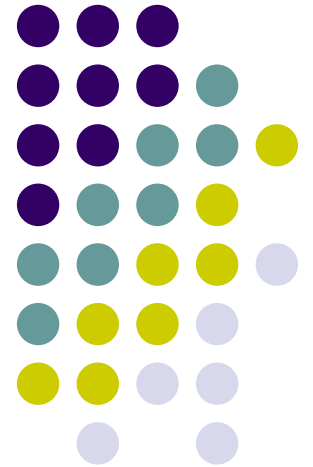


# Ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους

Quadrature Amplitude  
Modulation (QAM)

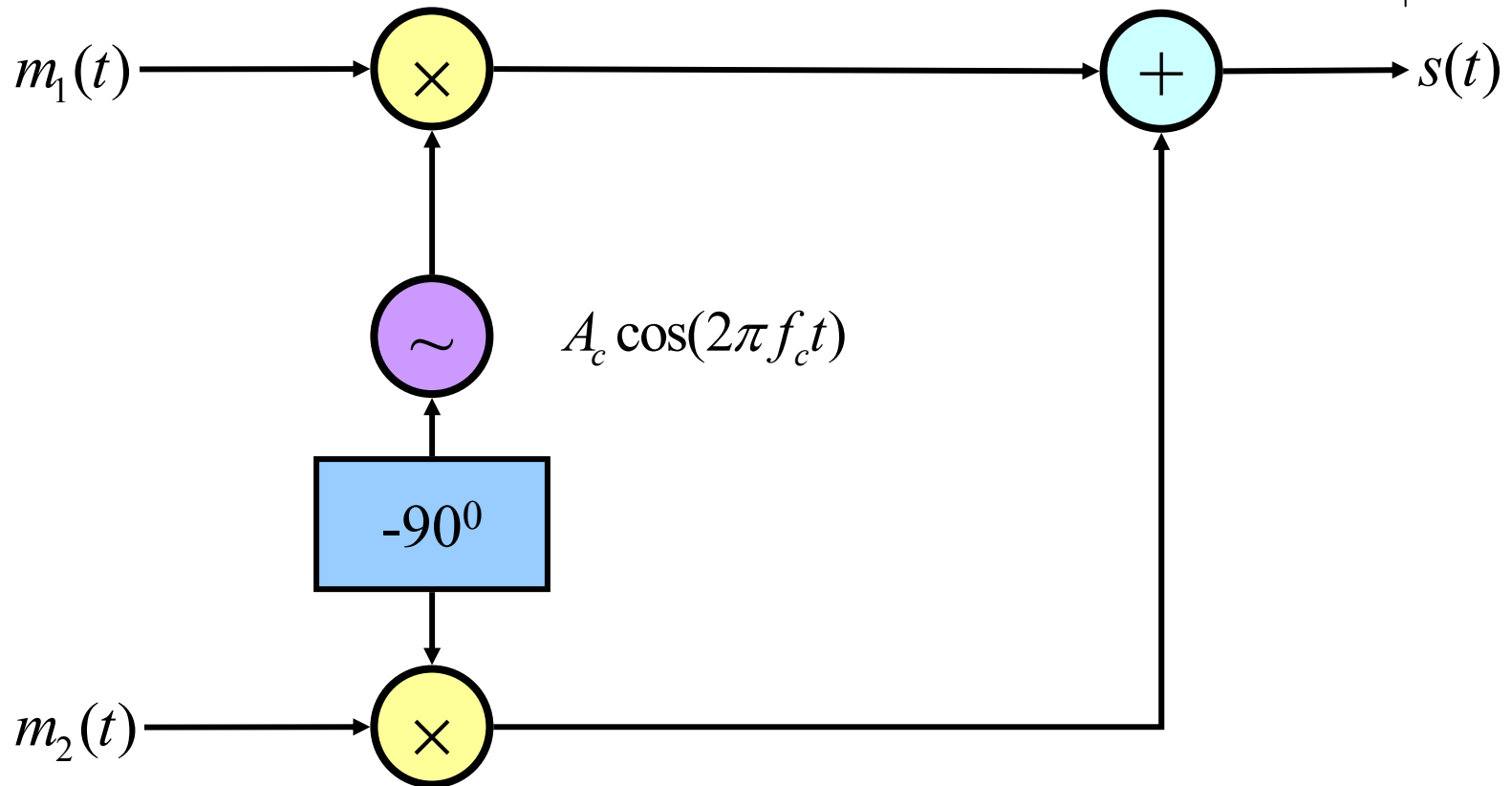


# Ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM)



- Στη διαμόρφωση QAM δύο σήματα διαμορφώνονται από δύο φέροντα που διαφέρουν σε φάση κατά  $90^\circ$ 
  - Το φέρον  $\cos(2\pi f_c t)$  αποκαλείται συμφασικό (in-phase) ή I-channel
  - Το φέρον  $\sin(2\pi f_c t)$  αποκαλείται ορθογωνικό (quadrature) ή Q-channel

# Ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM)



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

# Ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM)



- Μετάδοση δύο σημάτων DSBSC στο ίδιο εύρος ζώνης
  - AM: σπατάλη ισχύος, σπατάλη εύρους ζώνης
  - DSB: βελτίωση της επίδοσης μόνο ως προς την ισχύ, όχι ως προς το εύρος ζώνης
  - QAM: βελτίωση της επίδοσης της DSB ως προς το εύρος ζώνης με την ίδια κατανάλωση ισχύος

# Φάσμα QAM

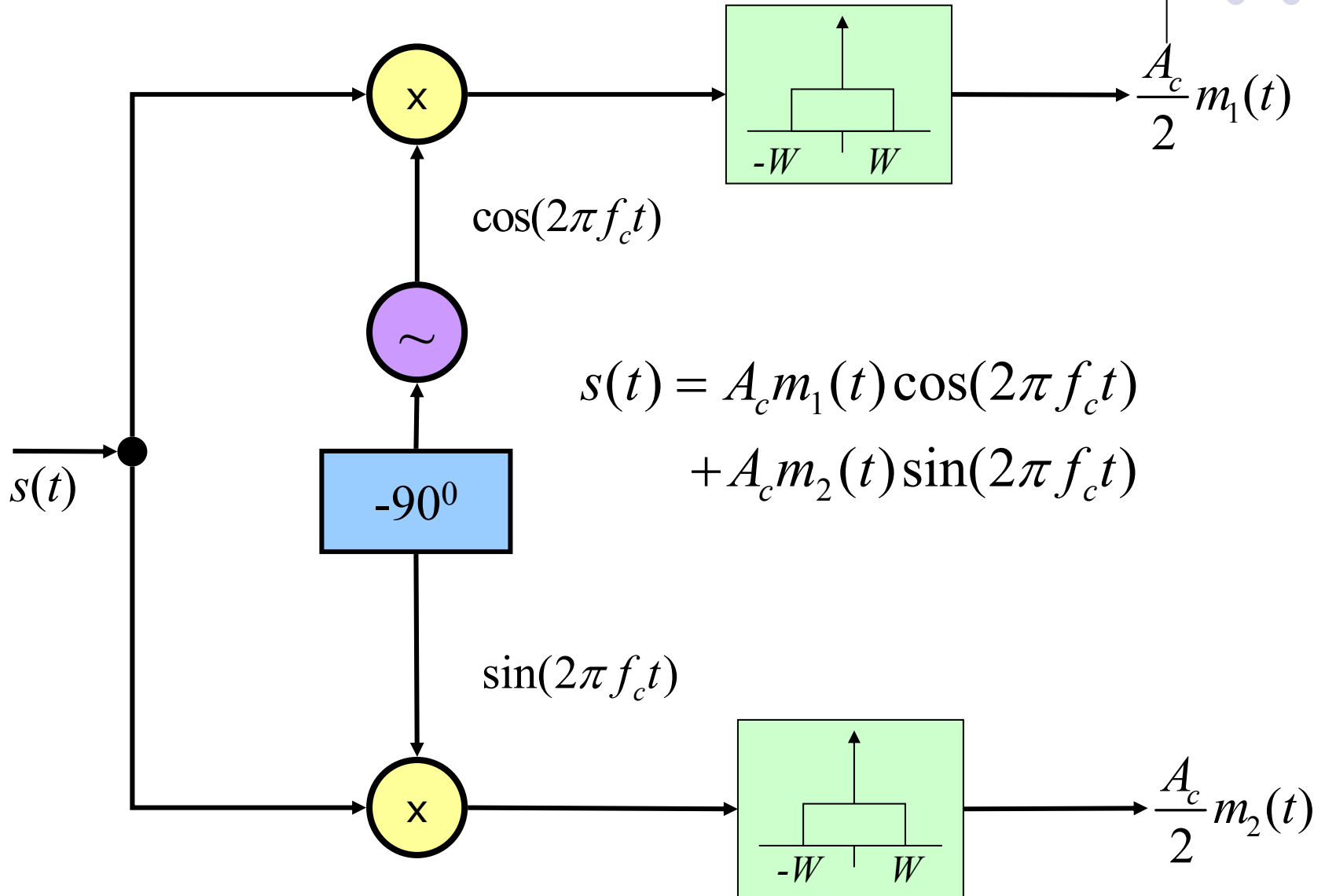


$$\begin{aligned} S(f) &= \frac{A_c}{2} M_1(f) * [\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c)] + \frac{A_c}{2} M_2(f) * \frac{1}{j} [\delta(f - f_c) - \delta(f + f_c)] \\ &= \frac{A_c}{2} [M_1(f + f_c) + M_1(f - f_c)] + \frac{A_c}{2j} [M_2(f - f_c) - M_2(f + f_c)] \end{aligned}$$

