



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τηλεπικοινωνίες

Ενότητα 3 : Διαμόρφωση Πλάτους (AM)

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Διαμόρφωση Πλάτους

4

- Περιεχόμενα:
 - ▣ Διαμόρφωση/Αποδιαμόρφωση Πλάτους AM
 - ▣ Διαμόρφωση DSB-SC
 - ▣ Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC
 - ▣ Διαμόρφωση QAM
 - ▣ Διαμόρφωση SSB
 - ▣ Διαμόρφωση VSB
 - ▣ Μετατόπιση Συχνότητας (Μίξη)
 - ▣ Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)

Διαμόρφωση Πλάτους

5

- Ο σκοπός ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η μετάδοση *σημάτων πληροφορίας* (*information-bearing signals*) ή *σημάτων βασικής ζώνης* (*baseband signals*) μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας που χωρίζει τον πομπό από το δέκτη.
- **Βασική ζώνη** (*baseband*) = η ζώνη συχνοτήτων που παριστάνει το αρχικό σήμα όπως αυτό στέλνεται από την πηγή πληροφορίας

Διαμόρφωση Πλάτους

6

- Η αποτελεσματική χρήση του διαύλου επικοινωνίας απαιτεί μετατόπιση της περιοχής συχνοτήτων της βασικής ζώνης σε άλλες περιοχές συχνοτήτων κατάλληλες για μετάδοση, μέσω διαμόρφωσης.
- **Διαμόρφωση** (*modulation*) = η διαδικασία με την οποία κάποιο χαρακτηριστικό ενός φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα διαμόρφωσης.
- **Αποδιαμόρφωση** (*demodulation*)

Διαμόρφωση Πλάτους

7

- Σήμα διαμόρφωσης (*modulating wave*)
- Διαμορφωμένο σήμα (*modulated wave*)
- Θα μελετήσουμε τις δύο οικογένειες συστημάτων διαμόρφωσης συνεχούς κυματομορφής (*continuous wave, CW*), δηλ. τα συστήματα:
 - ▣ Διαμόρφωσης πλάτους (*amplitude modulation, AM*)
 - ▣ Διαμόρφωση γωνίας (*angle modulation*)

Διαμόρφωση Πλάτους

8

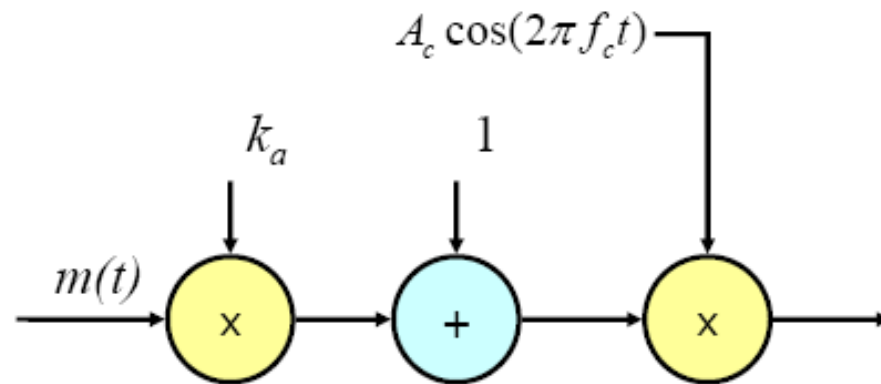
- Ημιτονικό φέρον $c(t)$: $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$
- Σήμα βασικής ζώνης που μεταφέρει την πληροφορία: $m(t)$
- Η διαμόρφωση πλάτους ορίζεται ως μια διαδικασία στην οποία το πλάτος του φέροντος $c(t)$ μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή γραμμικά σε σχέση με το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$.

$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

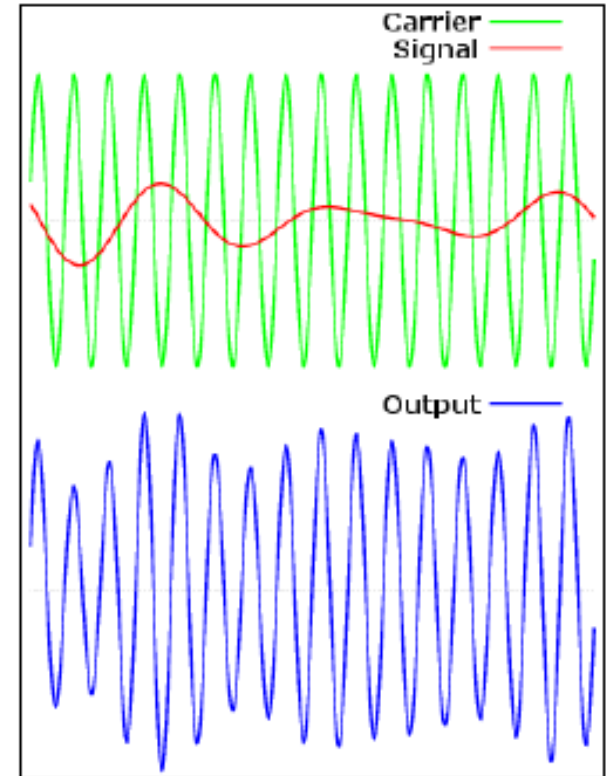
Διαμόρφωση Πλάτους

9

- Ημιτονικό φέρον $c(t)$: $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$
- Αναλογικό βαθυπερατό σήμα ισχύος $m(t)$
- Διαμορφωμένο κατά AM

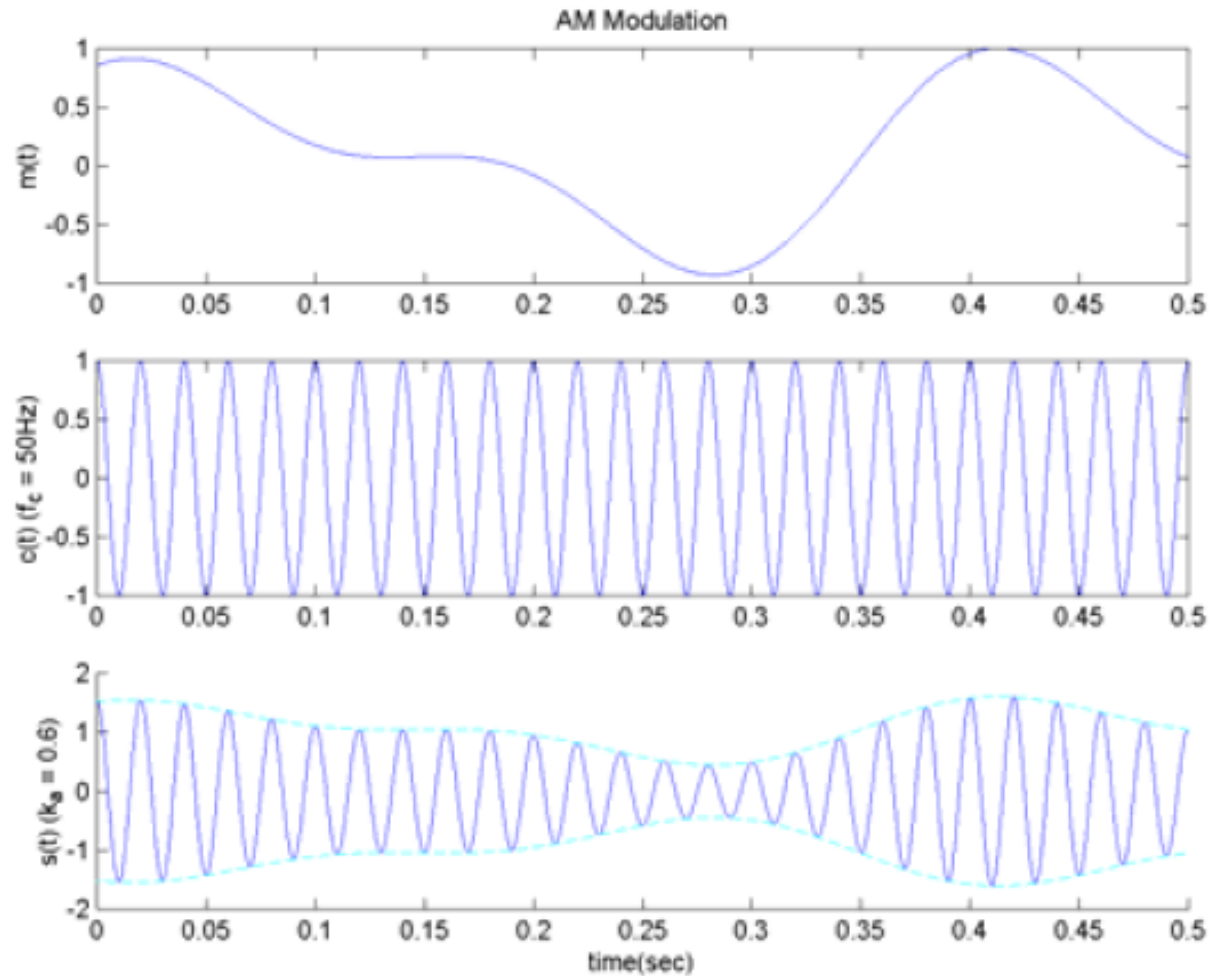


$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$



Διαμόρφωση Πλάτους

10



Διαμόρφωση Πλάτους

11

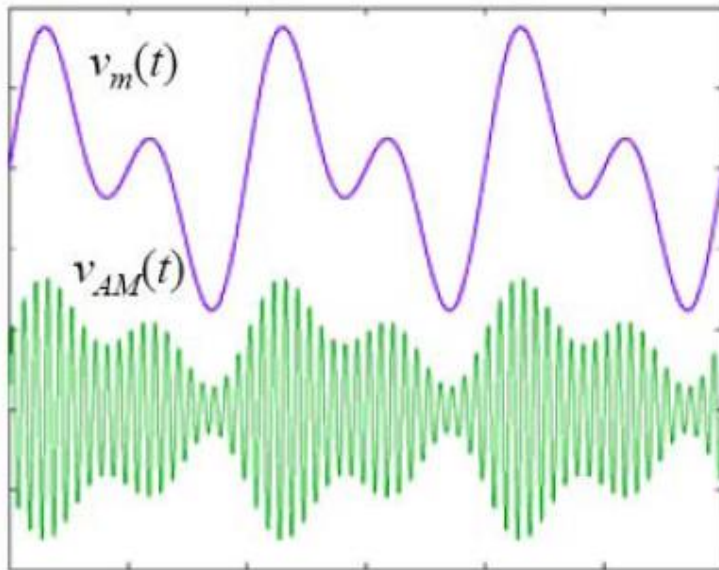
$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- $k_a =$ ευαισθησία πλάτους (*amplitude sensitivity*)
- $\max(|k_a m(t)|) * 100 =$ ποσοστό διαμόρφωσης (*percentage modulation*)
- Η περιβάλλουσα (*envelope*) του $s(t)$ έχει την ίδια μορφή με το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$ αν ικανοποιούνται οι εξής απαιτήσεις:
 - $|k_a m(t)| < 1$ για όλα τα t
 - $f_c \gg W$ ($W =$ εύρος ζώνης πληροφορίας-*message bandwidth*)

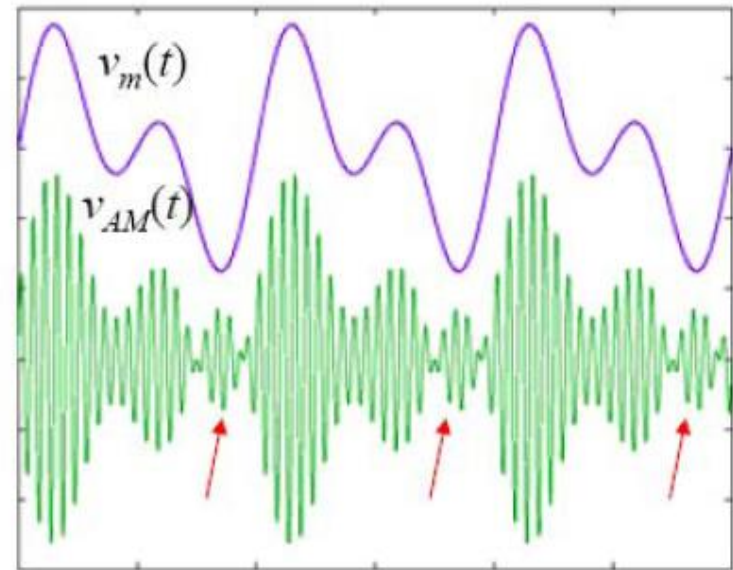
Διαμόρφωση Πλάτους

12

- Η σταθερά 1 προστίθεται στο σήμα:
 - ▣ Για απλοποίηση της αποδιαμόρφωσης
 - ▣ Φωρατής περιβάλλουσας
 - ▣ Οδηγεί σε μεγάλη σπατάλη ισχύος



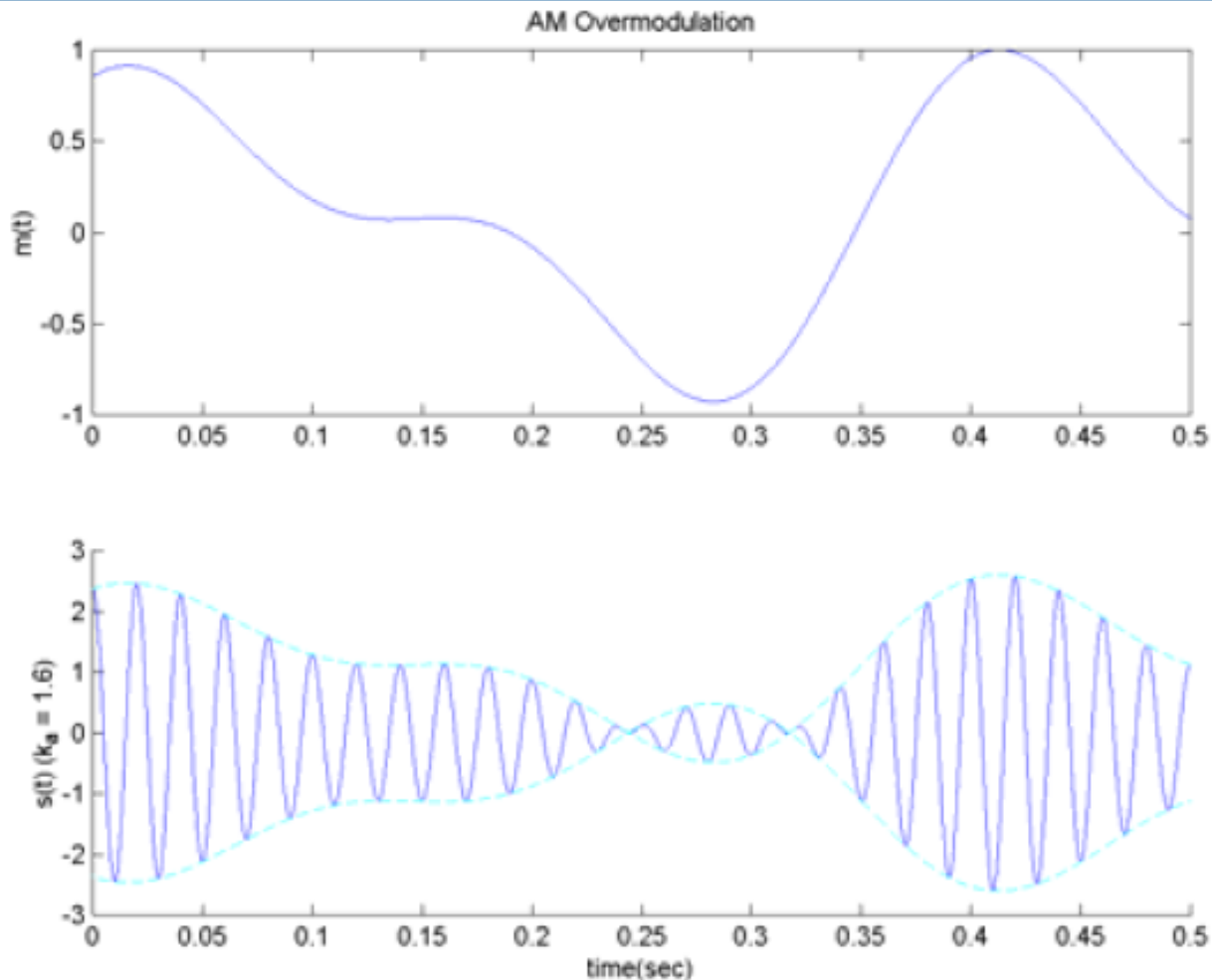
Τηλεπικοινωνίες $|k_a m(t)| < 1$



$|k_a m(t)| > 1$

Διαμόρφωση Πλάτους

13



Διαμόρφωση Πλάτους

14

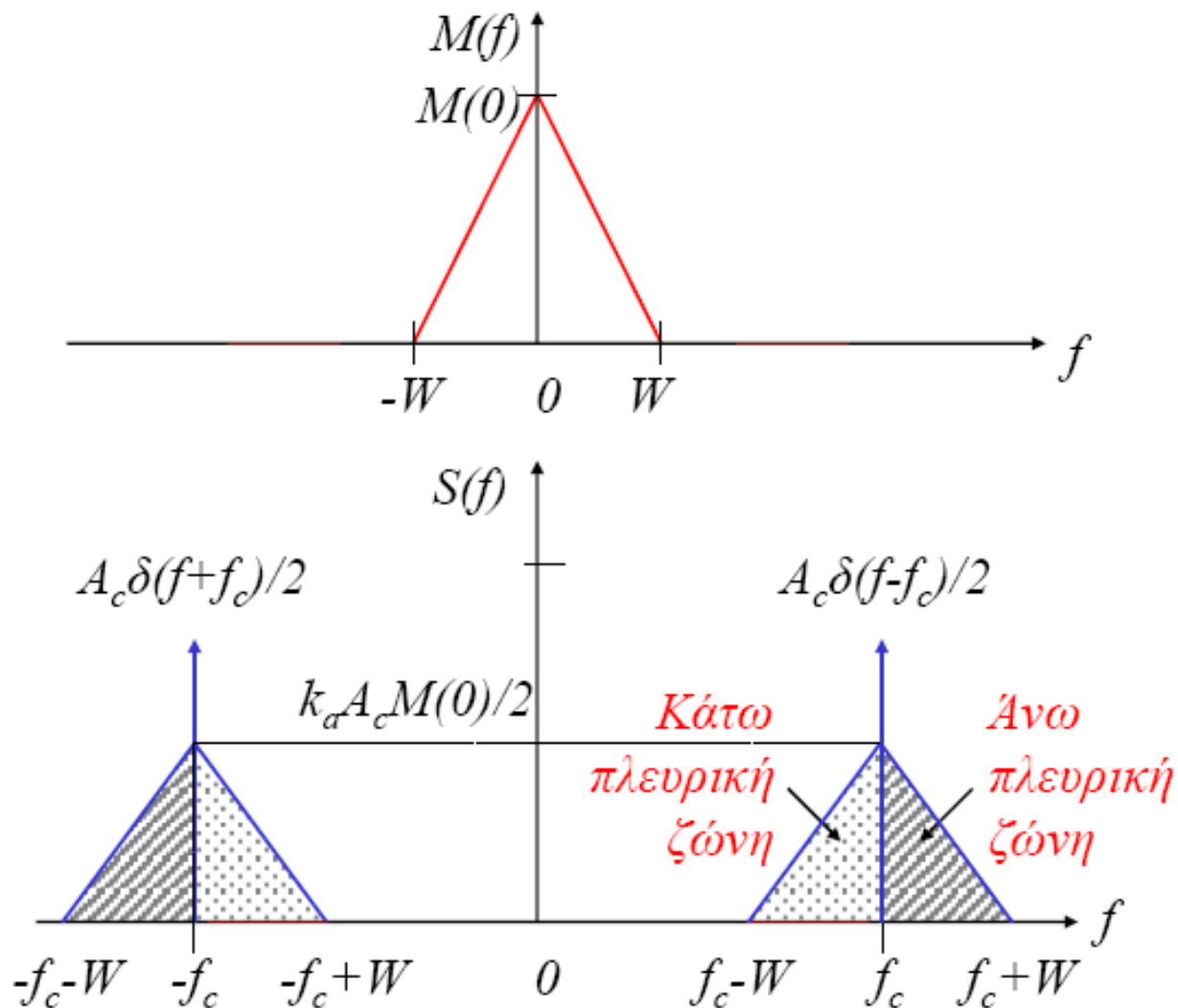
- Αν $|k_a m(t)| > 1$ η φέρουσα κυματομορφή γίνεται υπερδιαμορφωμένη (over-modulated) και η διαμορφωμένη κυματομορφή εμφανίζει παραμόρφωση περιβάλλουσας (envelope distortion).
- Ο ΜΣ Fourier της AM κυματομορφής $s(t)$:

$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

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

Διαμόρφωση Πλάτους

15



Διαμόρφωση Πλάτους

16

- Άνω πλευρική ζώνη (*upper sideband*)
- Κάτω πλευρική ζώνη (*lower sideband*)
- Η συνθήκη $f_c > W$ εξασφαλίζει ότι οι πλευρικές ζώνες δεν επικαλύπτονται.
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης (transmission bandwidth) B_T , για κυματομορφή AM:

$$B_T = (f_c + W) - (f_c - W) \Rightarrow B_T = 2W$$

είναι ακριβώς διπλάσιο του εύρους ζώνης πληροφορίας, W .

