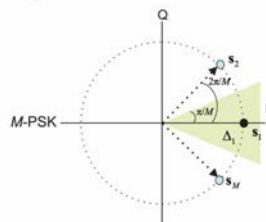
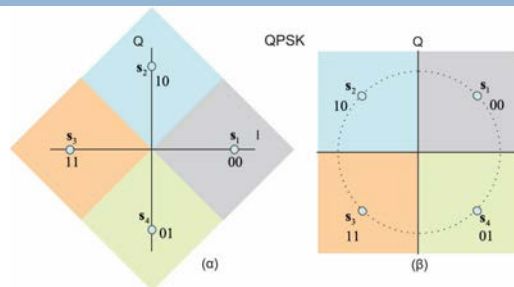


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

77

# Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση PSK

78



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

78

## Διαμόρφωση

79

- Είναι η διαδικασία αντιστοίχισης ενός ή περισσότερων bits («σύμβολο» – symbol) σε μια συγκεκριμένη κυματομορφή μέσα από ένα γνωστό σύνολο κυματομορφών
- Οι κυματομορφές αυτές είναι που διαμορφώνουν το τελικό σήμα ραδιοσυχνότητας.
- Ο δέκτης προσπαθεί να αναγνωρίσει στο σήμα που λαμβάνει κάποια από τις κυματομορφές του συνόλου ώστε να προσδιορίσει τελικά το σύμβολο (τα bits) που εκτέμφθηκαν.

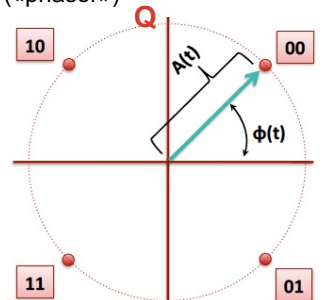
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

79

## Διαμόρφωση

80

- Μπορούμε να απεικονίσουμε τη διαμόρφωση ένα διάγραμμα όπου κάθε σύμβολο (που μεταφράζεται σε τιμή φάσης και πλάτους) αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο σημείο
- Το διάγραμμα αυτό λέγεται διάγραμμα I-Q (I-Q diagram) ή διάγραμμα σηματοστερισμού (constellation diagram)
- Το πλάτος και η φάση του φέροντος ανά πάσα στιγμή παρίστανται με ένα διάνυσμα με αφετηρία την αρχή των αξόνων («phasor»)
  - Για QPSK, το διάγραμμα σηματοστερισμού:



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

80

## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση PSK

81

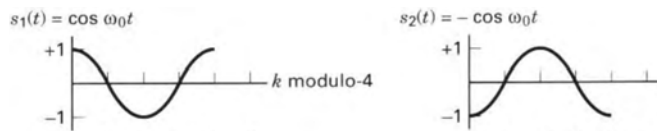
- Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα με δυαδική PSK (BPSK)

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi), 0 \leq t \leq T$$

$$s_2(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi)$$

$$= -\sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + \varphi), 0 \leq t \leq T$$

- Όπου ο όρος φάσης  $\varphi$  είναι μία αυθαίρετη σταθερά που δεν επηρεάζει την ανάλυση



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

81

## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση PSK

82

- Μία σημαντική μετρική της επίδοσης αυτών των συστημάτων είναι η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου  $P_E$
- Θα μελετήσουμε τη σύμφωνη φώραση για διαμόρφωση BPSK
- Υποθέτουμε ότι τα σήματα είναι ισοπίθανα
- Όταν στέλνουμε το σήμα  $s_i(t)$  ( $i=1,2$ ) τότε λαμβάνουμε το

$$r(t) = s_i(t) + n(t)$$

- Τα σήματα

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= \sqrt{E} \psi_1(t) \\ s_2(t) &= -\sqrt{E} \psi_1(t) \end{aligned} \right\}, 0 \leq t \leq T$$

- Ο φωρατής θα επιλέξει με βάση τον κανόνα  $s_1(t)$  εαν  $r(T) > \gamma_0 = 0$   
 $s_2(t)$  διαφορετικά

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

82

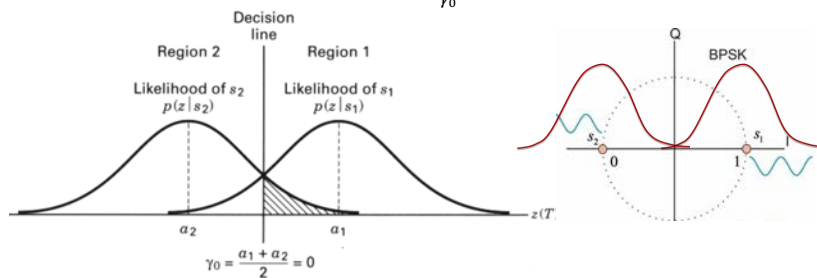


## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση PSK

83

- Υπάρχουν 2 τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί σφάλμα
- Ο ένας είναι να σταλθεί το σήμα  $s_2(t)$  και εξαιτίας του θορύβου, το σήμα στο δέκτη  $z(t)$  να είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι  $\gamma_0$
- Η πιθανότητα αυτού του σφάλματος απεικονίζεται με τη σκιασμένη περιοχή και δίνεται από

$$P(e|s_2) = P(H_2|s_2) = \int_{\gamma_0}^{\infty} p(z|s_2) dz$$



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

83

## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση PSK

84

- Πιθανότητα σφάλματος bit

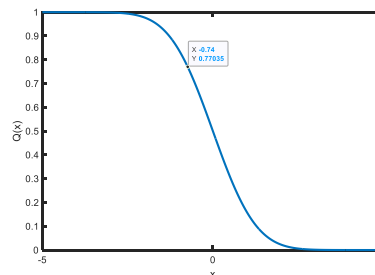
$$P_B = \int_{\sqrt{\frac{2E_S}{N_0}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = Q\left(\sqrt{\frac{2E_S}{N_0}}\right)$$

Η  $Q(x)$  ονομάζεται συμπληρωματική συνάρτηση λάθους (complementary error function) και ορίζεται

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

### Θεώρημα Ισοδυναμίας

Το αποτέλεσμα για την πιθανότητα σφάλματος bit για ζωνοπερατά συστήματα είναι ίδιο με εκείνο που υπολογίζεται και στα συστήματα βασικής ζώνης



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

84

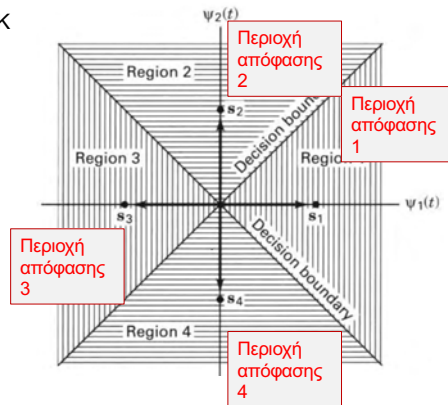
## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση MPSK

85

- Στην περίπτωση της διαμόρφωσης QPSK (4-PSK), τα δυαδικά ψηφία συλλέγονται ανά δύο τη φορά για κάθε περίοδο του συμβόλου
- Τα δύο διαδοχικά ψηφία υποδηλώνουν στο διαμορφωτή, ποια από τις τέσσερις κυματομορφές πρέπει να παράγει

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi i}{M}\right), \quad 0 \leq t \leq T$$

$$i = 1, \dots, M$$



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

85

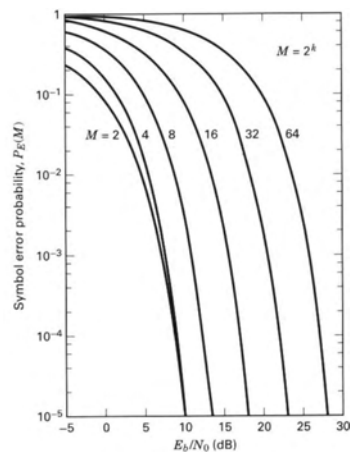
## Πιθανότητα Σφάλματος για MPSK

86

- Για μεγάλους λόγους ενέργειας bit προς θόρυβο ( $E_b/N_0$ ), η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου

$$P_E(M) \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right)$$

Όπου  $P_E(M)$  είναι η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου,  $E_s = E_b \log_2(M)$  είναι η ενέργεια από το σύμβολο και  $M=2^k$  είναι το πλήθος των συμβόλων

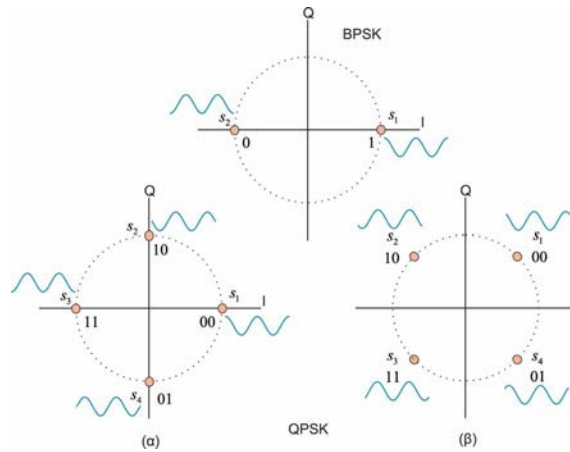


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

86

# Μ-Αδική Σηματοδοσία και Επίδοση

87

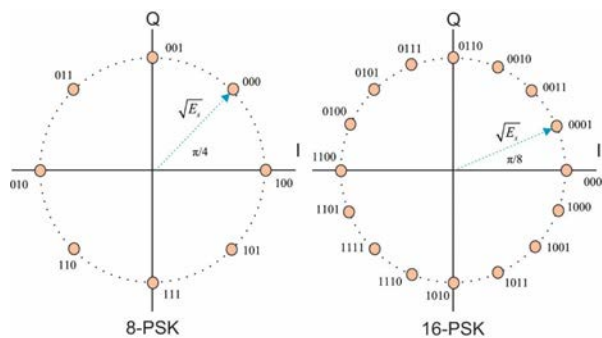


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

87

# Μ-Αδική Σηματοδοσία και Επίδοση

88



**8-PSK:** Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων κυματομορφών είναι  $M=2^K=8$  και κάθε σύμβολο μεταφέρει πληροφορία  $K=\log_2 8=3\text{bits}$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

88

## Ορθογώνια Διαμόρφωση Πλάτους- QAM

89

- Στην Ορθογώνια Διαμόρφωση Πλάτους (orthogonal amplitude modulation-QAM) εκτός από τη φάση μεταβάλλεται και το πλάτος των κυματομορφών

$$s_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_i}{T}} \cos(2\pi f_c t + \theta_i), & t \in [0, T], i = 1, \dots, M \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

- Σε μορφή I/Q

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i}{T}} \cos(\theta_i) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_i}{T}} \sin(\theta_i) \sin(2\pi f_c t)$$

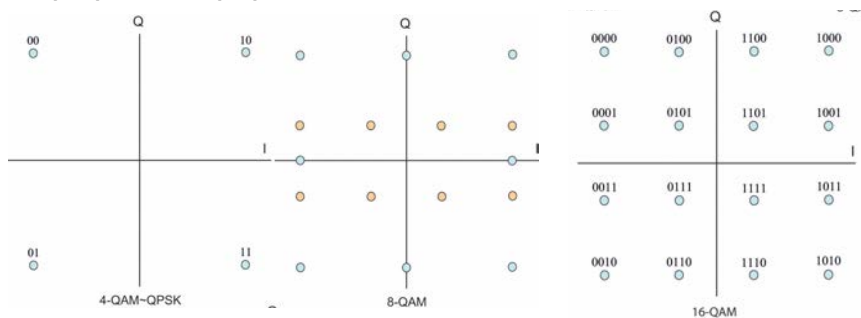
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

89

## Ορθογώνια Διαμόρφωση Πλάτους- QAM

90

### Ορθογώνιοι Αστερισμοί QAM



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

90

## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση FSK

91

- Στη διαμόρφωση FSK η πληροφορία μεταφέρεται με τη βοήθεια της συχνότητας του φορέα

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_i t + \varphi), \quad 0 \leq t \leq T$$
$$i = 1, \dots, M$$

Όπου  $E$  είναι το ενεργειακό περιεχόμενο του  $s_i(t)$  για κάθε περίοδο συμβόλου  $T$ , το  $\omega_{i+1} - \omega_i$  είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $\pi/T$ , και ο όρος της φάσης  $\varphi$  είναι μία αυθαίρετη σταθερά και μπορεί να τεθεί ίση με το 0

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

91

## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση FSK

92

### Πιθανότητα Σφάλματος

- Για ορθογώνια σήματα

$$P_B = \int_{\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

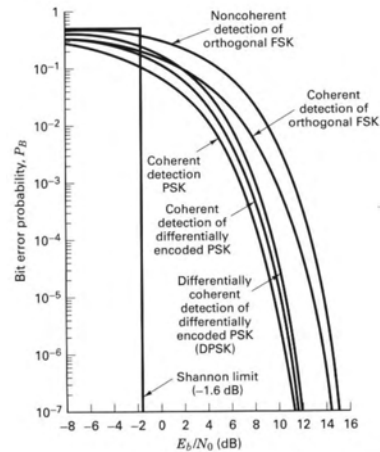
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

92

## Σύμφωνη Φώραση σε Συστήματα με Διαμόρφωση FSK

93

- Υπάρχει διαφορά 4dB μεταξύ της βέλτιστης (σύμφωνη PSK) και της χειρότερης (μη-σύμφωνης FSK)
- Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις, είναι πιο επιθυμητό να απλοποιηθεί η λειτουργία του συστήματος με κάποιο μικρό κόστος στην επίδοση (μη-σύμφωνες διαμορφώσεις)



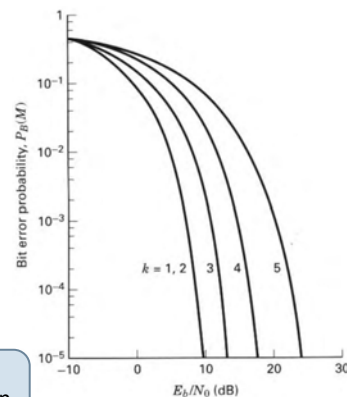
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