- Για βαθυπερατά σήματα  $m_1$  και  $m_2$  εύρους ζώνης  $W$

$$S(f) = \begin{cases} \frac{A_c}{2} [M_1(f + f_c) + jM_2(f + f_c)], & |f + f_c| \leq W \\ \frac{A_c}{2} [M_1(f - f_c) - jM_2(f - f_c)], & |f - f_c| \leq W \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

# Αποδιαμορφωτής QAM





# I-channel

- Εάν υπάρχει διαφορά φάσης στο τοπικό φέρον, τότε η συμφασική έξοδος είναι

$$\begin{aligned}y(t) &= s(t) \cos(2\pi f_c t + \phi) \Big|_{\text{LPF}} \\&= A_c m_1(t) \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t + \phi) \\&\quad + A_c m_2(t) \sin(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t + \phi) \Big|_{\text{LPF}} \\&= \frac{A_c}{2} m_1(t) [\cos \phi + \cos(4\pi f_c t + \phi)] \\&\quad + \frac{A_c}{2} m_2(t) [-\sin \phi + \sin(4\pi f_c t + \phi)] \Big|_{\text{LPF}} \\&= \frac{A_c}{2} m_1(t) \cos \phi - \frac{A_c}{2} m_2(t) \sin \phi\end{aligned}$$



# Q-channel

- Εάν υπάρχει διαφορά φάσης στο τοπικό φέρον, τότε η ορθογωνική έξοδος είναι

$$\begin{aligned}v_2(t) &= s(t) \sin(2\pi f_c t + \phi) \Big|_{\text{LPF}} \\ &= A_c m_1(t) \cos(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_c t + \phi) \\ &\quad + A_c m_2(t) \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_c t + \phi) \Big|_{\text{LPF}} \\ &= \frac{A_c}{2} m_1(t) [\sin \phi + \sin(4\pi f_c t + \phi)] \\ &\quad + \frac{A_c}{2} m_2(t) [\cos \phi + \cos(4\pi f_c t + \phi)] \Big|_{\text{LPF}} \\ &= \frac{A_c}{2} m_1(t) \sin \phi + \frac{A_c}{2} m_2(t) \cos \phi\end{aligned}$$





# Ιδιότητες QAM

- Η διαμόρφωση QAM μπορεί παραστατικά να θεωρηθεί σαν το μοίρασμα μιας διαδρομής αυτοκινήτου από τον οδηγό και ένα συνεπιβάτη
  - Κάθε σήμα έχει το δικό του φέρον
  - Η αποδιαμόρφωση είναι σχετικά απλή



# Ιδιότητες QAM

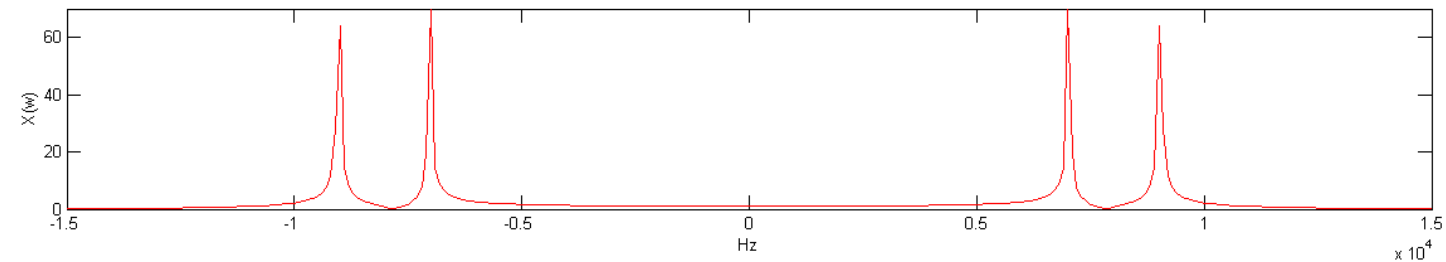
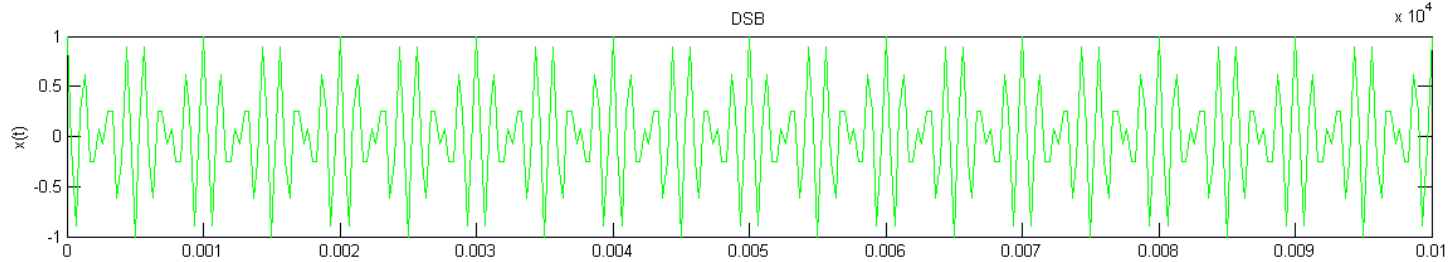
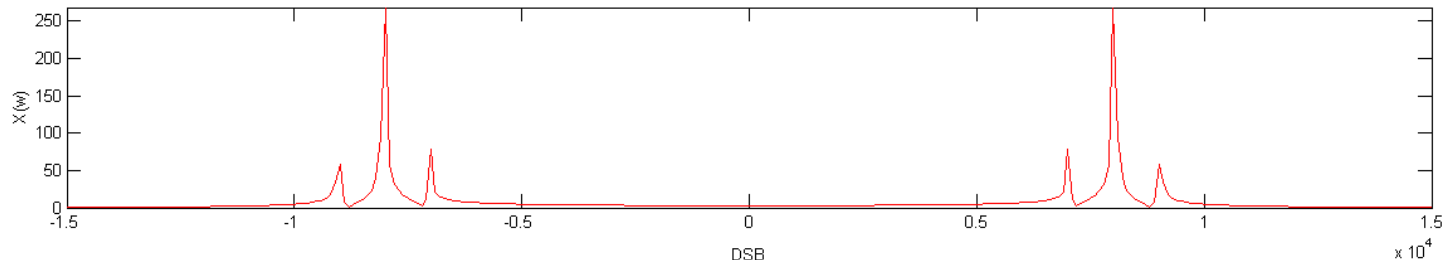
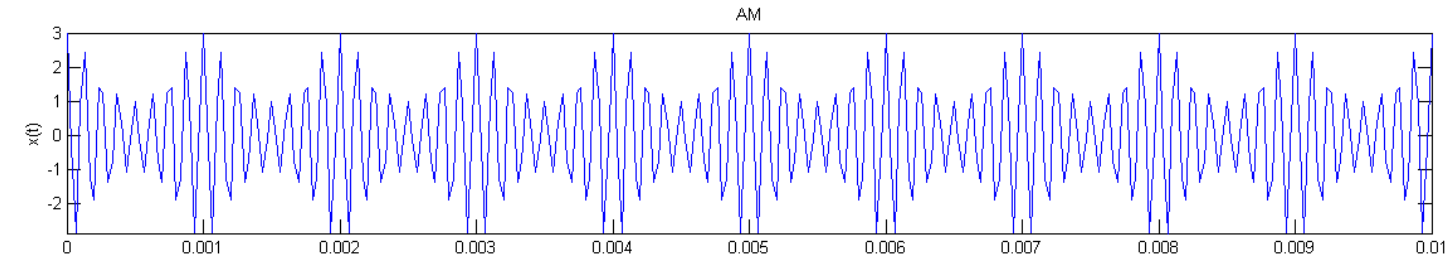
- **Προτέρημα:** Διπλασιασμός της επίδοσης ως προς το εύρος ζώνης
- **Μειονέκτημα:** Ισχυρή απαίτηση για συγχρονισμό
  - Ο δέκτης QAM πρέπει να είναι ομόδυνος, διαφορετικά εμφανίζεται **διαφωνία** (cross-talk), δηλαδή, ανάμειξη των δύο σημάτων