Παράδειγμα

Διαμόρφωση από απλό τόνο

17

- Διαμόρφωση από απλό τόνο:

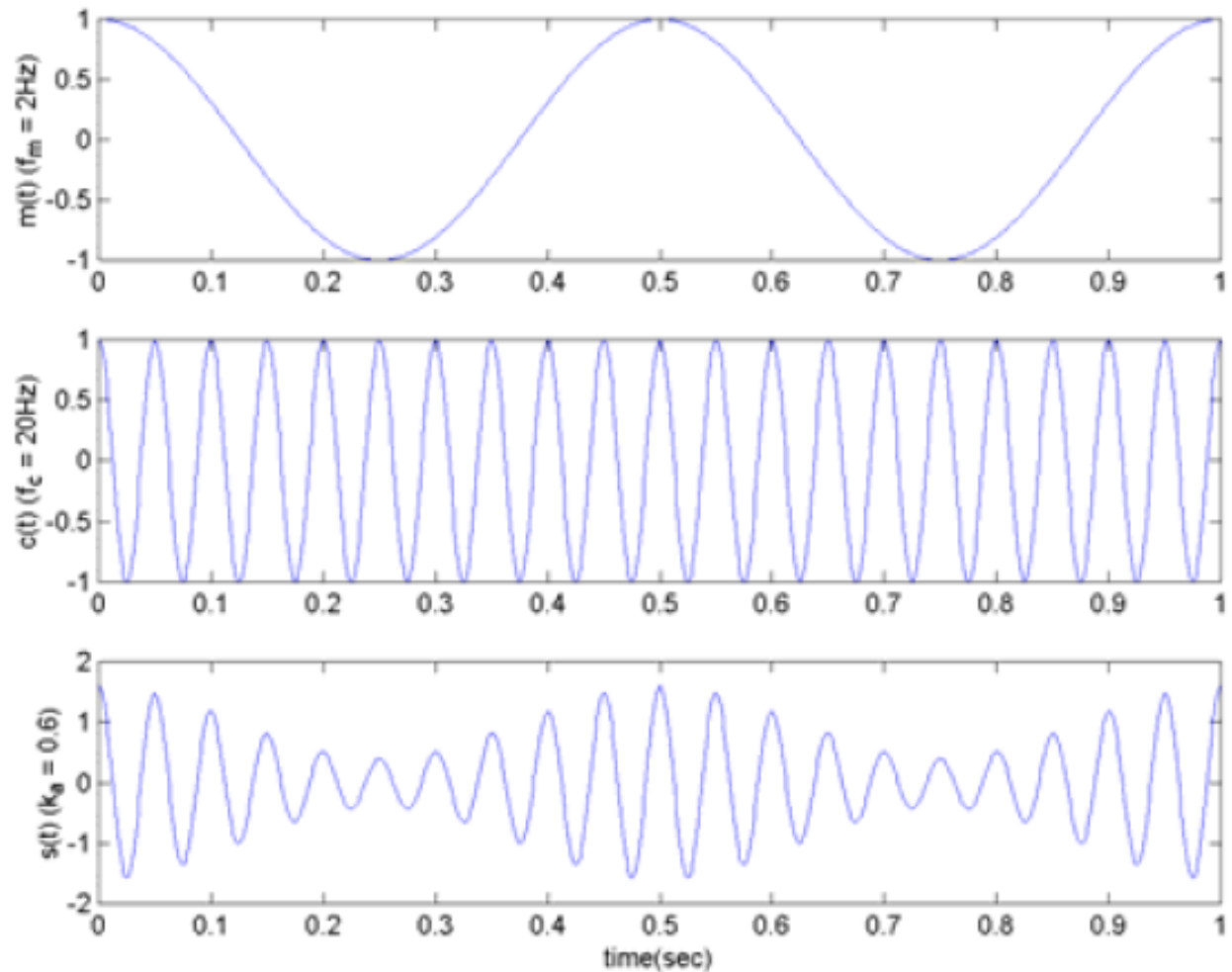
$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

$$s(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

- $\mu = k_a A_m$ συντελεστής διαμόρφωσης (*modulation factor*) ή επί τοις εκατό διαμόρφωση όταν εκφράζεται αριθμητικά σαν ποσοστό.
- Για να μην έχουμε υπερδιαμόρφωση: $\mu < 1$

Παράδειγμα Διαμόρφωση από απλό τόνο

18



Παράδειγμα

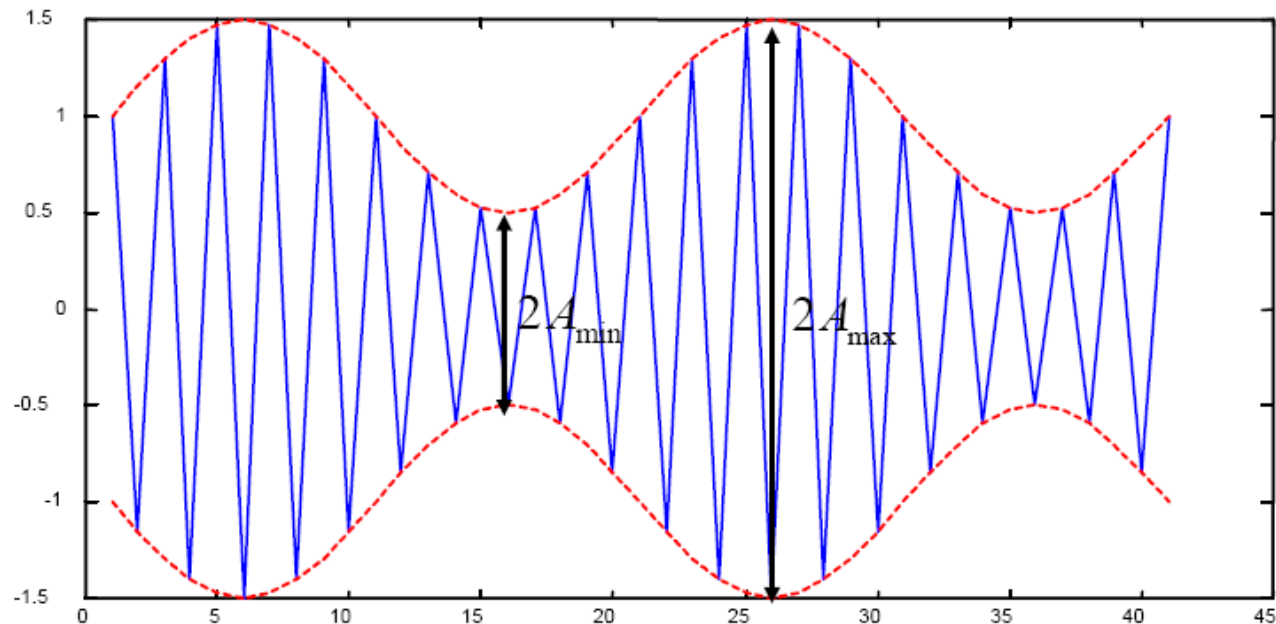
Διαμόρφωση από απλό τόνο

19

- Αν A_{min} και A_{max} δηλώνουν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της περιβάλλουσας της διαμορφωμένης κυματομορφής:

$$\frac{A_{max}}{A_{min}} = \frac{A_c (1 + \mu)}{A_c (1 - \mu)} \Rightarrow \mu = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}}$$

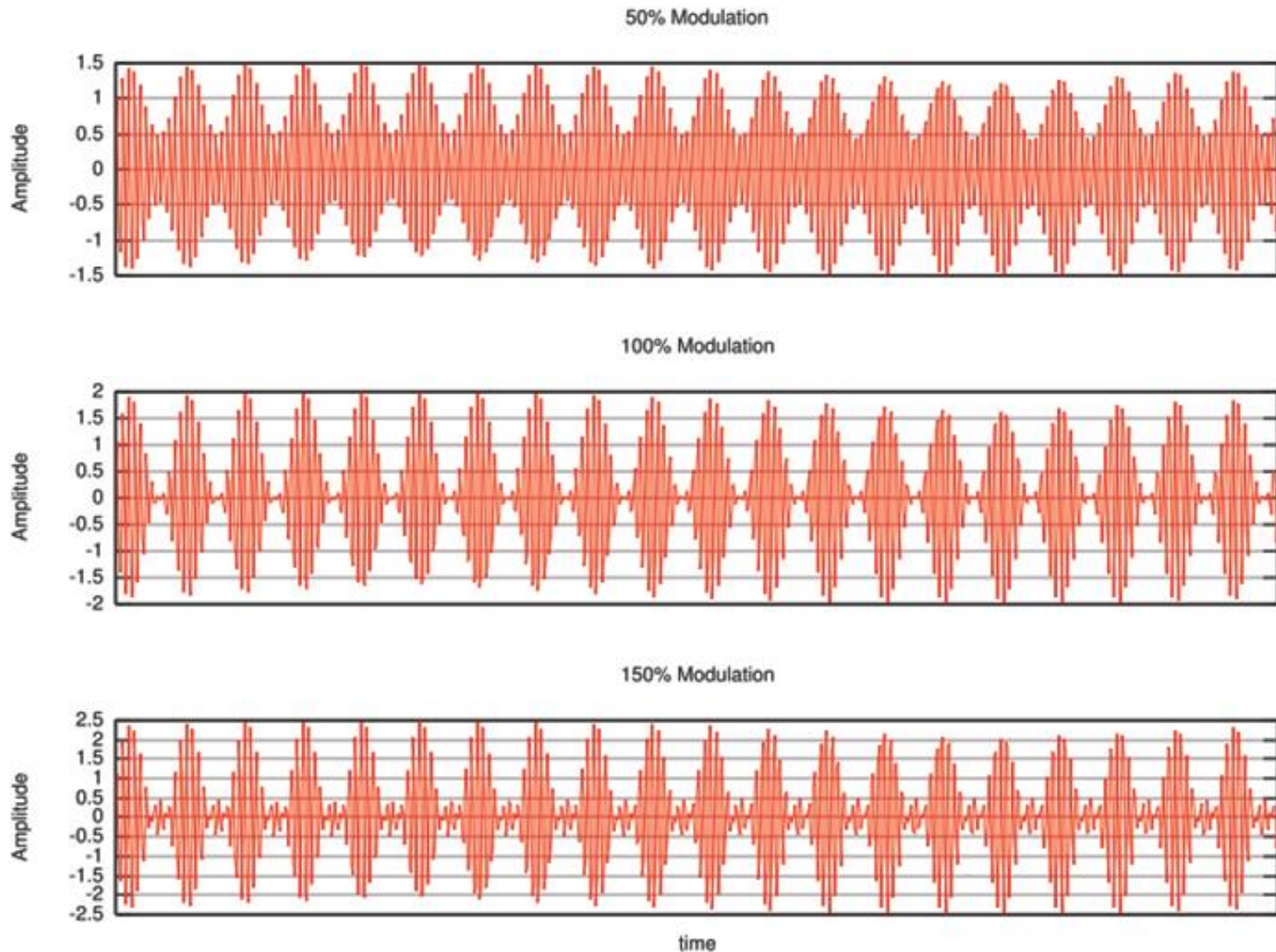
Πρέπει $\mu < 1$



Τηλεπικοινωνίες

Παράδειγμα Διαμόρφωση από απλό τόνο

20



Παράδειγμα

Διαμόρφωση από απλό τόνο

21

- Εύρεση του ΜΣ Fourier:

$$\begin{aligned} S(f) &= \mathfrak{F}[s(t)] = \mathfrak{F}[a(t)\cos(2\pi f_c t)] \\ &= \frac{1}{2}[A(f - f_c) + A(f + f_c)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A(f) &= \mathfrak{F}[a(t)] = \mathfrak{F}[A_c[1 + km(t)]] \\ &= A_c \mathfrak{F}[1 + km(t)] = A_c \mathfrak{F}[1] + A_c k \mathfrak{F}[m(t)] \\ &= A_c \delta(f) + kA_c M(f) \end{aligned}$$

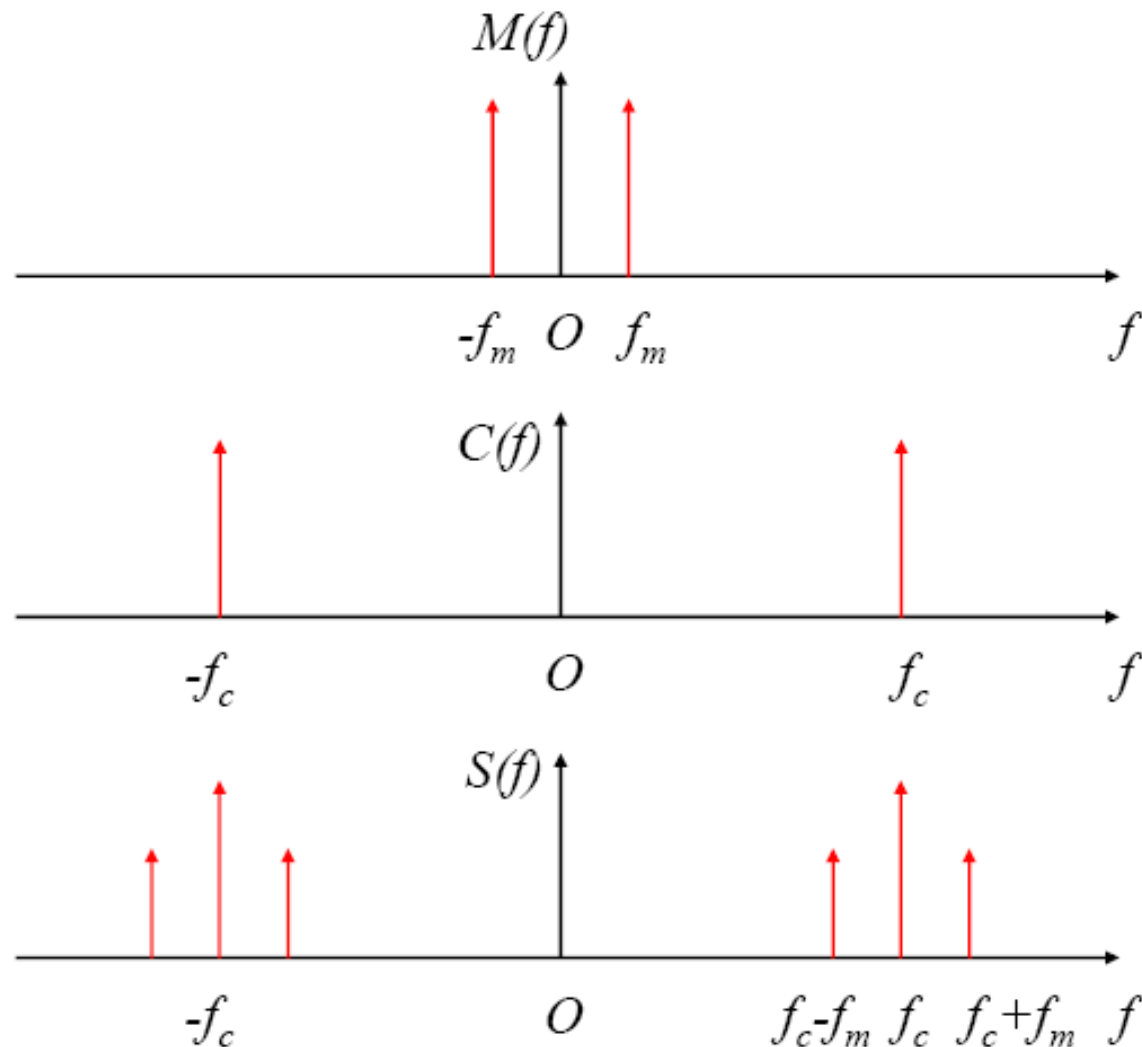
$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{1}{2} \mu A_c \cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{1}{2} \mu A_c \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$$

$$\begin{aligned} S(f) &= \frac{1}{2} A_c [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{1}{4} \mu A_c [\delta(f - f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)] + \\ &\quad + \frac{1}{4} \mu A_c [\delta(f - f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m)] \end{aligned}$$

Παράδειγμα

Διαμόρφωση από απλό τόνο

22



Παράδειγμα

Διαμόρφωση από απλό τόνο

23

- Η μέση ισχύς αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- Ισχύς φέροντος: $\frac{1}{2} A_c^2$

- Ισχύς άνω πλευρικής συχνότητας: $\frac{1}{8} \mu^2 A_c^2$

- Ισχύς κάτω πλευρικής συχνότητας: $\frac{1}{8} \mu^2 A_c^2$

$$\frac{\text{Συνολική ισχύς πλευρικής ζώνης}}{\text{Συνολική ισχύς διαμορφωμένης κυματομορφής}} = \frac{\mu^2}{2 + \mu^2}$$

- Ακόμα και όταν $\mu=1$ η συνολική ισχύς στις δύο πλευρικές συχνότητες είναι μόνο το ένα τρίτο της συνολικής ισχύος της διαμορφωμένης κυματομορφής.

