
Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας

Εκπομπή και Λήψη Αναλογικού Σήματος

1

Εισαγωγή (1/7)

- Πώς γίνεται τελικά η μετάδοση των δεδομένων;
 - Πηγές πληροφορίας
 - **Αναλογικές**
 - » Η τιμή (πλάτος) του σήματος μεταβάλλεται συνεχώς στο χρόνο (π.χ. σήματα ομιλίας)
 - **Ψηφιακές**
 - » Το πλάτος του σήματος έχει διακριτές τιμές στην πάροδο του χρόνου. Οι τιμές αυτές είναι αμετάβλητες για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (π.χ. H/Y Data)
 - Το μεταδιδόμενο σήμα μπορεί να είναι
 - **αναλογικό** (αναλογική μετάδοση/διαμόρφωση)
 - » Δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης
 - » Μικρή αντοχή σε θορύβους, μικρότερη εξασθένηση
 - **ψηφιακό** (ψηφιακή μετάδοση/διαμόρφωση)
 - » Υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης
 - » Μεγαλύτερη αντοχή σε θορύβους, μεγαλύτερη εξασθένηση
-

2

Εισαγωγή (2/7)

- **Χαρακτηριστικά των Μέσων Μετάδοσης-Εύρος Ζώνης**
- Κάθε πληροφορία, προκειμένου να μεταδοθεί από την πηγή στον προορισμό της, πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα ελαστικό μέσο, το μέσο μετάδοσης
- Κάθε πηγή εκπέμπει σε ορισμένες συχνότητες, οι οποίες καθορίζουν τη ζώνη εκπομπής ή **φάσμα** (spectrum): η μέγιστη και ελάχιστη συχνότητα που μπορεί να εκπέμψει
 - **Spectrum σήματος**: Το εύρος των συχνοτήτων που περιέχει το σήμα
- **Εύρος ζώνης (bandwidth)**: Το «μέγεθος» του spectrum
 - Εύρος ζώνης= Μέγιστη Συχνότητα - Ελάχιστη Συχνότητα
- **Εύρος ζώνης και μέσο μετάδοσης**
 - Κάθε μέσο μετάδοσης είναι κατάλληλο για συγκεκριμένα bandwidth (ώστε το σήμα να μεταδίδεται ικανοποιητικά - χωρίς σημαντικά σφάλματα)
 - Παράδειγμα: Κατά τη μετάδοση φωνής στο σύστημα PSTN, τα τηλεφωνικά καλώδια χαλκού υποστηρίζουν συχνότητες από 300 ως 3.300 Hz, Εύρος ζώνης = 3 KHz

3

Εισαγωγή (3/7)

- **Δεδομένα, Σήματα, Μετάδοση**
- **Δεδομένα**: ποσότητα πληροφορίας
 - **Αναλογικά (συνεχή)**, **Ψηφιακά (διακριτά)**
- **Σήματα**: Ηλεκτρομαγνητική αναπαράσταση των δεδομένων
 - **Αναλογικά σήματα**, **Ψηφιακά σήματα**
- **Μετάδοση**: Η διάδοση και επεξεργασία του σήματος στο «εσωτερικό» δίκτυο-δίαυλος επικοινωνίας-που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο κόμβων
 - **Ψηφιακή Μετάδοση**: μετάδοση χρησιμοποιώντας τετραγωνικά σήματα
 - **Αναλογική Μετάδοση**: μετάδοση χρησιμοποιώντας όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες σημάτων

4

Εισαγωγή (4/7)

■ Αναλογική και Ψηφιακή Μετάδοση

- **Αναλογική μετάδοση:** Μετάδοση του σήματος χωρίς να δίδεται σημασία στα «δεδομένα» που μεταφέρει
 - » Διαχειρίζεται Αναλογικά Σήματα
 - » Χρήση Ενισχυτών (Amplifiers)
- Μειονέκτημα: Ο ενισχυτής ενισχύει και το «θόρυβο» του σήματος
- **Ψηφιακή Μετάδοση:** Ανάκτηση των ψηφιακών δεδομένων που μεταφέρει ένα Αναλογικό ή Ψηφιακό σήμα.
 - » Χρήση Επαναληπτών (repeaters)
 1. Είσοδος: Αναλογικό Σήμα – Ο Επαναλήπτης ανακτά τα ψηφιακά δεδομένα, και δημιουργεί ένα καινούριο αναλογικό σήμα για μετάδοση
 2. Είσοδος: Ψηφιακό Σήμα – Ο Επαναλήπτης δημιουργεί ένα καινούριο ψηφιακό σήμα για μετάδοση

5

Εισαγωγή (5/7)

■ Τέσσερις κατηγορίες μετάδοσης

- Αναλογικά δεδομένα μέσω αναλογικής μετάδοσης σημάτων (π.χ. αναλογική ραδιοφωνία)
- Αναλογικά δεδομένα μέσω ψηφιακής μετάδοσης σημάτων (π.χ. με δειγματοληψία αναλογικών σημάτων φωνής, ήχου και video)
- Ψηφιακά δεδομένα μέσω αναλογικής μετάδοσης σημάτων (π.χ. ευρυζωνικότητα, ασύρματα τοπικά δίκτυα)
- Ψηφιακά δεδομένα μέσω ψηφιακής μετάδοσης σημάτων (π.χ. μετάδοση σε δίκτυα Ethernet)

6

Εισαγωγή (6/7)

- Κατηγορίες σημάτων ως προς το φάσμα τους
 - Σήμα βασικής ζώνης (baseband):
 - Το φάσμα του είναι μη μηδενικό στην περιοχή γύρω από τη συχνότητα $f_0 = 0$ και μηδενικό αλλού (π.χ. κυματομορφή ήχου παραγόμενη από μικρόφωνο)
 - Σήμα ζώνης διέλευσης (passband):
 - Το φάσμα του περιλαμβάνει συχνότητες γύρω από μια κεντρική συχνότητα (φορέας) f_c μακριά από τη μηδενική (δηλαδή είναι μη μηδενικό σε μια περιοχή γύρω από τον φορέα και μηδενικό αλλού)



7

Εισαγωγή (7/7)

- Το σήμα πληροφορίας είναι **χαμηλοπερατό** (χαμηλοδιαβατό)
 - συνήθως έχει μηδενική μέση τιμή (π.χ. ομιλία)
 - οπότε δεν έχει ενέργεια στη συνιστώσα dc ($f=0$)
 - Σήμα βασικής ζώνης
 - Voice (0-4kHz)
 - TV (0-6 MHz)
- Η μετάδοση δεν είναι πάντοτε εφικτή στη βασική ζώνη διότι δεν υπάρχει κατάλληλος δίαυλος επικοινωνίας
- Για αυτό χρησιμοποιείται η διαμόρφωση
 - το σήμα πληροφορίας μετατοπίζεται συχνотικά σε μια άλλη περιοχή συχνοτήτων
 - Επιτρέπει τη μετάδοση μέσα από το δοθέν κανάλι

8

Εκπομπή και Λήψη Αναλογικού Σήματος

Σήματα και συστήματα στο πεδίο της συχνότητας

9

Σήματα στο πεδίο της συχνότητας

- Τα σήματα διακρίνονται σε *ντετερμινιστικά* και σε *τυχαία* σήματα
- **Ντετερμινιστικά σήματα:**
 - Αναπαράσταση στο χρόνο (άμεσα αντιληπτή ενώ η χρονική μεταβολή του σήματος δίδεται είτε μέσω αναλυτικής σχέσης είτε με γραφική αναπαράσταση)
 - Περιγραφή στο πεδίο της συχνότητας
 - » Περιλαμβάνει τη χρήση της σειράς ή του μετασχηματισμού Fourier
 - » Φασματική περιγραφή του σήματος
 - Περιοδικά ή όχι
 - Σήματα πληροφορίας και μετάδοσης
- **Τυχαία σήματα:**
 - Σήματα που μεταβάλλονται τυχαίως με το χρόνο και κατά τυχαίο τρόπο
 - Σήματα τηλεπικοινωνιών (π.χ. έξοδος ηλεκτρονικών κυκλωμάτων)
 - Θόρυβος διαύλου επικοινωνίας