93

## M-Αδική Σηματοδοσία και Επίδοση

94

- Απεικονίζεται η πιθανότητα σφάλματος bit  $P_b(M)$  διαμορφώσεων MPSK συναρτήσεως του  $E_b/N_0$  σε κανάλια AWGN
- Όσο αυξάνεται το  $k$  (με  $M=2^k$ ), η πιθανότητα σφάλματος αυξάνει
- Ταυτόχρονα, όσο αυξάνει το  $k$  βελτιώνεται η αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (δλδ χρησιμοποιείται μεγαλύτερος ρυθμός bit εντός του ίδιου εύρους ζώνης)



Η βελτιωμένη απόδοση όσον αφορά στο εύρος ζώνης επιτυγχάνεται με αντίτιμο την υποβάθμιση της επίδοσης ως προς τα σφάλματα

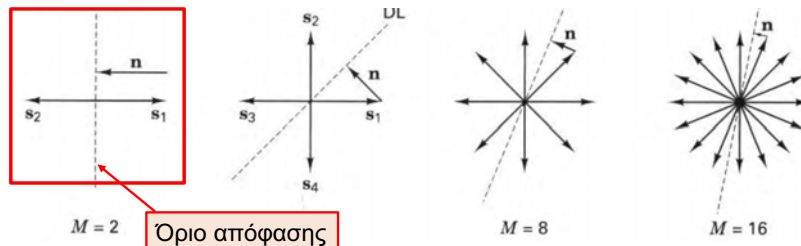
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

94

## Διανυσματική θεώρηση της Σηματοδοσίας MPSK

95

- Τα διανύσματα για δυαδικά ( $k=1, M=2$ ) αντίποδα σήματα  $s_1$  και  $s_2$  με διαφορά  $180^\circ$
- Το διάνυσμα θορύβου  $n$  είναι ίσο σε μέτρο με το  $s_1$  και με προσανατολισμό κατάλληλο
- Δίνεται μία γραφική εκτίμηση της ελάχιστης ενέργειας που είναι απαραίτητη για να δημιουργηθεί σφάλμα



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

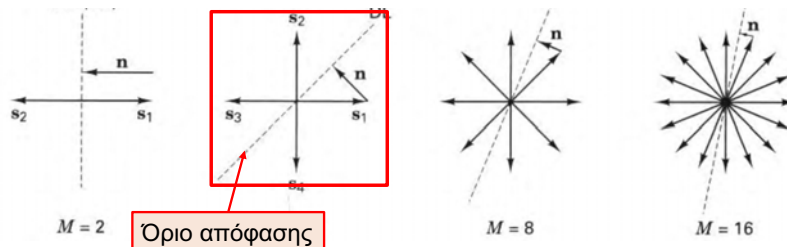
95

## Διανυσματική θεώρηση της Σηματοδοσίας MPSK

96

- Τα διανύσματα για δυαδικά ( $k=2, M=4$ )  $s_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) με διαφορά  $90^\circ$
- Ορίζονται 4 περιοχές
- Το διάνυσμα θορύβου  $n$  απεικονίζει το διάστημα ελάχιστης ενέργειας θορύβου που θα ανάγκασε το φωρατή να υποπέσει σ' ένα σφάλμα συμβόλου

Το διάνυσμα ελάχιστης απόφασης είναι μικρότερο όταν  $M=4$  από όταν  $M=2$



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

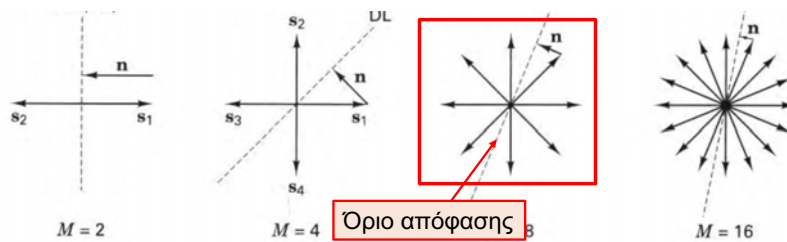
96

## Διανυσματική Θεώρηση της Σηματοδοσίας MPSK

97

- Τα διανύσματα για δυαδικά ( $k=3, M=8$ )  $s_i$  ( $i=1, \dots, 8$ ) με διαφορά  $45^\circ$  ορίζονται 8 περιοχές
- Το διάνυσμα θορύβου  $n$  απεικονίζει το διάστημα ελάχιστης ενέργειας θορύβου που θα ανάγκαζε το φωρατή να υποπέσει σ' ένα σφάλμα συμβόλου

Όσο αυξάνουμε το  $M$  τα διανύσματα πλησιάζουν περισσότερο το ένα στο άλλο  $\rightarrow$  απαιτείται μικρότερη ποσότητα ενέργειας θορύβου για να προκληθεί ένα σφάλμα



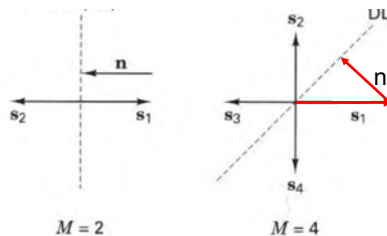
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

97

## Διανυσματική Θεώρηση της Σηματοδοσίας MPSK

98

- Αυξάνοντας το  $M$  αυξάνουμε τον βαθμό χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης με αντίτιμο την υποβάθμιση της επίδοσης ως προς τα σφάλματα
- Πως μπορούμε να κερδίσουμε τη χαμένη επίδοση ως προς τα σφάλματα;
- Αυξάνοντας της ένταση του σήματος  $\rightarrow$  να μεγαλώσουμε τα διανύσματα



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

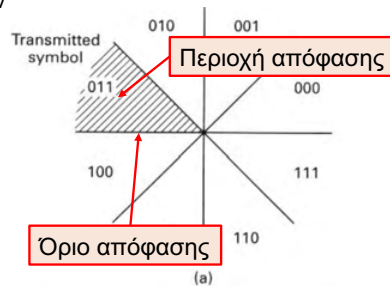
98



## BER vs SER

99

- Στην περίπτωση της σηματοδοσίας MPSK, κάθε διάνυσμα σήματος δεν ισαπέχει από όλα τα άλλα
- Στην περίπτωση 8-αδικής σηματοδοσίας, εάν μεταδοθεί το 011 και συμβεί σφάλμα, το σήμα που θα αναγνωρισθεί θα είναι το 100 ή το 010
- Η πιθανοφάνεια να αναγνωρισθεί το 111 είναι συγκριτικά μικρότερη
- Άρα ένα σφάλμα συμβόλου μπορεί να αντιστοιχίσει σε 1 έως 3 σφάλματα bit



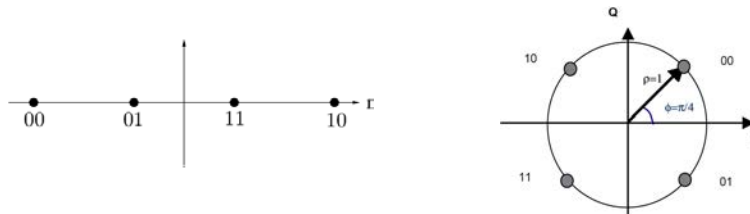
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

99

## Κωδικοποίηση Gray

100

- Με την κωδικοποίηση Gray, η αντιστοίχιση bits σε σύμβολα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε γειτονικά στον αστερισμό σύμβολα να διαφέρουν πάντα κατά 1 bit
- Έτσι εάν συμβεί λάθος στην ανίχνευση ενός συμβόλου, η μεγαλύτερη πιθανότητα είναι το εσφαλμένο εκτιμώμενο σύμβολο να είναι γειτονικό του σωστού



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

100

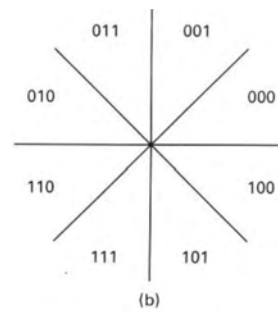
## BER vs SER

101

- Η κωδικοποίηση Gray σε 8-αδική PSK
- Τα γειτονικά bit διαφέρουν κατά ένα μόνο bit
- Η πιθανότητα να εμφανιστεί σφάλμα σε πολλαπλά bit, για δεδομένο σφάλμα συμβόλου, είναι πολύ μικρότερη

$$P_B = \frac{P_E}{\log_2 M}$$

Η κωδικοποίηση Gray είναι από τις ελάχιστες περιπτώσεις, όπου μπορεί να επιτευχθεί όφελος χωρίς οποιαδήποτε κόστος



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

101

## Κωδικοποίηση Καναλιού

102

- Ο όρος **κωδικοποίηση καναλιού (channel coding)** αναφέρεται στην κατηγορία μετασχηματισμών σήματος που αποσκοπούν στη βελτίωση της επίδοσης ενός συστήματος επικοινωνίας
- Επιτρέπουν στα μεταδιδόμενα σήματα να επιδεικνύουν αυξημένη αντοχή στις διάφορες φθοροποιές επιδράσεις που εισάγει το κανάλι επικοινωνίας, όπως είναι ο θόρυβος, οι παρεμβολές και τα φαινόμενα διαλείψεων

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

102

## Κωδικοποίηση Καναλιού

103

- Το υποκείμενο κανάλι μπορεί να αντιστρέφει bits του πακέτου
  - ένα ή περισσότερα 0 γίνονται 1 ή το αντίστροφο
  - το πακέτο δεν χάνεται αλλά αλλοιώνεται
- Χρειάζονται 2 επιπλέον λειτουργίες για την αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων:
  - έναν τρόπο να ανιχνεύεται αν το πακέτο έχει σφάλματα ή όχι
  - έναν τρόπο να διορθώνονται τα σφάλματα όταν αυτά συμβαίνουν

*ΕΡ: Πώς εντοπίζουν και διορθώνουν οι άνθρωποι σφάλματα επικοινωνίας όταν συνομιλούν;*

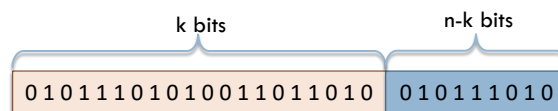
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

103

## Ρυθμός Κώδικα και Πλεονασμός

104

- Στην περίπτωση των κωδικών μπλοκ, τα δεδομένα της πηγής χωρίζονται σε μπλοκ των  $k$  bits δεδομένων έκαστο (**bits πληροφορίας ή bits μηνύματος**)
- Κάθε μπλοκ μπορεί να αναπαραστήσει οποιοδήποτε από  $2^k$  διαφορετικά μηνύματα
- Ο κωδικοποιητής μετασχηματίζει κάθε  $k$ -bits σε ένα μεγαλύτερο μπλοκ με  $n$  bits, τα οποία αποκαλούνται **κωδικά bits ή σύμβολα καναλιού**
- Τα  $(n-k)$  bits που προσθέτει ο κωδικοποιητής σε κάθε μπλοκ δεδομένων αποκαλούνται **πλεονασματικά bits ή bits ελέγχου** (δεν φέρουν νέα πληροφορία)
- Ένας τέτοιος κώδικας αναφέρεται ως  $(n,k)$



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

104

## Ρυθμός Κώδικα και Πλεονασμός

105

- Ο λόγος των πλεονασματικών bits προς τα bits των δεδομένων, αποκαλείται πλεονασμός (**redundancy**) και συμβολίζεται ως

$$\frac{n - k}{k}$$

- Ο λόγος των bits δεδομένων προς το σύνολο αποκαλείται ρυθμός του κώδικα (**code rate**) και συμβολίζεται ως

$$R_c = \frac{k}{n}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

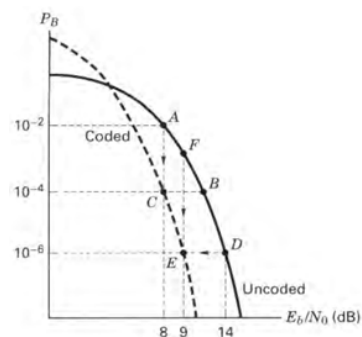
105

## Κωδικοποίηση με Διόρθωση Σφαλμάτων

106

- Η κωδικοποίηση με διόρθωση σφαλμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως μέσο για την πραγματοποίηση διαφόρων συμβιβασμών
- Εάν το σημείο λειτουργίας του συστήματος είναι το, με  $P=10^{-2}$
- Έστω ότι θέλουμε να βελτιώσουμε την πιθανότητα σφάλματος στο  $10^{-4}$
- Εάν δεν μπορούμε να πάμε στο σημείο B (μέσω αύξησης του  $E_b/N_0$ )
- Θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κωδικοποίηση και να πάμε στο σημείο C

Υπάρχει ανάγκη πλεονασμού →  
περισσότερο εύρος ζώνης



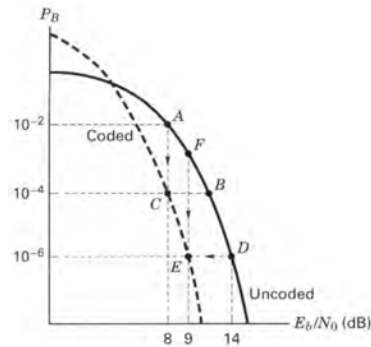
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

106

## Κωδικοποίηση με Διόρθωση Σφαλμάτων

107

- Η κωδικοποίηση με διόρθωση σφαλμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως μέσο για την πραγματοποίηση διαφόρων συμβιβασμών
- Εάν το σημείο λειτουργίας του συστήματος είναι στο σημείο D, με  $P=10^{-6}$  και  $E_b/N_0=14\text{dB}$
- Έστω ότι θέλουμε να βελτιώσουμε προβλήματα αξιοπιστίας μέσω της μείωσης του  $E_b/N_0$
- Εάν δεν μπορούμε να πάμε στο σημείο B (με αύξηση της πιθανότητας σφάλματος)
- Θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κωδικοποίηση και να πάμε στο σημείο E