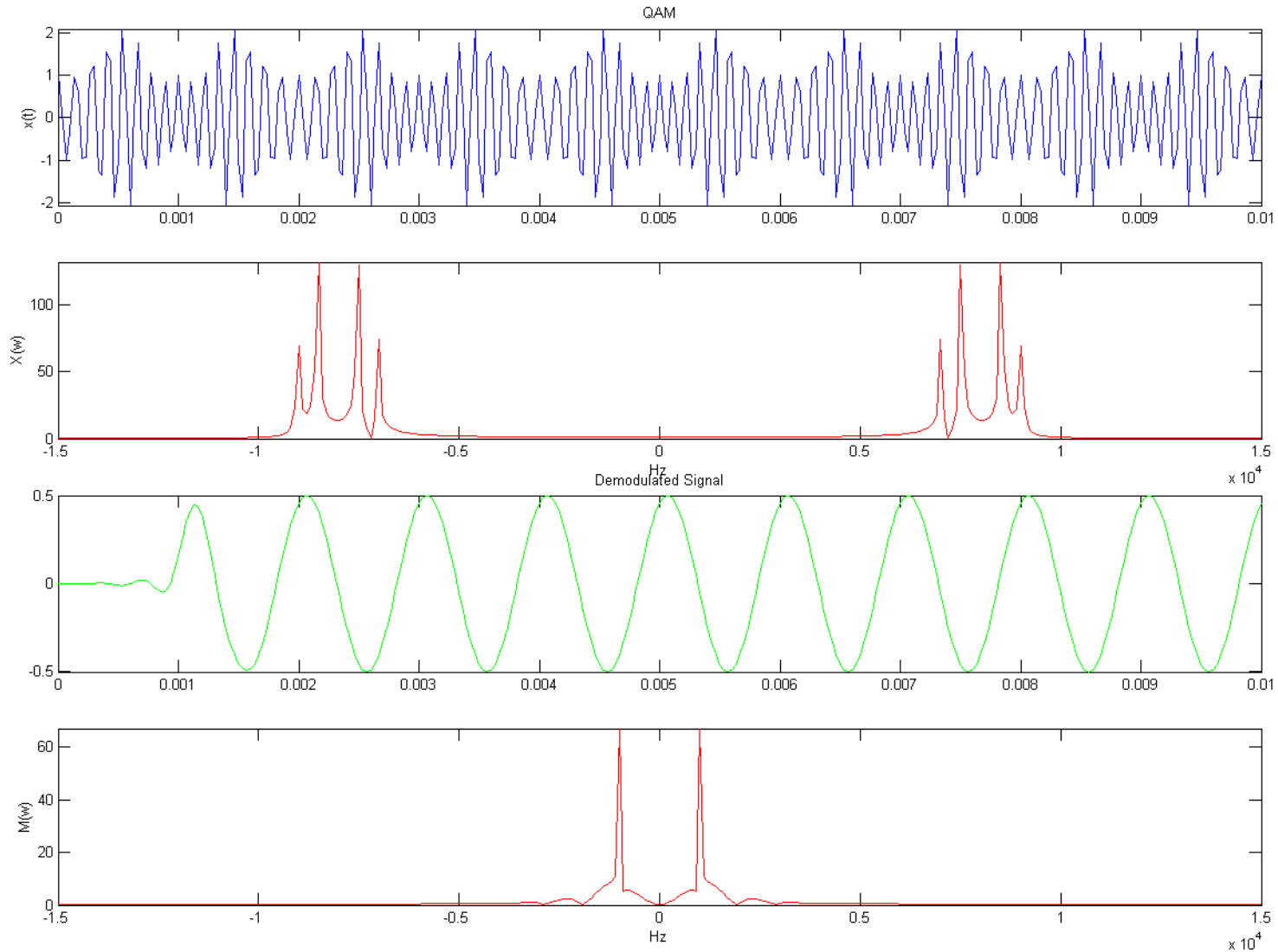
# Εφαρμογές QAM

- Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της QAM είναι στην έγχρωμη τηλεόραση (NTSC και PAL)
  - Τα σήματα χρωμικότητας μεταδίδονται διαμορφωμένα κατά QAM παράλληλα με το σήμα φωτεινότητας

# Ανασκόπηση

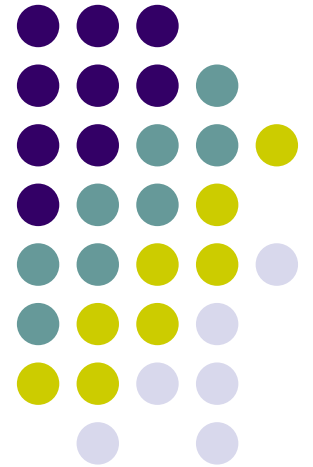


# Ανασκόπηση



# Διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης

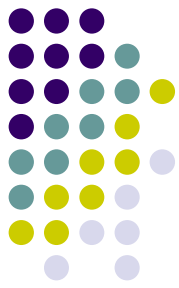
Single Sideband Modulation  
(SSB)



# Τι χρειάζεται η διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (SSB);

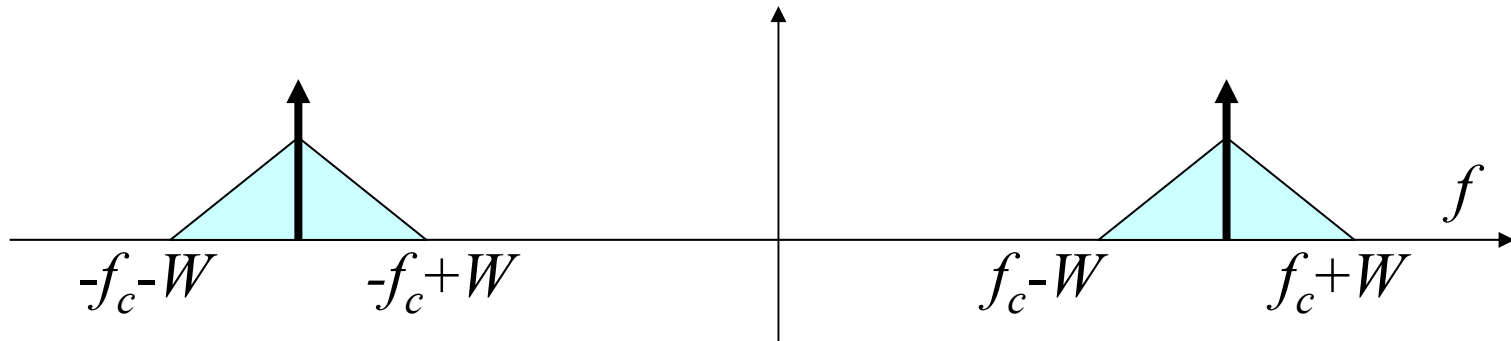


- Η σπατάλη φάσματος στην AM και DSB είναι σημαντική
- Το διαμορφωμένο κύμα καταλαμβάνει το διπλάσιο εύρος ζώνης από το προς διαμόρφωση σήμα
- Όμως, **όλη** η πληροφορία περιέχεται στη μία από τις πλευρικές
  - Η άλλη είναι περιττή!
- Υπάρχει περιθώριο βελτίωσης (διπλασιασμού) της φασματικής επίδοσης



# Πλευρικές ζώνες

- Το διαμορφωμένο σήμα AM έχει φάσμα:



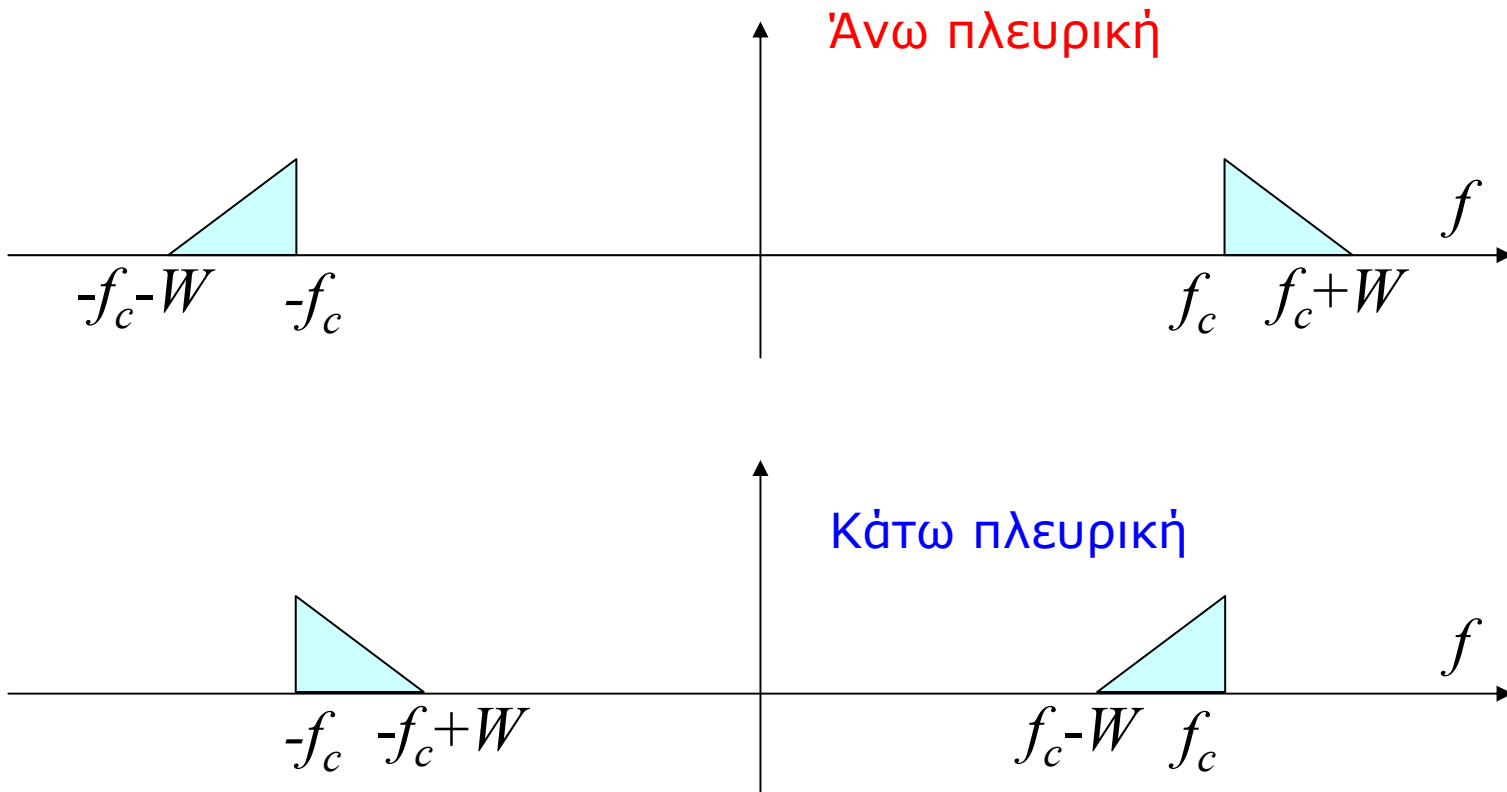
- Στις δυο πλευρές εκατέρωθεν της συχνότητας  $\pm f_c$  περιέχεται η **ίδια** πληροφορία