10

Σήματα Ενέργειας

- Σήματα Ενέργειας:
 - ντετερμινιστικά σήματα
- Διαισθητικός ορισμός
 - έχουν κάποια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια
 - παράδειγμα: ένας τριγωνικός παλμός
- Χαρακτηριστικά:
 - **Ενέργεια**: πεπερασμένη
 - **Ισχύς**: μηδενική

11

Σήματα Ισχύος

- Σήματα Ισχύος:
 - περιοδικά σήματα
 - τυχαία (στοχαστικά) σήματα
- Διαισθητικός ορισμός
 - έχουν άπειρη διάρκεια
 - παραδείγματα:
 - » ένα ημιτονοειδές σήμα
 - » ένα περιοδικό σήμα τριγωνικού παλμού
- Χαρακτηριστικά:
 - **Ενέργεια**: άπειρη (δε σταματά ποτέ)
 - **Ισχύς**: πεπερασμένη (η ενέργεια εμφανίζεται με συγκεκριμένο ρυθμό)

12

Σειρές Fourier

- Ένα σήμα $f(t)$ μπορεί να αναπτυχθεί ως υπέρθεση ημιτόνων και συνιμητόνων

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)), \omega_0 = 2\pi / T$$

- Συντελεστές Fourier

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt, n = 0$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt, n = 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt, n = 1, 2, \dots$$

- Ανάπτυξη της $f(t)$ τριγωνική μορφή

$$f(t) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n), c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \phi_n = \tan^{-1}(-b_n / a_n)$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f_n \exp(jn\omega_0 t), f_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \exp(-jn\omega_0 t) dt$$

- Θεώρημα Parseval

$$P = (\frac{1}{2} a_0)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2)$$

13

Μετασχηματισμός Fourier

- Μαθηματικό εργαλείο για την περιγραφή περιοδικών και μη σημάτων στο πεδίο της συχνότητας (**Fast Fourier Transform-FFT**)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

- Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

- Οι $f(t)$ και $F(\omega)$ αποτελούν ένα ζεύγος μετασχηματισμού Fourier

$$f(t) \text{ και } F(\omega)$$

$$F(\omega) = \text{FFT}\{f(t)\} \text{ και } f(t) = \text{IFFT}\{F(\omega)\}$$

14

Ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier

- Γραμμικότητα

$$\begin{cases} f_1(t) \rightarrow F_1(\omega) \\ f_2(t) \rightarrow F_2(\omega) \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$[c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t)] \rightarrow [c_1 F_1(\omega) + c_2 F_2(\omega)]$$

- Αλλαγή κλίμακας

$$f(t) \rightarrow F(\omega) \Rightarrow$$

$$\begin{cases} f(at) \rightarrow \frac{1}{a} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \\ \quad \quad \quad \uparrow \\ \frac{1}{a} f\left(\frac{t}{a}\right) \rightarrow F(a\omega) \end{cases}$$

- Χρονική Καθυστέρηση και διαμόρφωση

$$f(t) \rightarrow F(\omega) \Rightarrow$$

$$\begin{cases} f(t - t_0) \rightarrow e^{-j\omega t_0} F(\omega) \\ \quad \quad \quad \uparrow \\ e^{j\omega_0 t} f(t) \rightarrow F(\omega - \omega_0) \end{cases}$$

15

Ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier

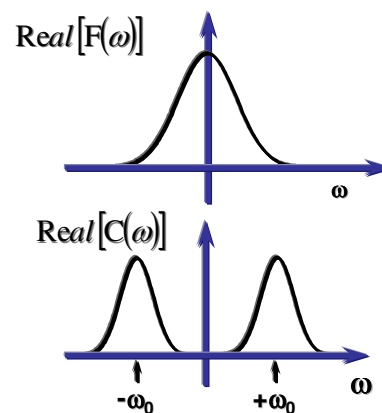
- Χρονική Καθυστέρηση και διαμόρφωση

$$\cos(\omega_0 t) f(t) \rightarrow \frac{1}{2} [F(\omega - \omega_0) + F(\omega + \omega_0)]$$

π.χ. Αν η $f(t)$
μετασχηματίζεται σε



Τότε η $C(t) = \cos(\omega_0 t) f(t)$
μετασχηματίζεται σε



16

Ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier

- Παραγωγή και ολοκλήρωση

$$f(t) \rightarrow F(\omega) \Rightarrow \begin{cases} \frac{df(t)}{dt} \rightarrow j\omega F(\omega) \\ \int f(t) dt \rightarrow \frac{F(\omega)}{j\omega} \end{cases}$$

- Πολλαπλασιασμός και συνέλιξη

$$\begin{cases} f_1(t) \rightarrow F_1(\omega) \\ f_2(t) \rightarrow F_2(\omega) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1(t)f_2(t) \rightarrow \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_1(\eta)F_2(\omega - \eta)d\eta \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(\eta)f_2(t - \eta)d\eta \rightarrow F_1(\omega)F_2(\omega) \end{cases}$$

- Θεώρημα Parseval

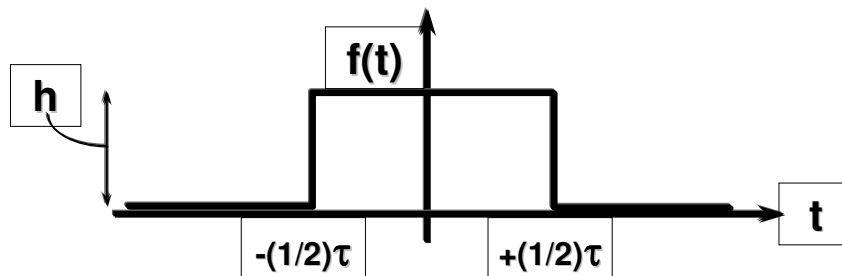
$$f(t) \rightarrow F(\omega) \Rightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$$

17

Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (1/6)

- Παράδειγμα 1: Συνάρτηση ορθογώνιου παλμού

$$f(t) = \begin{cases} h & |t| < \tau / 2 \\ 0 & |t| > \tau / 2 \end{cases} \quad \tau \in \mathbb{R}$$



18

Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (2/6)

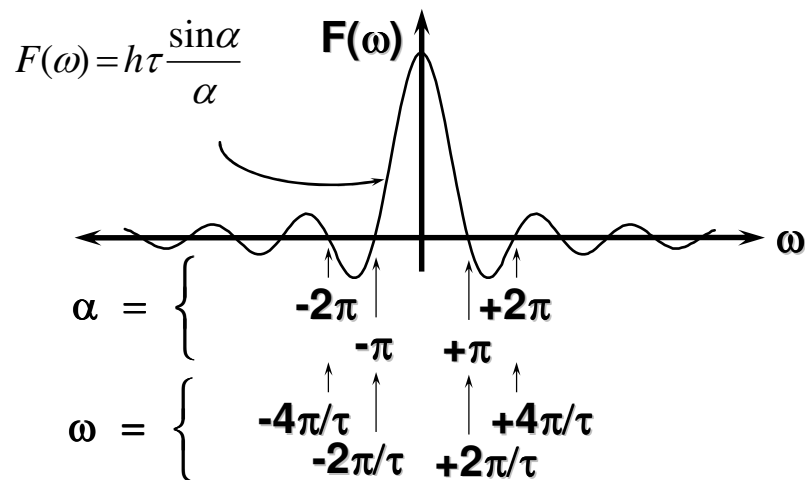
- Παράδειγμα 1: Συνάρτηση ορθογώνιου παλμού