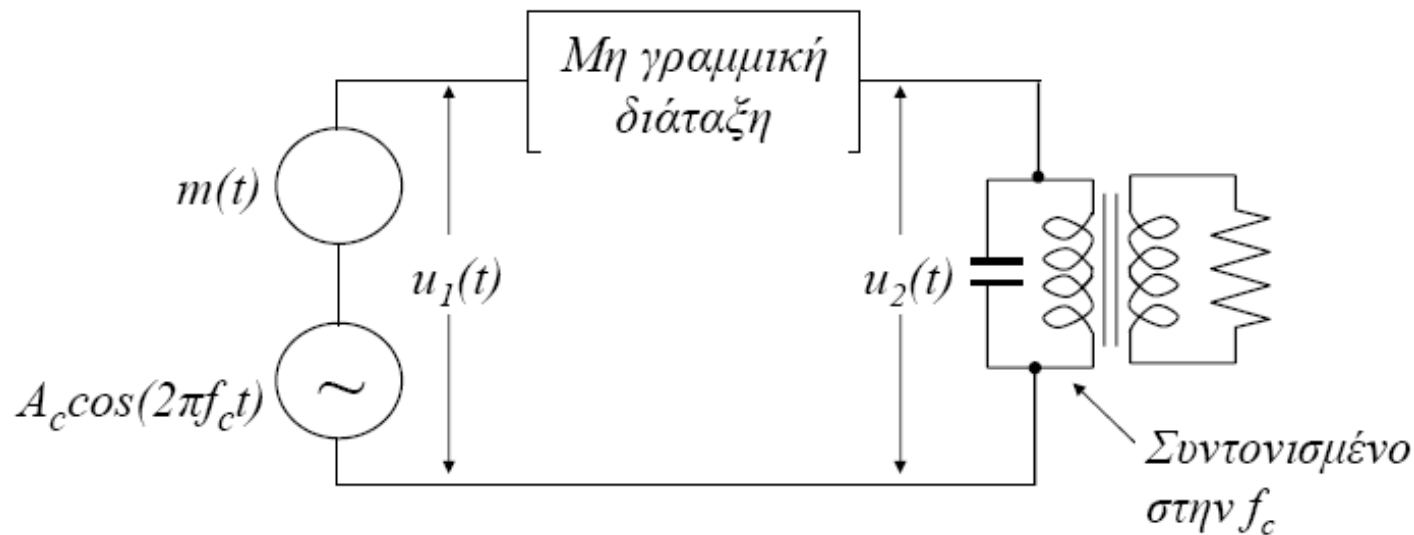
Παραγωγή κυματομορφών ΑΜ

24

- Δύο διατάξεις κατάλληλες για διαμόρφωση χαμηλής ισχύος:
 - ▣ Διαμορφωτής τετραγωνικού νόμου (*square-law modulator*)
 - ▣ Διακοπτικός διαμορφωτής (*switching modulator*)
- Και οι δύο απαιτούν τη χρήση ενός μη γραμμικού στοιχείου (ημιαγωγικές δίοδοι, τρανζίστορς).

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διαμορφωτής τετραγωνικού νόμου

25



- Η χαρακτηριστική μεταφοράς του συνδυασμού της διόδου και της αντίστασης φορτίου μπορεί να αναπαρασταθεί με σημαντική ακρίβεια με ένα τετραγωνικό νόμο (*square law*):

$$u_2(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_1^2(t), \quad a_1, a_2 = ct$$

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διαμορφωτής τετραγωνικού νόμου

26

$$u_2(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_1^2(t)$$

$$u_1(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + m(t)$$

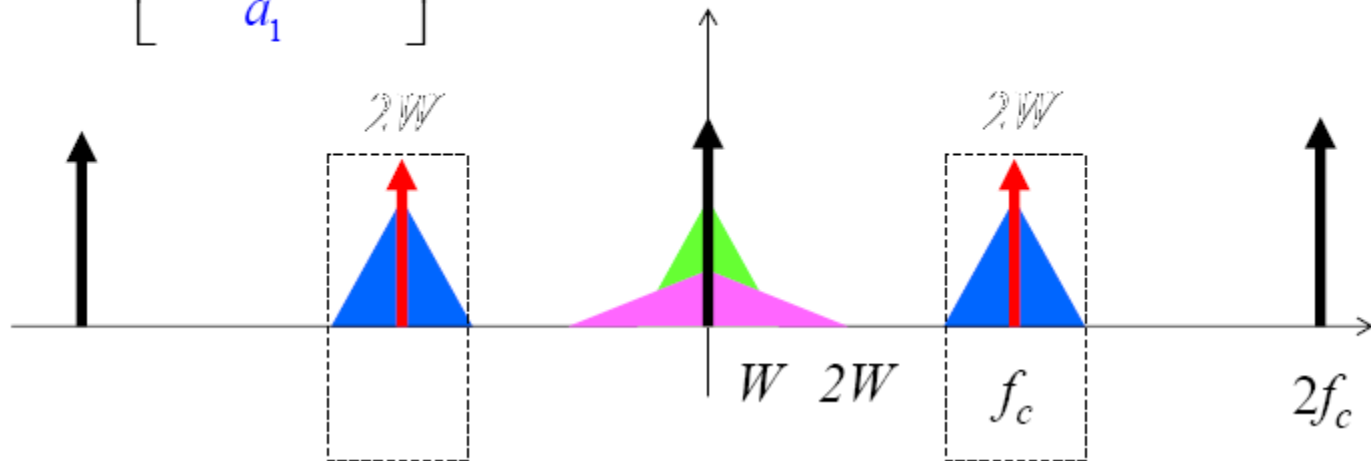
$$u_2(t) = a_1 A_c \left[1 + \frac{2a_2}{a_1} m(t) \right] \cos(2\pi f_c t) + a_1 m(t) + \\ + a_2 m^2(t) + a_2 A_c^2 \cos^2(2\pi f_c t)$$

- Ο πρώτος όρος είναι η επιθυμητή κυματομορφή AM, με ευαισθησία πλάτους $k_a = 2a_2/a_1$.
- Οι υπόλοιποι τρεις όροι είναι ανεπιθύμητοι και αφαιρούνται μέσω φιλτραρίσματος.

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διαμορφωτής τετραγωνικού νόμου

27

$$v_2(t) = a_1 A_c \left[1 + \frac{2a_2}{a_1} m(t) \right] \cos(2\pi f_c t) + a_1 m(t) + a_2 m^2(t) + a_2 A_c^2 \cos^2(2\pi f_c t)$$



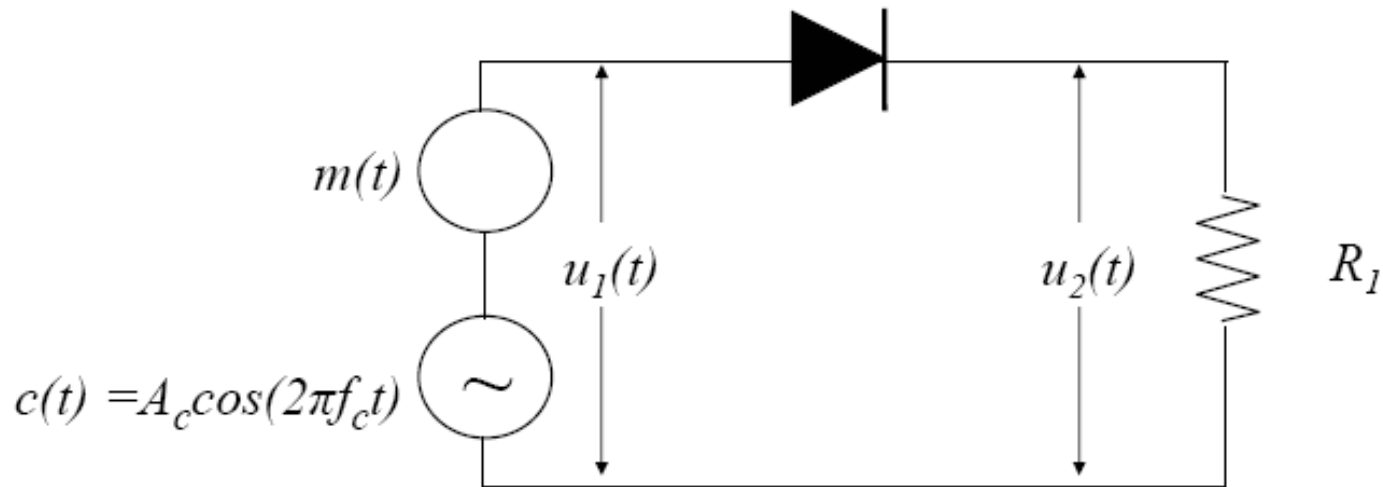
- Με ζωνοπερατό φίλτρο εύρους ζώνης $2W$ και κεντρική συχνότητα f_c λαμβάνουμε:

$$a_1 A_c \left[1 + \frac{2a_2}{a_1} m(t) \right] \cos(2\pi f_c t)$$

εφόσον $f_c > 3W$

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διακοπτικός διαμορφωτής

28

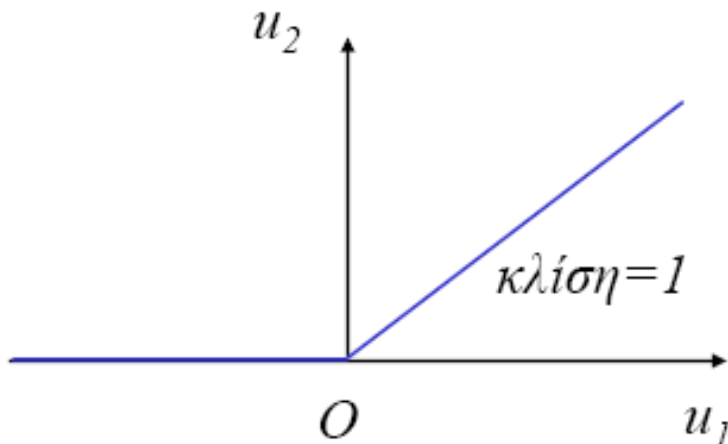


- Θεωρούμε ότι το φέρον που εφαρμόζεται στην είσοδο είναι μεγάλο στο πλάτος έτσι ώστε να ταλαντώνεται σε όλο το πλάτος της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου.
- Επίσης θεωρούμε ότι η δίοδος ενεργεί σαν ιδανικός διακόπτης.

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διακοπτικός διαμορφωτής

29

- Προσεγγίζουμε τη χαρακτηριστική μεταφοράς του συνδυασμού διόδου-αντίστασης φορτίου με μία τμηματικά γραμμική (piece-wise linear) χαρακτηριστική.



Αν $|m(t)| \ll A_c$, έχουμε:

$$u_2(t) \approx \begin{cases} u_1(t), & c(t) > 0 \\ 0, & c(t) < 0 \end{cases}$$

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διακοπτικός διαμορφωτής

30

- Άρα, θεωρώντας σήμα διαμόρφωσης που είναι ασθενές συγκρινόμενο με το φέρον, έχουμε αντικαταστήσει τη μη γραμμική λειτουργία της διόδου με μια προσεγγιστικά ισοδύναμη γραμμική, χρονικά μεταβαλλόμενη, λειτουργία.

$$u_2(t) \approx [A_c \cos(2\pi f_c t) + m(t)]g_p(t)$$

- $g_p(t)$ = περιοδική παλμοσειρά, με duty cycle = 1/2, και περίοδο $T_o = 1/f_c$.
- Η σειρά Fourier αυτής:

$$g_p(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos[2\pi f_c t(2n-1)]$$

Παραγωγή κυματομορφών AM: Διακοπτικός διαμορφωτής

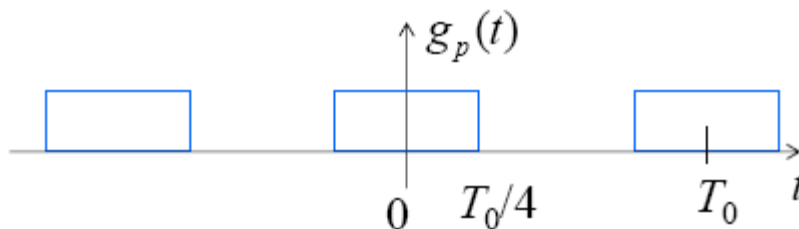
31

- Η $u_2(t)$ αποτελείται από:

- Τη συνιστώσα
$$u_2(t) = \frac{A_c}{2} \left[1 + \frac{4}{\pi A_c} m(t) \right] \cos(2\pi f_c t)$$

που είναι η επιθυμητή κυματομορφή AM με ευαισθησία πλάτους $k_a = 4/\pi A_c$.

- Συναρτήσεις δέλτα στα $0, \pm 2f_c, \pm 4f_c$, κ.ο.κ. και διαστήματα συχνότητας πλάτους $2W$ με κέντρο τα $0, \pm 3f_c, \pm 5f_c$, κ.ο.κ., όπου W το εύρος ζώνης του $m(t)$.
- Αυτά αφαιρούνται με ζωνοπερατό φιλτράρισμα.



Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM

32

- Θα περιγράψουμε δύο διατάξεις κατάλληλες για αποδιαμόρφωση χαμηλής ισχύος:
 - ▣ Φωρατή τετραγωνικού νόμου (square-law detector)
 - ▣ Φωρατή περιβάλλουσας (envelope detector)

Αποδιαμόρφωση κυματομορφών ΑΜ: Φωρατής Τετραγωνικού Νόμου

33

- Για την αποδιαμόρφωση αυτή χρησιμοποιούμε τη διάταξη του διαμορφωτή τετραγωνικού νόμου.

$$u_2(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_1^2(t) \quad \text{όπου}$$

$$u_1(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

$$\begin{aligned} \text{Άρα } u_2 &= a_1 A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t) + \\ &+ \frac{1}{2} a_2 A_c^2 [1 + 2k_a m(t) + k_a^2 m^2(t)] [1 + \cos(4\pi f_c t)] \end{aligned}$$

- Το επιθυμητό σήμα $a_2 A_c^2 k_a m(t)$ οφείλεται στον όρο $a_2 u_1^2(t)$ και αφαιρείται με βαθυπερατό φιλτράρισμα.

Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM: Φωρατής Τετραγωνικού Νόμου

34

- Ωστόσο το σήμα $a_2 A_c^2 k_a m(t)$ δεν είναι η μόνη συνεισφορά μέσα στο φάσμα βασικής ζώνης, γιατί ο όρος $A_c^2 k_a^2 m^2(t)$ θα δώσει ένα μεγάλο αριθμό παρόμοιων συνιστωσών συχνότητας.
- Ο λόγος του επιθυμητού σήματος προς την παραμόρφωση είναι ίσος με $2/k_a m(t)$. Για να αυξήσουμε αυτό το λόγο περιορίζουμε το ποσοστό διαμόρφωσης, δηλαδή επιλέγουμε $|k_a m(t)|$ **μικρό** συγκρινόμενο με τη μονάδα για όλα τα t .

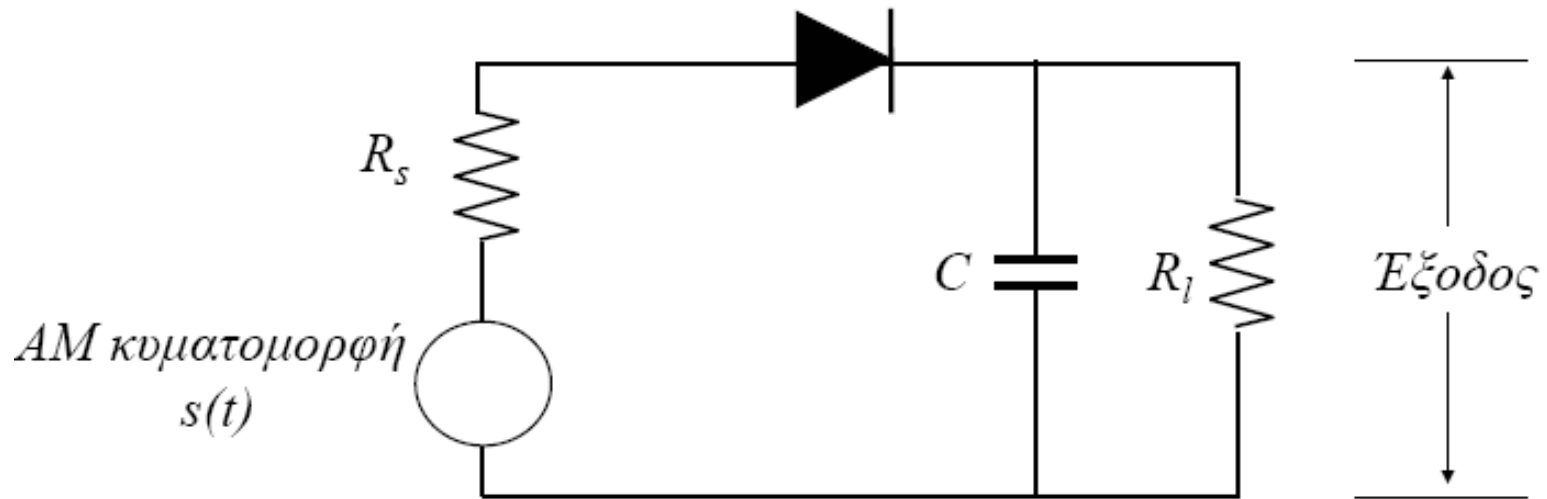
Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM: Φωρατής Τετραγωνικού Νόμου

35

- Άρα η ανάκτηση του σήματος βασικής ζώνης $m(t)$ χωρίς παραμόρφωση είναι δυνατή μόνο
 - ▣ εάν η εφαρμοσμένη κυματομορφή AM είναι **ασθενής** έτσι ώστε να δικαιολογηθεί η χρήση μιας σχέσης εισόδου-εξόδου τετραγωνικού νόμου και
 - ▣ εάν το ποσοστό διαμόρφωσης είναι **μικρό**.

Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM: Φωρατής Περιβάλλουσας

36



- AM στενής ζώνης και ποσοστό διαμόρφωσης $< 100\%$
- Η σταθερά χρόνου φόρτισης: $R_s C \ll \frac{1}{f_c}$
- Η σταθερά χρόνου εκφόρτισης: $\frac{1}{f_c} \ll R_l C \ll \frac{1}{W}$

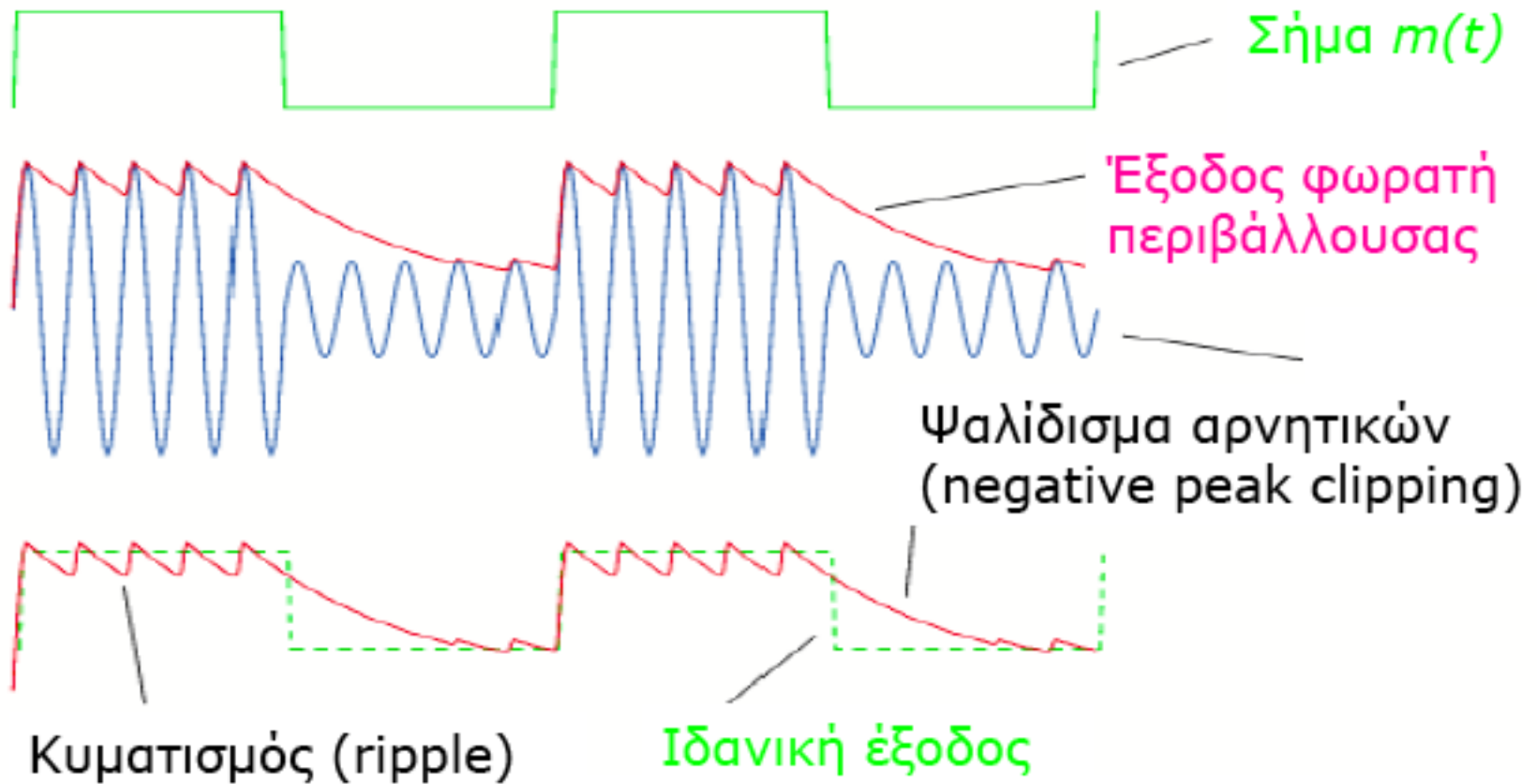
Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM: Φωρατής Περιβάλλουσας

37

- Η σταθερά χρόνου φόρτισης $R_s C$ είναι μικρή έτσι ώστε ο πυκνωτής να φορτίζεται ταχύτατα και να ακολουθεί την εφαρμοζόμενη τάση μέχρι τη θετική κορυφή όταν η δίοδος άγει.
- Η σταθερά χρόνου εκφόρτισης $R_1 C$ είναι αρκετά μεγάλη για να εξασφαλίζει ότι ο πυκνωτής εκφορτίζεται αργά μέσω της αντίστασης φορτίου R_1 μεταξύ θετικών κορυφών του φέροντος, αλλά όχι τόσο αργά ώστε η τάση του πυκνωτή να μην εκφορτίζεται στο μέγιστο ρυθμό αλλαγής του σήματος διαμόρφωσης.

Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM: Φωρατής Περιβάλλουσας

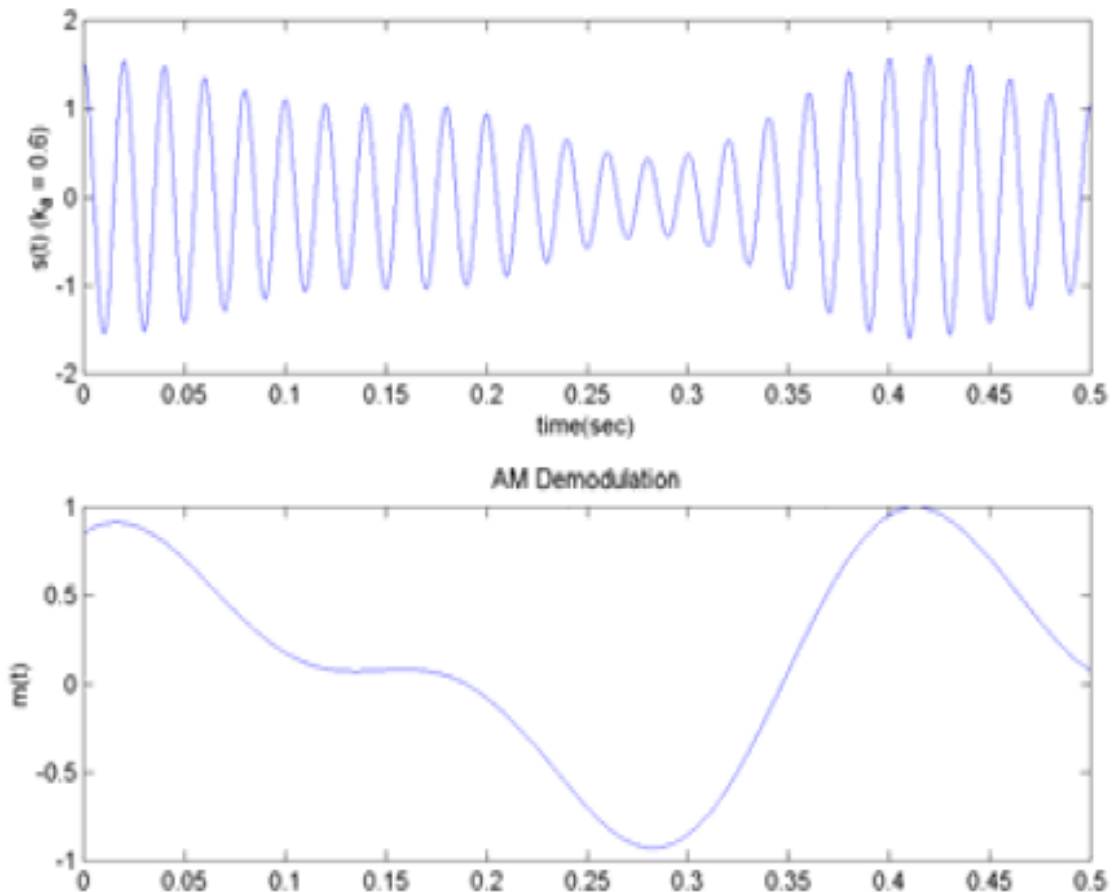
38



Αποδιαμόρφωση κυματομορφών AM: Φωρατής Περιβάλλουσας

39

- Η έξοδος του φωρατή έχει μια μικρή κυμάτωση στη συχνότητα του φέροντος που εξαλείφεται εύκολα με βαθυπερατό φιλτράρισμα.



Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης με Καταπιεσμένο Φέρον (DSB-SC)

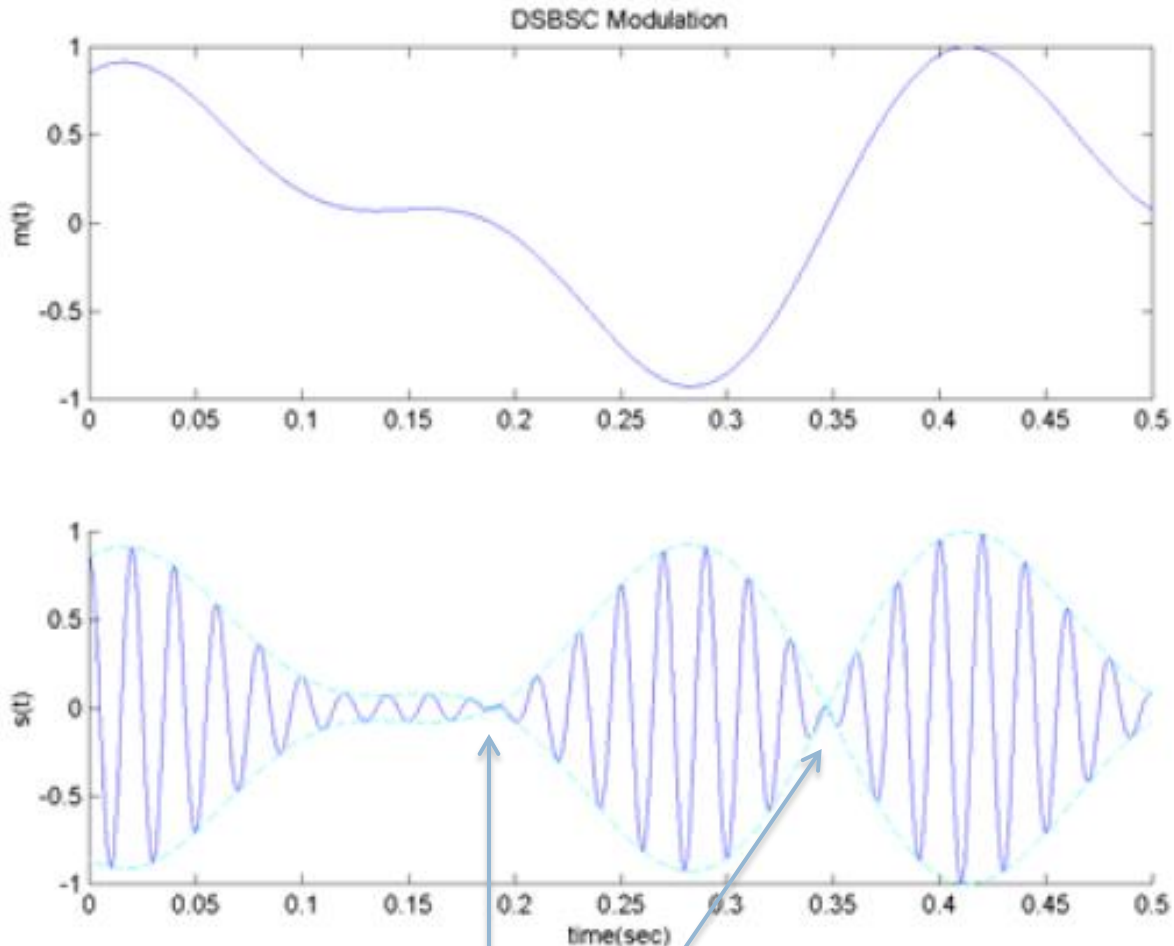
40

- *Double-SideBand-Suppressed Carrier Modulation*
- Στη διαμόρφωση AM η μετάδοση του φέροντος αποτελεί απώλεια ισχύος.
- Απαλείφοντας το φέρον από την AM έχουμε τη διαμόρφωση DSB-SC:

$$s(t) = c(t)m(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)m(t)$$

Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης με Καταπιεσμένο Φέρον (DSB-SC)

41



Τηλεπικοινωνίες

Αναστροφές φάσης

Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης με Καταπιεσμένο Φέρον (DSB-SC)

42

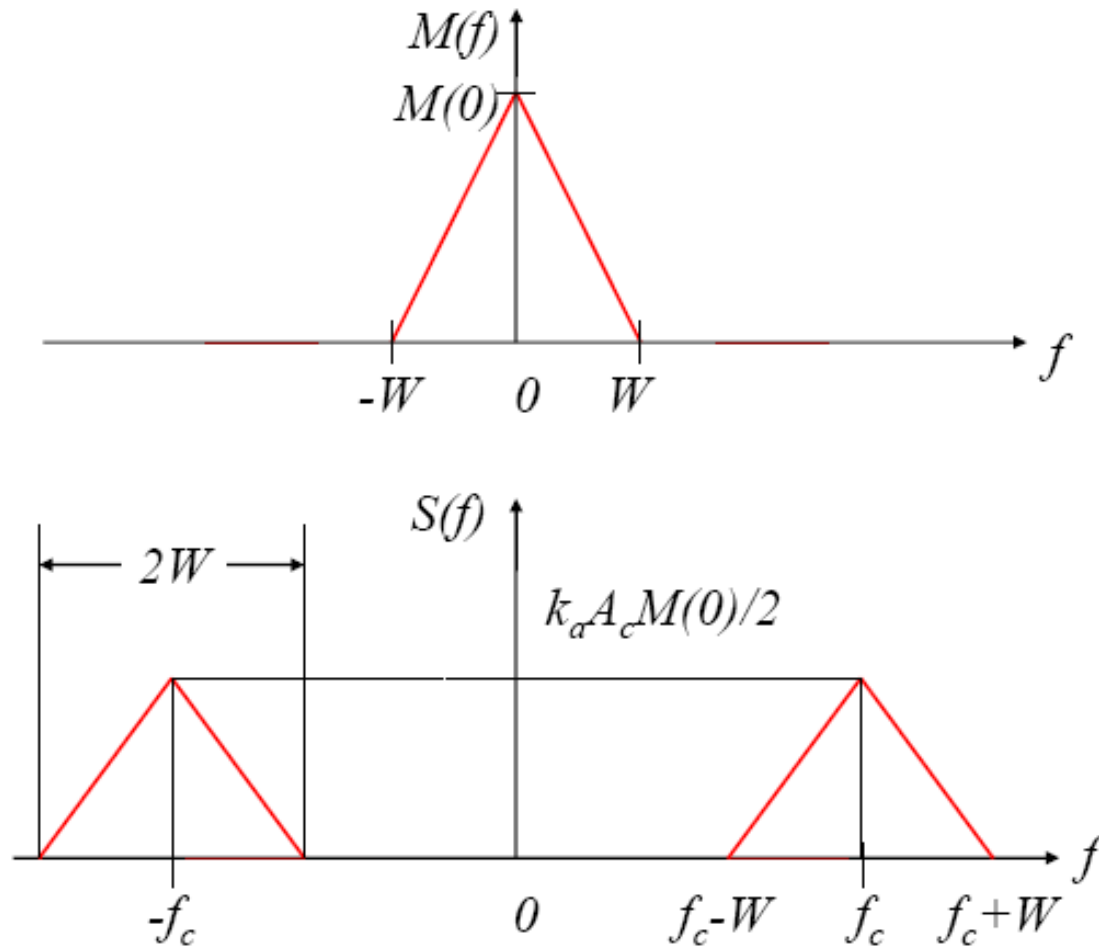
- Η διαμορφωμένη κυματομορφή υφίσταται αντιστροφή φάσης όποτε το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$ αλλάζει πρόσημο.
- Η περιβάλλουσα είναι διαφορετική από το σήμα βασικής ζώνης.
- Ο ΜΣ Fourier της DSB-SC κυματομορφής $s(t)$:

$$S(f) = \frac{1}{2} A_c [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$$

- Το εύρος ζώνης μετάδοσης της DSB-SC κυματομορφής είναι $2W$.

Διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης με Καταπιεσμένο Φέρον (DSB-SC)

43



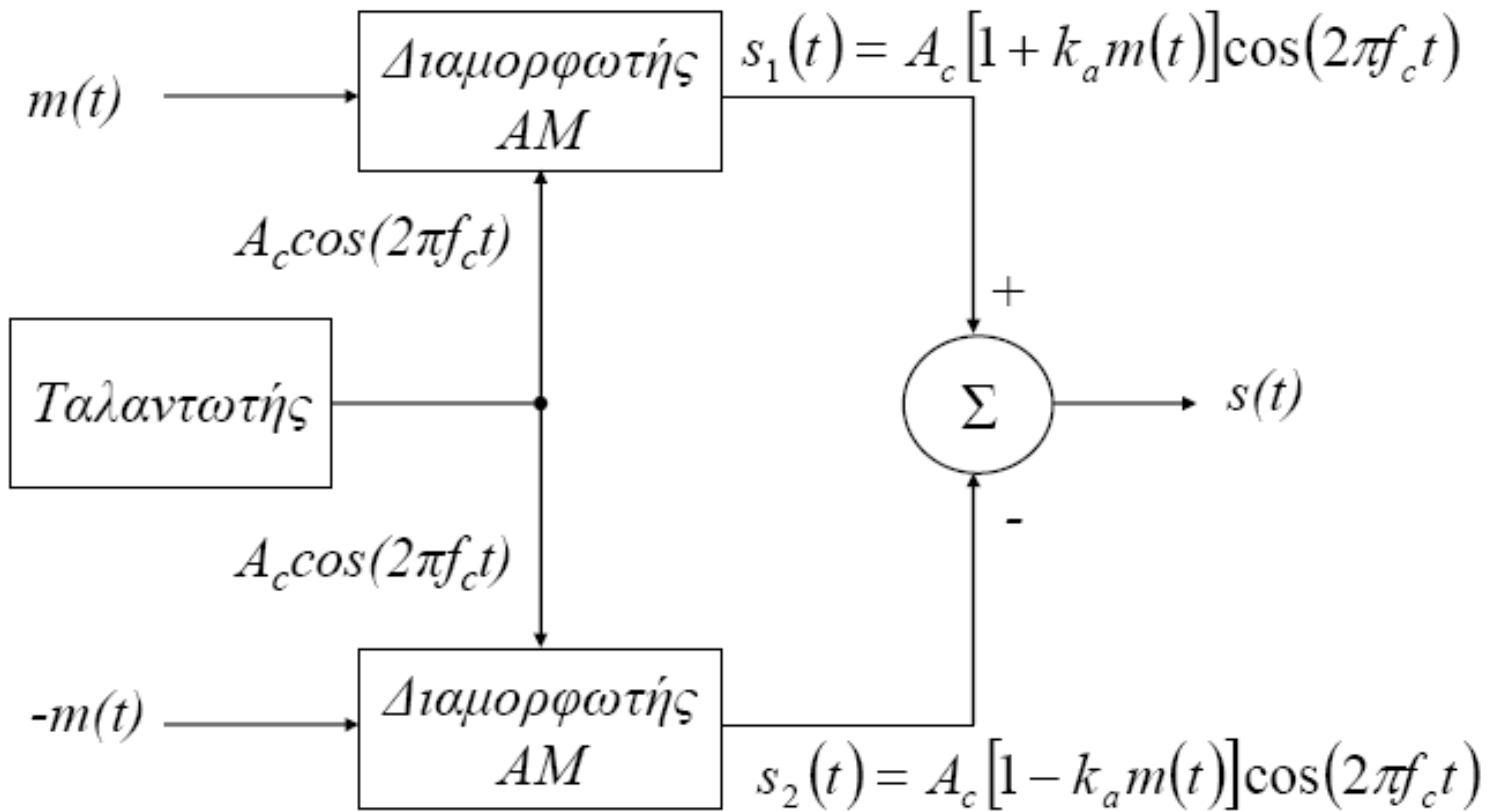
Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC

44

- Θα εξετάσουμε δύο μορφές διαμορφωτή γινομένου (product modulator):
 - ▣ Τον **ισοσταθμισμένο διαμορφωτή** (balanced modulator)
 - ▣ Το **δακτυλιοειδή διαμορφωτή** (ring modulator)

Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC: Ισοσταθμισμένος Διαμορφωτής