# Διαμόρφωση SSB

- Μεταδίδουμε μόνο την άνω ή κάτω πλευρική ζώνη





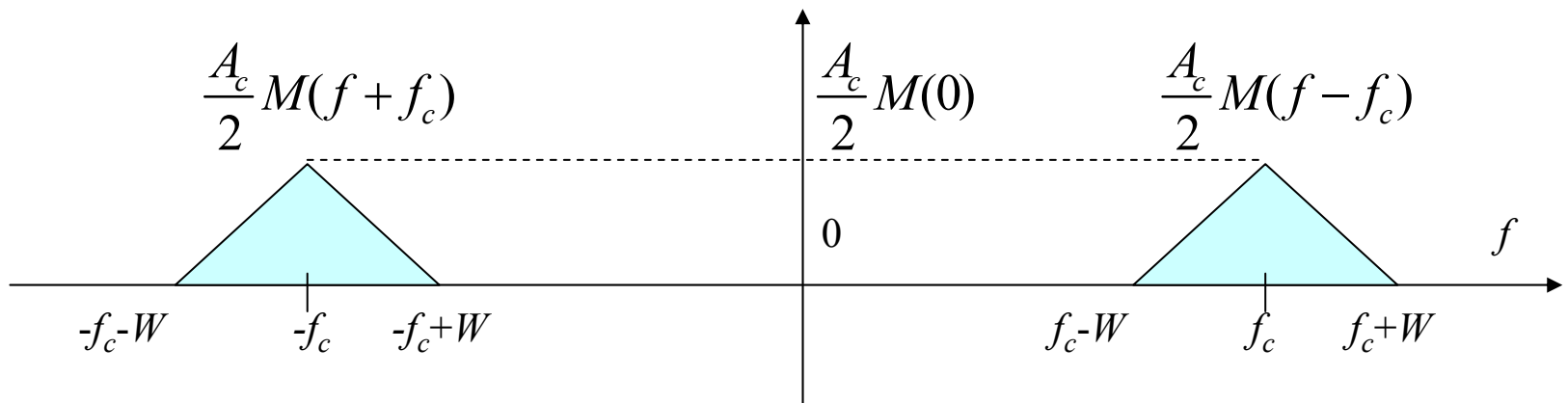
# Φάσμα σήματος SSB

- Έστω σήμα DSBSC

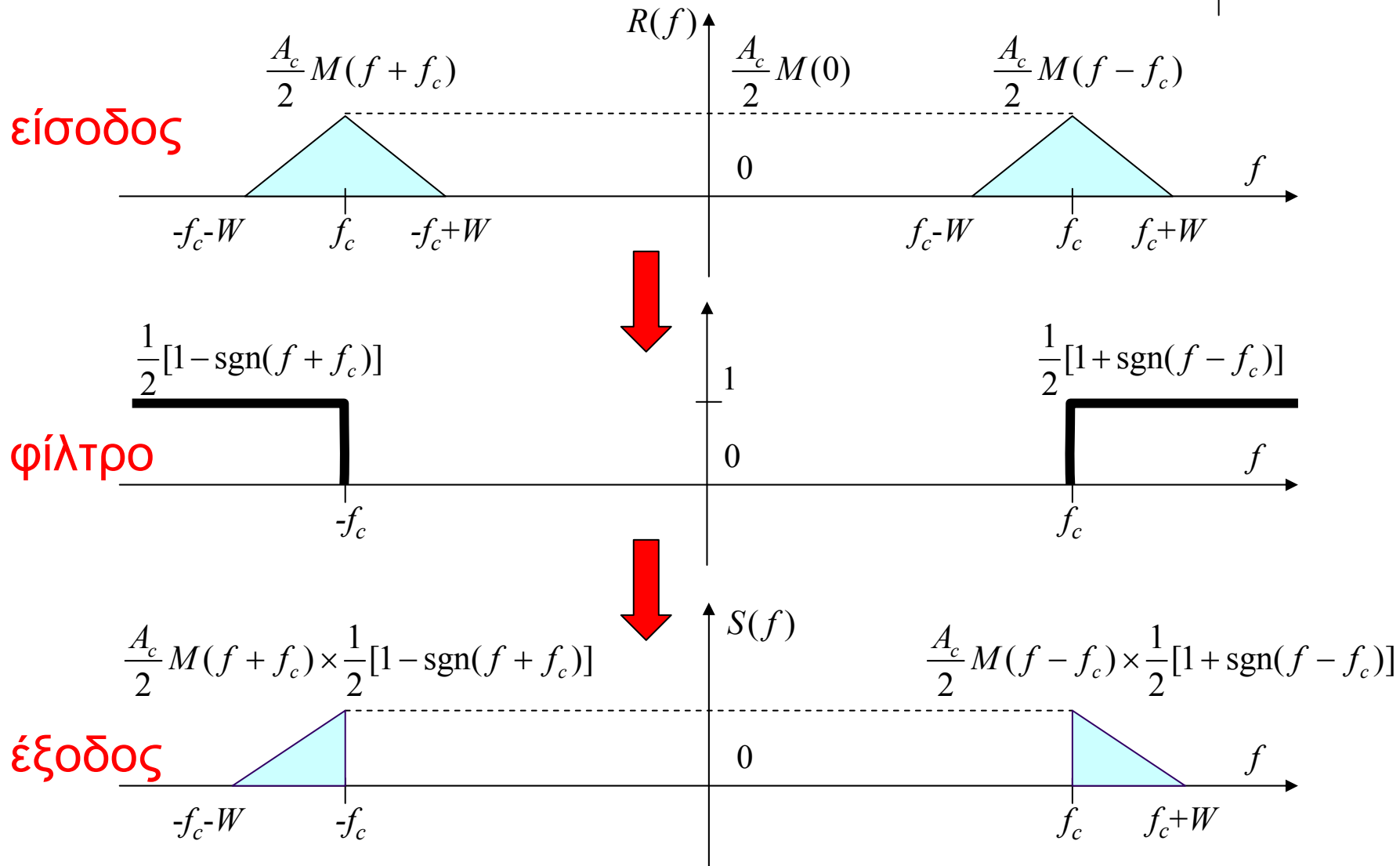
$$r(t) = m(t)A_c \cos 2\pi f_c t = \frac{A_c}{2} m(t)e^{j2\pi f_c t} + \frac{A_c}{2} m(t)e^{-j2\pi f_c t}$$

- Στο πεδίο συχνότητας

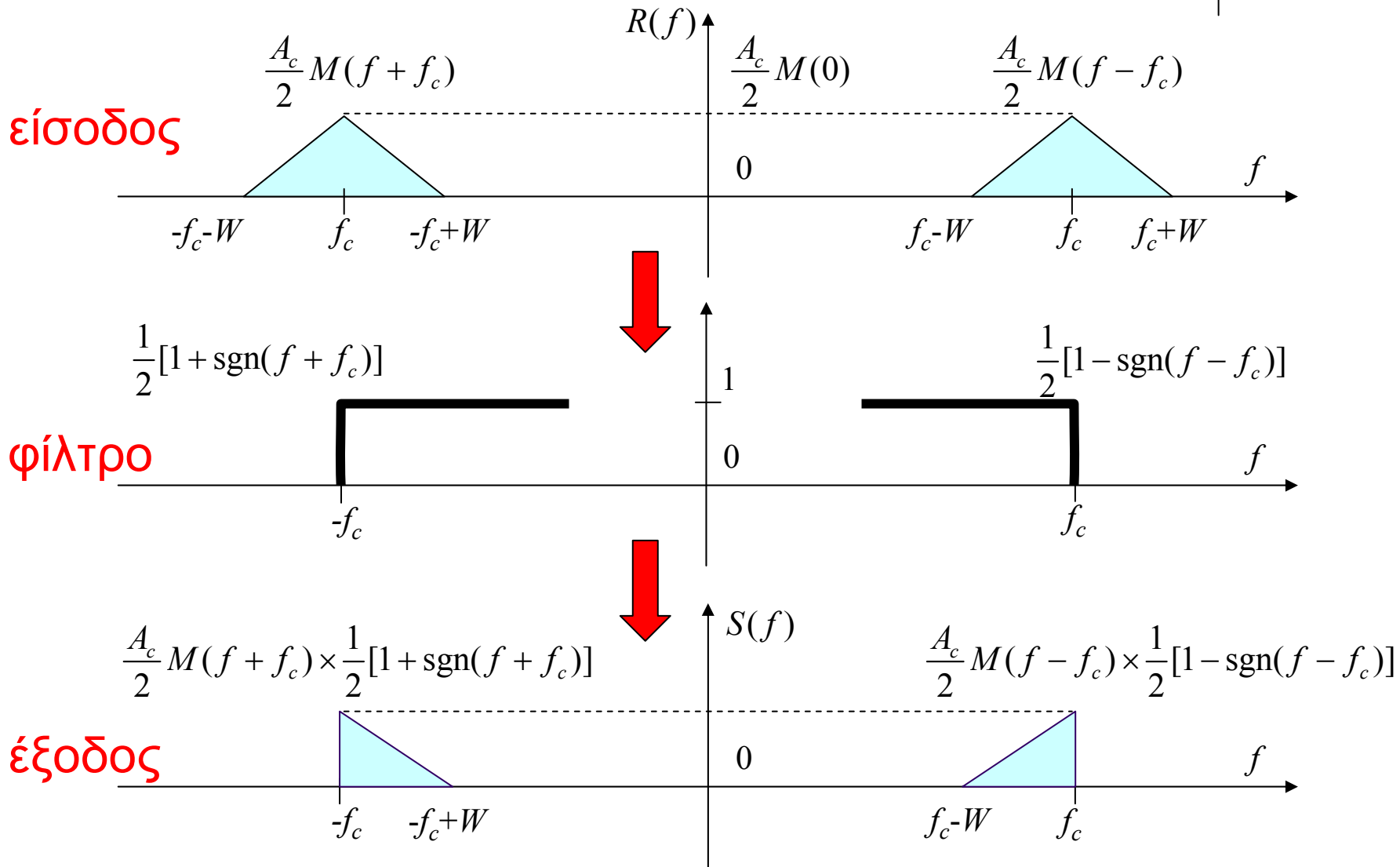
$$R(f) = \frac{A_c}{2} M(f - f_c) + \frac{A_c}{2} M(f + f_c)$$