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \\
 &= \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} h e^{-j\omega t} dt \quad \rightarrow \quad \therefore F(\omega) = \frac{h\tau \sin(\omega\tau/2)}{(\omega\tau/2)} \\
 &= \frac{h \left(e^{-j\omega\tau/2} - e^{j\omega\tau/2} \right)}{-j\omega} \quad \downarrow \\
 &= (2h/\omega) \sin(\omega\tau/2) \quad \frac{\sin \alpha}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{\omega\tau}{2} \\
 & \quad \quad \quad F(\omega) = h\tau \frac{\sin \alpha}{\alpha}
 \end{aligned}$$

19

Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (3/6)

- Παράδειγμα 1: Συνάρτηση ορθογώνιου παλμού

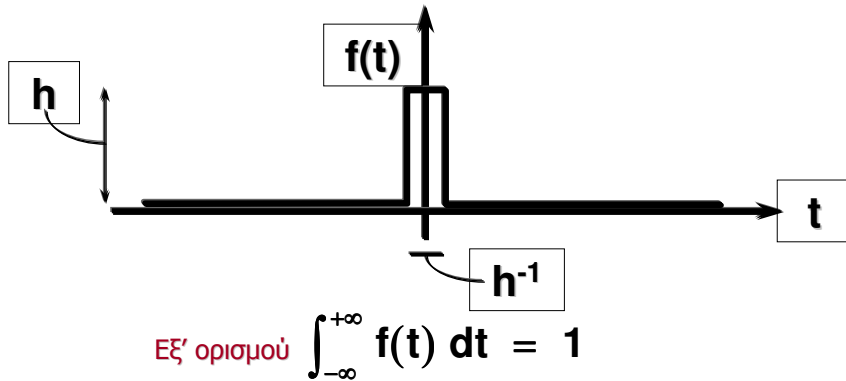


20

Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (4/6)

- Παράδειγμα 2: Κρουστική συνάρτηση δ (Dirac delta-function)

$$f(t) = \lim_{h \rightarrow \infty} \begin{cases} h & |t| < (2h)^{-1} \\ 0 & |t| > (2h)^{-1} \end{cases}$$



21

Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (5/6)

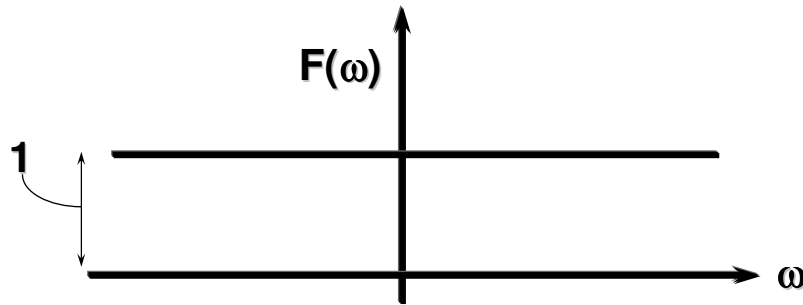
- Παράδειγμα 2: Κρουστική συνάρτηση δ (Dirac delta-function)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \stackrel{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t-x(0)) dt}{=} e^0 = 1$$

22

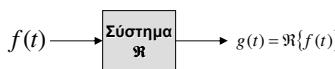
Παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (6/6)

- Παράδειγμα 2: Κρουστική συνάρτηση δ (Dirac delta-function)
- $F(\omega)$ είναι πραγματική, όπως αναμενόταν από μια πραγματική $f(t)$



23

Συστήματα στο πεδίο της συχνότητας (1/5)

- Σύστημα ορίζεται ένας νόμος R μέσω του οποίου συνδέεται η έξοδος $g(t)$ με την είσοδο του $f(t)$
 $R\{f(t)\}=g(t)$

- Γραμμικό σύστημα είναι το σύστημα για το οποίο ισχύει η γραμμικότητα
 $R\{f_1(t)\}=g_1(t)$ και $R\{f_2(t)\}=g_2(t) \Rightarrow$
 $R\{a_1f_1(t) + a_2f_2(t)\}=a_1g_1(t) + a_2g_2(t)$
- Χρονικά σταθερό καλείται ένα σύστημα στο οποίο μια χρονική καθυστέρηση της διέγερσής του καταλήγει σε ίση χρονική καθυστέρηση της απόκρισής του
 $R\{f(t-t_0)\}=g(t-t_0)$, για κάθε t_0
- Αιτιατό ή υλοποιήσιμο καλείται το σύστημα που δεν έχει απόκριση πριν εφαρμοσθεί σε αυτό κάποια διέγερση. Η απόκρισή του σε κάποια χρονική στιγμή t_0 εξαρτάται από τις τιμές της διέγερσης για $t \leq t_0$

24

Συστήματα στο πεδίο της συχνότητας (2/5)

- Για γραμμικά και χρονικά αμετάβλητα συστήματα ισχύει $a_0g(t)+a_1[dg(t)/dt]+\dots+a_n[dg^n(t)/dt^n]=b_0f(t)+b_1[df(t)/dt]+\dots+b_m[df^m(t)/dt^m]$
- Αν $f(t)=\exp(j\omega_0t)$ τότε $g(t)=H(\omega_0)\exp(j\omega_0t)$ όπου

$$H(\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m b_k (j\omega)^k}{\sum_{k=0}^n a_k (j\omega)^k} \quad \text{συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος}$$

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(j\theta(\omega)) \quad \begin{array}{l} |H(\omega)|: \text{απόκριση πλάτους του συστήματος} \\ \theta(\omega): \text{απόκριση φάσης} \end{array}$$

$$\theta(\omega) = -t_0\omega \quad t_0: \text{σταθερά}$$

- Γραμμικά και χρονικά αμετάβλητο σύστημα στο πεδίο της συχνότητας $G(\omega) = F(\omega)H(\omega)$
 - $F(\omega)$ και $G(\omega)$: οι μετασχηματισμοί Fourier των $f(t)$ και $g(t)$
- $$|G(\omega)| = |F(\omega)| \cdot |H(\omega)| \quad \text{και} \quad \theta_G(\omega) = \theta_F(\omega) + \theta_H(\omega)$$

25

Συστήματα στο πεδίο της συχνότητας (3/5)

- Η είσοδος και η έξοδος ενός γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου συστήματος στο πεδίο του χρόνου συνδέεται ως εξής:

$$g(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad h(t) = F^{-1}\{H(\omega)\} \quad \text{κρουστική απόκριση}$$

- Ένα σήμα υφίσταται παραμόρφωση όταν αλλοιώνεται η φάσμα του και προκαλείται όταν αυτό διέρχεται από κάποιο ενσύρματο μέσο μετάδοσης, ηλεκτρονικό κύκλωμα ή σύστημα
- Ένα γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο σύστημα δεν παραμορφώνει την είσοδό του $x(t)$ όταν

$$y(t) = kx(t-t_0) \quad k, t_0 \text{ σταθερές που εκφράζουν την σταθερή μεταβολή του πλάτους και τη χρονική καθυστέρηση εμφάνισης της εισόδου}$$

$$H(\omega) = k \exp(-j\omega t_0) \quad \text{συνάρτηση μεταφοράς}$$

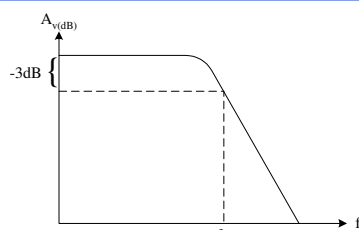
26

Συστήματα στο πεδίο της συχνότητας (4/5)