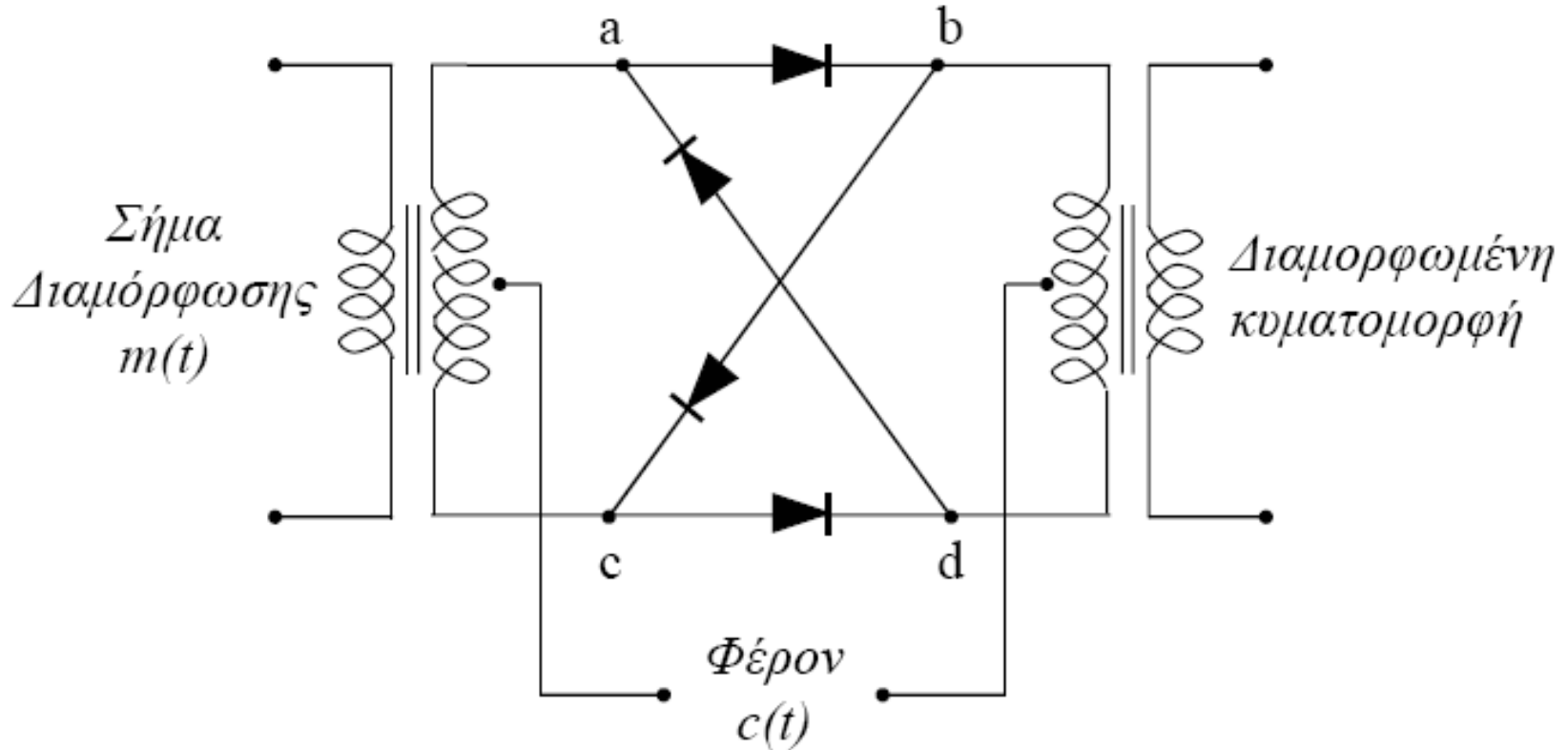
45



$$s(t) = s_1(t) - s_2(t) = 2k_a A_c \cos(2\pi f_c t) m(t)$$

Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC: Δακτυλιοειδής Διαμορφωτής

46



Οι τέσσερις δίοδοι σχηματίζουν ένα δακτύλιο στον οποίο όλες έχουν την ίδια φορά.

Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC: Δακτυλιοειδής Διαμορφωτής

47

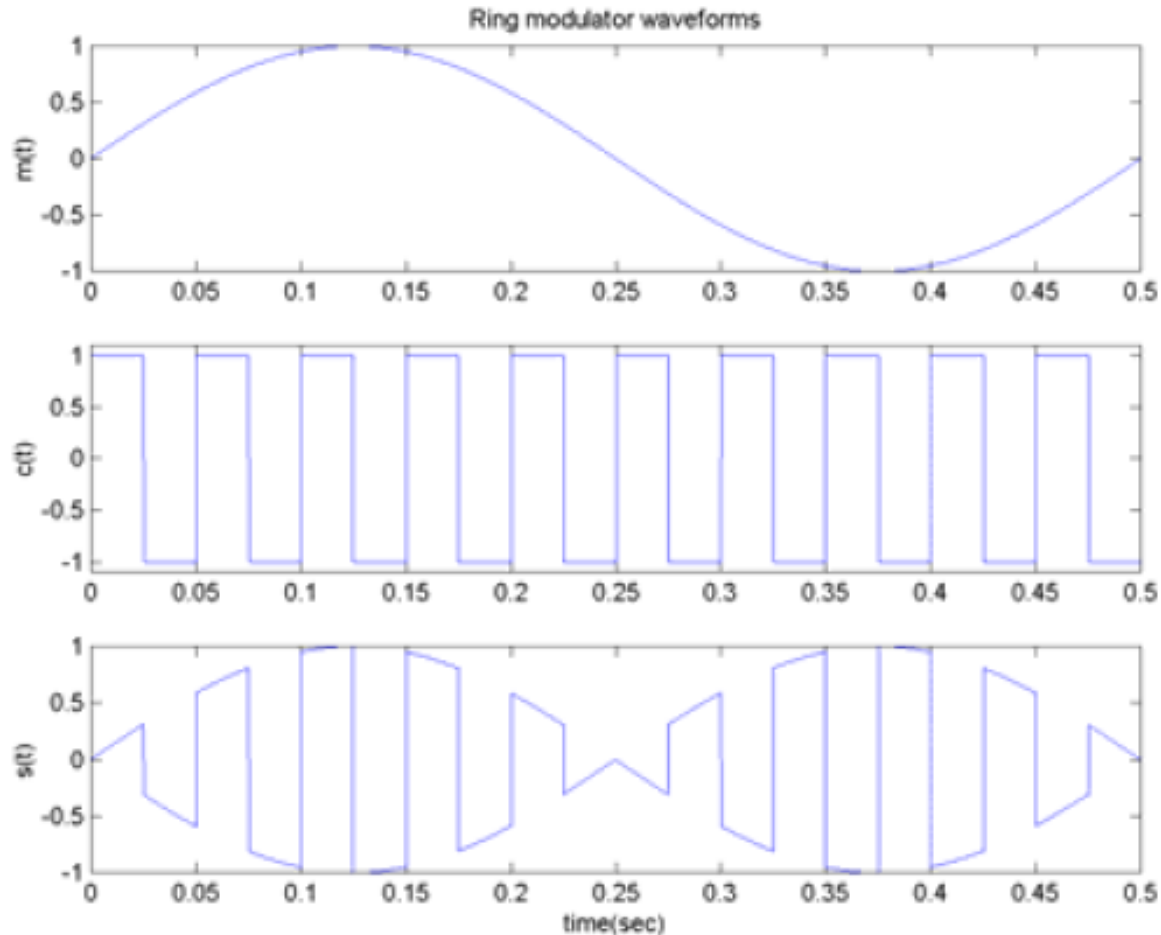
- Οι δίοδοι ελέγχονται από **τετραγωνικό** φέρον $c(t)$ συχνότητας f_c , που εφαρμόζεται μέσω δύο μετασχηματιστών κεντρικής λήψης.

$$c(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos [2\pi f_c t (2n-1)]$$

$$\begin{aligned} s(t) &= c(t)m(t) = \\ &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos [2\pi f_c t (2n-1)] m(t) \end{aligned}$$

Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC: Δακτυλιοειδής Διαμορφωτής

48



Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC: Δακτυλιοειδής Διαμορφωτής

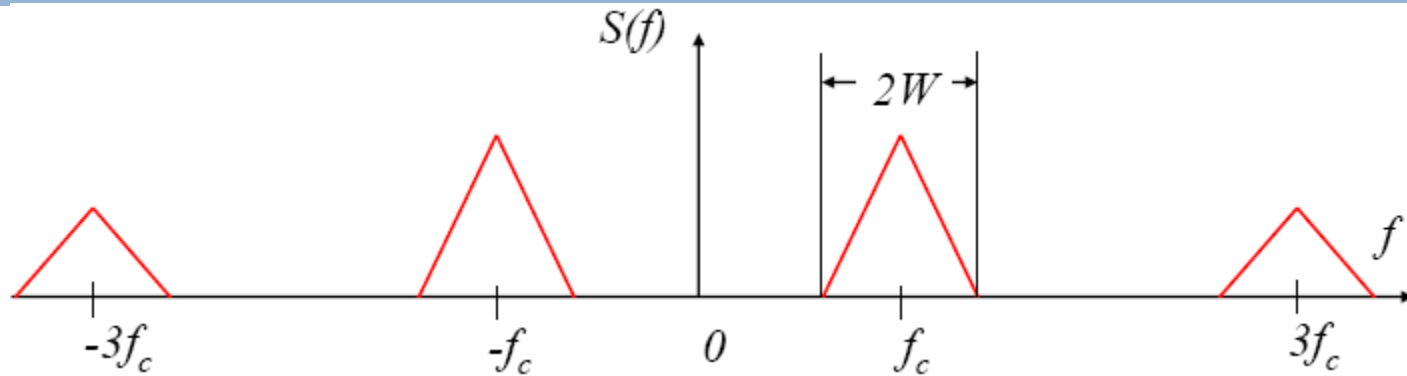
49

$$s(t) = c(t)m(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos [2\pi f_c t(2n-1)] m(t)$$

- Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καμία έξοδος από το διαμορφωτή στη φέρουσα συχνότητα.
- Δηλαδή η έξοδος του διαμορφωτή αποτελείται αποκλειστικά από προϊόντα διαμόρφωσης.
- **Διπλά ισοσταθμισμένος διαμορφωτής** (double-balanced modulator), γιατί ισοσταθμίζεται όσο αφορά τόσο το σήμα βασικής ζώνης όσο και το τετραγωνικό φέρον.

Παραγωγή Κυματομορφών DSB-SC: Δακτυλιοειδής Διαμορφωτής

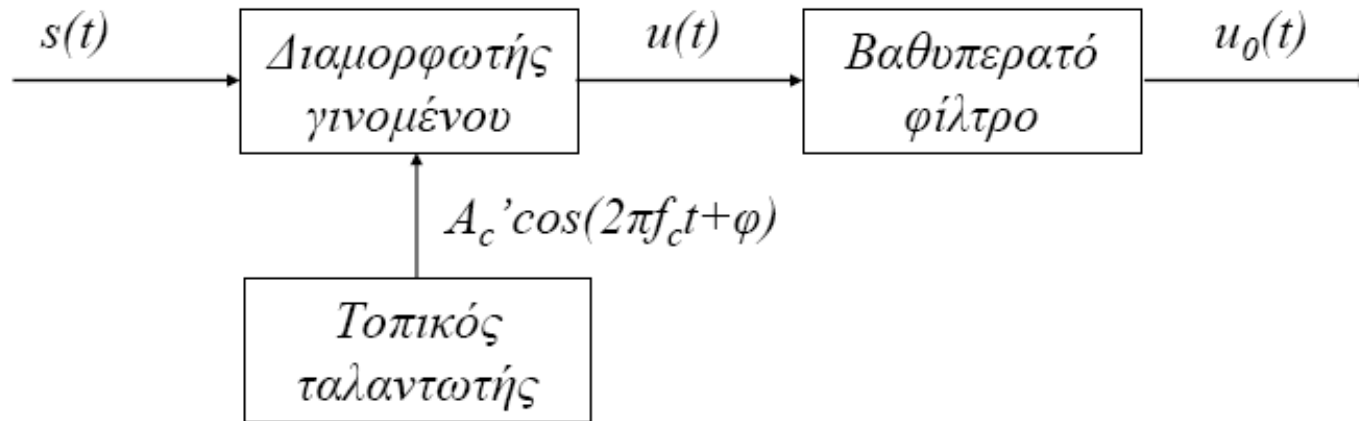
50



- Το φάσμα της εξόδου αποτελείται από πλευρικές ζώνες γύρω από κάθε μία από τις περιττές αρμονικές του τετραγωνικού φέροντος.
- Για να πάρουμε την επιθυμητή έξοδο χρησιμοποιούμε ζωνοπερατό φίλτρο με κεντρική συχνότητα f_c και εύρος ζώνης $2W$.
- Για να αποφύγουμε την επικάλυψη των πλευρικών ζωνών (sideband overlap) πρέπει $f_c > W$.

Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC

51



- Θεωρείται ότι το τοπικό σήμα ταλάντωσης είναι επακριβώς σύμφωνο ή συγχρονισμένο τόσο σε συχνότητα όσο και σε φάση με το φέρον $c(t)$ που χρησιμοποιείται στο διαμορφωτή γινομένου για την παραγωγή της $s(t)$.
- Η μέθοδος αποδιαμόρφωσης αυτή ονομάζεται **ομόδυνη** ή **σύγχρονη φώραση** (coherent or synchronous detection)

Ομόδυνα Φώραση Κυματομορφών DSB-SC

52

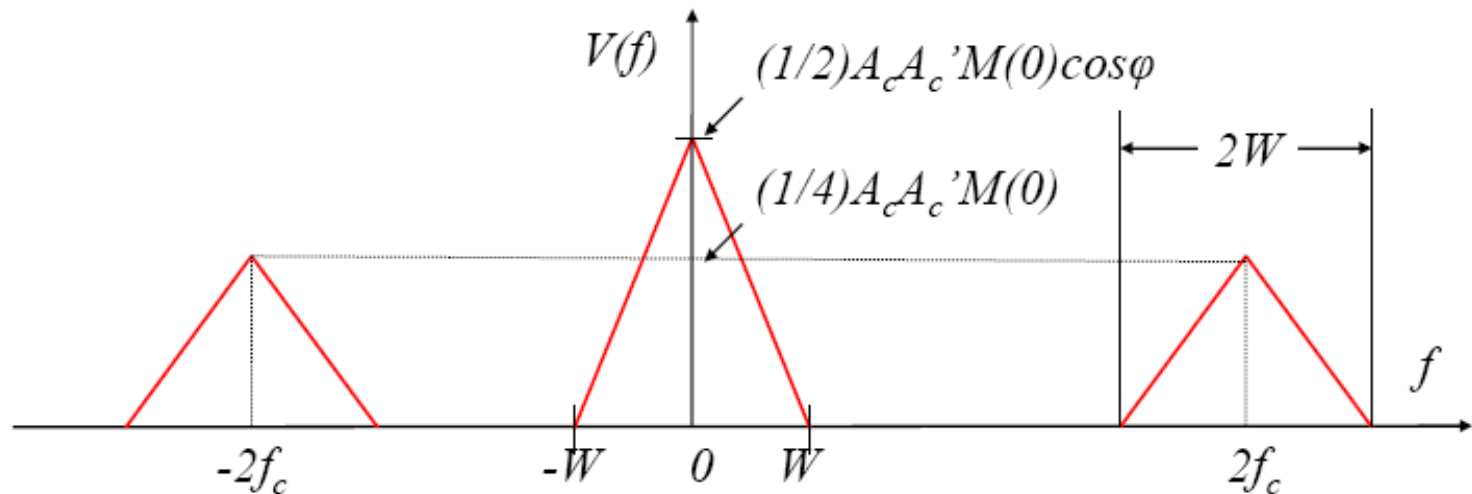
- Γενικότερη περίπτωση: το σήμα του τοπικού ταλαντωτή είναι της ίδιας συχνότητας αλλά με αυθαίρετη διαφορά φάσης: $A'_c \cos(2\pi f_c t + \phi)$

$$\begin{aligned} u(t) &= A'_c \cos(2\pi f_c t + \phi) s(t) \\ &= A_c A'_c \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t + \phi) m(t) \\ &= \frac{1}{2} A_c A'_c \cos(4\pi f_c t + \phi) m(t) + \frac{1}{2} A_c A'_c \cos(\phi) m(t) \end{aligned}$$

DSB-SC

Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC

53



- Έξοδος βαθυπερατού φίλτρου (με την προϋπόθεση $f_c > W$):

$$u_o(t) = \frac{1}{2} A_c A_c' \cos(\phi) m(t)$$

- Για $\phi = \pi/2$: ορθογωνικό μηδενικό φαινόμενο (quadrature null effect) του ομόδυνου φωρατή.

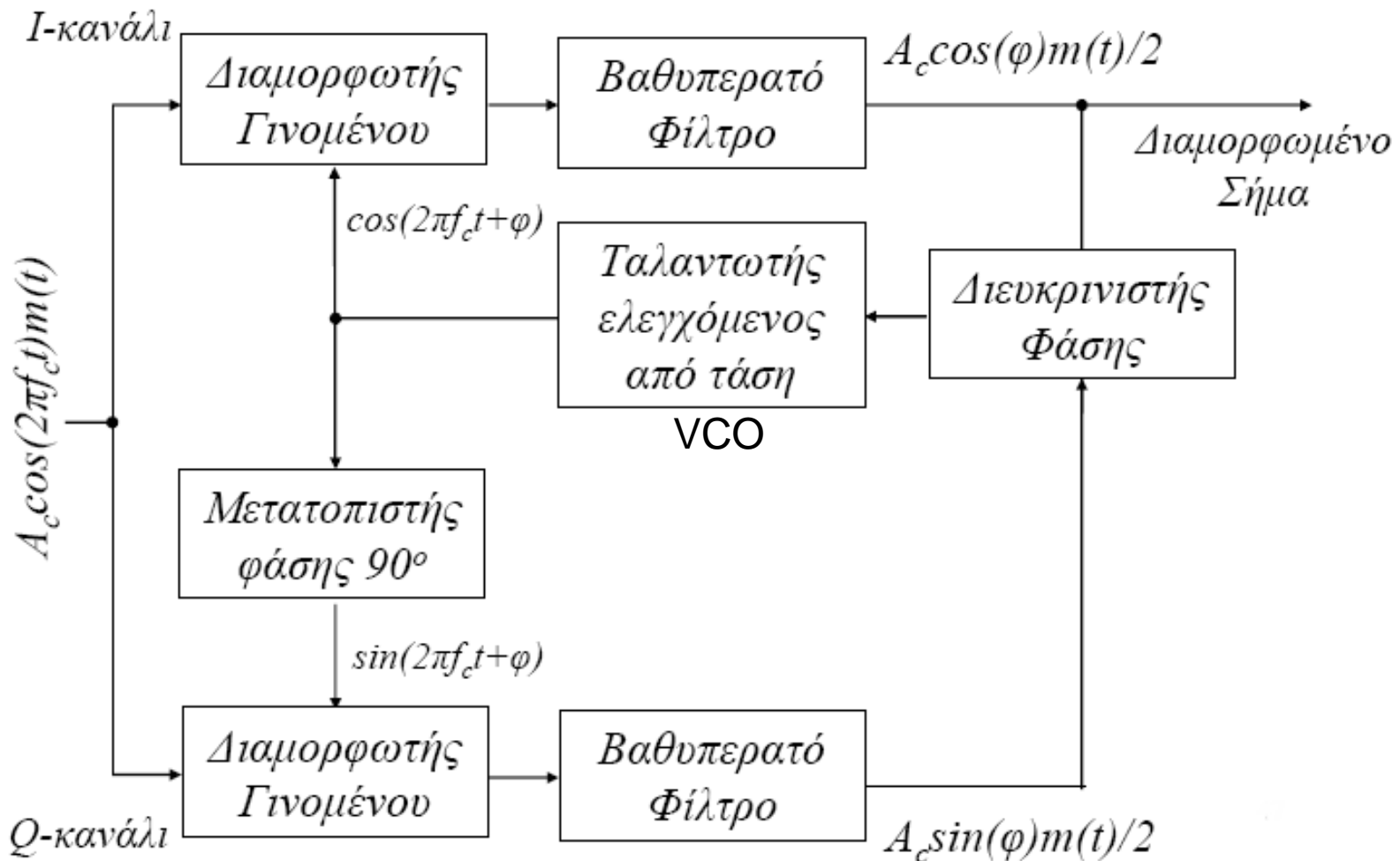
Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC

54

- Λόγω τυχαίων μεταβολών του καναλιού, το σφάλμα φάσης φ μεταβάλλεται τυχαία με το χρόνο.
- Συνεπώς χρειάζονται κυκλώματα στο δέκτη για να διατηρούν τον τοπικό ταλαντωτή σε **άριστο συγχρονισμό** τόσο σε συχνότητα όσο και σε φάση με το φέρον.
- Η **πολυπλοκότητα** του δέκτη είναι το αντίτιμο που πρέπει να πληρωθεί για την απαλοιφή του φέροντος, ώστε να εξοικονομηθεί ισχύς μετάδοσης.

Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC – Δέκτης Costas

55



Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC – Δέκτης Costas

56

- Αποτελείται από δύο ομόδυνους αποδιαμορφωτές (φωρατές) τροφοδοτούμενους από το ίδιο σήμα εισόδου, αλλά με σήματα τοπικού ταλαντωτή που είναι σε διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους:
 - Συμφασικός ομόδυνος φωρατής (*in-phase coherent detector*) ή I-κανάλι (*I-channel*)
 - Ορθογωνικός ομόδυνος φωρατής (*quadrature-phase coherent detector*) ή Q-κανάλι (*Q-channel*)
- Οι δύο φωρατές συνδέονται για την παραγωγή ενός συστήματος με αρνητική ανάδραση, σχεδιασμένου έτσι, ώστε να διατηρεί τον τοπικό ταλαντωτή σε συγχρονισμό με το φέρον.

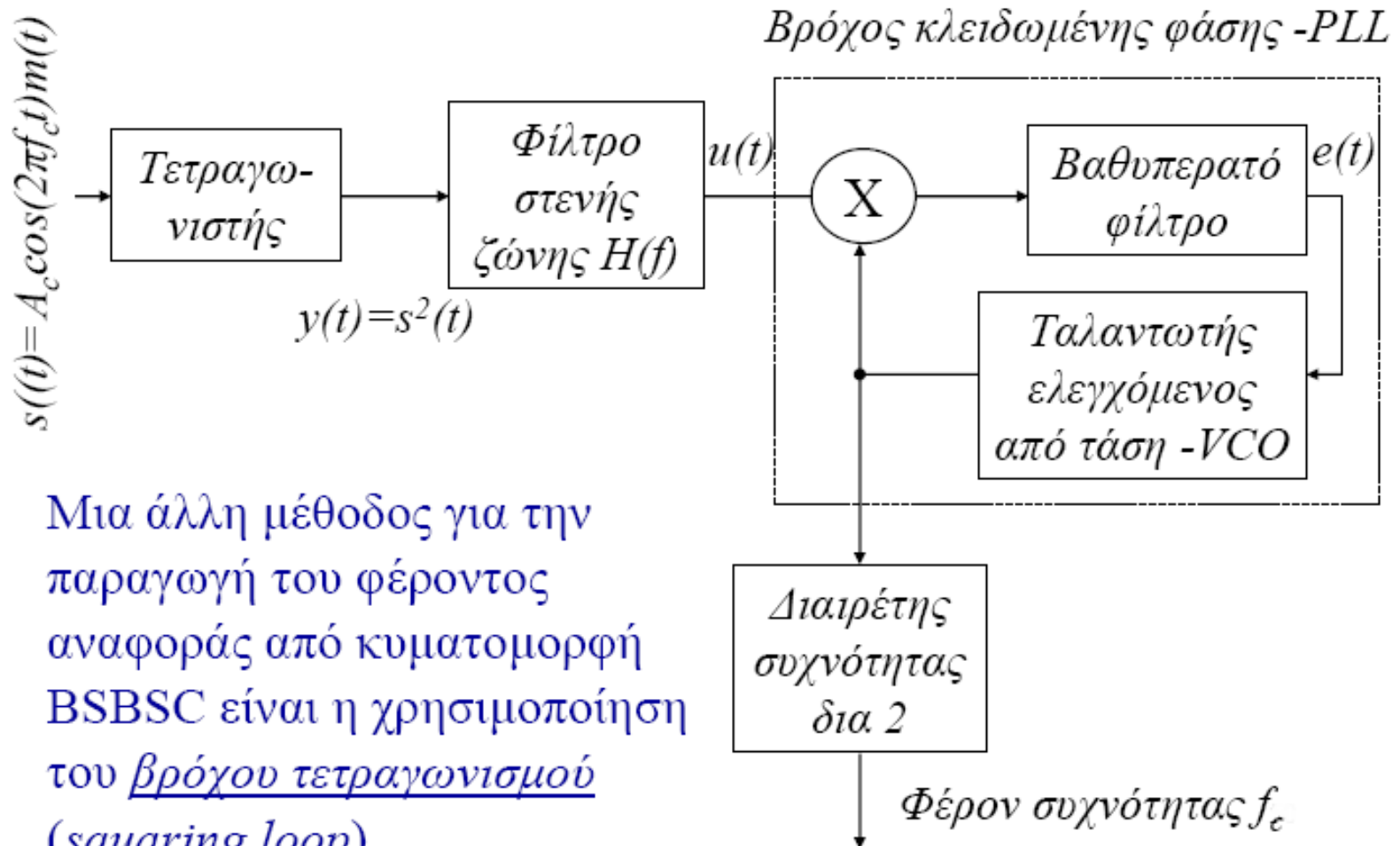
Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC – Δέκτης Costas

57

- Αν εμφανιστεί μία μετατόπιση φάσης κατά φ rad, η έξοδος του I-καναλιού παραμένει σχεδόν αμετάβλητη, αλλά εμφανίζεται πλέον και κάποιο σήμα στο Q-κανάλι ανάλογο με το $\sin\varphi \approx \varphi$.
- Συνδυάζοντας τις εξόδους του I και Q καναλιού σε ένα **διευκρινιστή φάσης** (*phase discriminator*) (που αποτελείται από ένα πολλαπλασιαστή ακολουθούμενο από ένα βαθυπερατό φίλτρο), λαμβάνεται ένα dc σήμα ελέγχου που αυτόματα διορθώνει σφάλματα φάσης του τοπικού ταλαντωτή.
- Ο έλεγχος φάσης παύει μαζί με τη διαμόρφωση και το κλείδωμα φάσης πρέπει να εγκατασταθεί ξανά με την επανεμφάνιση διαμόρφωσης.

Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC – Βρόχος Τετραγωνισμού

58



Μια άλλη μέθοδος για την παραγωγή του φέροντος αναφοράς από κυματομορφή BSBSC είναι η χρησιμοποίηση του βρόχου τετραγωνισμού (*squaring loop*).

Ομόδυνη Φώραση Κυματομορφών DSB-SC – Βρόχος Τετραγωνισμού

59

- Η έξοδος του φίλτρου στενής ζώνης παρακολουθείται μέσω ενός βρόχου κλειδωμένης φάσης (*phase-locked loop – PLL*) (πολλαπλασιαστής, βαθυπερατό φίλτρο και ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση - *Voltage Controlled Oscillator* - σε σύστημα με αρνητική ανάδραση).
- Το σήμα σφάλματος (*error signal*) εξαρτάται από τη διαφορά (ως προς συχνότητα και φάση) της εξόδου του VCO από το σήμα $u(t)$ στην είσοδο της *PLL*.
- Το σήμα σφάλματος εφαρμόζεται στην είσοδο του VCO αναγκάζοντας τη συχνότητα του VCO να συμπίπτει με αυτή της εισόδου $u(t)$ του *PLL* και τη φάση του να έχει 90° διαφορά από αυτή του $u(t)$.

Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους (QAM)

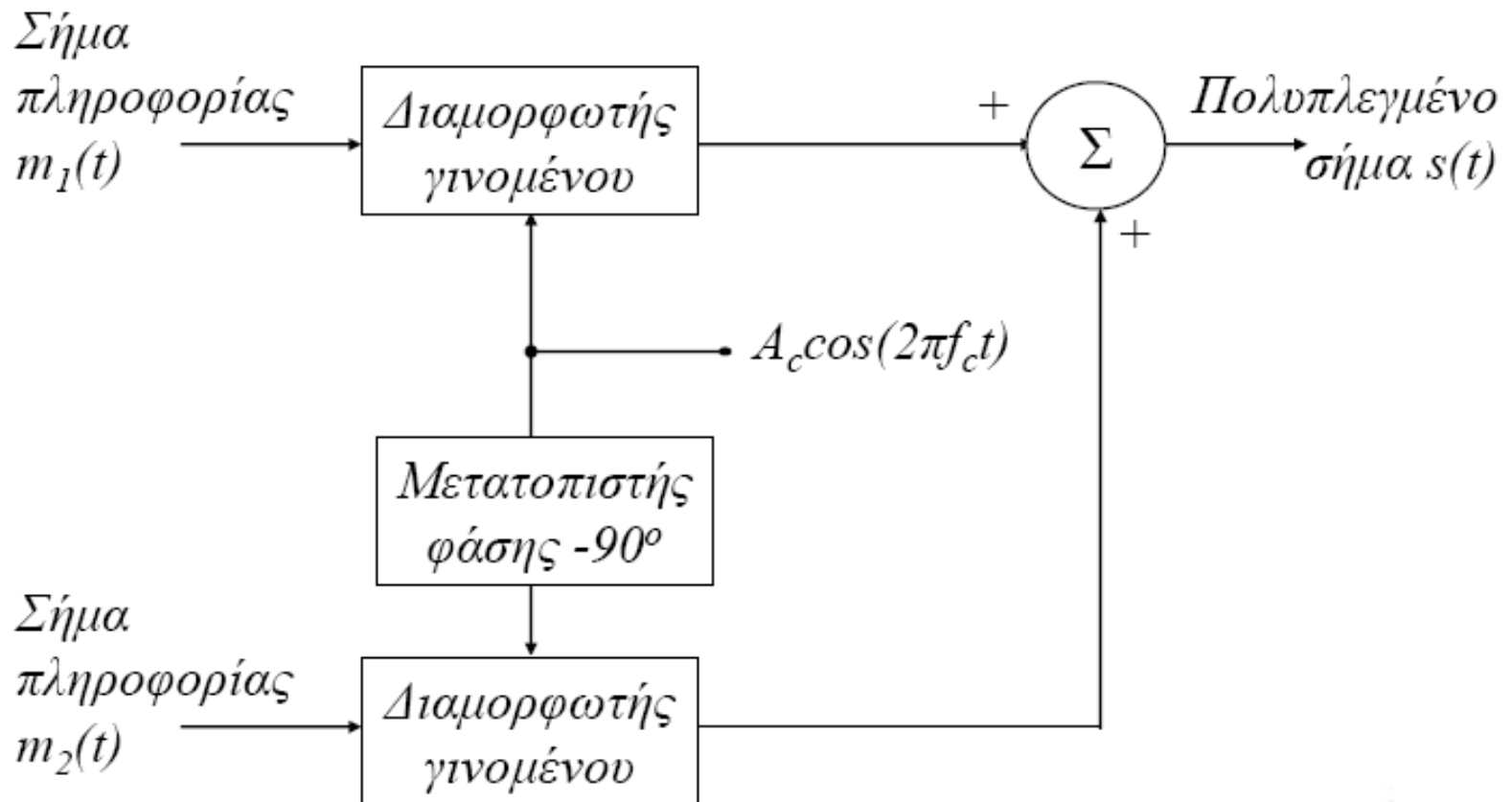
60

- Η πολυπλεξία ορθογωνικών φερόντων (*quadrature-carrier multiplexing*) ή ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (*quadrature-amplitude modulation, QAM*) επιτρέπει σε δύο διαμορφωμένα DSB-SC, προερχόμενα από την εφαρμογή δύο ανεξάρτητων σημάτων πληροφορίας, να καταλάβουν το ίδιο εύρος ζώνης μετάδοσης.
- Είναι συνεπώς μια διάταξη εξοικονόμησης εύρους ζώνης (*bandwidth-conservation scheme*).

Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους (QAM)

61

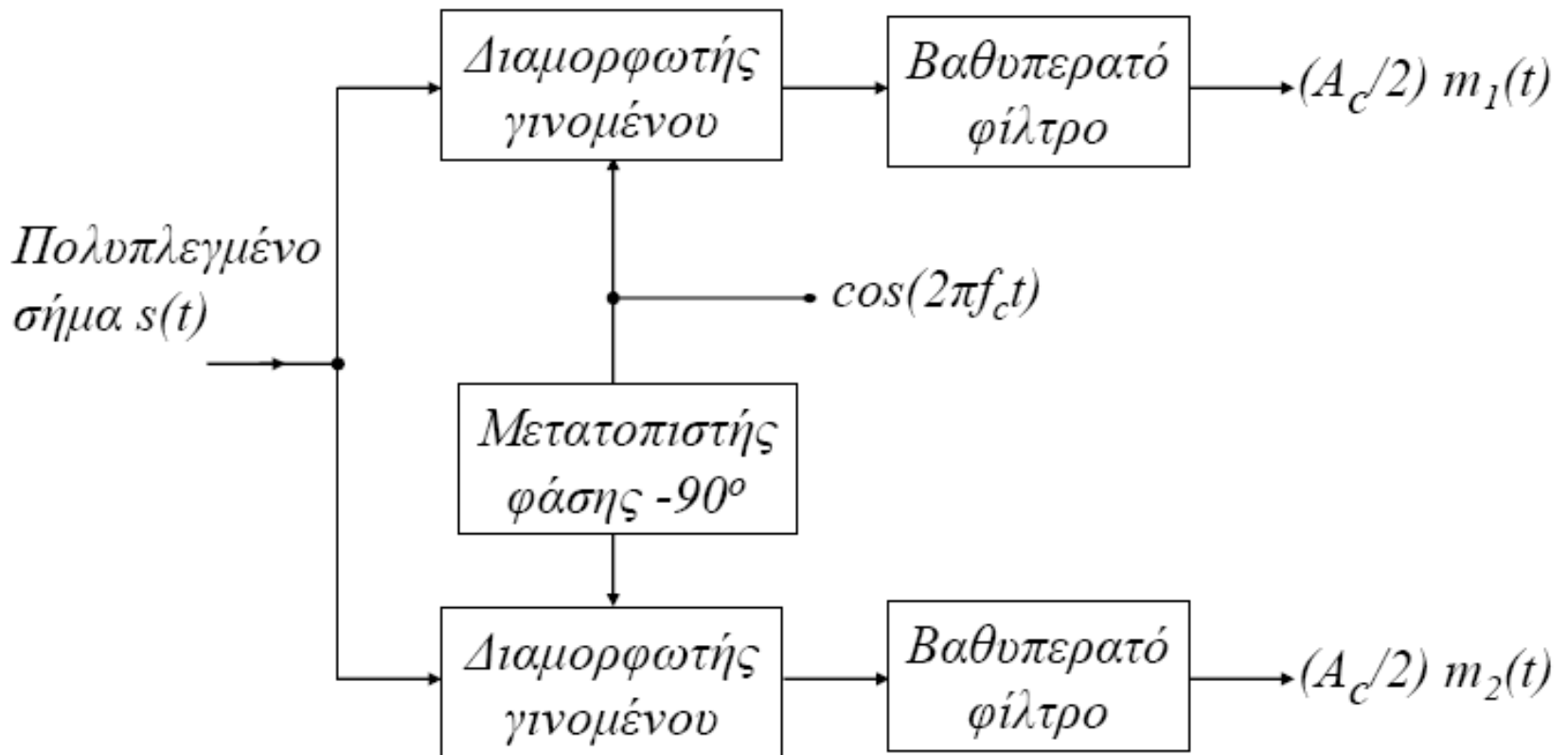
Πομπός:



Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους (QAM)

62

Δέκτης:



Ορθογωνική Διαμόρφωση Πλάτους (QAM)

63

$$s(t) = A_c m_1(t) \cos(2\pi f_c t) + A_c m_2(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- $A_c m_1(t)$ = **συμφασική συνιστώσα** του $s(t)$
- $A_c m_2(t)$ = **ορθογωνική συνιστώσα** του $s(t)$
- Για να λειτουργήσει ικανοποιητικά το σύστημα πρέπει να διατηρούνται οι σωστές σχέσεις φάσης και συχνότητας μεταξύ των τοπικών ταλαντωτών που χρησιμοποιούνται στον πομπό και το δέκτη του συστήματος.
 - Συγχρονισμός (π.χ. Δέκτης Costas, πιλοτικό σήμα)
- Έτσι π.χ. στην έγχρωμη αναλογική τηλεόραση μεταδίδονται παλμοί συγχρονισμού.