Υπάρχει ανάγκη πλεονασμού →  
περισσότερο εύρος ζώνης

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

107

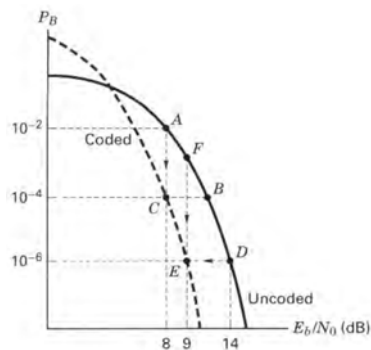
## Κωδικοποίηση με Διόρθωση Σφαλμάτων

108

### Κέρδος Κωδικοποίησης

- Για δεδομένη πιθανότητα σφάλματος bit, το κέρδος κωδικοποίησης (coding gain) ορίζεται ως η μείωση του λόγου  $E_b/N_0$  που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κώδικα

$$G(\text{dB}) = \left(\frac{E_s}{N_0}\right)_u (\text{dB}) - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_e (\text{dB})$$



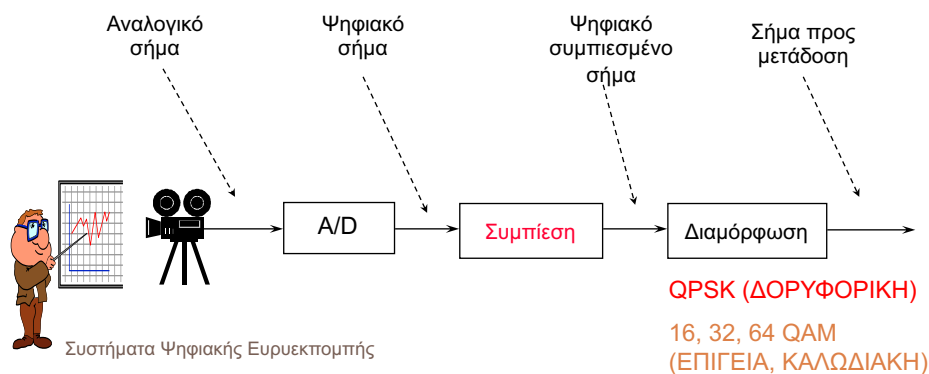
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

108

## Ψηφιακή Τηλεόραση

109

- Είναι η εκπομπή τηλεοπτικών προγραμμάτων με τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας. Δηλαδή τα σήματα video και audio εκτέμπονται με τη μορφή ψηφιακών σημάτων (bit).



109

## Πρότυπα DVB



110

- Το Digital Video Broadcasting (DVB) αποτελείται από ένα σύνολο διεθνώς ανοικτών προτύπων για την ψηφιακή τηλεόραση.
- Τα πρότυπα DVB διατηρούνται από το DVB Project ([www.dvb.org](http://www.dvb.org)) μια διεθνής βιομηχανική κοινοπραξία με περισσότερα από 270 μέλη και δημοσιεύονται από την Κοινή Τεχνική Επιτροπή (JTC) του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI), της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (CENELEC) και την Ευρωπαϊκή Ένωση Ραδιοφωνίας (EBU).

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

110

## Πρότυπα DVB



111

- Τα συστήματα DVB διανέμουν δεδομένα χρησιμοποιώντας διάφορες προσεγγίσεις, όπως:
  - ▣ Δορυφορική: **DVB-S**, **DVB-S2** και **DVB-SH**
    - **DVB-SMATV** για διανομή μέσω SMATV
  - ▣ Καλωδιακή: **DVB-C**, **DVB-C2**
  - ▣ Επίγεια τηλεόραση: **DVB-T**, **DVB-T2**
    - Ψηφιακή επίγεια τηλεόραση για φορητές συσκευές: **DVB-H**, **DVB-SH**
  - ▣ Μικροκύματα: χρησιμοποιώντας τα πρότυπα
    - DTT (**DVB-MT**)
    - MMDS (**DVB-MC**)
    - MVDS (**DVB-MS**)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

111

## Πρότυπα DVB

112

<b>Δορυφορικό</b>	<b>ETS 300 421</b> Digital satellite transmission systems
<b>Καλωδιακό</b>	<b>ETS 300 429</b> Digital cable delivery systems
<b>Επίγειο</b>	<b>ETS 300 744</b> Digital terrestrial broadcasting systems
<b>Διανομής “πολλών σημείων”</b>	<b>ETS 300 748</b> Digital multipoint distribution systems at and above 10 GHz <b>ETS 300 749</b> Digital multipoint distribution systems at or below 10 GHz
<b>(Satellite) Master Antenna Telev. (SMART)</b>	<b>ETS 300 473</b> Digital satellite master antenna television (SMART) distribution systems
<b>Αλληλο- δραστικής τηλεόρασης</b>	<b>ETS 800</b> Return channels in CATV systems (DVB-RCC) <b>ETS 300 801</b> Network-independent Interactive protocols (DVB-NIP) <b>ETS 300 802</b> Return channels in PSTN / ISDN systems <b>ETS 300 813</b> Interfacing to PDH networks <b>ETS 300 814</b> Interfacing to SDH networks
<b>Εκπομπής Data</b>	<b>TS/EN 301 192</b> Specification for the transmission of data in DVB systems

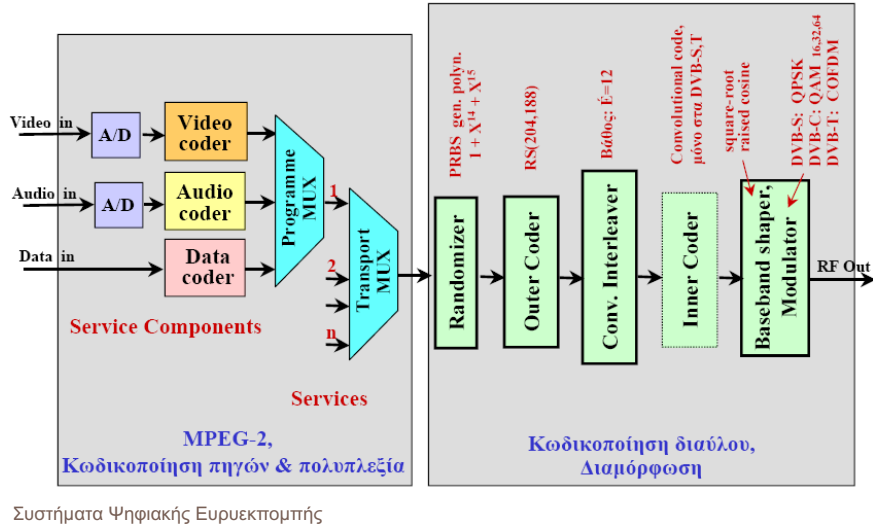
<http://www.dvb.org>

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

112

# DVB: Αρχιτεκτονική πομπού

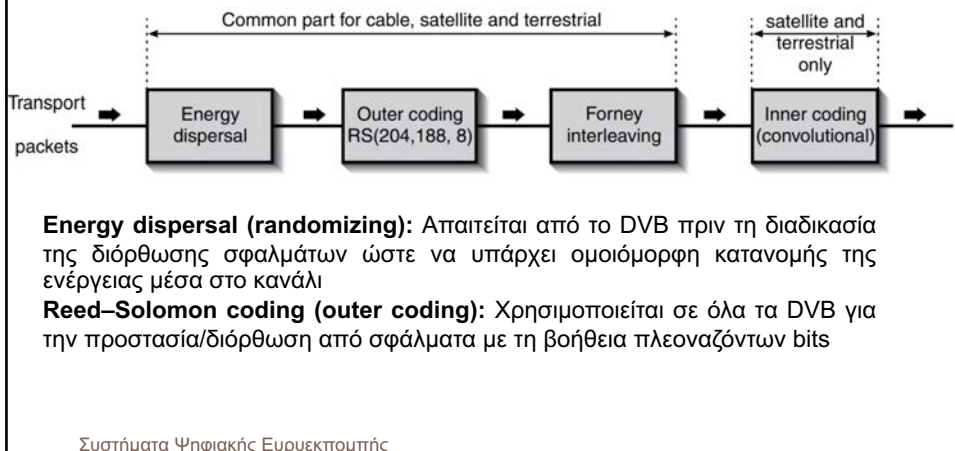
113



113

# DVB: Αρχιτεκτονική πομπού

114

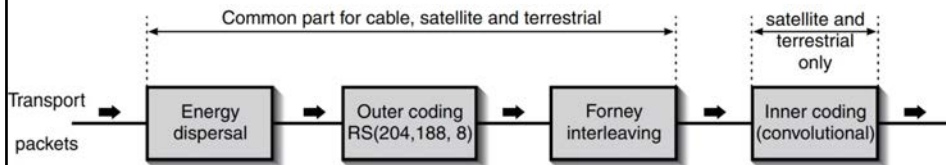


114



## DVB: Αρχιτεκτονική πομπού

115



**Forney convolutional interleaving:** Σκοπός είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας της κωδικοποίησης RS στην περίπτωση των σφαλμάτων ριπής

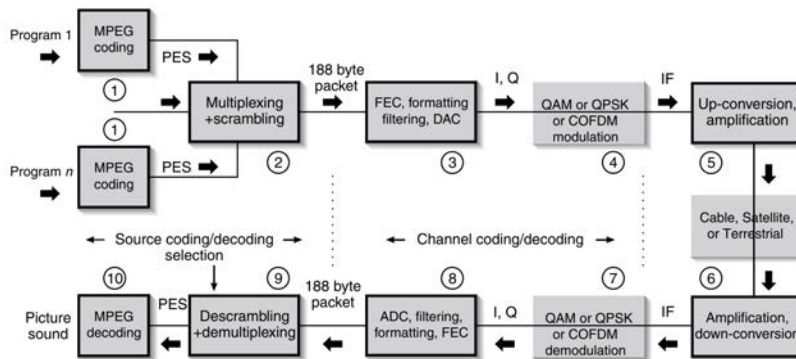
**Convolutional coding (inner coding):** Χρησιμοποιείται μόνο στα DVB satellite και terrestrial για τη βελτίωση της διαδικασίας διόρθωσης σφαλμάτων και από άλλα λάθη

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

115

## Μετάδοση και Λήψη DVB

116

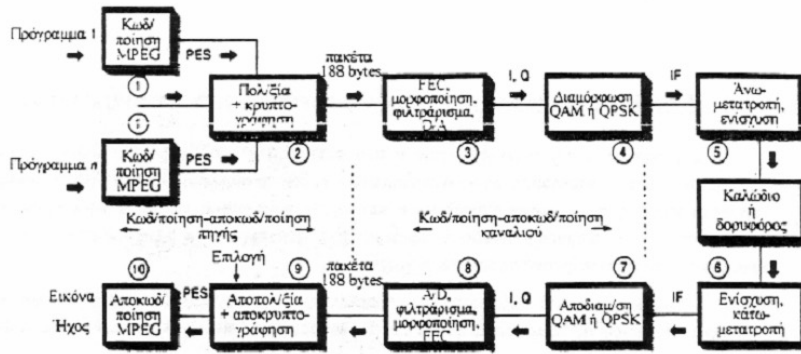


Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

116

# Μετάδοση DVB

117

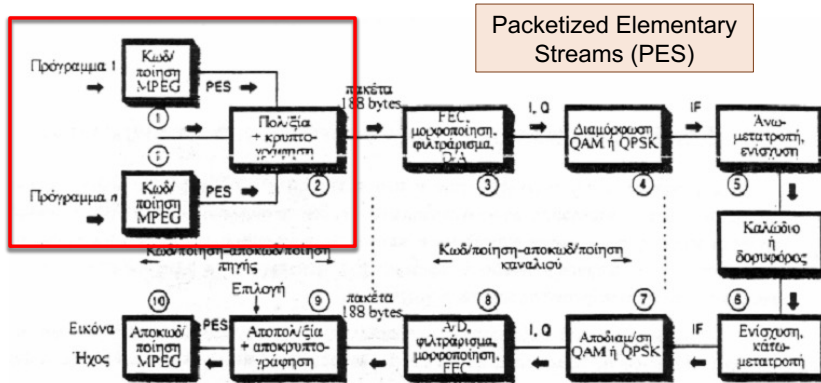


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

117

# Μετάδοση DVB

118



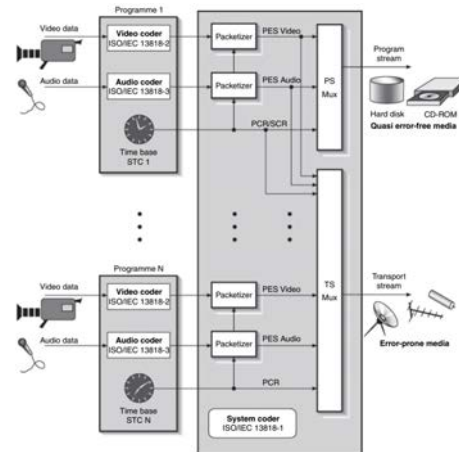
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

118

# Μετάδοση DVB

119

- Μια τυπική μέθοδος μετάδοσης στοιχείων στοιχειώδους ροής από έναν κωδικοποιητή βίντεο ή ήχου είναι πρώτα να δημιουργηθούν πακέτα Packetized Elementary Stream (PES) από τα δεδομένα στοιχειώδους ροής και στη συνέχεια να ενσωματωθούν μέσα στα πακέτα ροής μεταφοράς (transport stream-TS) ή στα πακέτα ροής προγράμματος (packet stream-PS)
- Τα πακέτα TS μπορούν στη συνέχεια να πολυπλέκονται και να μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τεχνικές εκπομπής



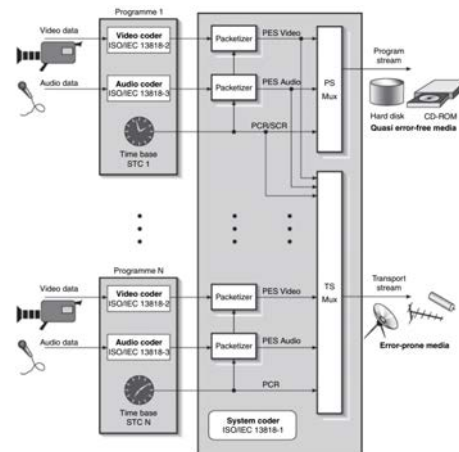
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