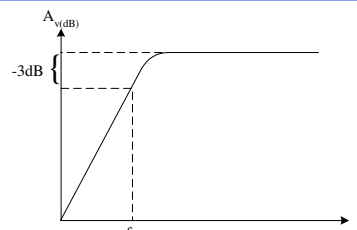
- **Φίλτρα** είναι δίκτυα που επιτρέπουν τη διέλευση μιας ζώνης συχνοτήτων και απορρίπτουν το υπόλοιπο μέρος του φάσματος και διακρίνονται σε **ιδανικά** και **υλοποιήσιμα**
- **Ιδανικά φίλτρα:**
 - Σταθερότητα της $|H(\omega)|$ σε όλο το εύρος συχνοτήτων διέλευσης
 - Γραμμική ως προς ω ολίσθηση φάσης $\theta(\omega)$
- Κατηγορίες φίλτρων
 - Low Pass -βαθυπερατά φίλτρα
 - High Pass -Υψιπερατά φίλτρα
 - Band Pass -Φίλτρα εύρους ζώνης
 - Band Stop -Φίλτρα φραγμού ζώνης

27

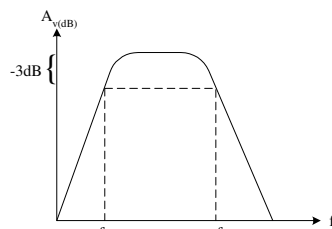
Συστήματα στο πεδίο της συχνότητας (5/5)



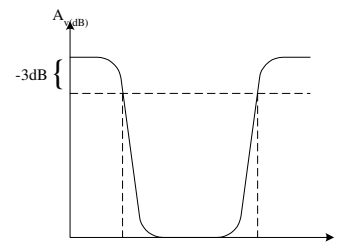
βαθυπερατό φίλτρο



Υψιπερατό φίλτρο



Φίλτρο εύρους ζώνης



Φίλτρο φραγμού ζώνης

28

Εκπομπή και Λήψη Αναλογικού Σήματος

Διαμόρφωση σήματος

29

Εισαγωγή στη Διαμόρφωση (1/2)

- **Διαμόρφωση:** Τα σήματα βασικής ζώνης $m(t)$ που δημιουργούνται από κατάλληλο ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα (π.χ. μικρόφωνο τηλεφωνικής συσκευής) μεταβιβάζονται στο δέκτη αφού μετατραπούν πρώτα σε σήματα υψηλής συχνότητας (passband) με χρήση σήματος υψηλής συχνότητας που ονομάζεται **φέρων σήμα** (ή **φέρουσα συχνότητα**)
- Η διαμόρφωση είναι απαραίτητη:
 - Σε χαμηλές συχνότητες είναι δύσκολη η κατασκευή κεραιών
 - Το σήμα βασικής ζώνης πρέπει να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μέσου μετάδοσης (π.χ. ελεύθερος χώρος, ομοαξονική γραμμή)
 - Γίνεται δυνατή η πολλαπλή εκμετάλλευση του μέσου μετάδοσης (ταυτόχρονη μετάδοση μεγάλου αριθμού συνδιαλέξεων ή σημάτων)
 - Βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο υπό δεδομένη ισχύ εκπομπής και παρενοχλήσεων
 - το φυσικό κανάλι «κόβει» τις χαμηλές συχνότητες καθώς ορίζεται σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων

30

Εισαγωγή στη Διαμόρφωση (2/2)

- Στη διαμόρφωση συνεχών φορέων χρησιμοποιούνται συνεχείς ημιτονοειδές ταλαντώσεις passband σημάτων $c(t)$ ως φέροντα των baseband σημάτων $f(t)$

$$c(t) = a(t) \cos(\phi(t)) = a(t) \cos(2\pi f_c t + \theta(t))$$

- $a(t)$: πλάτος του φέροντος
 - $2\pi f_c = \omega_c$: φέρουσα συχνότητα
 - $\theta(t)$: η τυχαία φάση του τοπικού ταλαντωτή (local oscillator)
 - $\phi(t)$: γωνία του φέροντος
 - $f(t) = A_m \cos(\omega t)$
- Μελέτη διαμόρφωσης αναλογικού baseband σήματος με χρήση αναλογικού φορέα (μετατροπή σε αναλογικό passband σήμα)

31

Κατηγορίες Διαμόρφωσης

Διαμόρφωση

Διαμόρφωση Πλάτους - AM (Amplitude Modulation)

Το πλάτος του φορέα $a(t)$ μεταβάλλεται γύρω από τη μέση τιμή του A_c ανάλογα με τη στιγμιαία τιμή του baseband σήματος $f(t)$: $a(t) = A_c + f(t)$
($\phi(t) = ct$)

Διαμόρφωση Γωνίας (Angle Modulation)

Η γωνία του φορέα $\phi(t)$ μεταβάλλεται σε συνάρτηση της μεταβολής του baseband σήματος $f(t)$ ($a(t) = ct$)

Διαμόρφωση Συχνότητας - FM (Frequency Modulation)

Η στιγμιαία συχνότητα ω_{if} του διαμορφωμένου σήματος $\gamma(t)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το $f(t)$
 $\omega_{if} = \omega_0 + K_f A_m \cos(\omega t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\omega t)$
 $\Delta\omega = K_f A_m$
 $\phi_f'(t) = \int \omega_{if} dt = \omega_0 t + (\Delta\omega/\omega) \sin(\omega t)$

Διαμόρφωση Φάσης - PM (Phase Modulation)

Η γωνία $\phi'(t)$ του $\gamma(t)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το $f(t)$
 $\phi'(t) = \phi(t) + K_p A_m \cos(\omega t) = \phi(t) + \Delta\phi \cos(\omega t)$
 $\gamma(t) = A_c \cos(\omega_0 t + \Delta\phi \cos(\omega t))$
Γωνιαία κυκλική συχνότητα $\omega_{ip} = d\phi'(t)/dt$
 $\omega_{ip} = \omega_0 - \omega \Delta\phi \sin(\omega t)$

32

Εκπομπή και Λήψη Αναλογικού Σήματος

Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

33

Διαμόρφωση Πλάτους

- Σήμα βασικής ζώνης
 - Audio, (2-20)KHz
 - Συχνότητα φέροντος
 - 525 - 1705 KHz
 - Απόδοση
 - Εύρος ζώνης: 1180KHz
 - Ακτίνα λήψης: 250-500 km
 - Κατηγορίες AM διαμόρφωσης
 - AM διπλής πλευρικής ζώνης με καταργημένο φέρον (AM Double Sideband Suppressed Carrier **AMDSB-SC**)
 - Συμβατικό AM διπλής πλευρικής ζώνης (Full AM ή Double Sideband Large carrier modulation **AMDSB-LC**)
 - AM απλής πλευρικής ζώνης (Single Sideband modulation **AMSSB**)
 - AM με κατάλοιπο πλευρικής ζώνης (Vestigial Sideband modulation **AMVSB**)
-

34

Εκπομπή και Λήψη Αναλογικού Σήματος

AM διπλής πλευρικής ζώνης με καταργημένο φέρον (AMDSB-SC)

35

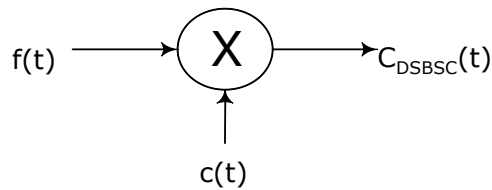
AMDSB-SC (1/4)

- **Χαρακτηριστικά**
 - Το σήμα πληροφορίας $f(t)$ πολλαπλασιάζεται με το φέρον $c(t)$
 - Το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου σήματος B_{CAM} είναι διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας ω_m του σήματος $f(t)$:
 $B_{CAM} = 2f_m$
- **Ζώνες Συχνοτήτων**
 - Άνω Πλευρική Ζώνη (Upper Side Band, USB)
 - Κάτω Πλευρική Ζώνη (Lower Side Band, LSB)
- **Διπλή Πλευρική Ζώνη**
 - κάθε πλευρική ζώνη περιέχει ολόκληρο το φάσμα $\varphi(f)$ του σήματος πληροφορίας
- **Καταργημένο Φέρον**
 - το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος εξαρτάται μόνο από το σήμα πληροφορίας
 - η φέρουσα δίνει μόνο τη **μετατόπιση στη συχνότητα**
 - αν το σήμα δεν περιέχει πληροφορία (ενέργεια) dc $f=0$ το μεταδιδόμενο σήμα δε φέρει πληροφορία στη φέρουσα συχνότητα $f=f_c$