# Φάσμα σήματος SSB - USB



# Φάσμα σήματος SSB - LSB





# Φάσμα σήματος SSB

- Σήμα SSB άνω πλευρικής ζώνης (USB)

$$S(f) = \frac{A_c}{2} \frac{M(f + f_c) + M(f - f_c)}{2} - \frac{A_c}{2} \frac{\text{sgn}(f + f_c)M(f + f_c) - \text{sgn}(f - f_c)M(f - f_c)}{2}$$

- Σήμα SSB κάτω πλευρικής ζώνης (LSB)

$$S(f) = \frac{A_c}{2} \frac{M(f + f_c) + M(f - f_c)}{2} + \frac{A_c}{2} \frac{\text{sgn}(f + f_c)M(f + f_c) - \text{sgn}(f - f_c)M(f - f_c)}{2}$$



# Σήμα SSB στο πεδίο του χρόνου

$$S(f) = \frac{A_c}{2} \frac{M(f + f_c) + M(f - f_c)}{2} - \frac{A_c}{2} \frac{\text{sgn}(f + f_c)M(f + f_c) - \text{sgn}(f - f_c)M(f - f_c)}{2} \Rightarrow$$

$$2s(t) = \frac{A_c}{2} m(t) e^{j2\pi f_c t} + \frac{A_c}{2} m(t) e^{-j2\pi f_c t} + \frac{A_c}{2j} F^{-1} \{-j \text{sgn}(f + f_c) M(f + f_c)\} - \frac{A_c}{2j} F^{-1} \{-j \text{sgn}(f - f_c) M(f - f_c)\} \Rightarrow$$

$$2s(t) = A_c m(t) \frac{e^{j2\pi f_c t} + e^{-j2\pi f_c t}}{2} - A_c \hat{m}(t) \frac{e^{j2\pi f_c t} - e^{-j2\pi f_c t}}{2j} \Rightarrow$$

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



# Σήμα SSB στο πεδίο του χρόνου

- Σήμα SSB άνω πλευρικής ζώνης (USB)

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

- Σήμα SSB κάτω πλευρικής ζώνης (LSB)

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

- Εμφανίζονται δύο συνιστώσες: η **συμφασική**  $m(t)$  και η **ορθογώνια**  $\hat{m}(t)$



# Θεώρηση στο πεδίο συχνότητας

- Το φάσμα των συνιστωσών

$$m(t) \rightleftharpoons M^+(f) + M^-(f)$$

$$\hat{m}(t) \rightleftharpoons -jM^+(f) + jM^-(f)$$

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

$$\sin(2\pi f_c t) \rightleftharpoons \frac{\delta(f - f_c) - \delta(f + f_c)}{2j}$$



# Θεώρηση στο πεδίο συχνότητας



- Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα πολλαπλασιασμού

$$m(t) \cos(2\pi f_c t) \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2} \left( M^+(f - f_c) + M^-(f - f_c) + M^+(f + f_c) + M^-(f + f_c) \right)$$

$$\hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t) \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2} \left( -M^+(f - f_c) + M^-(f - f_c) + M^+(f + f_c) - M^-(f + f_c) \right)$$

# Θεώρηση στο πεδίο συχνότητας



- Με αφαίρεση (πρόσθεση)

$$s_{USB}(t) \rightleftharpoons M^+(f - f_c) + M^-(f + f_c)$$

$$s_{LSB}(t) \rightleftharpoons M^-(f - f_c) + M^+(f + f_c)$$

# Θεώρηση ζωνοπερατού σήματος



- Κάθε ζωνοπερατό σήμα μπορεί να παρασταθεί ως

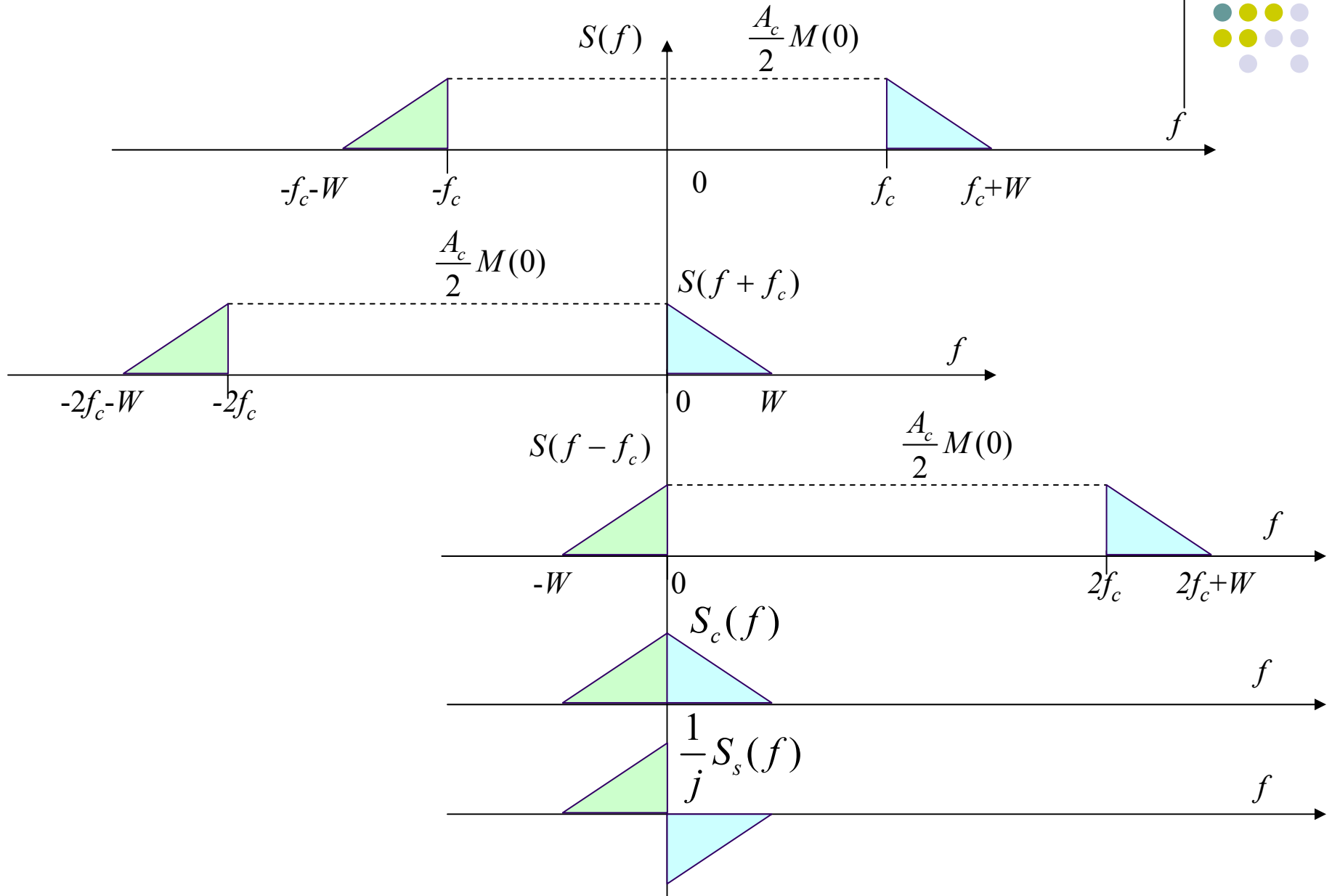
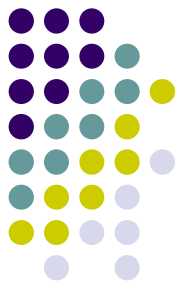
$$s(t) = s_c(t) \cos(2\pi f_c t) - s_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Όπου τα  $s_c(t)$  και  $s_s(t)$  είναι βαθυπερατά σήματα

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

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

# Θεώρηση ζωνοπερατού σήματος



# Θεώρηση ζωνοπερατού σήματος



- Επομένως

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

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

$$S_s(f) = -\frac{j}{2} A_c \operatorname{sgn}(f) \widehat{M}(f) \Rightarrow$$

$$s_s(t) = \frac{A_c}{2} \widehat{m}(t)$$



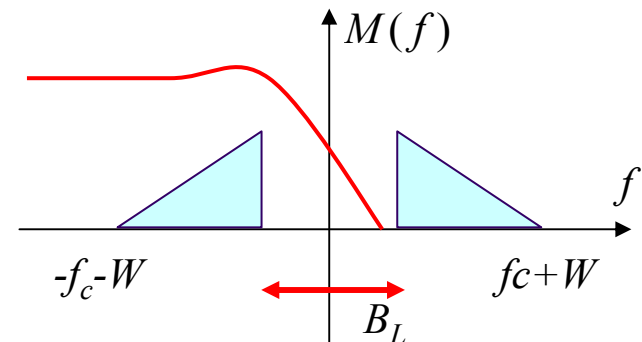
# Παραγωγή σημάτων SSB

- Διευκρίνιση συχνότητας
  - Παραγωγή με βάση το φασματικό περιεχόμενο
  - Αποκοπή των ανεπιθύμητων πλευρικών με φίλτρο
- Διευκρίνιση φάσης
  - Παραγωγή με βάση την αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου
- Μέθοδος Weaver
  - Παραγωγή με βάση την αναπαράσταση ζωνοπερατού σήματος