119

# Μετάδοση DVB

120

- Διαμοιράζονται το ίδιο ρολόι συστήματος
- Είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου το κανάλι μεταφοράς εισαγάγει πολύ μικρό αριθμό σφαλμάτων ( $10^{-10}$ ), πχ cd-rom hard-disk
- Κατάλληλα για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις
- Ανεκτικά σε μεγάλα BER ( $10^{-4}$ )
- Το μέγεθος τους είναι σχετικά μικρό



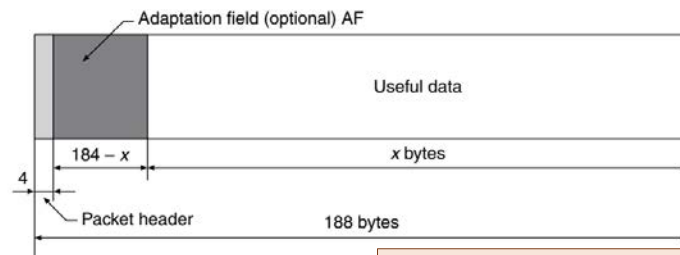
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

120

## Μετάδοση DVB

121

- Αυτά τα PES χρησιμοποιούνται από τον πολυπλέκτη για τον σχηματισμό πακέτων μετάδοσης μεγέθους 188 bytes, τα οποία τελικά κρυπτογραφούνται (πίνακες Conditional Access Table (CAT) που φέρουν πληροφορίες πρόσβασης υπό συνθήκη ECM/EMM εισάγονται σε αυτήν την περίπτωση), καθώς επίσης και οι πίνακες PAT, PMT, PSI και DVB-SI (ETSI EN 300 468) για τον ηλεκτρονικό οδηγό προγράμματος EPG (electronic program guide)



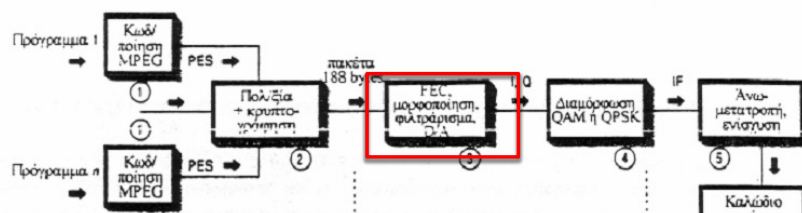
**ECM** Entitled Control Message  
**EMM** Entitled Management Message

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

121

## Μετάδοση DVB

122



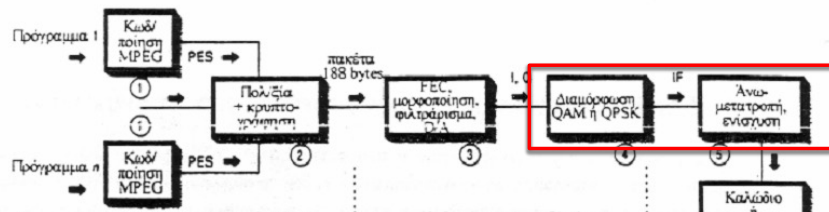
- Η διόρθωση σφαλμάτων RS αυξάνει το μέγεθος του πακέτου σε 204 bytes. Για την περίπτωση δορυφορικής μετάδοσης, η συνελκτική κωδικοποίηση πολλαπλασιάζει τον ρυθμό με ένα παράγοντα μεταξύ 1.14 ( $R_c = 7/8$ ) και 2 ( $R_c = 1/2$ ). Στη συνέχεια η μορφοποίηση των δεδομένων (χαρτογράφηση συμβόλων) ακολουθούμενη από φιλτράρισμα και ψηφιακή-σε-αναλογική (D/A) μετατροπή παράγει τα αναλογικά σήματα I και Q

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

122

## Μετάδοση DVB

123



- Τα σήματα I και Q διαμορφώνουν (QPSK για δορυφορική και QAM για καλωδιακή) ένα φέρον IF (ενδιάμεσης συχνότητα της τάξης των 70 MHz)
- Το σήμα IF ανυψώνεται σε κατάλληλη ζώνη συχνοτήτων (ανάλογα το μέσο) για την μετάδοση του στους τελικούς χρήστες

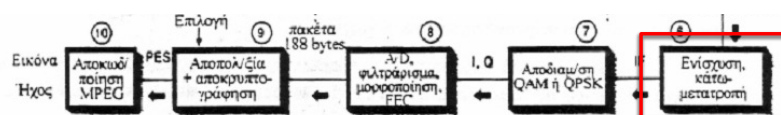
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

123

## Λήψη DVB

124

- Στην περίπτωση δορυφορικής λήψης, γίνεται αρχικά υποβιβασμός της συχνότητας στην απόληξη της κεραίας (μετατροπέας χαμηλού θορύβου, LNC, low noise converter), ο οποίος οδηγεί την συχνότητα στη ζώνη των 950-2150 MHz (είσοδος του IRD), όπου δέχεται μια δεύτερη υποβάθμιση (μετά την επιλογή του RF καναλιού) σε μια IF συχνότητα περίπου 480MHz. Για καλωδιακή λήψη, υπάρχει μόνο ένας υποβιβασμός της συχνότητας από την ζώνη των VHF/UHF στην IF συχνότητα των 36.15 MHz στην Ευρώπη



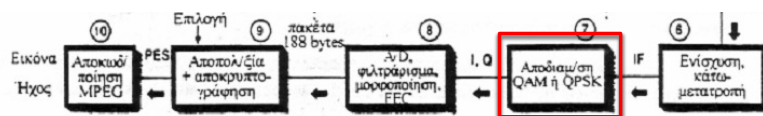
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

124

## Λήψη DVB

125

- Η σχετική αποδιαμόρφωση αυτού του IF σήματος παρέχει τα αναλογικά σήματα I και Q



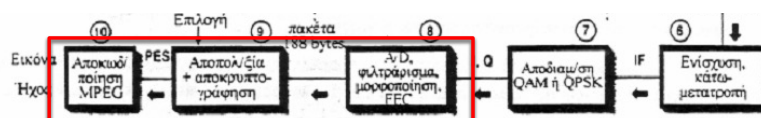
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

125

## Λήψη DVB

126

- Μετά τη μετατροπή αναλογικό-σε-ψηφιακό (A/D), το φιλτράρισμα και την αναμόρφωση των σημάτων I και Q (αποχαρτογράφηση συμβόλων, symbol demapping), ανακτώνται τα πακέτα μετάδοσης των 188 bytes με εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων
- Ο αποπολυπλέκτης επιλέγει το PES που αντιστοιχεί στο πρόγραμμα που επέλεξε ο χρήστης, το οποίο μπορεί να είχε προηγουμένως αποκρυπτογραφηθεί με την βοήθεια των ECM, EMM και του κλειδιού χρήστη (έξυπνη κάρτα)
- Ο αποκωδικοποιητής MPEG-2 ανασυνθέτει την εικόνα και τον ήχο του επιλεγμένου προγράμματος

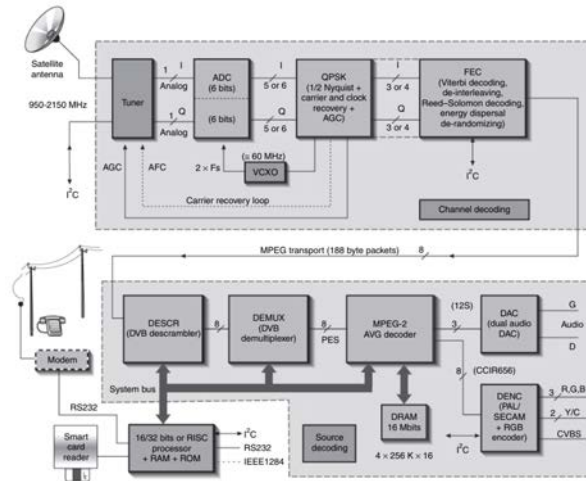


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

126

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

127

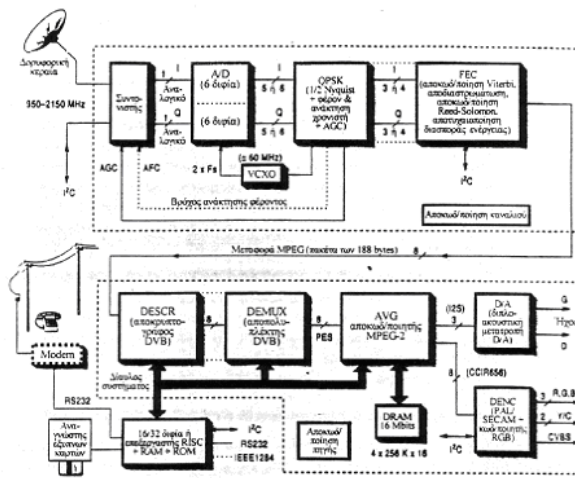


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

127

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

128



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

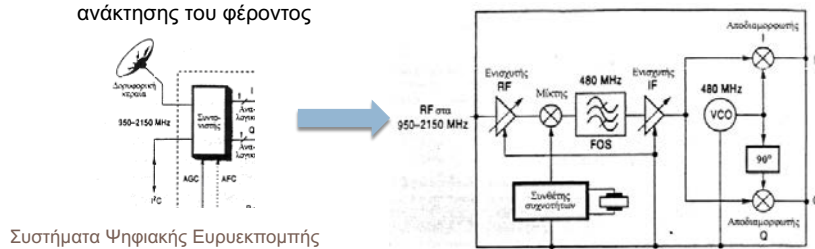
128

## Δομή Δορυφορικού Δέκτη

129

### □ Συντονιστής ή front end

- Ο συντονιστής ελέγχεται γενικότερα από ένα σειριακό δίαυλο επικοινωνίας (I<sup>2</sup>C bus), επιλέγει τα απαιτούμενο κανάλι RF στην περιοχή 950-2150 MHz, το μετατρέπει σε ένα σήμα IF των 480 MHz και επιτυγχάνει την απαιτούμενη επιλογή διαμέσου ενός **φίλτρου επιφανείας ακουστικού κύματος** (SAW, surface acoustic wave filter). Το σήμα ενισχύεται και αποδιαμορφώνεται συμφασικά ως προς τους άξονες 0° και 90° για να ληφθούν τα αναλογικά σήματα I και Q. Η ανάκτηση της φάσης του φέροντος που απαιτείται για αποδιαμόρφωση, πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τα επόμενα στάδια του δέκτη με κλειδίωμα της φάσης και της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή διαμέσου ενός βρόχου ανάκτησης του φέροντος



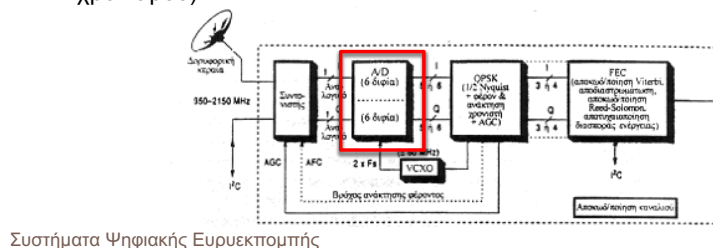
129

## Δομή Δορυφορικού Δέκτη

130

### □ Μετατροπές από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC)

- Ο ADC λαμβάνει τα αναλογικά σήματα I και Q, τα οποία μετατρέπει σε διπλάσια από τη συχνότητα συμβόλου  $f_{symbol}$  (της τάξης των 30 MHz στην Ευρώπη). Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτό επιτυγχάνεται με έναν διπλό ADC με ανάλυση 6 bits ο οποίος λειτουργεί με συχνότητα δειγματοληψίας μεγαλύτερη των 60 MHz. Εδώ ξανά, η συχνότητα δειγματοληψίας κλειδώνεται στη συχνότητα συμβόλου διαμέσου ενός κυκλώματος βρόχου κλειδωμένης φάσης PLL (δηλ. βρόχος ανάκτησης χρονισμού)



130

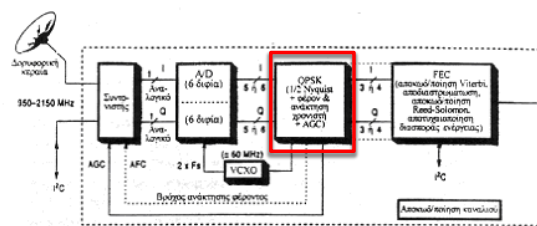


# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

131

## □ QPSK

- Το τμήμα QPSK, εκτός των λειτουργιών του που αφορούν τους βρόχους ανάκτησης του φέροντος και χρονισμού, επιτυγχάνει τη διαδικασία φιλτραρίσματος ημί-Nyquist επιπρόσθετα αυτής που εφαρμόζεται στον αναμεταδότη για τα σήματα I και Q. Τα ψηφιοποιημένα πλέον σήματα οδηγούνται οργανωμένα σε ομάδες των 2x3 ή 2x4 bits στο επόμενο λειτουργικό τμήμα (FEC)



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

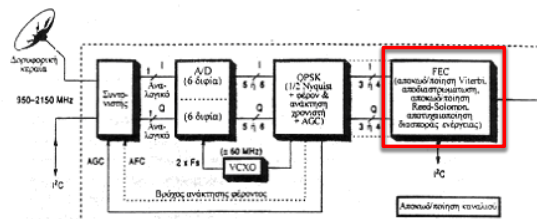
131

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

132

## □ Εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων (FEC)

- Το τμήμα FEC διακρίνει, με τη λογική της πλειονότητας, τα '0' από τα '1' και επιτυγχάνει την πλήρη διόρθωση σφαλμάτων με την ακόλουθη σειρά: αποκωδικοποίηση του κώδικα συνέλιξης, απο-διεμπλοκή (de-interleaving), αποκωδικοποίηση Reed-Solomon και από-τυχαιοποίηση (de-randomizing) διασποράς ενέργειας. Τα δεδομένα εξόδου είναι πακέτα μετάδοσης μεγέθους 188 bytes που γενικότερα διανέμονται σε παράλληλη μορφή (δεδομένα 8-bit, σήματα ελέγχου και χρονισμού, από τα οποία το ένα δηλώνει μη-διορθώσιμα σφάλματα)