36

AMDSB-SC (2/4)

- Θεωρούμε πληροφοριακό σήμα $f(t)$ με εύρος ζώνης $B = f_m + (-f_m) = 2f_m \text{ Hz}$, πλάτος $A_m = 1$ και μετασχηματισμό Fourier $f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$
- $c(t)$ το σήμα του φέροντος, $c(t) = \cos(\omega_c t)$, $f_c \gg B$
 - $A_c = 1$
- Το διαμορφωμένο σήμα είναι:
 - $C_{DSBSC}(t) = f(t) \cdot \cos(\omega_c t)$
 - $C_{DSBSC}(t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos(\omega_c + \omega)t + \frac{A_m A_c}{2} \cos(\omega_c - \omega)t$
 - $C_{DSBSC}(\omega) = (1/2) [F(\omega - \omega_c) + F(\omega + \omega_c)]$

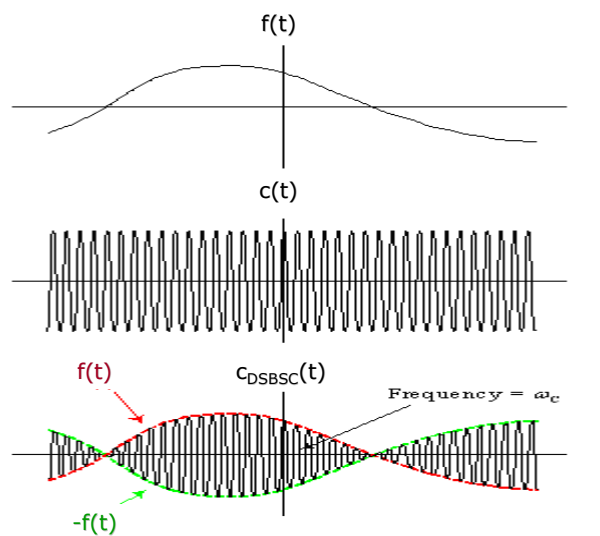


AMDSB-SC Διαμορφωτής

37

AMDSB-SC (3/4)

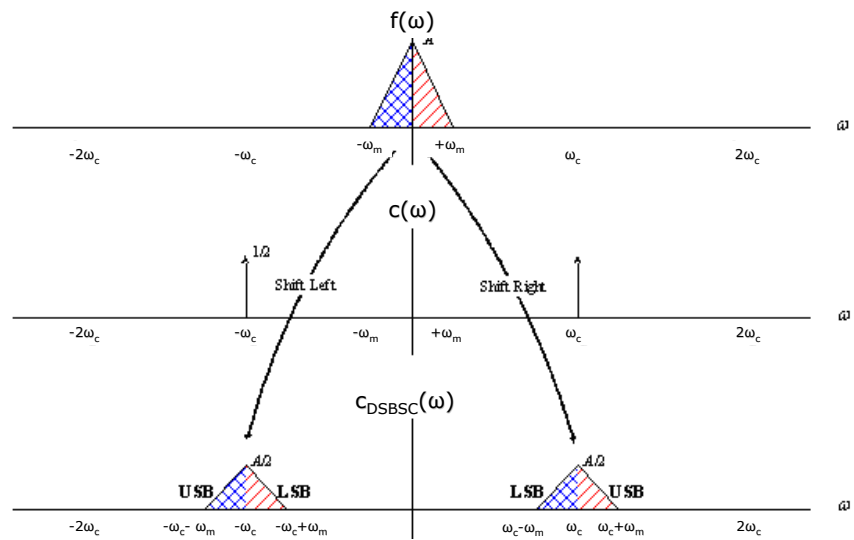
Αναπαράσταση στο χρόνο



38

AMDSB-SC (4/4)

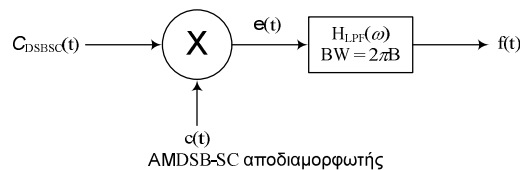
Αναπαράσταση στη συχνότητα



39

AMDSB-SC Αποδιαμόρφωση (1/3)

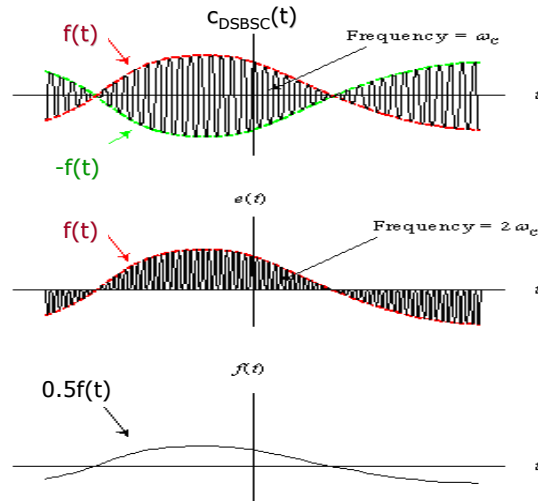
- **Διαισθητική προσέγγιση**
 - ο δέκτης από το ληφθέν σήμα θα πρέπει να απορρίψει το φέρον σήμα και να απομονώσει το σήμα πληροφορίας
 - το ληφθέν σήμα περιέχει το μεταδιδόμενο σήμα και θόρυβο
 - προς το παρόν αγνοούμε το θόρυβο
- Ο δέκτης γνωρίζει τη φέρουσα f_c και το εύρος ζώνης του καναλιού W
- $e(t) = C_{DSBSB}(t) \cdot \cos(\omega_c t) = f(t) \cdot \cos^2(\omega_c t) = (1/2) f(t) [1 + \cos(2\omega_c t)] = (1/2) f(t) + (1/2) f(t) \cos(2\omega_c t)$
- $E(\omega) \Leftrightarrow (1/2) F(\omega) + (1/4) [F(\omega - 2\omega_c) + F(\omega + 2\omega_c)]$.
- Η έξοδος $f(t)$ του LPF είναι
 $f(t) = (1/2) f(t) \Leftrightarrow (1/2) F(\omega)$



40

AMDSB-SC Αποδιαμόρφωση (2/3)

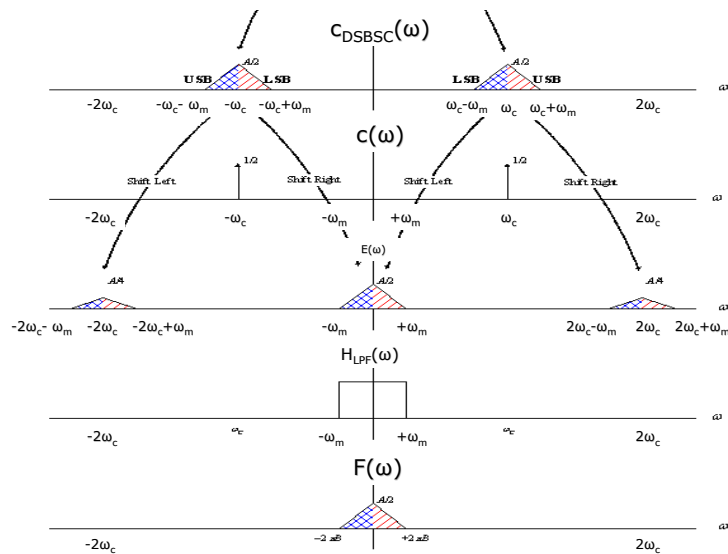
Αναπαράσταση στο χρόνο



41

AMDSB-SC Αποδιαμόρφωση (3/3)