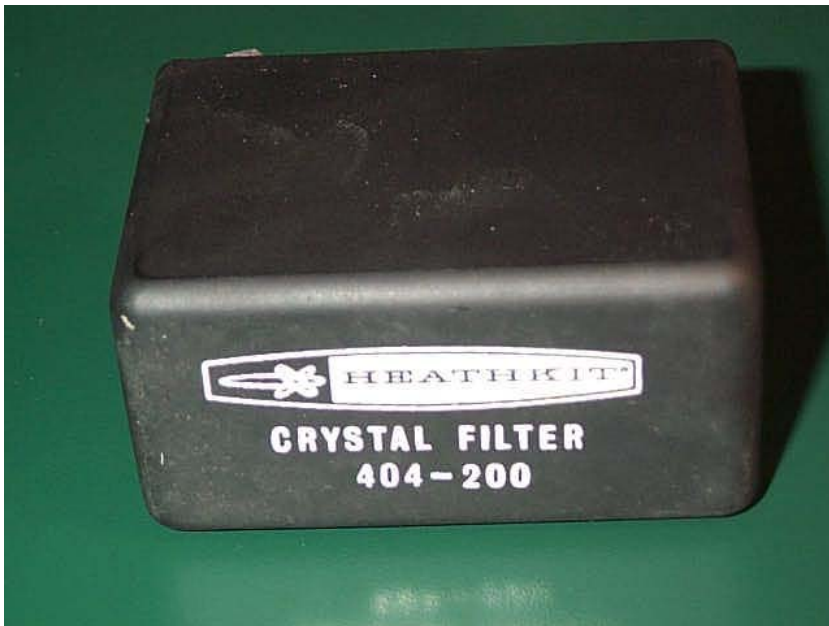


# Διευκρίνιση συχνότητας

- Απλή ως σύλληψη
- Δύσκολη στην εφαρμογή
  - Φίλτρο με πολύ απότομη αποκοπή στο  $f_c$
  - Το σήμα δεν πρέπει να έχει συνιστώσα DC
- Εάν το σήμα δεν περιέχει χαμηλές συχνότητες (π.χ. φωνή)
  - Είναι εφικτή σε δύο στάδια

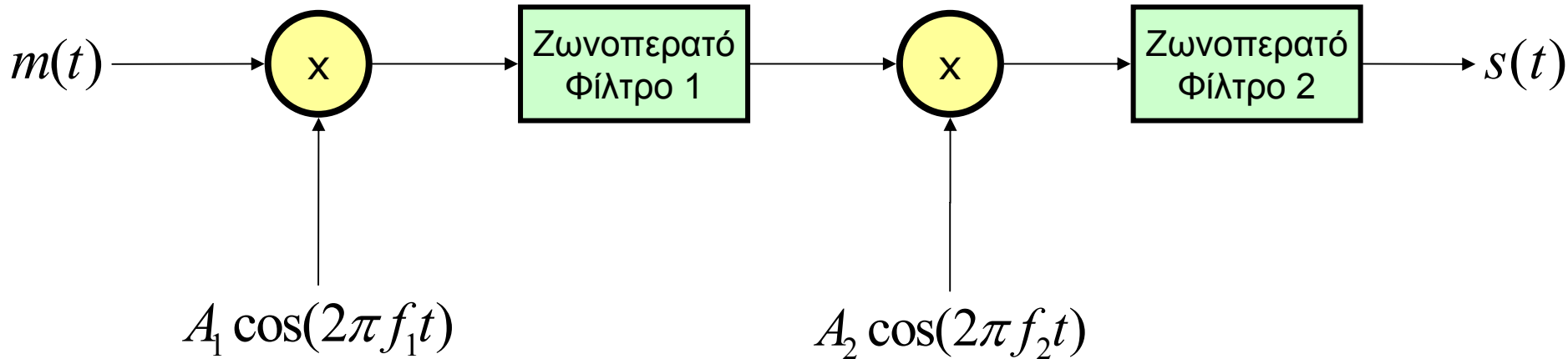


# Φίλτρα SSB





# Διβάθμια παραγωγή SSB



- Το δεύτερο φίλτρο είναι λιγότερο κρίσιμο, γιατί;



# Διβάθμια παραγωγή SSB

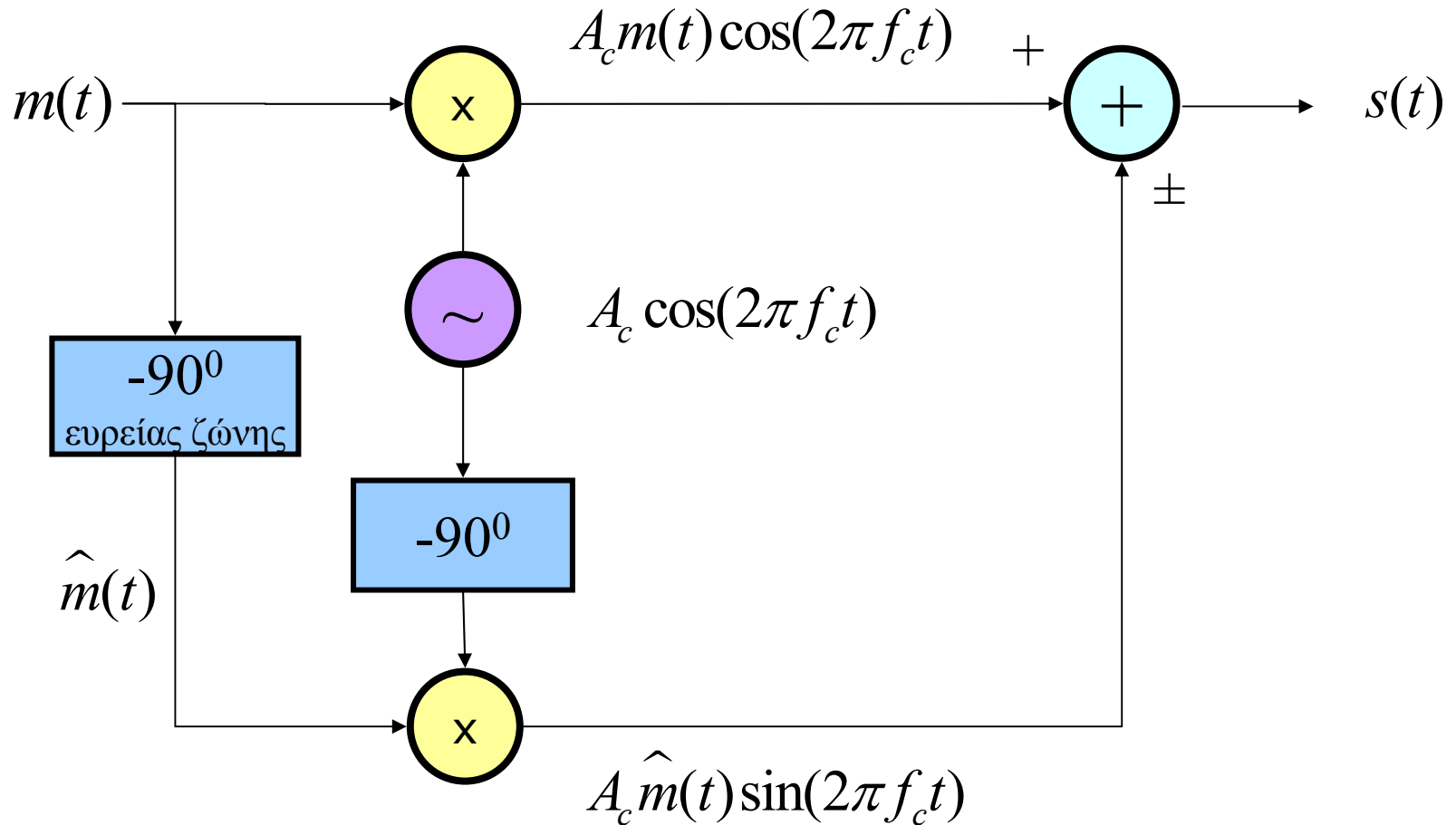
m(t)	300 Hz	3400 Hz
$f_1=100\text{kHz}$	96,6 kHz	99,7kHz
	100,3 kHz	103,4 kHz
$f_2=10\text{ MHz}$	9,8966 MHz	9,8997 MHz
	10,1003 MHz	10,1034 MHz