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

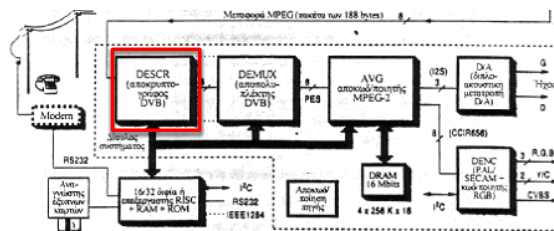
132

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

133

## □ Αποκρυπτογράφος

- Το τμήμα DESC (αποκρυπτογράφος) λαμβάνει τα πακέτα μετάδοσης και επικοινωνεί με τον κυρίως επεξεργαστή διαμέσου παράλληλου δίαυλου για τη γρήγορη μεταφορά δεδομένων. Επιλέγει και αποκρυπτογραφεί τα πακέτα του απαιτούμενου προγράμματος υπό έλεγχο της μονάδας πρόσβασης υπό συνθήκη. Αυτή η λειτουργία πολλές φορές συνδυάζεται με τον αποπολυπλέκτη



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

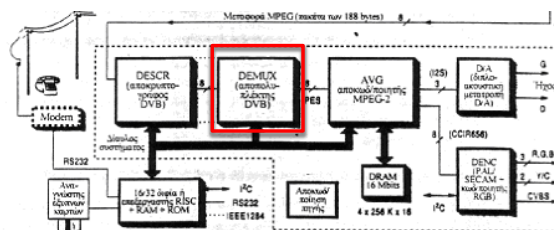
133

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

134

## □ Αποπολυπλέκτης

- Ο αποπολυπλέκτης (DEMUX) επιλέγει, διαμέσου προγραμματιζόμενων 'φίλτρων', τα πακέτα PES που αντιστοιχούν στο πρόγραμμα που επιλέχθηκε από τον χρήστη



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

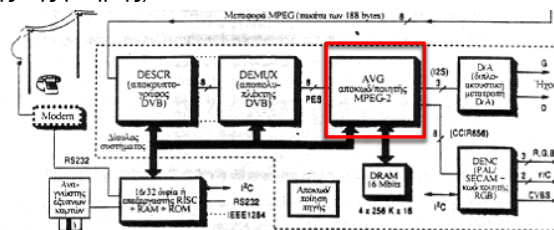
134

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

135

□ MPEG

- Οι οπτικές και ηχητικές έξοδοι PES από τον αποπολυπλέκτη εφαρμόζονται στην είσοδο του τμήματος MPEG, που σε γενικές γραμμές συνδυάζει τις οπτικές και ηχητικές λειτουργίες και αυτές του ελέγχου γραφικών που απαιτούνται, μεταξύ άλλων, για τον ηλεκτρονικό οδηγό προγράμματος (EPG). Η αποκωδικοποίηση MPEG-2 περιλαμβάνει γενικότερα τουλάχιστον 16 Mbits **DRAM** (κάποιες φορές περισσότερα για την αποκωδικοποίηση σημάτων 625 γραμμών, ανάλογα των δυνατοτήτων διαχείρισης της μνήμης)



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

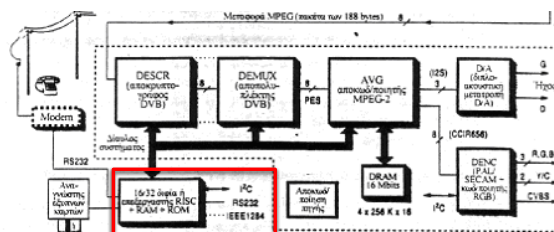
135

# Δομή Δορυφορικού Δέκτη

136

□ Μικροεπεξεργαστής

- Το όλο σύστημα ελέγχεται από έναν πανίσχυρο μικροεπεξεργαστή 16/32 bits ο οποίος ελέγχει το κύκλωμα, ερμηνεύει τις εντολές του χρήστη από το τηλεχειριστήριο, και διαχειρίζεται τους αναγνώστες έξυπνων καρτών και τις επικοινωνιακές διασυνδέσεις που γενικά υπάρχουν στο δέκτη. Το λογισμικό ανέρχεται σε αρκετές εκατοντάδες Kbytes, και είναι αποθηκευμένο μερικώς σε μια flash EPROM για να υπάρχει η δυνατότητα αναβάθμισης κατά την διάρκεια του χρόνου ζωής του προϊόντος (εκτός λειτουργίας ή μέσω των θυρών επικοινωνίας)



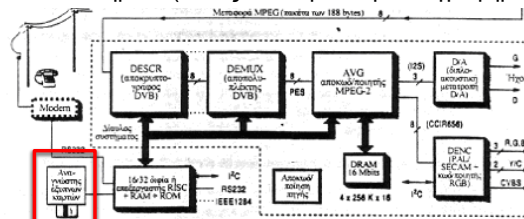
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

136

## Δομή Δορυφορικού Δέκτη

137

- Έξυπνοι αναγνώστες καρτών (smart card readers)
  - ▣ Η μονάδα πρόσβασης υπό συνθήκη περιλαμβάνει γενικότερα έναν ή δύο τέτοιους αναγνώστες (ένας μπορεί να είναι για τραπεζική κάρτα, για παράδειγμα). Στην περίπτωση της αποσπώμενης μονάδας κοινής διασύνδεσης τύπου DVB-CI (προφανώς στο σχήμα της υποδοχής PCMCIA), τα κυκλώματα πρόσβασης υπό συνθήκη και αποκρυπτογράφησης εντοπίζονται στην αποσπώμενη μονάδα τύπου PCMCIA. Ο αποπολυπλέκτης που περιλαμβάνεται στον δέκτη IRD λαμβάνει τα πακέτα αποκωδικοποιημένα ('όπως είναι' ή αποκρυπτογραφημένα)



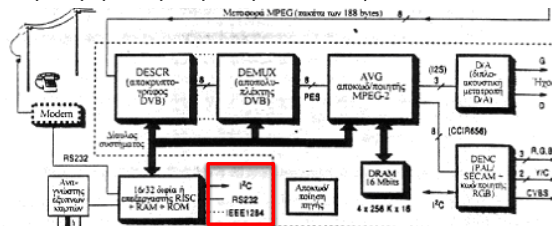
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

137

## Δομή Δορυφορικού Δέκτη

138

- Θύρες επικοινωνίας
  - ▣ Ο δέκτης IRD μπορεί να επικοινωνήσει με τον έξω κόσμο (PC, modem, κτλ.) μέσω μιας ή περισσότερων θυρών. Από την απλούστερη (σειριακή RS232) έως τη γρηγορότερη (παράλληλη IEEE 1284), αυτές οι θύρες, όπως και η διασύνδεση διαμέσου τηλεφωνικής γραμμής (με τη βοήθεια ενός ολοκληρωμένου modem), είναι τα απαραίτητα σημεία σύνδεσης για αλληλεπίδραση και δυνατότητα πρόσβασης σε νέες υπηρεσίες (χρέωση ανά-θέαμα, τηλεγορά, πρόσβαση σε δίκτυα)



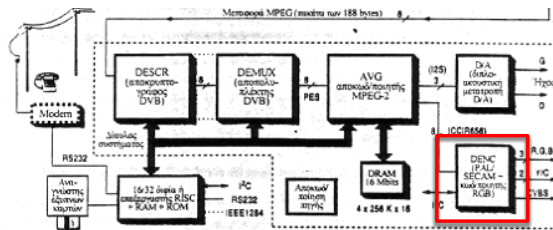
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

138

## Δομή Δορυφορικού Δέκτη

139

- Ψηφιακός κωδικοποιητής εικόνας (digital video encoder, DENC)
  - ▣ Τα οπτικά σήματα που ανασυντίθενται από τον αποκωδικοποιητή MPEG-2 (ψηφιακά σήματα YUV στη μορφή CCIR 656) εφαρμόζονται στη συνέχεια στον ψηφιακό κωδικοποιητή εικόνας DENC που εξασφαλίζει την μετατροπή τους σε αναλογικά σήματα RGB και συγχρονισμού, για την βέλτιστη δυνατή ποιότητα εικόνας στην τηλεόραση διαμέσου διασύνδεσης SCART/PERITEL και PAL, NTSC ή SECAM (σύνθετο σήμα και/ή Y/C) κυρίως για VCR εγγραφή



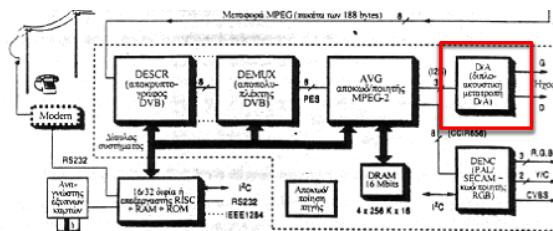
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

139

## Δομή Δορυφορικού Δέκτη

140

- Μετατροπέας από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC)
  - ▣ Τα αποσυμπιεσμένα ψηφιακά ηχητικά σήματα μορφής I<sup>2</sup>C ή παρόμοιας οδηγούνται σε ένα διπλό μετατροπέα από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC) με ανάλυση 16 bits ή περισσότερων, ο οποίος παράγει το δεξί και το αριστερό αναλογικό σήμα ήχου



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

140

## Ψηφιακή Διαμόρφωση

141

- Ανάλογα με το μέσο (**δορυφορικό, καλωδιακό, επίγειο δίκτυο**), το εύρος ζώνης που διατίθεται για τη μετάδοση εξαρτάται από τεχνικές και διοικητικές θεωρήσεις, όπου οι τελευταίες κυρίως εξαρτώνται από τις προηγούμενες
- Στην πραγματικότητα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά (**λόγος σήματος – προς – θόρυβο, SNR και ανακλάσεις**) διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των σημάτων που προέρχονται από:
  - **δορυφόρο**, αδύναμα αλλά σχετικά σταθερά εφόσον προέρχονται από πομπό χαμηλής ισχύος σε απόσταση μεγαλύτερη των 36000 km
  - **καλωδιακό δίκτυο**, όπου τα σήματα είναι σε γενικές γραμμές ισχυρά και σταθερά στην πρίζα του συνδρομητή
  - **επίγειο πομπό**, όπου οι συνθήκες μπορεί να διαφέρουν αρκετά, ειδικά στην περίπτωση ενός κινητού δέκτη

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

141

## Ψηφιακή Διαμόρφωση

142

- Για **δορυφορική** λήψη, ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (λόγος φέροντος-προς-θόρυβο, carrier- to-noise ratio C/N ή CNR) μπορεί να είναι πολύ μικρός (10 dB ή λιγότερο) αλλά το σήμα πρακτικά δεν επηρεάζεται από ανακλάσεις
- Για **καλωδιακή** λήψη, ο SNR είναι πολύ πιο μεγάλος (γενικότερα μεγαλύτερος των 30 dB), αλλά το σήμα μπορεί να επηρεαστεί από ανακλάσεις (echoes) λόγω της κακής προσαρμογής του δικτύου
- Για **επίγεια** λήψη, οι συνθήκες είναι πιο δυσκολίες, ειδικά στην κινητή λήψη όπου απαιτούνται πολύ μικρές κεραιές λήψης (πολλαπλές ανακλάσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών (multipath), παρεμβολών, σημαντικών μεταβολών στη στάθμη του σήματος)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

142

## Ψηφιακή Διαμόρφωση

143

- Οι τεχνικές διαμόρφωσης πρέπει να διαφέρουν, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν για τους συγκεκριμένους περιορισμούς του καναλιού μετάδοσης και για συμβατότητα με υπάρχουσες αναλογικές μεταδόσεις:
  - Στον **δορυφόρο**, το εύρος καναλιού βρίσκεται γενικότερα μεταξύ 27 και 36 MHz, λόγω της αναγκαιότητας της χρήσης διαμόρφωσης συχνότητας (FM, frequency modulation) για τη μετάδοση αναλογικών τηλεοπτικών προγραμμάτων (εύρος ζώνης 6-8 MHz μαζί με το αντίστοιχο φέρον ήχου), λόγω του χαμηλού CNR που αναφέρθηκε παραπάνω
  - Για **καλωδιακά ή επίγεια** δίκτυα, το εύρος καναλιού ποικίλει από 6 (ΗΠΑ) σε 7 ή 8 MHz (Ευρώπη) λόγω της χρήσης αναλογικής διαμόρφωσης (AM) με ημιμονόπλευρη εκπομπή (VSB, vestigial sideband) για την εικόνα και ενός ή περισσοτέρων φερόντων ήχου

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

143

## Ψηφιακή Διαμόρφωση

144

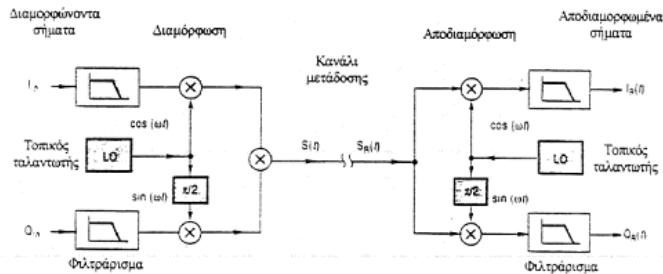
- Τεχνικές διαμόρφωσης, όπως FSK και ASK έχουν μικρή φασματική απόδοση
- Για να αυξηθεί η φασματική απόδοση χρησιμοποιούνται οι ορθογωνικές διαμορφώσεις
  - **DVB-S**
    - QPSK
    - 8-PSK
    - 16-QAM
  - **DVB-T**
    - QPSK
    - 16-QAM
    - 64-QAM σε σχήμα πολλαπλών ορθογωνίων φερόντων (COFDM - Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και ιεραρχικής διαμόρφωσης
  - **DVB-C**
    - QPSK
    - 16-QAM
    - 32-QAM
    - 64-QAM
    - 128-QAM
    - 256-QAM