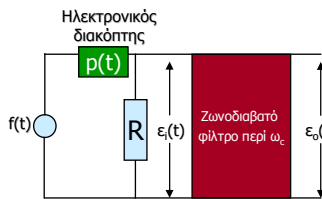
Αναπαράσταση στη συχνότητα



42

Κυκλώματα διαμόρφωσης AMDSB-SC (1/4)

- Βασική διαδικασία: Υλοποίηση του γινομένου $f(t) \cdot \cos(\omega_c t)$
- Η διάταξη αυτή ονομάζεται **διαμορφωτής γινομένου**
- Δύο κατηγορίες:
 - Χρονικά μεταβαλλόμενα κυκλώματα
 - Μη γραμμικά στοιχεία
- **Διακοπτόμενος διαμορφωτής με χρήση ηλεκτρονικού διακόπτη**



■ $p(t) = \{1, \text{διακόπτης κλειστός και } 0, \text{ διακόπτης ανοικτός}\}$, συνάρτηση δειγματοληψίας $T=1/f_c$

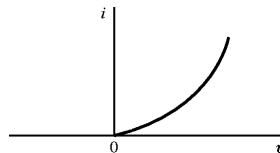
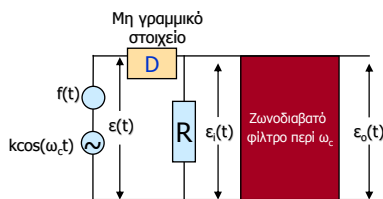
■ $\epsilon_i(t) = f(t)p(t) = f(t)\{0.5 + (2/\pi)[\cos(\omega_c t) - (1/3)\cos(3\omega_c t) + (1/5)\cos(5\omega_c t) - \dots]\}$

■ Το ζωνοδιαβατό φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση του όρου $\epsilon_o(t) = (2/\pi)f(t)\cos(\omega_c t)$

43

Κυκλώματα διαμόρφωσης AMDSB-SC (2/4)

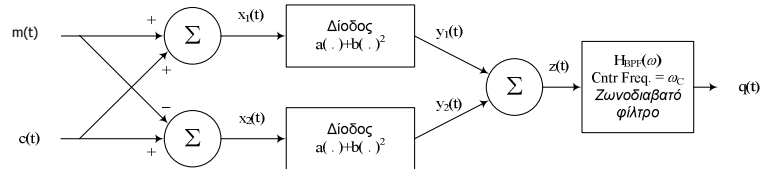
- **Διαμορφωτής γινομένου με χρήση μη γραμμικού στοιχείου**
 - Δηλαδή ένα κύκλωμα (π.χ. δίοδος PN) που η έξοδος είναι μη γραμμική συνάρτηση της εισόδου
 - $i(t) = au(t) + bu^2(t) + \dots$, $i(t)$: πολύ μικρό $\Rightarrow u(t) = \epsilon(t)$
 - $\epsilon_i(t) = a[f(t) + k\cos(\omega_c t)]R + b[f(t) + k\cos(\omega_c t)]^2 R$
 - $\epsilon_o(t) = akR\cos(\omega_c t) + 2bkRf(t)\cos(\omega_c t)$



44

Κυκλώματα διαμόρφωσης AMDSB-SC (3/4)

■ Ισορροπημένος διαμορφωτής



$$x_1(t) = c(t) + m(t) = \cos(\omega_c t) + m(t)$$

$$x_2(t) = c(t) - m(t) = \cos(\omega_c t) - m(t)$$

$$z(t) = y_1(t) - y_2(t)$$

$$= \underbrace{2am(t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{4bm(t) \cdot \cos(\omega_c t)}_{\text{Επιθύμητο}}$$

$$y_1(t) = a[\cos(\omega_c t) + m(t)] + b[\cos(\omega_c t) + m(t)]^2$$

$$= a \cos(\omega_c t) + am(t) + bm^2(t) + 2bm(t) \cdot \cos(\omega_c t) + b \cos^2(\omega_c t)$$

$$= \underbrace{am(t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{bm^2(t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{2bm(t) \cdot \cos(\omega_c t)}_{\text{Επιθύμητο}} + \underbrace{a \cos(\omega_c t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{\frac{b}{2}}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{\frac{b}{2} \cos(2\omega_c t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}}$$

$$q(t) = 4bm(t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

$$y_2(t) = a[\cos(\omega_c t) - m(t)] + b[\cos(\omega_c t) - m(t)]^2$$

$$= a \cos(\omega_c t) - am(t) + bm^2(t) - 2bm(t) \cdot \cos(\omega_c t) + b \cos^2(\omega_c t)$$

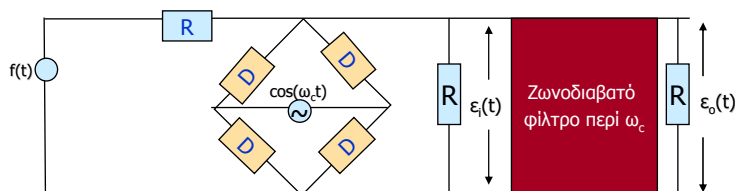
$$= \underbrace{-am(t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{bm^2(t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} - \underbrace{2bm(t) \cdot \cos(\omega_c t)}_{\text{Επιθύμητο}} + \underbrace{a \cos(\omega_c t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{\frac{b}{2}}_{\text{Ανεπιθύμητο}} + \underbrace{\frac{b}{2} \cos(2\omega_c t)}_{\text{Ανεπιθύμητο}}$$

45

Κυκλώματα διαμόρφωσης AMDSB-SC (4/4)

■ Διακοπτόμενος διαμορφωτής

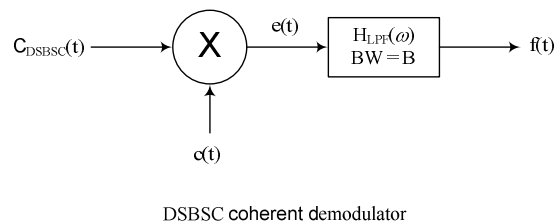
- Κατά την αρνητική ημιπερίοδο του φέροντος σήματος οι διόδοι δεν άγουν και το σήμα εφαρμόζεται στην είσοδο του φίλτρου
- Κατά τη θετική ημιπερίοδο οι διόδοι άγουν βραχυκυκλώνοντας την είσοδο του φίλτρου



46

Κυκλώματα αποδιαμόρφωσης AMDSB-SC

- Τα κυκλώματα των διαμορφωτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποδιαμόρφωση αντικαθιστώντας το ζωνοδιαβατό φίλτρο με ένα βαθυπερατό εύρους ζώνης B Hz.
- Ο δέκτης πρέπει να δημιουργεί το φέρον με την ίδια φάση ώστε να υπάρχει συγχρονισμός με τον εισερχόμενο φέρον σήμα
- Αυτού του είδους η διαμόρφωση καλείται **σύμφωνη αποδιαμόρφωση (coherent demodulation)**