# Διευκρίνιση φάσης

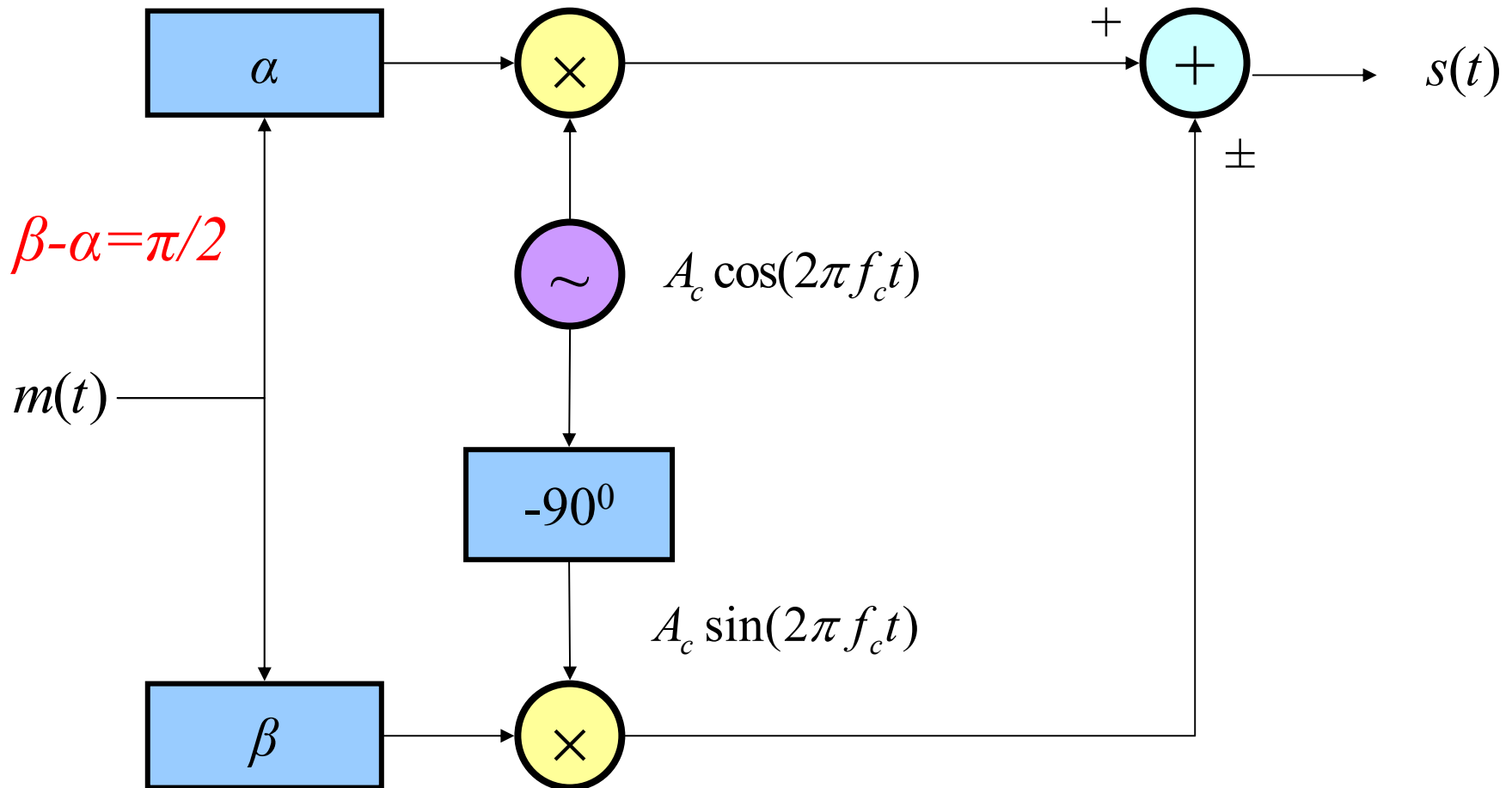
- Διαμορφωτής Hartley
- Κύκλωμα σταθερής διαφοράς φάσης



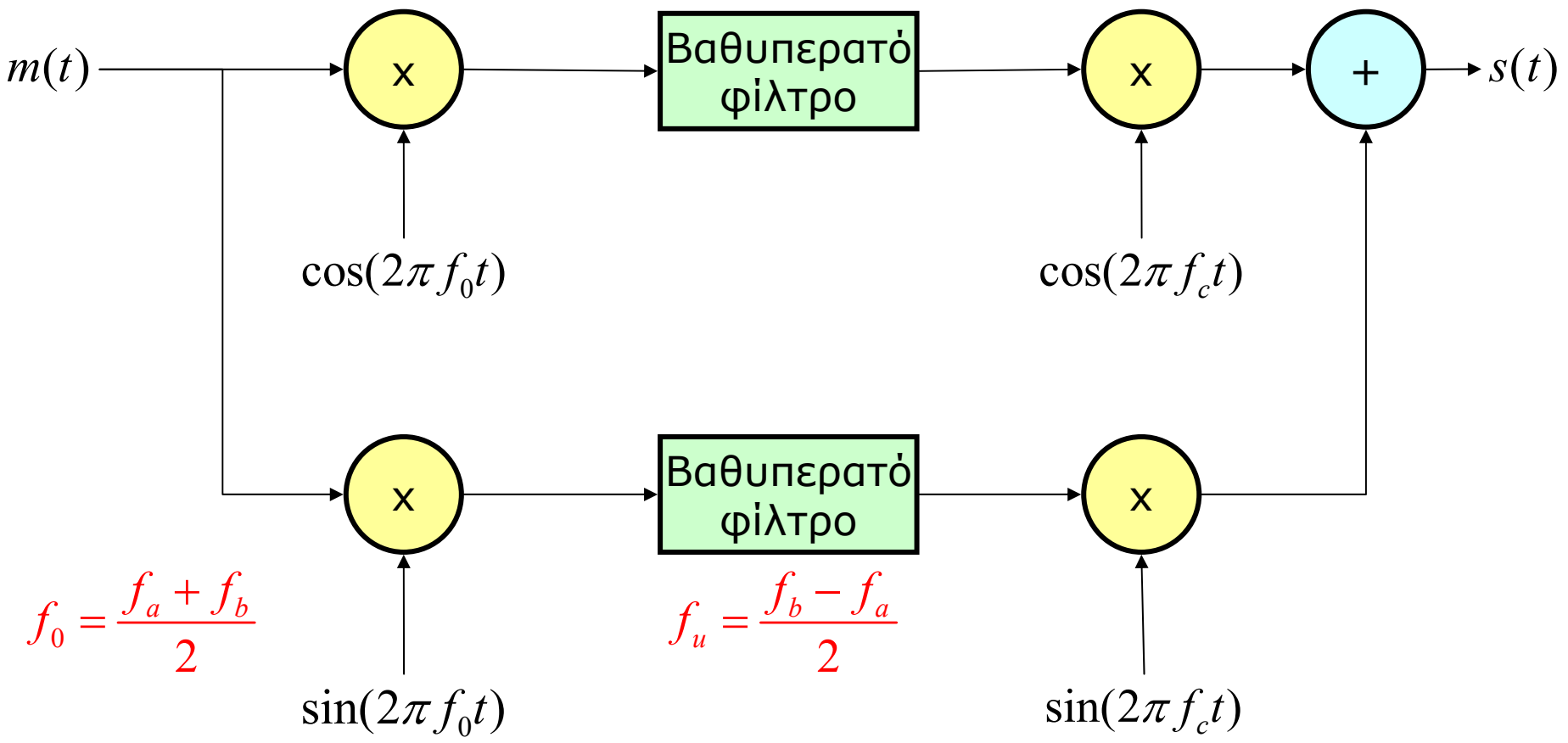
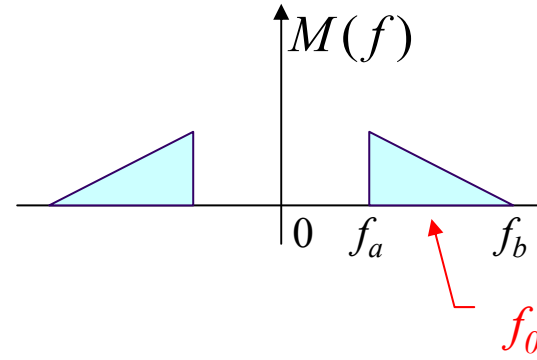
# Διαμορφωτής Hartley