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

144

# Ορθογωνική Διαμόρφωση

145



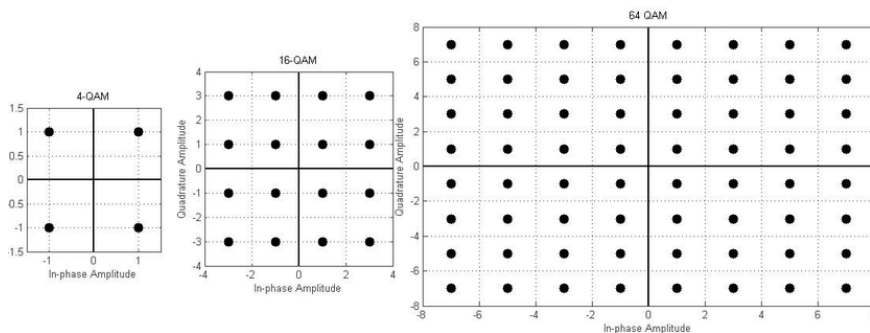
Κωδικοποίηση I/Q (bits)	Bit/Σύμβολο	Αριθμ. Καταστάσεων	Συντομογραφία
1	2	4	QPSK (4-QAM)
2	4	16	16-QAM
3	6	64	64-QAM
4	8	256	256-QAM

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

145

# Ορθογωνική διαμόρφωση

146



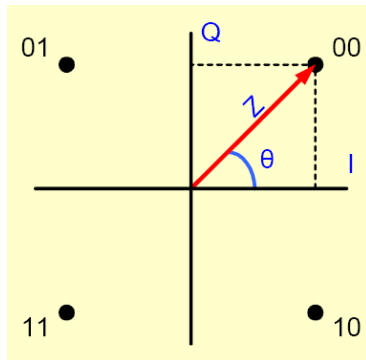
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

146

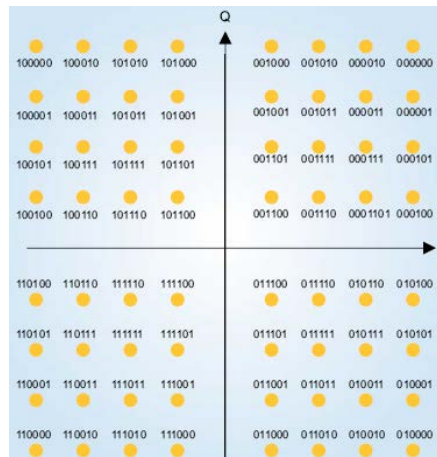


## Διαγράμματα αστερισμού (Constellation Diagrams)

147



4-QAM (QPSK)



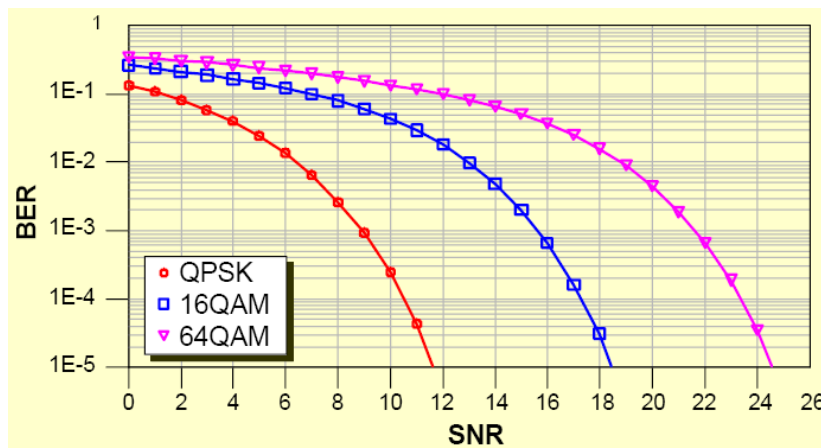
64-QAM

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

147

## Απόδοση διαμόρφωσης

148



Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

148

## Επιδράσεις ατελειών

149

- Ενοχλήσεις ή ατέλειες μετάδοσης στις μονάδες εκπομπής και λήψης είναι:
  - ▣ Ατελής απόκριση συχνοτήτων
  - ▣ Παρεμβολές
  - ▣ Ενδοδιαμόρφωση (*intermodulation*)

Αυξάνουν τις αλληλεπιδράσεις συμβόλων και παρουσιάζονται ως θόρυβος στο διάγραμμα αστερισμού, ενισχύοντας την ανάγκη για συστήματα διόρθωσης σφαλμάτων.

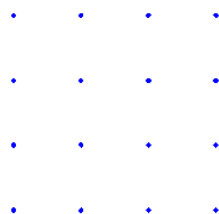
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

149

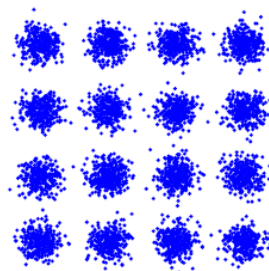
## Επίδραση θορύβου

150

16-QAM



Χωρίς Θόρυβο



Με Θόρυβο

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

150

## Κύρια χαρακτηριστικά των μεταδόσεων ψηφιακής τηλεόρασης συμβατών με το DVB

153

Παράμετρος	DVB-S	DVB-C
Εύρος καναλιού	26-54 MHz	8 MHz (7 MHz δυνατή)
Τύπος διαμόρφωσης	QPSK (4-QAM)	64, 32 ή 16-QAM
Παράγοντας εξασθένησης ( $\alpha$ )	0.35	0.15

DVB-S

Εύρος καναλιού	Μέγιστος ρυθμός συμβόλων (MHz)	Μέγιστος ωφέλιμος ρυθμός (Mbps)				
		$R_c = 1/2$	$R_c = 2/3$	$R_c = 3/4$	$R_c = 5/6$	$R_c = 7/8$
54	42.2	38.9	51.8	58.3	64.8	68.0
46	35.9	33.1	44.2	49.7	55.2	58.0
40	31.2	28.8	38.4	43.2	48.0	50.4
36	28.1	25.9	34.6	38.9	43.2	45.4
33	25.8	23.8	31.7	35.6	39.6	41.6
30	23.4	21.6	28.8	32.4	36.0	37.8
27	21.1	19.4	25.9	29.2	32.4	34.0
26	20.3	18.7	25.0	28.1	31.2	32.8

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκτομής

153

## Διαμόρφωση COFDM

154

- Η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση και το επίγειο ψηφιακό ραδιόφωνο χρησιμοποιεί για τη μετάδοση του σήματος την κωδικοποιημένη ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (**C**oded **O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing, **COFDM**).
- Το πλεονέκτημα του COFDM είναι η αντοχή στον θόρυβο που προκύπτει λόγω πολλαπλών διαδρομών, επειδή χρησιμοποιεί πολλαπλά φέροντα για να διαβιβάσει το σήμα.
- Το COFDM αναθέτει την πληροφορία από ένα ενιαίο ψηφιακό σήμα σε πολλαπλά φέροντα που λειτουργούν ταυτόχρονα.
- Το πρόβλημα των διαλείψεων επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading) επιλύεται συνδυάζοντας τη χρήση υποφορέων με τη χρήση FEC, η οποία αποτελεί και το **C** στο COFDM

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκτομής

154

## Διαμόρφωση OFDM

155

- Το **DVB-T** βασίζεται στη διαμόρφωση **2K/8K OFDM**, που εκδόθηκε από το ETSI και δημοσιεύτηκε στην αναφορά ETSI/EBU 300 744
- Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη διανομή ενός υψηλού ρυθμού ροής διαμέσου ενός **μεγάλου αριθμού ορθογωνίων φερόντων** (από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες), όπου κάθε ένα από αυτά φέρει έναν χαμηλό ρυθμό
- Η ίδια αρχή διατηρήθηκε στο παρελθόν για το ευρωπαϊκό σύστημα ψηφιακής ραδιοφωνίας **DAB** (Digital Audio Broadcast) που χρησιμοποιεί 2K OFDM
- Το κύριο πλεονέκτημα της είναι η εξαιρετική συμπεριφορά στην περίπτωση λήψης από πολλαπλές διαδρομές (**multipath reception**), που είναι συνήθεις στην επίγεια κινητή και φορητή λήψη
  - ▣ Σε αυτήν την περίπτωση οι καθυστερήσεις των έμμεσων διαδρομών (**paths**) γίνεται πολύ μικρότερη από την περίοδο συμβόλου

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

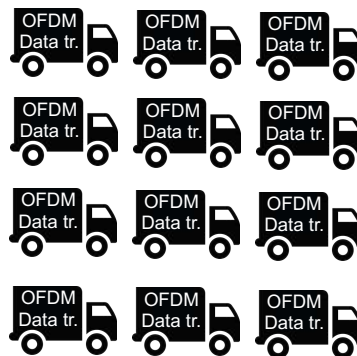
155

## Διαμόρφωση OFDM

156



Κατάτμηση ενός σήματος υψηλού ρυθμού δεδομένων σε μικρότερα, χαμηλότερου ρυθμού

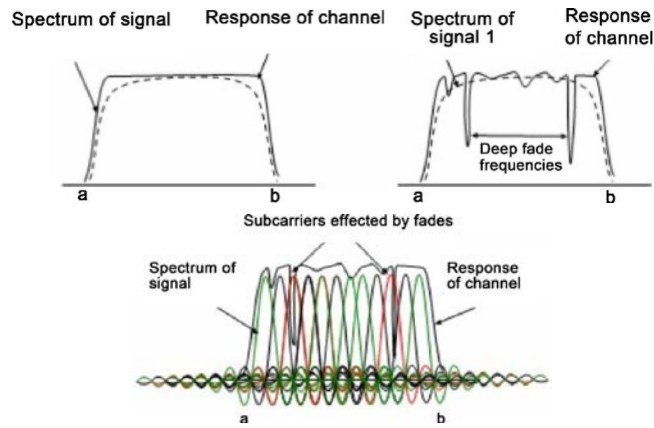


Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

156

# Διαμόρφωση OFDM

157

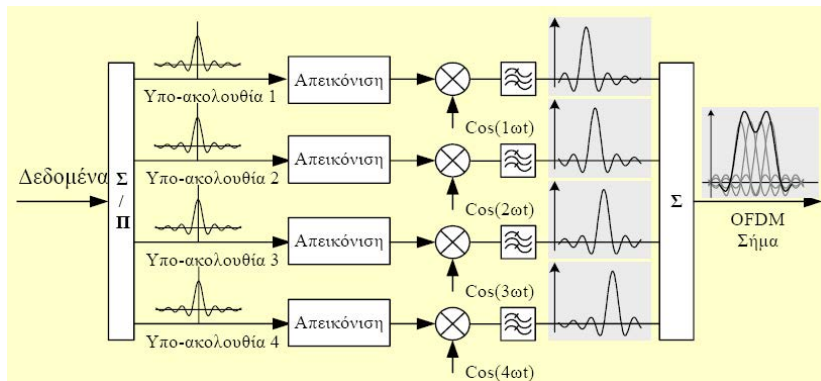


Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκτομής

157

# Διαμόρφωση OFDM

158



Ν παράλληλα συστήματα διαμόρφωσης QAM τα οποία λειτουργούν σε ακέραια πολλαπλάσια συχνοτήτων

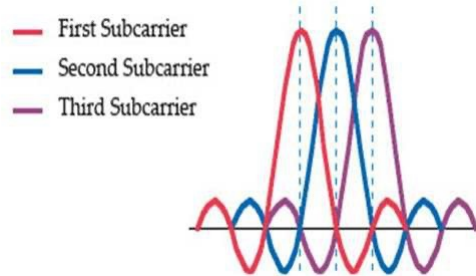
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκτομής

158

## Διαμόρφωση OFDM

159

- Η σχέση μεταξύ της συχνότητας  $f_0$  του χαμηλότερου φέροντος και αυτής του φέροντος  $k$  ( $0 < k < N - 1$ ),  $f_k$ , δίνεται από  $f_k = f_0 + k/T_s$



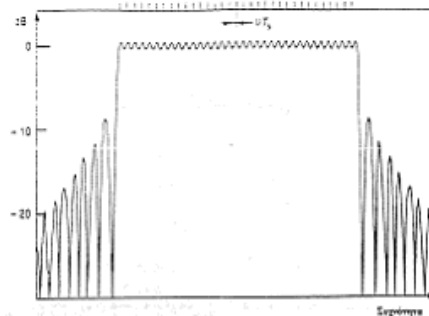
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

159

## Διαμόρφωση OFDM

160

- Η σχέση μεταξύ της συχνότητας  $f_0$  του χαμηλότερου φέροντος και αυτής του φέροντος  $k$  ( $0 < k < N - 1$ ),  $f_k$ , δίνεται από  $f_k = f_0 + k/T_s$
- Το φάσμα συχνοτήτων μιας τέτοιας ομάδας φερόντων παρουσιάζει δευτερεύοντες παρασιτικούς λοβούς εύρους  $1/T_s$ , (για  $N = 32$  φέροντα)



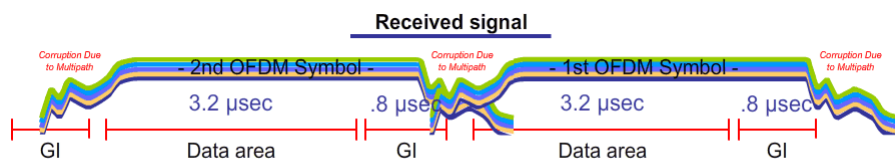
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

160

## Διαμόρφωση OFDM

161

- Σε πραγματικές συνθήκες επίγειας λήψης τα σήματα καταφθάνουν από πολλές έμμεσες διαδρομές που προστίθενται στην άμεση διαδρομή, υπονοούν ότι η κατάσταση ορθογωνιότητας μεταξύ των φερόντων δεν ισχύει πλέον, με αποτέλεσμα την ενδο-συμβολική παρεμβολή
- Αυτό το πρόβλημα μπορεί να παρακαμφθεί με την προσθήκη ενός διαστήματος προστασίας (**guard interval**)  $\Delta$  πριν την περίοδο συμβόλου  $T_s$  για να επιτευχθεί μια νέα περίοδος συμβόλου  $T'_s = \Delta + T_s$
- Αυτό το διάστημα προστασίας είναι γενικά ίσο ή μικρότερο του  $T_s/4$ .



Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκτομπής

161

## Διαμόρφωση OFDM

165

- Για επίγειες μεταδόσεις, το σύστημα DVB (**DVB-T**) βασίζεται σε διαμόρφωση με OFDM με φέροντα 8192 (**8K**) ή 2048 (**2K**)
- Για να βοηθηθεί ο δέκτης στην ανάκτηση του σήματος και κατόπιν στην πληροφόρηση του, όσον αφορά τις παραμέτρους της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης καναλιού, η πολυπλεξία OFDM περιλαμβάνει **συνεχή πιλοτικά φέροντα** που μεταφέρουν πληροφορίες μετάδοσης παραμέτρων σηματοδότησης (**TPS**, transmission parameter signaling) και διασκορπισμένα πιλοτικά σήματα εκπεμπόμενα στο διπλάσιο του κανονικού επιπέδου ισχύος και διαμορφωμένα από μια ακολουθία αναφοράς

Παράμετρος	Κατάσταση λειτουργίας 8K	Κατάσταση λειτουργίας 2K
Απαιτούμενος αριθμός φερόντων ( $N$ )	6817	1705
Χρήσιμη διάρκεια συμβόλου ( $T_s$ )	896 $\mu$ s	224 $\mu$ s
Διάστημα προστασίας ( $\Delta$ )	$T_s/4$ ή $T_s/8$ ή $T_s/32$	$T_s/4$ ή $T_s/8$ ή $T_s/32$
Απόσταση διαδοχικών φερόντων ( $1/T_s$ )	1116 Hz	4464 Hz
Απόσταση μεταξύ ακραίων φερόντων $(N-1)/T_s$	7.61 MHz	7.61 MHz
Διαμόρφωση φέροντος	QPSK ή 16-QAM ή 64-QAM	QPSK ή 16-QAM ή 64-QAM

165

## Διαμόρφωση OFDM

166

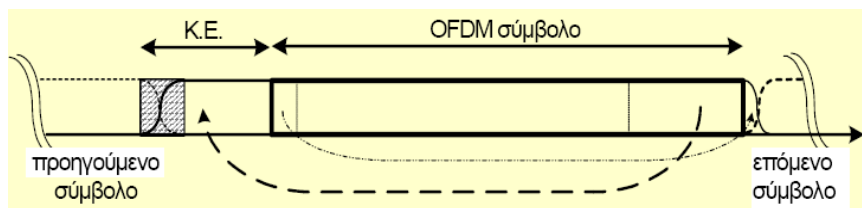
- Η υλοποίηση της μεθόδου των **8K** είναι αρκετά πολύπλοκη, κάτι που κάνει τον δέκτη ακριβό, αλλά η μεγάλη περίοδος συμβόλου του (**896  $\mu$ s**) με τη χρήση του μέγιστου διαστήματος προστασίας (**224  $\mu$ s**), επιτρέπει ικανοποιητική λήψη ακόμη και παρουσία πολύ μεγάλων καθυστερήσεων λόγω πολλαπλών διαδρομών
  - Αυτό επιτρέπει όχι μόνο καλή κινητή λήψη αλλά και ανάπτυξη των δικτύων μετάδοσης χρησιμοποιώντας ένα κανάλι σε μια μεγάλη περιοχή, και για τον λόγο αυτό ονομάζονται δίκτυα μιας συχνότητας (**SFN**, single frequency networks), με αναμεταδότες που μπορεί να είναι εγκατεστημένοι δεκάδες χιλιόμετρα μακριά μεταξύ τους
- Η μέθοδος **2K** είναι απλούστερη και ο δέκτης είναι λιγότερο ακριβός, αλλά η μικρότερη περίοδος συμβόλου περιορίζει σημαντικά την απόδοση κατά την παρουσία πολύ μεγάλων ανακλάσεων, κάτι που την καθιστά ουσιαστικά ακατάλληλη για δίκτυα μιας συχνότητας

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

166

## Διάστημα προστασίας OFDM

167



Το **διάστημα προστασίας** ή **κυκλική επέκταση** προστίθεται στην αρχή κάθε OFDM συμβόλου βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος.

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

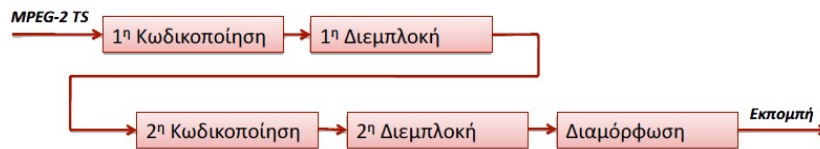
167



## Αρχές Λειτουργίας Μετάδοσης

168

- Για την προστασία και τη μετάδοση του σήματος χρησιμοποιούνται από τον διαμορφωτή οι τρεις βασικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται και στο δορυφορικό σύστημα:
  - Κωδικοποίηση καναλιού – Channel coding (2 σταδίων)
  - Διεμπλοκή – Interleaving (2 σταδίων)
  - Διαμόρφωση – Modulation



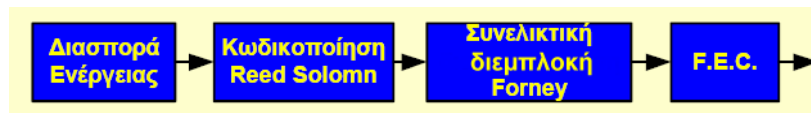
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

168

## Κωδικοποίηση Καναλιού

169

- Κωδικοποίηση καναλιού καλείται η προσθήκη πλεονασμού πληροφορίας η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ιδιοτήτων ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων στη μεταδιδόμενη ενέργεια



1. Πολλαπλασιασμός με μία ψευδοτυχαία ακολουθία
2. RS Πρόσθεση 16 Bytes ισοτιμίας
3. Χρονική αναδιάταξη ακολουθίας
4. FEC με βασικό ρυθμό 1/2 και μέσω puncturing 2/3, 3/4, 5/6 ή 7/8  
Το 4<sup>ο</sup> στάδιο χρησιμοποιείται μόνο στα DVB-S και DVB-T

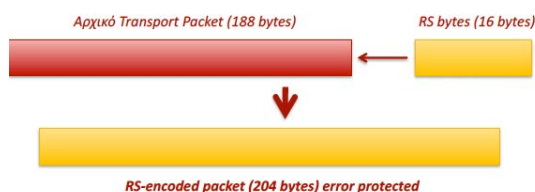
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

169

## Κωδικοποίηση Καναλιού

170

- Ο αλγόριθμος **Reed-Solomon (RS)** χρησιμοποιείται σε πολλά ενσύρματα και ασύρματα συστήματα, αλλά και σε συστήματα αποθήκευσης (π.χ. στα CD)
- Στον πομπό/διαμορφωτή, σε κάθε πακέτο μεταφοράς (Transport Packet) προστίθενται 16 bytes πλεονασμού (RS bytes) που υπολογίζονται με βάση τα 188 bytes του TP
- Σχηματίζεται έτσι ένα RS-κωδικοποιημένο πακέτο των 204 bytes το οποίο πλέον είναι προστατευμένο από λάθη και αυτό είναι που τελικά μεταδίδεται



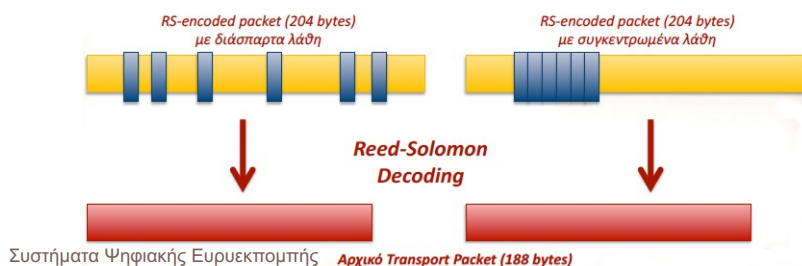
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

170

## Κωδικοποίηση Καναλιού

171

- Ο δέκτης λαμβάνει το κωδικοποιημένο πακέτο, στο οποίο πιθανόν να έχουν υπεισέλθει λάθη
- Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο αποκωδικοποίησης **Reed-Solomon**, ο δέκτης μπορεί να διορθώσει μέχρι 8 λανθασμένα bytes στο κωδικοποιημένο πακέτο. Αυτά τα λάθη μπορεί να είναι είτε συγκεντρωμένα είτε διάσπαρτα
- Αν τα λάθη είναι περισσότερα από 8, ο αλγόριθμος αποτυγχάνει και το πακέτο δεν μπορεί να ανακτηθεί



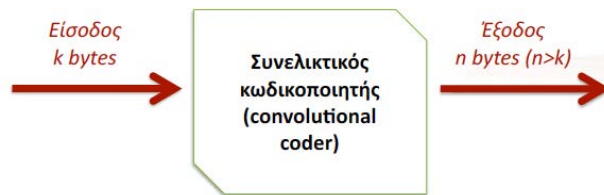
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

171

## Κωδικοποίηση Καναλιού

172

- Μετά την κωδικοποίηση RS, στον πομπό ακολουθεί και κωδικοποίηση δεύτερου σταδίου, με μια διαφορετική τεχνική που λέγεται **συνελικτική κωδικοποίηση (convolutional coding)**
- Η αρχή είναι η ίδια, δηλ. σε κάθε  $k$  bytes εισόδου προστίθενται bytes πλεονασμού για διόρθωση λαθών, ώστε στην έξοδο του κωδικοποιητή να εξέρχονται  $n$  bytes, όπου  $n > k$



Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

172

## Κωδικοποίηση Καναλιού

173

- Σε αντίθεση με την κωδικοποίηση Reed-Solomon, όπου ο αριθμός των bytes που προστίθενται είναι συγκεκριμένος (16 B για κάθε πακέτο των 188 B), στη συνελικτική κωδικοποίηση μπορούμε να επιλέξουμε το ποσοστό των bytes πλεονασμού
- Μπορούμε δηλαδή να επιλέξουμε τον **ρυθμό κώδικα (code rate - CR)** που είναι ο λόγος των bytes εισόδου στον κωδικοποιητή προς τα bytes εξόδου
- Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός κώδικα, τόσο περισσότερα είναι τα bytes πλεονασμού που προστίθενται. Στην περίπτωση αυτή, αυξάνεται και ο αριθμός των λαθών που μπορεί να διορθωθούν. Συνεπώς, ο δέκτης μπορεί να λειτουργήσει σωστά υπό δυσκολότερες συνθήκες λήψης (χαμηλότερες τιμές SNR)
- Το τίμημα είναι ότι τα bytes πλεονασμού δεν μεταδίδουν πληροφορία και έτσι ελαττώνεται η ποσότητα της χρήσιμης πληροφορίας που μπορούμε να στείλουμε (δηλ. το ωφέλιμο bitrate)

$$CR = \frac{\text{input bytes}}{\text{output bytes}} = \frac{k}{n}$$

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

173

## Κωδικοποίηση Καναλιού

174

- Στο DVB-S μπορούμε να επιλέξουμε code rate μεταξύ των τιμών: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και 7/8
- Ο CR 1/2 δίνει τον «δυνατότερο» κώδικα, που δίνει τη δυνατότητα στο δέκτη να μπορεί να λειτουργήσει σωστά σε πολύ χαμηλό SNR
- Όμως, η ωφέλιμη χωρητικότητα του καναλιού πέφτει στο μισό, αφού για κάθε byte πληροφορίας εκπέμπεται ένα byte πλεονασμού

Code Rate	Ωφέλιμο bitrate (Mbits/s, για εύρος ζώνης 33 MHz)	Ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη (dB)
1/2	23.8	4.1
2/3	31.7	5.8
3/4	35.6	6.8
5/6	39.6	7.8
7/8	41.6	8.4

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

174

## Κωδικοποίηση Καναλιού

175

- Στο DVB-T2 (και στο DVB-S2) χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση οι αλγόριθμοι BCH (Bose–Chaudhuri–Hocquenghem – 1ο στάδιο) και LDPC (Low-Density Parity Check – 2ο στάδιο)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκπομπής

175

## Διεμπλοκή

176

- Πολλές φορές, το δορυφορικό κανάλι υφίσταται απότομη διάλειψη ή παρεμβολή που διαρκεί πολύ λίγο αλλά είναι πολύ ισχυρή (π.χ. από ηλεκτρική εκκένωση στην ατμόσφαιρα ή από σπινθήρα σε κάποια ηλεκτρική συσκευή κοντά στο δέκτη)
- Το αποτέλεσμα είναι ότι χάνεται μια σειρά από διαδοχικά bytes που είναι τόσα πολλά που ο αποκωδικοποιητής καναλιού δεν μπορεί να διορθώσει. Αυτό ονομάζεται λάθος ριπής (burst error)
- Η τεχνική της **διεμπλοκής (interleaving)** χρησιμοποιείται για να αντιμετωπίσει αυτό το φαινόμενο. Συνίσταται στην εκούσια αλλαγή της σειράς των bytes που μεταδίδονται με συγκεκριμένο τρόπο, γνωστό και στον πομπό και στον δέκτη
- Έτσι, μια σειρά από διαδοχικά λανθασμένα bytes μετατρέπεται τελικά σε πολλά μεμονωμένα λάθη, που εύκολα διορθώνονται από τον αποκωδικοποιητή καναλιού

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

176

## Διεμπλοκή

177

- Παράδειγμα με πληροφορία κειμένου: Θέλουμε να αποστείλουμε το μήνυμα «ΑυτοΕιναιΕναΠαραδειγμαΔιεμπλοκης» (32 bytes). Στο 5ο byte, συμβαίνει ένα λάθος ριπής διάρκειας 8 bytes.