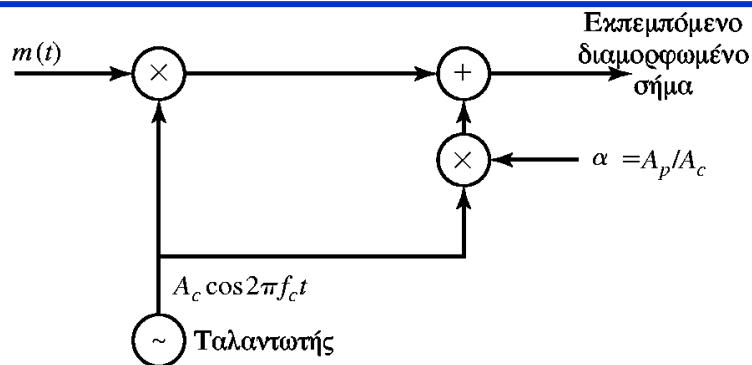
47

Φάση και Αποδιαμόρφωση

- Είναι πολύ σημαντικό ο αποδιαμορφωτής να γνωρίζει τη φάση του φέροντος στο ληφθέν σήμα
- Αυτή η φάση μπορεί να είναι **χρονικά μεταβαλλόμενη**
- Όταν ο δέκτης γνωρίζει τη φάση, έχουμε **σύγχρονο ή σύμφωνο κατά φάση αποδιαμορφωτή**
- Πώς μπορεί ο δέκτης να μάθει τη φάση;
 1. τόνος πιλότος
 2. εξάγεται έμμεσα από το ίδιο το ληφθέν σήμα

48

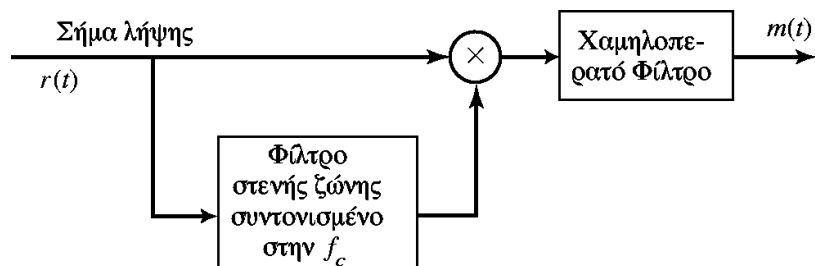
AM με Τόνο Πιλότο (Πομπός)



- Στο μεταδιδόμενο σήμα προστίθεται και η φέρουσα
- Το πλάτος του τόνου πιλότου είναι μικρότερο του $m(t)$
- **Μειονέκτημα:** καταναλώνεται ισχύς για τον τόνο πιλότο

49

AM με Τόνο Πιλότο (Δέκτης)



- Ο δέκτης χρησιμοποιεί ένα φίλτρο στενής ζώνης για να απομονώσει την f_c
- Από το αποδιαμορφωμένο σήμα αφαιρείται ο όρος dc

50

Φάση από Ληφθέν Σήμα

- Χρησιμοποιούνται ειδικά κυκλώματα που δέχονται ως είσοδο το λαμβανόμενο σήμα και εξάγουν τη φάση του φέροντος σε αυτό
- **Πλεονέκτημα:**
 - δεν υπάρχει σπατάλη ισχύος
- **Μειονέκτημα:**
 - αυξάνεται η πολυπλοκότητα του δέκτη
 - εισάγεται επιπλέον θόρυβος λόγω εσφαλμένης εκτίμησης φάσης
- **Παράδειγμα:**
 - Βρόχος Κλειδωμένης Φάσης (Phase Locked Loop-PLL)

51

Από την AMDSB-SC στην AMDSB-LC

- Τα κυκλώματα ανάκτησης φορέα τα οποία απαιτούνται για την λειτουργία της σύμφωνης αποδιαμόρφωσης έχουν σχετικά υψηλό κόστος λόγω της πολυπλοκότητάς τους
- Αν θεωρήσουμε ότι $m(t)$ είναι η **περιβάλλουσα (envelope)** του διαμορφωμένου σήματος, τότε ένα πιο απλό κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποδιαμόρφωση και ονομάζεται **ανιχνευτής περιβάλλουσας (envelope detector)** ή **φωρατής περιβάλλουσας**
- **Μη σύμφωνη αποδιαμόρφωση (non-coherent demodulation)**
- Πώς μπορούμε θέσουμε το $m(t)$ ώστε να είναι η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος?

52

Εκπομπή και Λήψη Αναλογικού Σήματος

Συμβατικό AM διπλής πλευρικής ζώνης (AMDSB-LC)

53

Συμβατικό AM- AMDSB-LC (1/5)

- Αποτελείται από:
 - DSB AM σήμα
 - μια **ισχυρή** συνιστώσα φέρουσας
 - στο DSB-SC AM με τόνο πιλότο, η συνιστώσα φέρουσας είχε μικρή ισχύς

- **Διαφορά:** το σήμα πληροφορίας έχει κανονικοποιηθεί ώστε

$$|m(t)| \leq 1$$

- Το πλάτος της κυματομορφής είναι πάντοτε θετικό

$$A_c (m(t) + 1) \geq 0$$

54

Συμβατικό AM- AMDSB-LC (2/5)

- Σήμα βασικής ζώνης
 - $f(t)=A_m \cos(\omega t)$
- Σήμα ζώνης διέλευσης (φέρον)
 - $c(t)=a(t)\cos(\omega_c t)$
- Διαμορφωμένο AM σήμα
 - $C_{AM}(t)=[A_c+f(t)]\cos(\omega_c t)=[A_c+A_m \cos(\omega t)]\cos(\omega_c t)$
 - $C_{AM}(t)=[A_c+mA_c \cos(\omega t)]\cos(\omega_c t)$
 - $C_{AM}(t)=A_c[1+m \cos(\omega t)]\cos(\omega_c t)$
 - Όπου A_c το πλάτος του αδιαμόρφωτου φέροντος και $m=A_m/A_c$ ο βαθμός ή δείκτης διαμόρφωσης $0 \leq m \leq 1$
 - πρέπει $A_c[1+m \cos(\omega t)] \geq 0$
- Η διαμόρφωση είναι(περίπου) γραμμική
 - Το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου σήματος δεν εξαρτάται από το πλάτος του σήματος
 - Ο θόρυβος ενισχύεται όσο και το μήνυμα
 - Το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου σήματος B_{CAM} είναι διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας ω_m του σήματος $f(t)$: $B_{CAM}=2f_m$
 - Το σήμα γίνεται πλήρως διαμορφωμένο όταν $m=1$. Για τιμές του $m > 1$ δημιουργούνται υπερδιαμορφωμένα σήματα που δεν μπορούν να ανακτηθούν καλά στα περισσότερα συστήματα ανίχνευσης

55

Συμβατικό AM- AMDSB-LC (3/5)

- Ανάπτυξη σε άθροισμα συνημιτόνων

$$C_{AM}(t) = \underbrace{A_c \cos \omega_c t}_{\text{carrier}} + \underbrace{\frac{mA_c}{2} \cos(\omega_c + \omega)t}_{\text{USB}} + \underbrace{\frac{mA_c}{2} \cos(\omega_c - \omega)t}_{\text{LSB}}$$

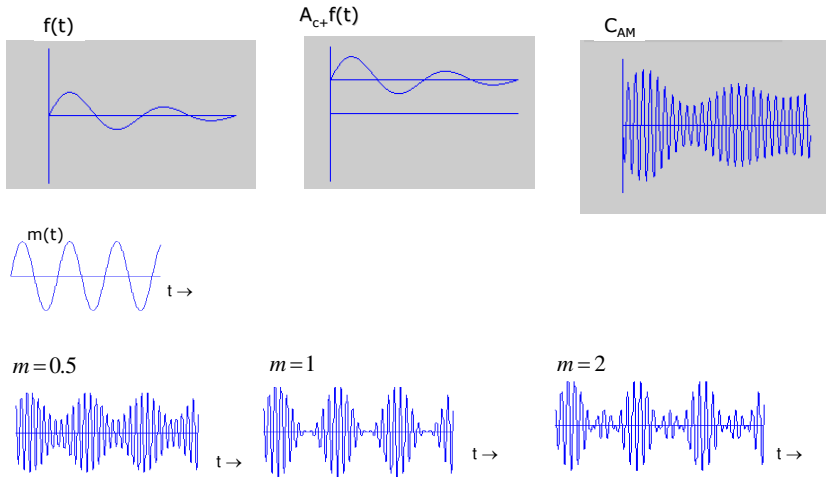
- Μετασχηματισμός Fourier

$$C_{AM}(t) \Leftrightarrow \pi A_c [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)] + \frac{1}{2} [F(\omega - \omega_c) + F(\omega + \omega_c)]$$