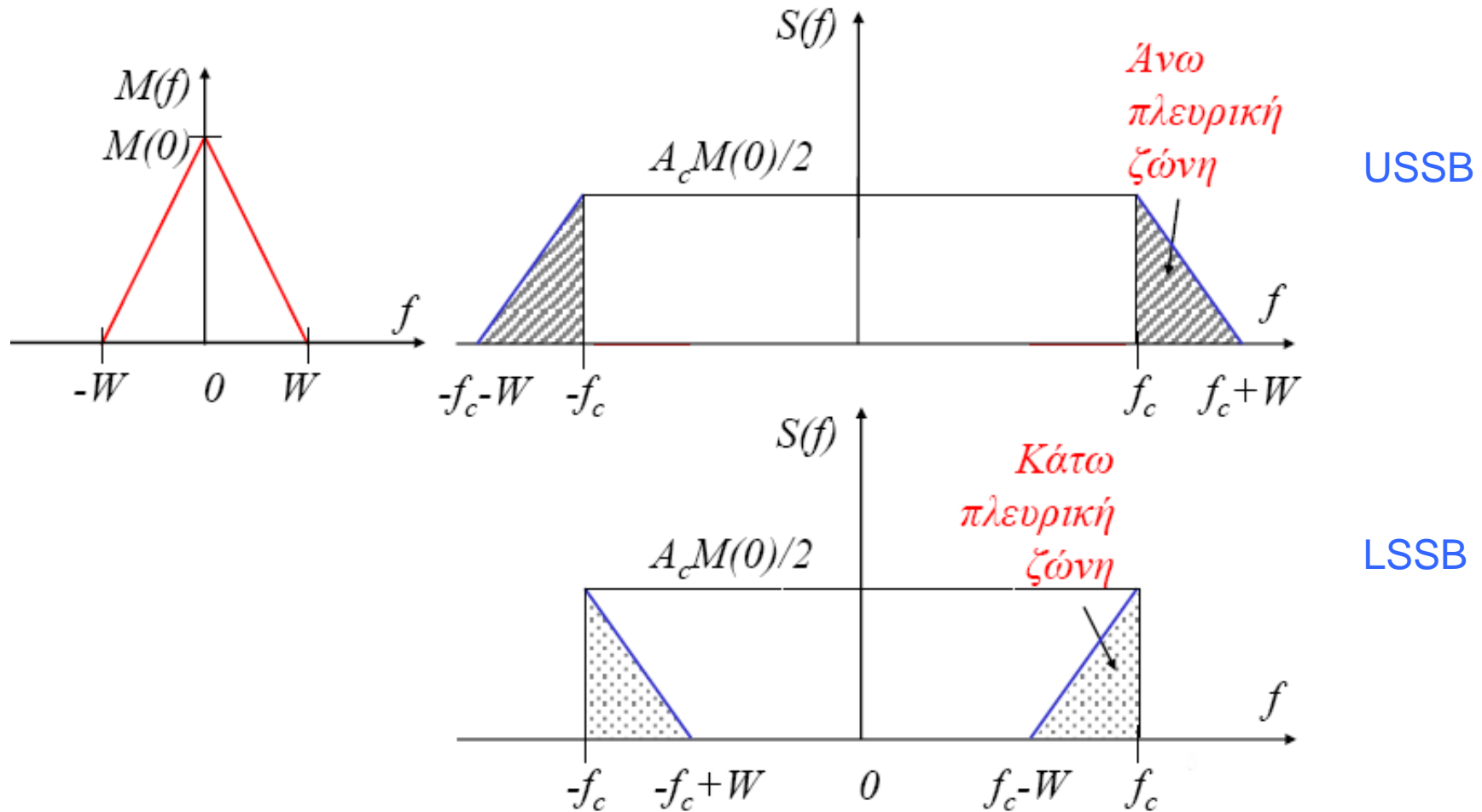
Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

64

- Στις διαμορφώσεις AM και DSB-SC η άνω και κάτω πλευρική ζώνη συνδέονται μοναδικά μεταξύ τους με την ιδιότητα της συμμετρίας γύρω από τη f_c .
- Όταν μεταδίδεται μόνο η μία πλευρική ζώνη το σύστημα διαμόρφωσης αναφέρεται ως σύστημα **απλής πλευρικής ζώνης** (*Single-SideBand, SSB*).
- Πλεονέκτημα: μειωμένη απαίτηση εύρους ζώνης και περιορισμός της υψηλής ισχύος φέροντος
- Μειονέκτημα: κόστος και πολυπλοκότητα του συστήματος

Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

65



USB

LSB

Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

66

- Περιγραφή της κυματομορφής SSB στο πεδίο του χρόνου
- Κανονικοποιημένη μορφή της SSB κυματομορφής:

$$s(t) = s_I(t) \cos(2\pi f_c t) - s_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

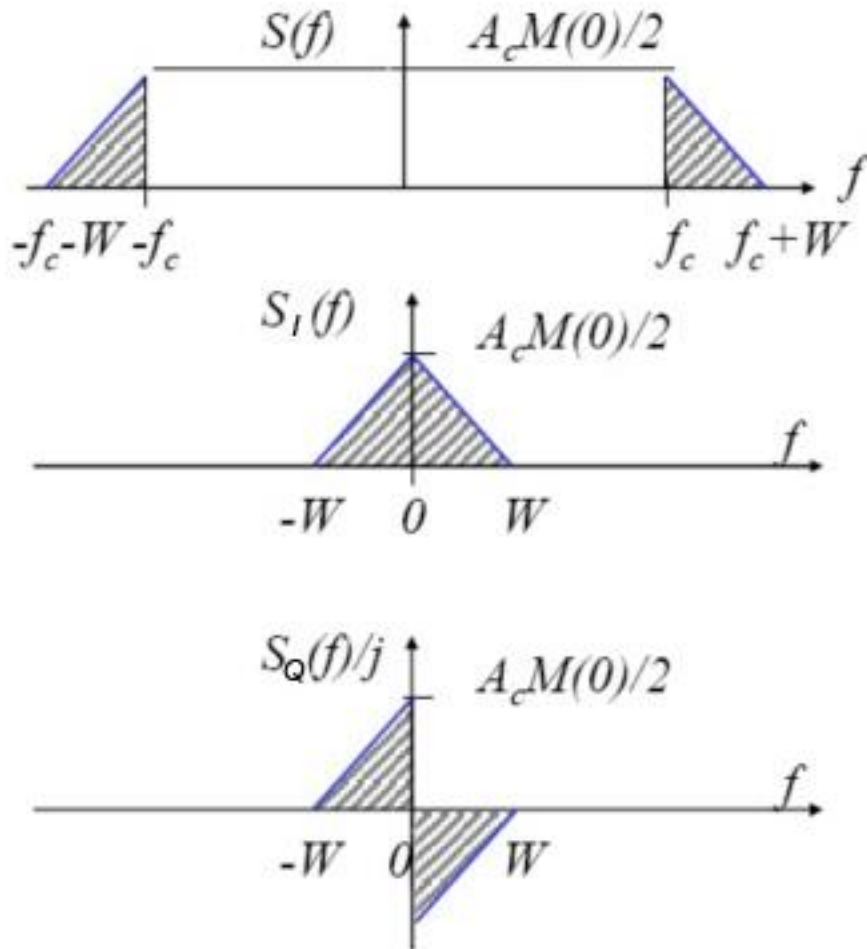
- ΟΤΠΟΥ:

$$S_I(f) = \begin{cases} S(f - f_c) + S(f + f_c), & -W \leq f_c \leq W \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases}$$

$$S_Q(f) = \begin{cases} j[S(f - f_c) - S(f + f_c)], & -W \leq f_c \leq W \\ 0, & \text{αλλου} \end{cases}$$

Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

67



$$S_I(f) = \frac{1}{2} A_c M(f)$$

$$s_I(t) = \frac{1}{2} A_c m(t)$$

$$S_Q(f) = -\frac{j}{2} A_c \operatorname{sgn}(f) M(f) = \frac{1}{2} A_c \hat{M}(f)$$

$$s_Q(t) = \frac{1}{2} A_c \hat{m}(t)$$

Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

68

$$s(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) - \frac{1}{2} A_c \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)$$

Άνω
πλευρική
ζώνη

SSB κυματομορφή μόνο με την κάτω πλευρική ζώνη:

$$s(t) = \frac{1}{2} A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) + \frac{1}{2} A_c \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)$$

Παράδειγμα: Διαμόρφωση από απλό τόνο

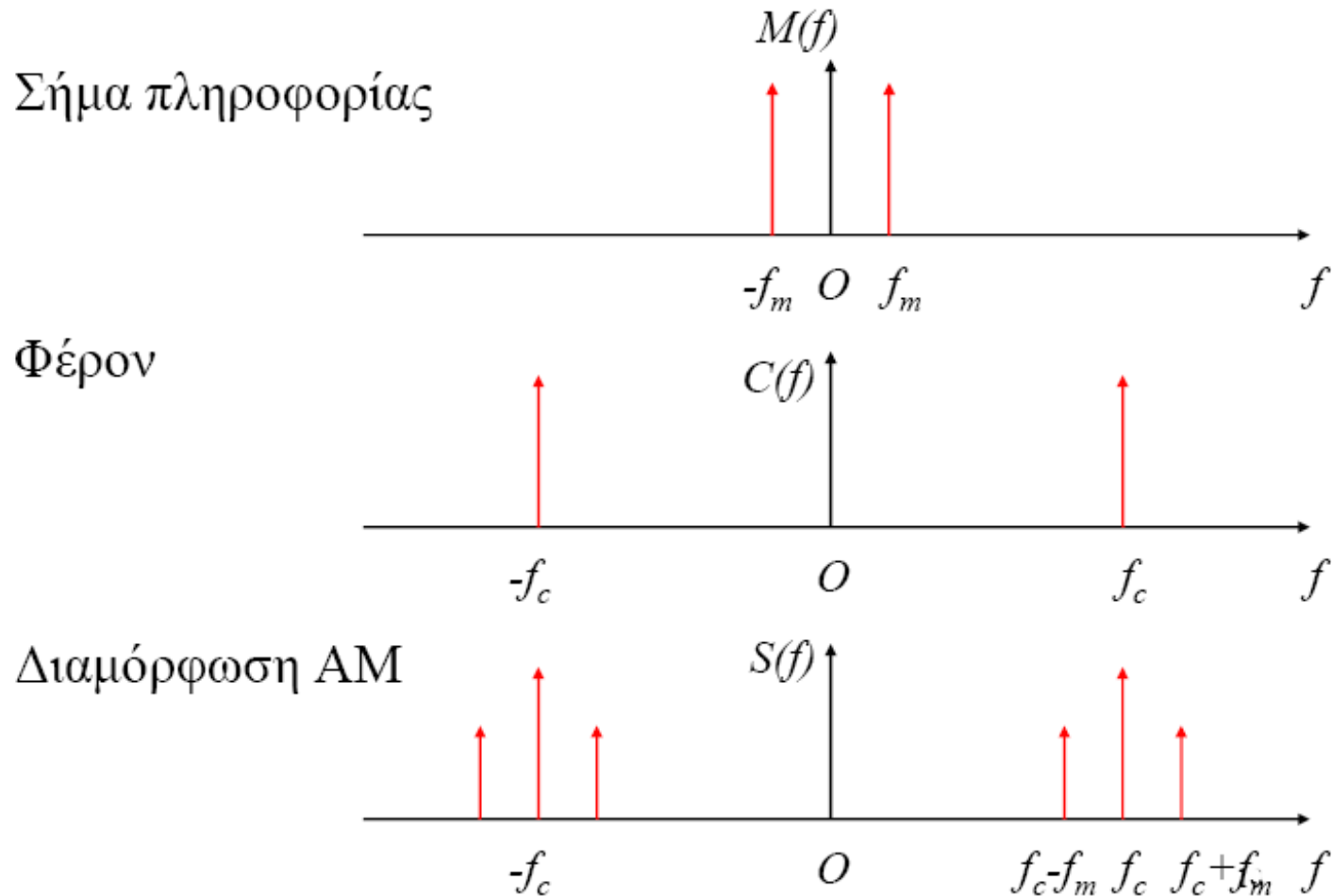
$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad \Rightarrow \quad \hat{m}(t) = A_m \sin(2\pi f_m t)$$

SSB κυματομορφή μόνο με την άνω πλευρική συχνότητα:

$$s(t) = \frac{1}{2} A_c A_m \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

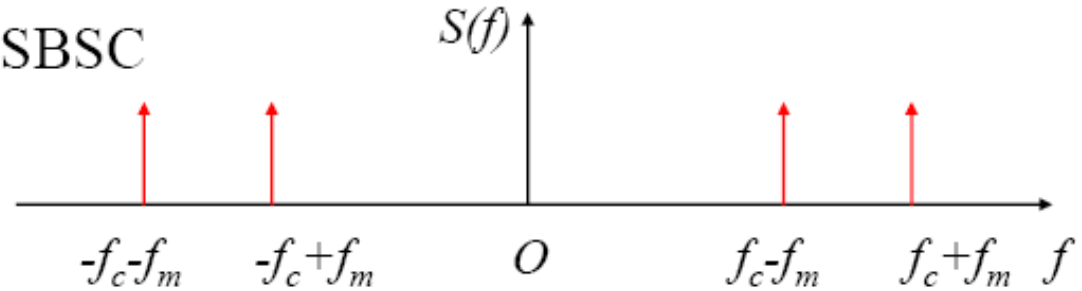
69



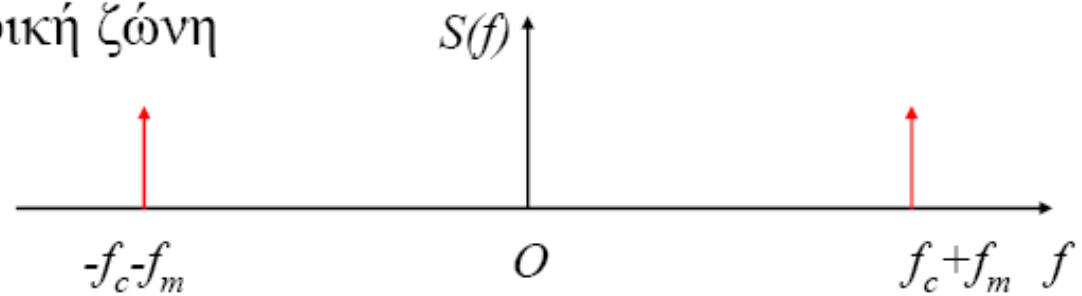
Διαμόρφωση Απλής Πλευρικής Ζώνης (SSB)

70

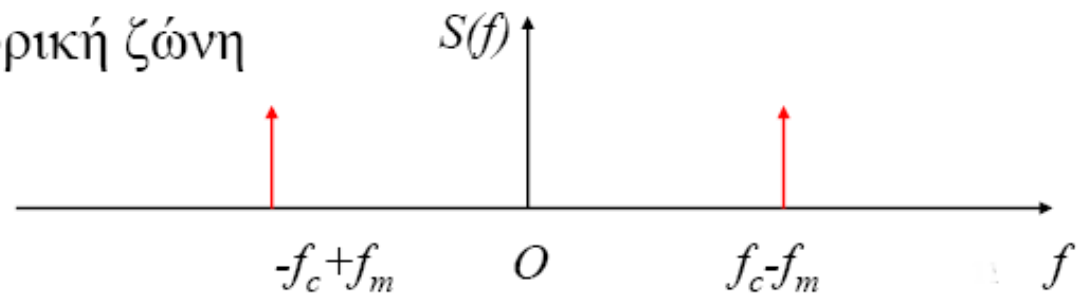
Διαμόρφωση DSBSC



SSB άνω πλευρική ζώνη



SSB κάτω πλευρική ζώνη



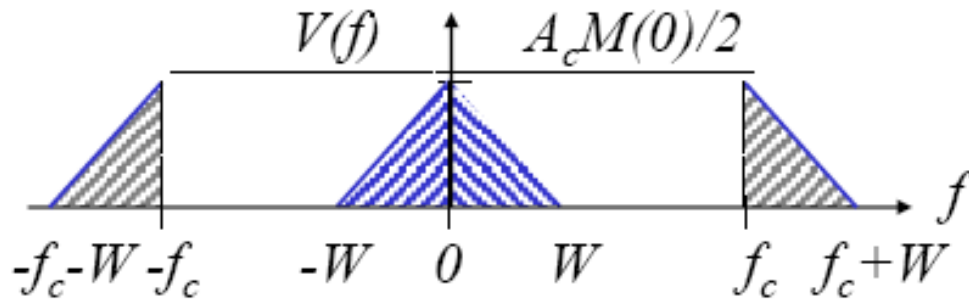
Παραγωγή κυματομορφών SSB

71

- Δύο συνηθισμένες μεθόδους για την παραγωγή κυματομορφών SSB:
 - ▣ Μέθοδο διευκρίνισης συχνότητας (*frequency discrimination method*)
 - ▣ Μέθοδο διευκρίνισης φάσης (*phase discrimination method*)
- Βασίζονται στις περιγραφές της κυματομορφής SSB στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χρόνου αντίστοιχα.

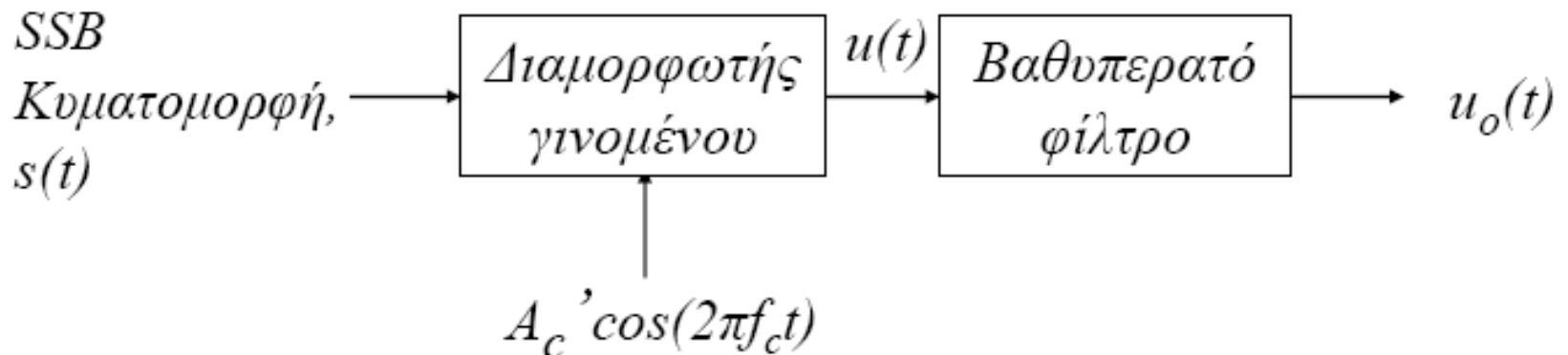
Αποδιαμόρφωση κυματομορφών SSB

72



Να μετατρέψουμε τη μεταδιδόμενη πλευρική ζώνη σε σήμα βασικής ζώνης

Ομόδυνη φώραση κυματομορφής SSB:



Αποδιαμόρφωση κυματομορφών SSB

73

$$u(t) = \frac{1}{2} A_c A_c' \cos(2\pi f_c t) \left[m(t) \cos(2\pi f_c t) - \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t) \right]$$

$$= \frac{1}{4} A_c A_c' m(t) + \frac{1}{4} A_c A_c' \left[m(t) \cos(4\pi f_c t) - \hat{m}(t) \sin(4\pi f_c t) \right]$$

- Στο δέκτη χρειάζεται ημιτονική κυματομορφή της σωστής συχνότητας f_c και σε σωστή σχέση φάσης με το φέρον.
- Αυτό εξασφαλίζεται είτε μεταδίδοντας ένα πιλοτικό φέρον επιπρόσθετα με την επιθυμητή πλευρική ζώνη ή χρησιμοποιώντας έναν ταλαντωτή υψηλής ευστάθειας.