ΑυτοΕιναιΕναΠαραδειγμαΔιεμπλοκης < Αρχικό μήνυμα – Μετάδοση χωρίς διεμπλοκή

Αυτο\_\_\_\_\_ΠαραδειγμαΔιεμπλοκης < Λάθος ριπής – Αδύνατη η ανακατασκευή του μηνύματος στο δέκτη

ΑυτοΕιναιΕναΠαραδειγμαΔιεμπλοκης < Αρχικό μήνυμα

ΑΕΙΠδμεουΙεαεαμκτνρΙΔηηοααγΙλς < Διεμπλοκή του μηνύματος στον πομπό

ΑΕΙΠ\_\_\_\_\_εαμκτνρΙΔηηοααγΙλς < Λάθος ριπής

Α\_τοΕ\_ναι\_ναΠ\_ρα\_ειγ\_αΔι\_μπλ\_κης < Αντίστροφη διεμπλοκή στο δέκτη

ΑυτοΕιναιΕναΠαραδειγμαΔιεμπλοκης < Διόρθωση μεμονωμένων λαθών και ανακατασκευή του μηνύματος

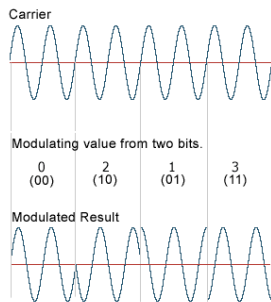
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

177

## Διαμόρφωση

178

- Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)
- Δηλαδή κάθε ένα από τα 4 δυνατά σύμβολα (00, 01, 10, 11) αντιστοιχεί σε μια διαφορετική μετατόπιση φάσης του φέροντος



$$S(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi)$$

Όπου:

- για 00  $\rightarrow \varphi=0$
- για 01  $\rightarrow \varphi=\pi/2$
- για 10  $\rightarrow \varphi=\pi$
- για 11  $\rightarrow \varphi=3\pi/2$

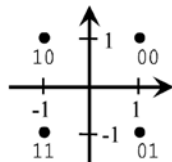
Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

178

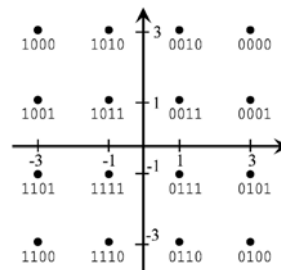
## Διαμόρφωση

179

- Στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση χρησιμοποιούνται τέσσερις διαμορφώσεις διαφορετικής «τάξης»: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM. (Η τελευταία μόνο στο DVB-T2)



QPSK (2 bits/symbol)



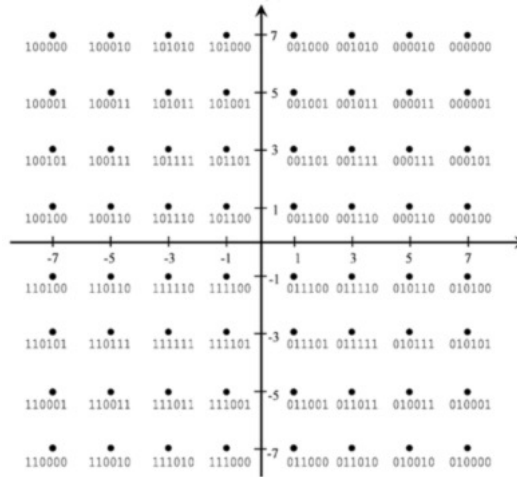
16-QAM (4 bits/symbol)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

179

# Διαμόρφωση

180



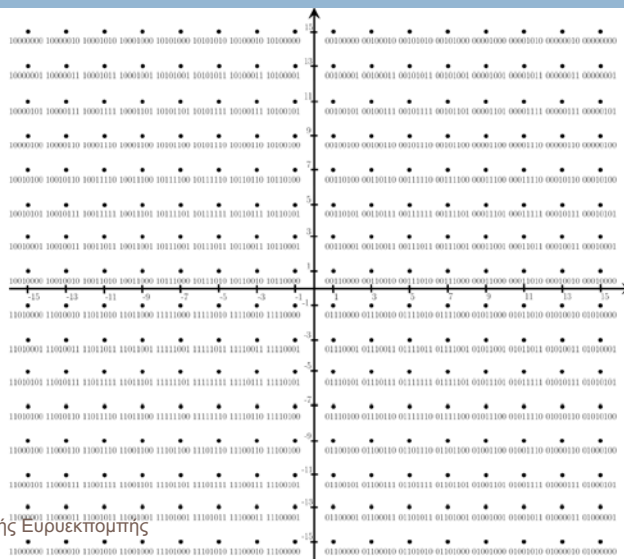
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής  
64-QAM  
(6 bits/symbol)

180

# Διαμόρφωση

181

256-QAM  
(6 bits/symbol)  
μόνο στο DVB-T2



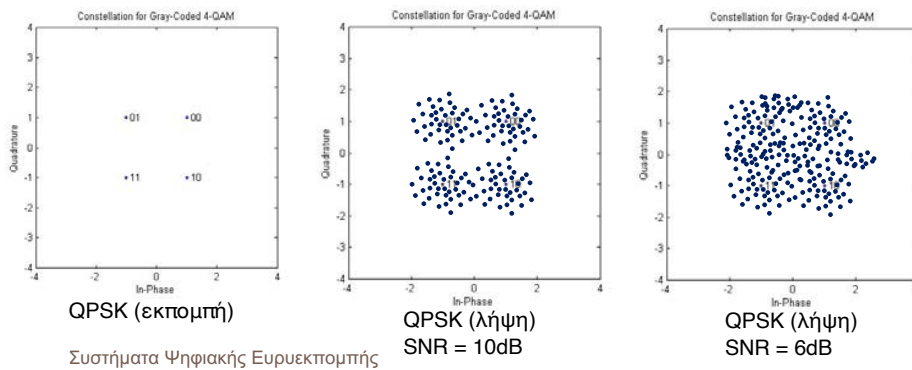
Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομπής

181

## Διαμόρφωση

182

- Η πτώση του σηματοθροβικού λόγου προκαλεί τυχαίες μεταβολές, τόσο στο πλάτος όσο και στη φάση του λαμβανόμενου σήματος
- Στον δέκτη, τα σημεία του σηματοαστερισμού παρουσιάζουν αποκλίσεις



182

## Διαμόρφωση

183

- Συνεπώς υπάρχουν δύο παράμετροι που ορίζουν τη χωρητικότητα (σε ωφέλιμο bitrate) και την αντοχή του σήματος:
  - Ρυθμός κώδικα στην κωδικοποίηση καναλιού
    - Χαμηλός ρυθμός κώδικα (δηλ. πολλά bits πλεονασμού) → σήμα που μπορεί να ληφθεί σωστά ακόμη και σε χαμηλό SNR
    - Υψηλός ρυθμός κώδικα → Μεγαλύτερο ωφέλιμο bitrate (αυξημένη χωρητικότητα)
  - Σχήμα (τάξη) διαμόρφωσης
    - Διαμόρφωση μικρής τάξης (π.χ. QPSK) → σήμα που μπορεί να ληφθεί σωστά ακόμη και σε χαμηλό SNR
    - Διαμόρφωση μεγάλης τάξης (π.χ. 256-QAM) → Μεγαλύτερο ωφέλιμο bitrate (αυξημένη χωρητικότητα)
- Ο συνδυασμός σχήματος διαμόρφωσης και ρυθμού κώδικα που επιλέγουμε στον πομπό λέγεται σχήμα μετάδοσης (transmission scheme)
- Το σχήμα μετάδοσης ορίζει:
  - το ωφέλιμο bitrate (δηλ. το μέγιστο bitrate του MPEG-2 Transport Stream) και
  - το ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη
- ώστε να ληφθεί σωστά το σήμα (δηλ. για να μην υπερβούμε τη μέγιστη ικανότητα διόρθωσης του αποκωδικοποιητή καναλιού)

Συστήματα Ψηφιακής Ευρεκτομής

183



## Χωρητικότητα ψηφιακής επίγειας τηλεόρασης

184

Modulation	Code Rate	Ωφέλιμο bitrate (Mbits/s)	Ελάχιστο απαιτούμενο SNR στον δέκτη (dB)
QPSK	1/2	5.53	3.1
QPSK	2/3	7.37	4.9
QPSK	3/4	8.29	5.9
QPSK	5/6	9.22	6.9
QPSK	7/8	9.68	7.7
16-QAM	1/2	11.06	8.8
16-QAM	2/3	14.75	11.1
16-QAM	3/4	16.59	12.5
16-QAM	5/6	18.43	13.5
16-QAM	7/8	19.35	13.9
64-QAM	1/2	16.59	14.4
64-QAM	2/3	22.12	16.5
64-QAM	3/4	24.88	18.0
64-QAM	5/6	27.65	19.3
64-QAM	7/8	29.03	20.1

Συστήματα

Τιμές για σήμα DVB-T σε κανάλι 8MHz, Guard Interval = 1/8

184

## Χωρητικότητα ψηφιακής επίγειας τηλεόρασης

185

### Ωφέλιμη χωρητικότητα DVB-T

Modulation	Code rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4.98	5.53	5.85	6.03
	2/3	6.64	7.37	7.81	8.04
	3/4	7.46	8.29	8.78	9.05
	5/6	8.29	9.22	9.76	10.05
	7/8	8.71	9.68	10.25	10.56
16-QAM	1/2	9.95	11.06	11.71	12.06
	2/3	13.27	14.75	15.61	16.09
	3/4	14.93	16.59	17.56	18.10
	5/6	16.59	18.43	19.52	20.11
64-QAM	7/8	17.42	19.35	20.49	21.11
	1/2	14.93	16.59	17.56	18.10
	2/3	19.91	22.12	23.42	24.13
	3/4	22.39	24.88	26.35	27.14
	5/6	24.88	27.65	29.27	30.16
7/8	26.13	29.03	30.74	31.67	

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

185

## Απαιτούμενος SNR για ψηφιακή επίγεια τηλεόραση

186

Modulation	Code rate	Gaussian channel	Ricean channel ( $F_1$ )	Rayleigh channel ( $P_1$ )
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4
QPSK	2/3	4,9	5,7	8,4
QPSK	3/4	5,9	6,8	10,7
QPSK	5/6	6,9	8,0	13,1
QPSK	7/8	7,7	8,7	16,3
16-QAM	1/2	8,8	9,6	11,2
16-QAM	2/3	11,1	11,6	14,2
16-QAM	3/4	12,5	13,0	16,7
16-QAM	5/6	13,5	14,4	19,3
16-QAM	7/8	13,9	15,0	22,8
64-QAM	1/2	14,4	14,7	16,0
64-QAM	2/3	16,5	17,1	19,3
64-QAM	3/4	18,0	18,6	21,7
64-QAM	5/6	19,3	20,0	25,3
64-QAM	7/8	20,1	21,0	27,9

- Για όλους τους συνδυασμούς ρυθμών κωδικοποίησης και ειδών διαμόρφωσης
- Για ρυθμό σφαλμάτων  $< 10^{-4}$
- Για τύπο καναλιού μετάδοσης Gaussian, Ricean και Rayleigh

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

186

## Χρήσιμος ρυθμός μετάδοσης ψηφιακής επίγεια τηλεόρασης

187

- Ο χρήσιμος ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$R_u = R_s \times b \times CR_i \times CR_r \times (T_u/T_s)$$

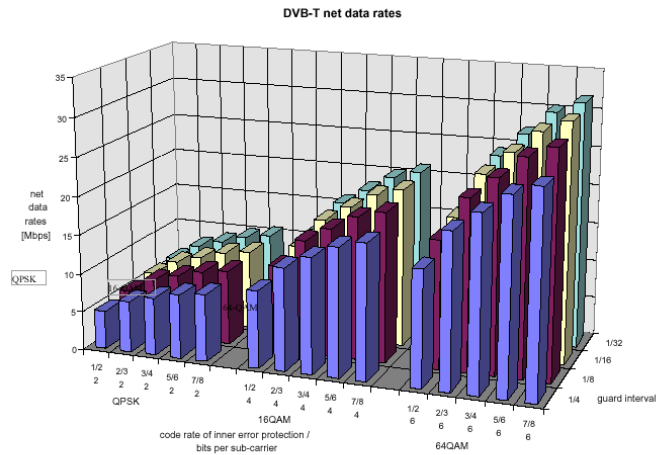
- $R_u$ : ο χρήσιμος ρυθμός μετάδοσης σε Mbit/s
- $R_s$ : ο ρυθμός συμβόλων σε Msymbols/s
- $b$ : bit ανά φέρον
- $CR_i$ : ρυθμός κωδικοποίησης
- $CR_r$ : κωδικοποίηση Reed Solomon, 188/204
- $T_u$ : διάρκεια χρήσιμου μέρους συμβόλου
- $T_s$ : διάρκεια συμβόλου
- $T_u/T_s$ : 4/5, 8/9, 16/17 ή 32/33 ανάλογα με το διάστημα προστασίας

Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

187

# Χρήσιμος ρυθμός μετάδοσης ψηφιακής επίγειας τηλεόρασης

188

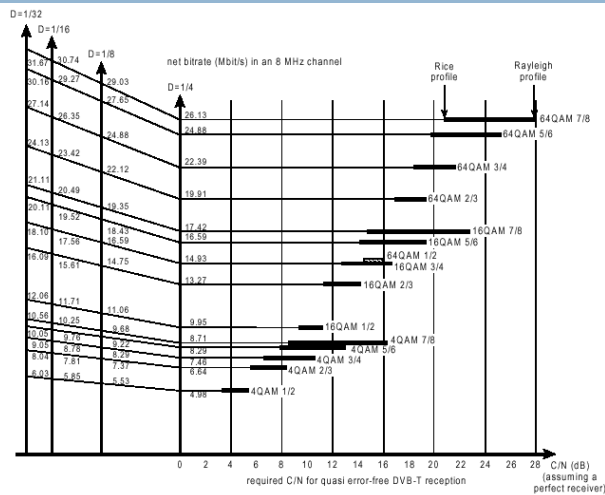


Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

188

# Απαιτούμενος CNR για ψηφιακή επίγεια τηλεόραση

189



Συστήματα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής

189