56

Συμβατικό AM- AMDSB-LC (4/5)

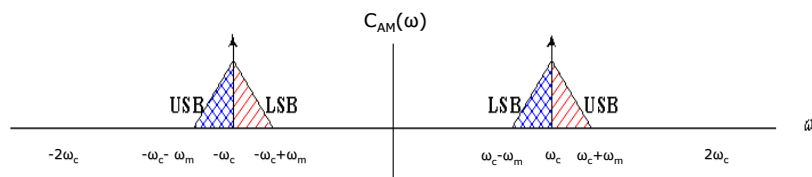
- Απόκριση στο χρόνο



57

Συμβατικό AM- AMDSB-LC (5/5)

- Μέτρο φάσματος



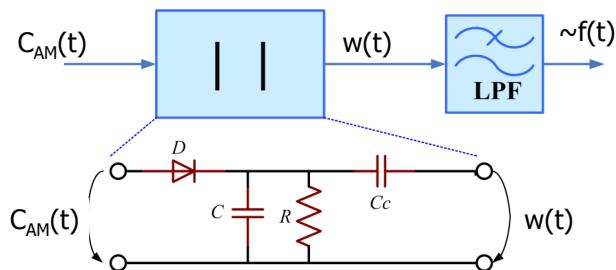
58

Συμβατικό AM

- **Μειονέκτημα:** δεν είναι αποδοτικό ως προς την ισχύ
 - παρέχεται πολύ ισχύς στη συνιστώσα της φέρουσας
- **Πλεονέκτημα:** εύκολη αποδιαμόρφωση
- Η αποδιαμόρφωση γίνεται με τον **ανιχνευτή περιβάλλουσας** ή με διάταξη ανιχνευτή βασιζόμενο σε ανορθωτή
- **Χρήση:** ραδιοφωνία AM
 - υπάρχουν λίγοι πομποί AM μη αποδοτικής ισχύος
 - υπάρχουν πολλοί δέκτες AM που υλοποιούνται εύκολα και φθηνά

59

Ανιχνευτής Περιβάλλουσας (1/3)

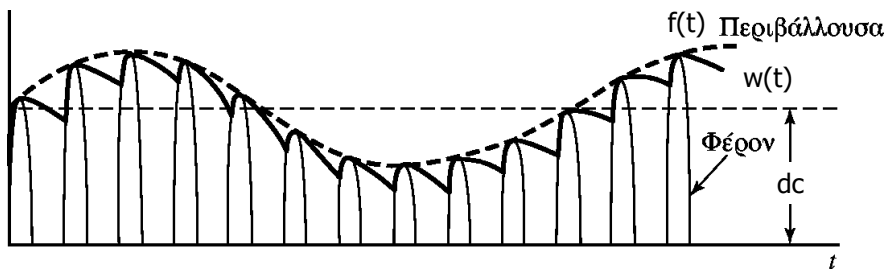


- Όταν η D είναι ορθά πολωμένη, ο πυκνωτής φορτίζεται ακολουθώντας την είσοδο
- Όταν η D είναι ανάστροφα πολωμένη, ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης R

60

Ανιχνευτής Περιβάλλουσας (2/3)

- Απαιτείται κατάλληλη επιλογή της $\tau=RC$
- Αν η τιμή της RC είναι μεγάλη τότε η εκφόρτιση θα είναι αργή και το κύκλωμα δεν θα ακολουθεί την περιβάλλουσα
- Αν η τιμή της RC είναι πολύ μικρή θα παρατηρηθούν υψηλοί κυματισμοί (ripples)
- Πρέπει $1/\omega \ll \tau \ll 1/\omega_c$
- Η DC συνιστώσα απομακρύνεται από τον πυκνωτή
- Οι κυματισμοί εξαλείφονται από το βαθυπερατό φίλτρο



61

Ανιχνευτής Περιβάλλουσας (3/3)

- **Επιλογή της τιμής του RC**
- Αν η τάση στον πυκνωτή όταν η διόδος παύει να άγει είναι E τότε η εκφόρτισή του μέσω της αντίστασης ξεκινά με:

$$v_c(t) = Ee^{-\frac{t}{RC}} \approx E\left(1 - \frac{t}{RC}\right), \quad RC \gg \frac{1}{\omega_c}$$

- Ισχύει $\frac{dv_c(t)}{dt} = -\frac{E}{RC}$
- Όπου $-\frac{E}{RC}$ η κλίση της συνάρτησης της εκφόρτισης
- Για να ακολουθεί η εκφόρτιση την περιβάλλουσα θα πρέπει η κλίση της εκφόρτισης να είναι μεγαλύτερη από την κλίση της περιβάλλουσας:

$$\left| \frac{dv_c(t)}{dt} \right| = \frac{E}{RC} \geq \left| \frac{dE}{dt} \right| \quad \text{Ισχύει: } E(t) = A_c(1 + m \cos(\omega_c t)) \Rightarrow$$

$$RC \leq \frac{1}{\omega_c} \left(\frac{\sqrt{1-m^2}}{m} \right)$$

62

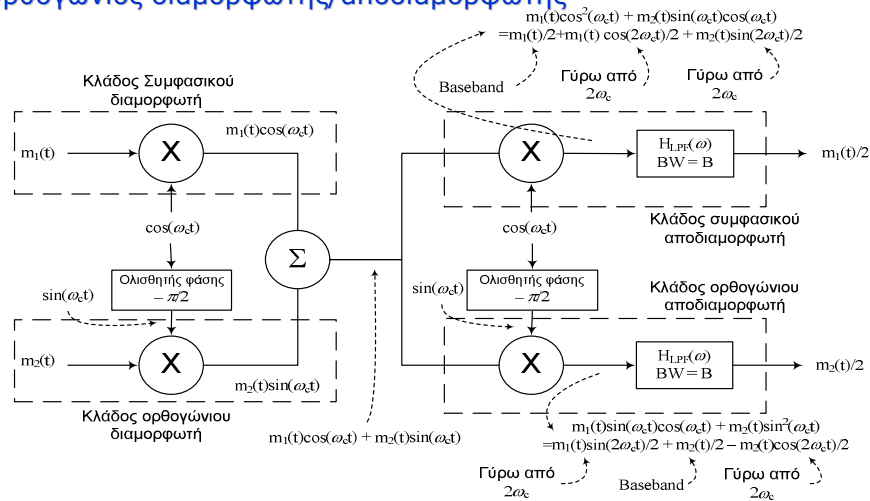
Ορθογώνια διαμόρφωση AM (1/3)

- Στις διαμορφώσεις AMDSB-SC και του συμβατικού AM το διαμορφωμένο σήμα καταλαμβάνει διπλάσιο εύρος ζώνης από το σήμα βασικής ζώνης
- Υπάρχει η δυνατότητα να αποσταλούν δύο σήματα πάνω από την ίδια ζώνη συχνοτήτων
 - Ένα διαμορφωμένο με συνημίτονο cosine
 - Το άλλο διαμορφωμένο με ημίτονο sine
- Τα δύο σήματα μπορούν να ληφθούν ξεχωριστά μετά τη διαμόρφωση

63

Ορθογώνια διαμόρφωση AM (2/3)

Ορθογώνιος διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής



64

Ορθογώνια διαμόρφωση AM (3/3)

Ορθογώνιος διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής με σφάλματα στη φάση και στη φέρουσα συχνότητα