Διαμόρφωση VSB

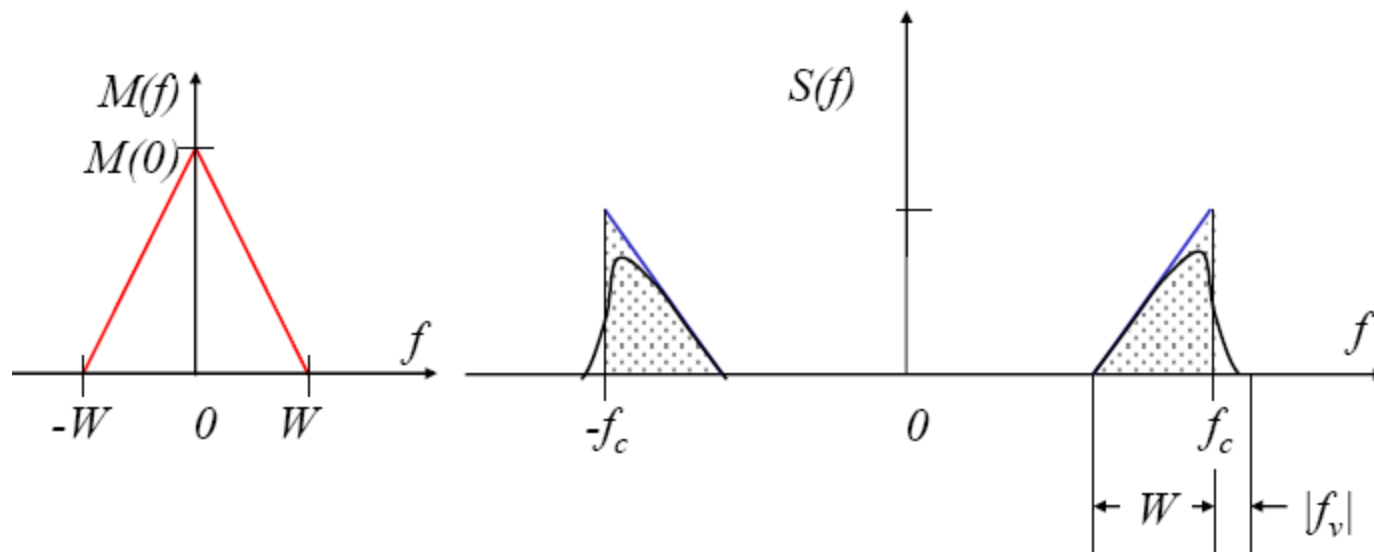
74

Διαμόρφωση Υπολειπόμενης Πλευρικής Ζώνης **V**estigial **S**ide**B**and Modulation - VSB

- Όταν το σήμα βασικής ζώνης περιέχει σημαντικές συνιστώσες σε αρκετά χαμηλές συχνότητες, οι άνω και κάτω πλευρικές συναντιούνται στη συχνότητα φέροντος και η χρήση SSB δεν είναι κατάλληλη.
- Στη διαμόρφωση VSB περνάει σχεδόν ολόκληρη η μία πλευρική ζώνη, ενώ διατηρείται μόνο ένα ίχνος ή **κατάλοιπο** (*vestige*) της άλλης πλευρικής ζώνης.

Διαμόρφωση VSB

75

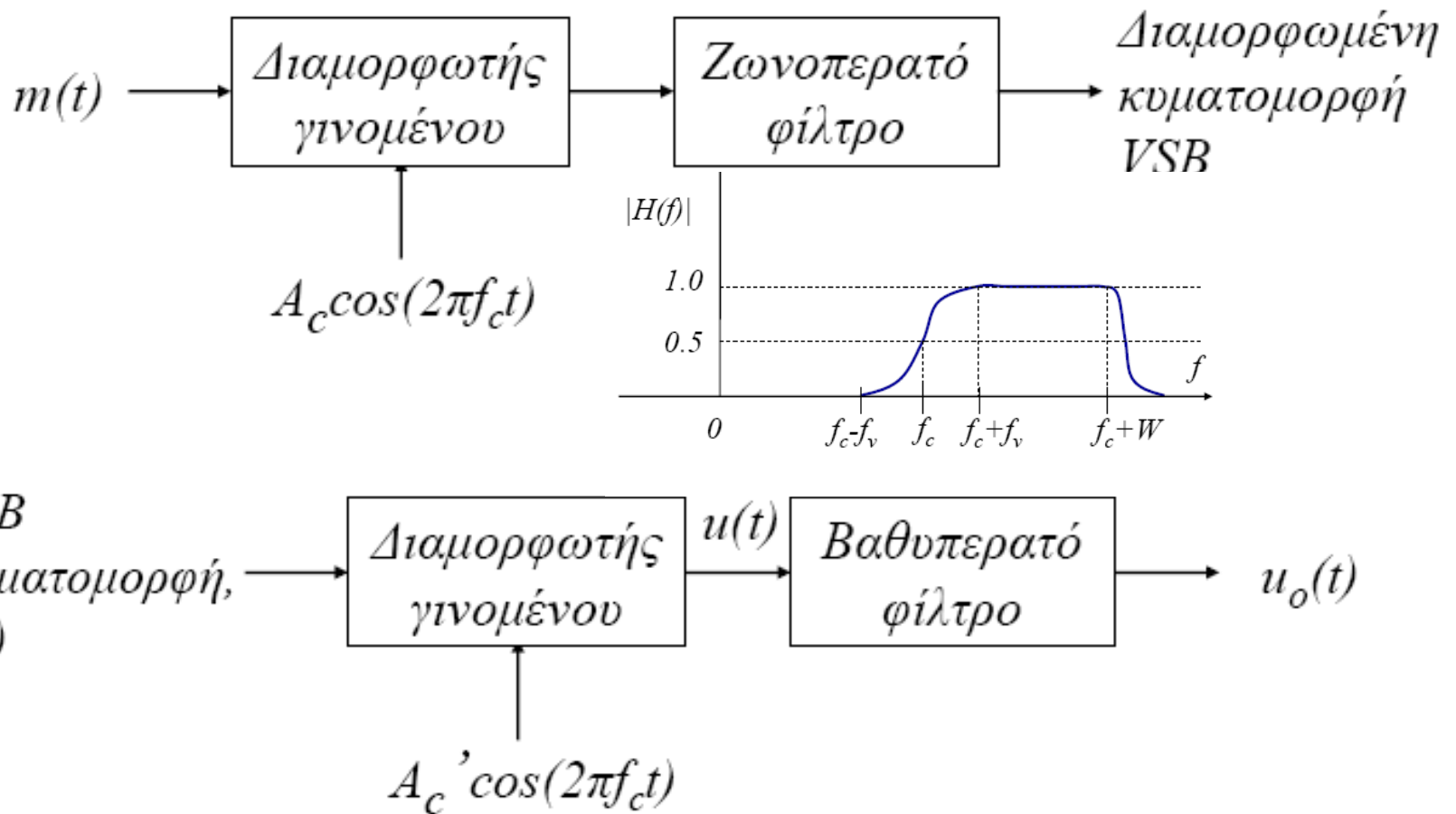


- Το μεταδιδόμενο κατάλοιπο της ανεπιθύμητης πλευρικής ζώνης αντισταθμίζεται από την επιθυμητή πλευρική ζώνη.
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης που απαιτείται είναι:

$$B_T = W + f_v$$

Διαμόρφωση VSB

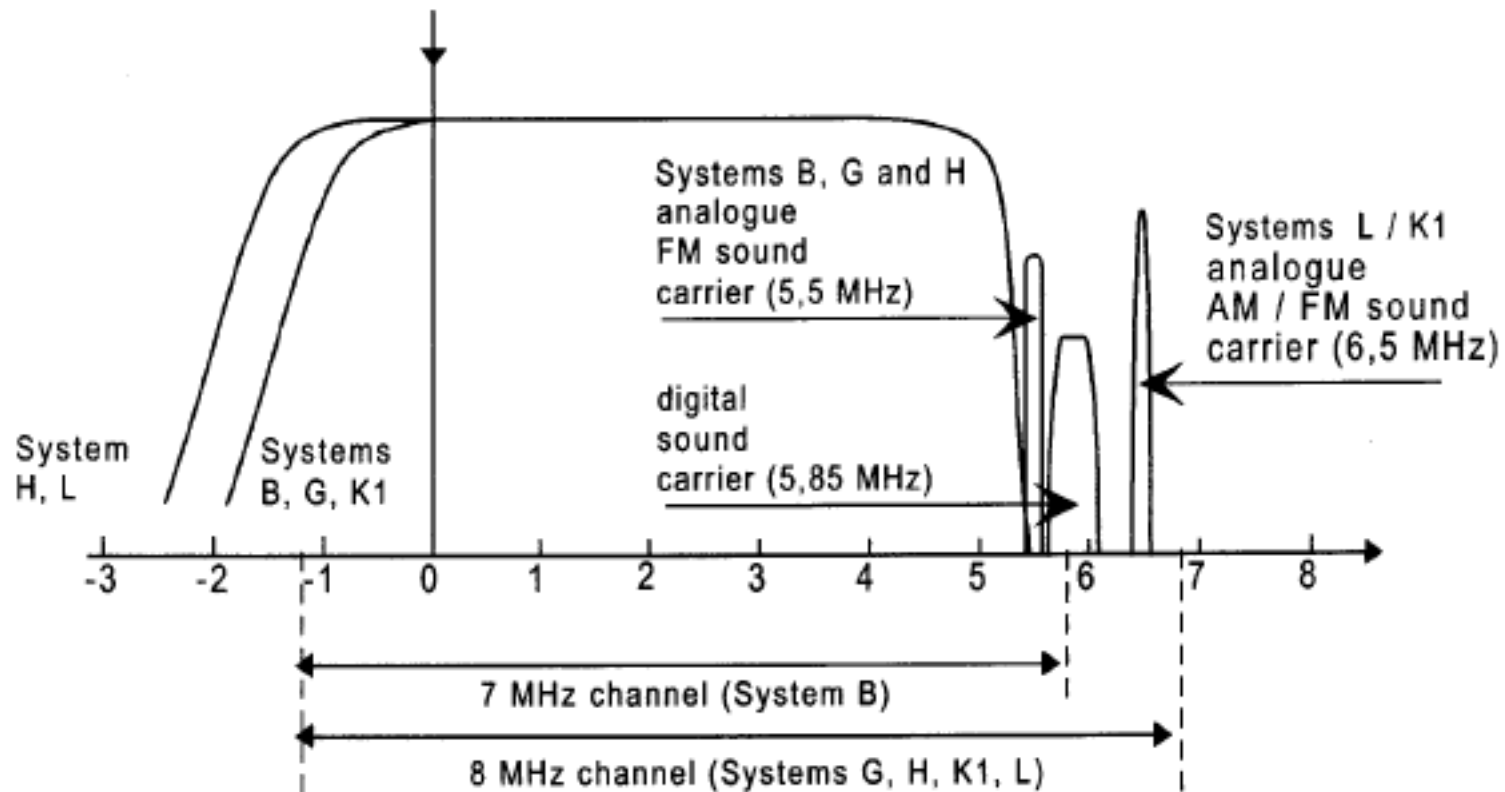
76



Διαμόρφωση VSB

77

- Π.χ. Φάσμα Αναλογικού Τηλεοπτικού Σήματος



Μετατόπιση Συχνότητας

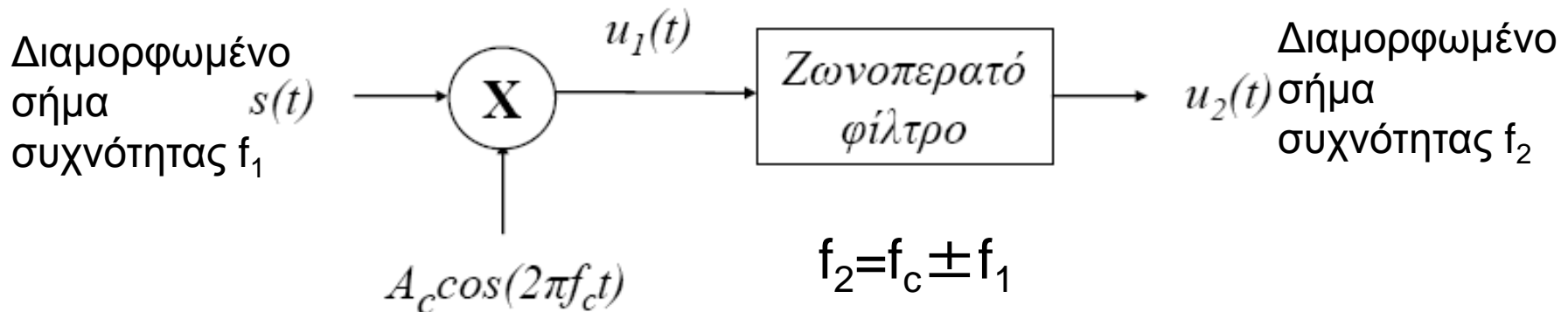
78

- **Ολίσθηση** του φάσματος ενός σήματος σε διαφορετική περιοχή συχνοτήτων, γνωστή και ως
 - ▣ Αλλαγή συχνότητας (frequency changing), μίξη (mixing), ετεροδύνωση (heterodyning)
- **Παραδείγματα**
 - ▣ Η διαμόρφωση AM είναι μετατροπή συχνότητας ενός βαθυπερατού σήματος σε ζωνοπερατό
 - ▣ Η ομόδυνη αποδιαμόρφωση είναι μετατροπή συχνότητας ζωνοπερατού σήματος σε βαθυπερατό

Μετατόπιση Συχνότητας

79

- Η διάταξη που μετατοπίζει τις συχνότητες μιας διαμορφωμένης κυματομορφής ονομάζεται **μίκτης** (*mixer*).
- Ζωνοπερατό σήμα με φέρον f_1 μεταφέρεται σε άλλο φέρον f_2
 - ▣ Το είδος της διαμόρφωσης δεν αλλάζει!



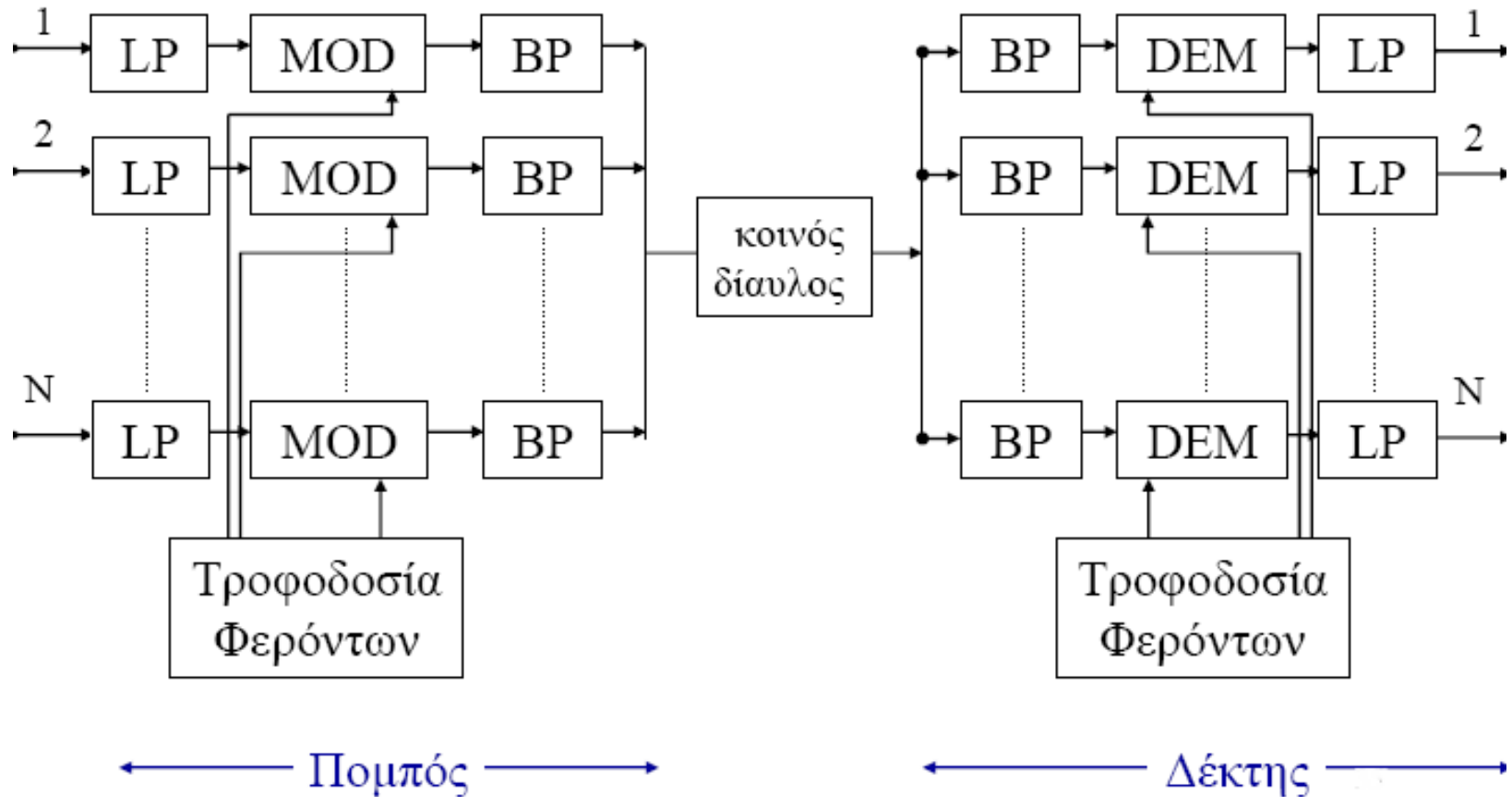
Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)

80

- Η **πολυπλεξία** (*multiplexing*) είναι μία τεχνική στην οποία ένας αριθμός ανεξάρτητων σημάτων μπορεί να συνδυαστεί σε σύνθετο σήμα κατάλληλο για μετάδοση σε ένα κοινό δίαυλο.
- Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στη συχνότητα αναφέρεται σαν **πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας** (*Frequency Division Multiplexing, FDM*), ενώ η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στο χρόνο ονομάζεται **πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου** (*Time Division Multiplexing, TDM*).

Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)

81



Συγχρονισμός φέροντος

- Μια μέθοδος η οποία συνήθως χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό μεταξύ του φέροντος που χρησιμοποιείται στον πομπό για διαμόρφωση και αυτού που παράγεται τοπικά στο δέκτη για αποδιαμόρφωση, είναι η μετάδοση μιας **πιλοτικής συχνότητας** (*pilot frequency*) μαζί με το εξερχόμενο σήμα.
- Ο μεταδιδόμενος πιλότος χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα τοπικό ταλαντωτή στον δέκτη, ώστε να δημιουργηθούν τα φέροντα που χρησιμοποιούνται για την αποδιαμόρφωση των σημάτων πληροφορίας.

Ανακεφαλαίωση

83

□ Γραμμικά Συστήματα Διαμόρφωσης

$$s_{AM}(t) = A_c s_I(t) \cos(2\pi f_c t) - A_c s_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$\square \text{ DBS+C} \quad s_I(t) = 1 + k_a m(t), \quad s_Q(t) = 0$$

$$\square \text{ DSB-SC} \quad s_I(t) = m(t), \quad s_Q(t) = 0$$

$$\square \text{ SSB} \quad s_I(t) = \frac{1}{2} m(t), \quad s_Q(t) = \pm \frac{1}{2} \hat{m}(t)$$

$$\square \text{ VSB} \quad s_I(t) = \frac{1}{2} m(t), \quad s_Q(t) = \pm \frac{1}{2} m_s(t)$$