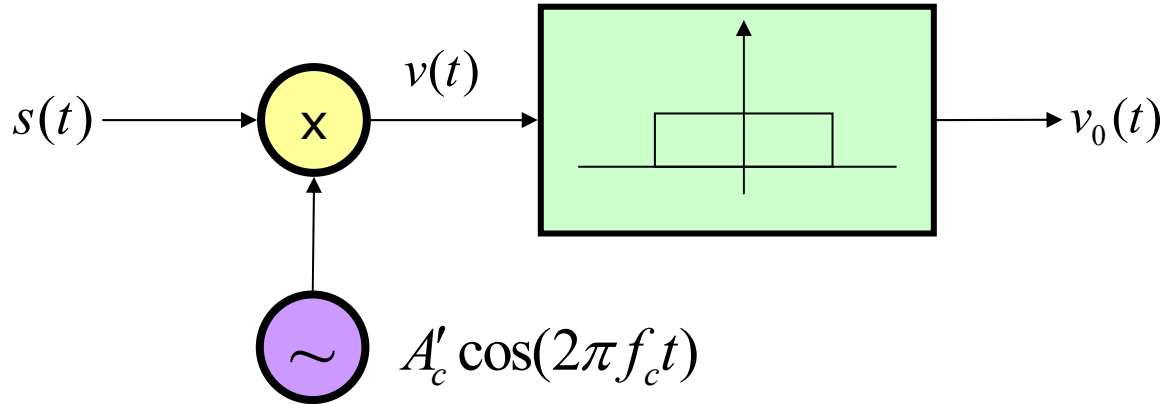
# Σταθερή διαφορά φάσης



# Μέθοδος Weaver



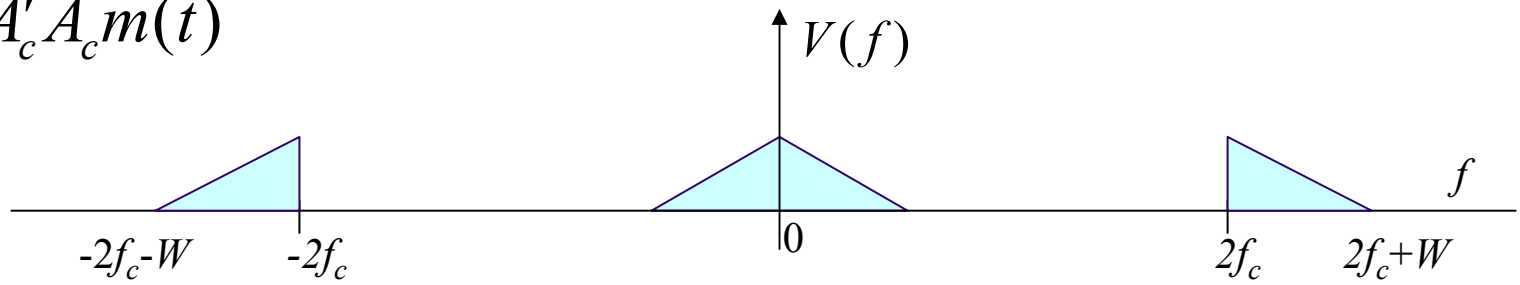
# Ομόδυνα φώραση SSB



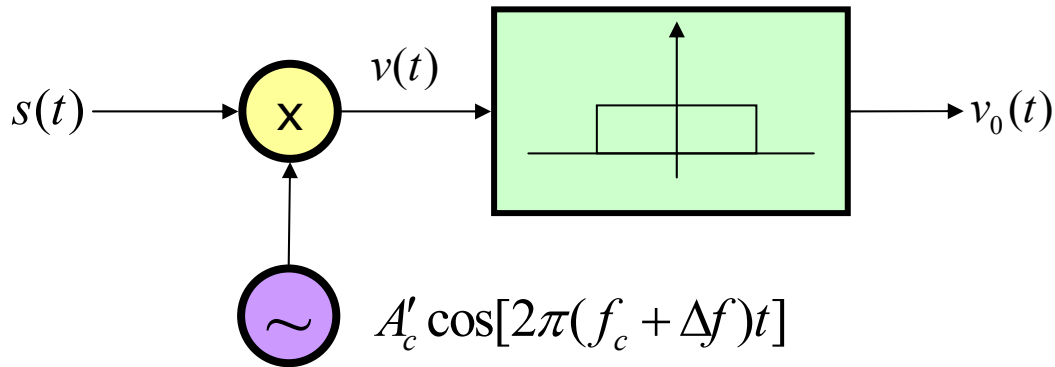
$$v(t) = \frac{1}{2} A'_c A_c \cos(2\pi f_c t) [m(t) \cos(2\pi f_c t) \mp \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)] =$$

$$= \frac{1}{4} A'_c A_c m(t) + \frac{1}{4} A'_c A_c [m(t) \cos(4\pi f_c t) \mp \hat{m}(t) \sin(4\pi f_c t)] \Rightarrow$$

$$v_0(t) = \frac{1}{4} A'_c A_c m(t)$$



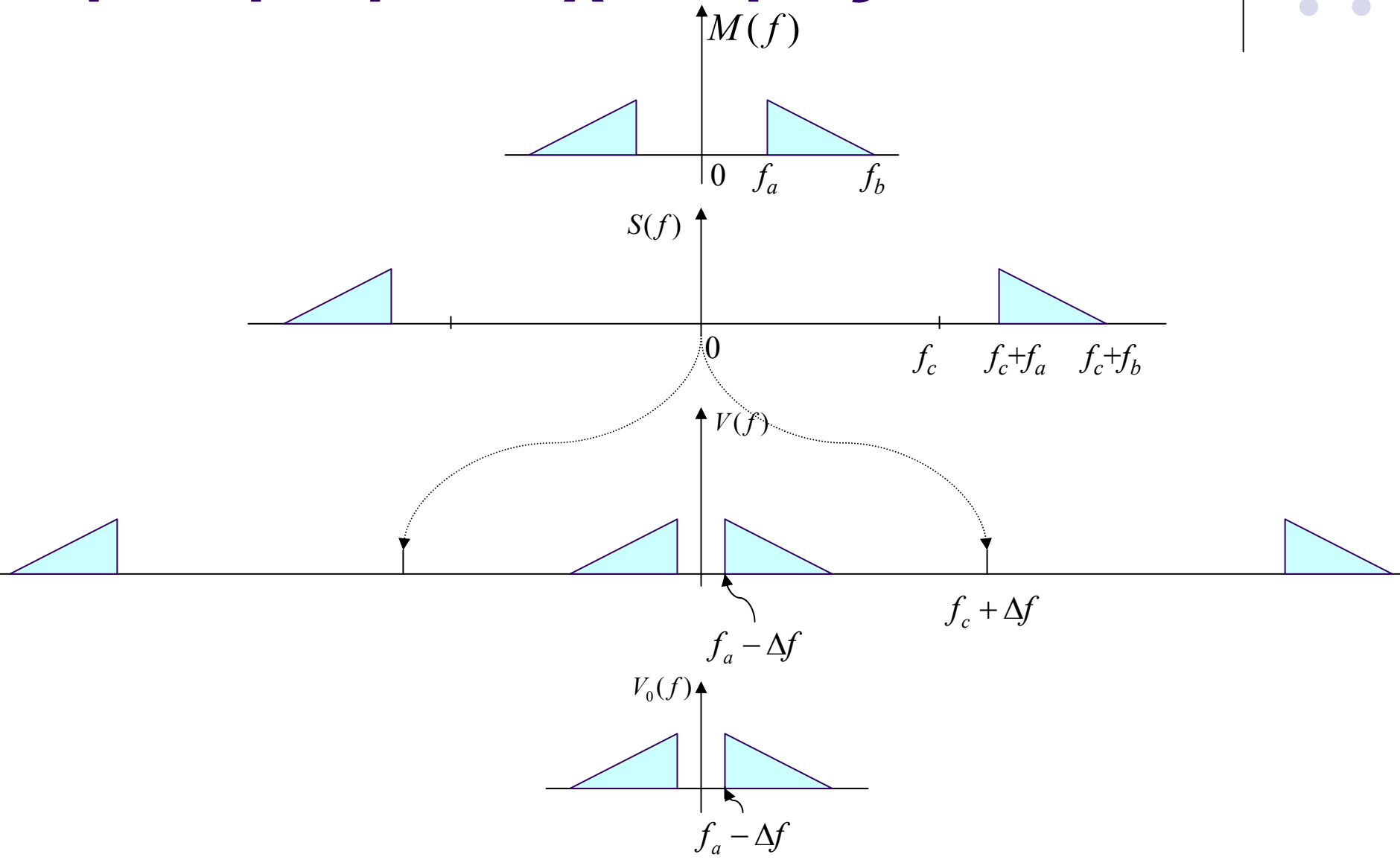
# Ομόδυνη φώραση SSB με σφάλμα συχνότητας



$$\begin{aligned}
 v(t) &= \frac{1}{2} A'_c \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t] A_c [m(t) \cos(2\pi f_c t) \mp \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)] = \\
 &= \frac{1}{4} A'_c A_c [ m(t) \cos(2\pi\Delta f t) + m(t) \cos[2\pi(2f_c + \Delta f)t] \\
 &\mp \hat{m}(t) \sin[2\pi(2f_c + \Delta f)t] \pm \hat{m}(t) \sin(2\pi\Delta f t) ] \Rightarrow \\
 v_0(t) &= \frac{1}{4} A'_c A_c [ m(t) \cos(2\pi\Delta f t) \pm \hat{m}(t) \sin(2\pi\Delta f t) ]
 \end{aligned}$$



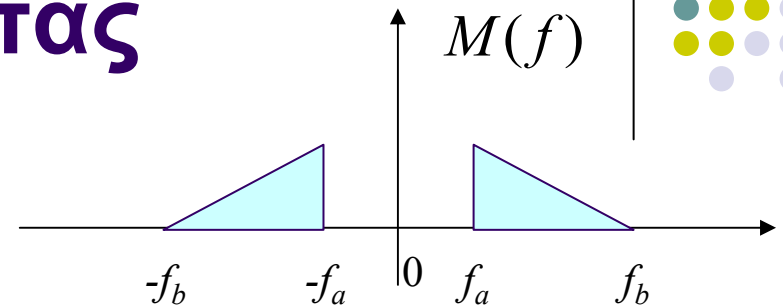
# Ομόδυνη φώραση SSB με σφάλμα συχνότητας



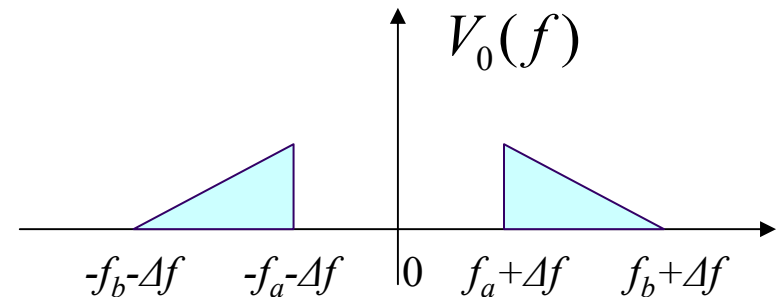
# Ομόδυνη φώραση SSB με σφάλμα συχνότητας



- Σήμα προς διαμόρφωση

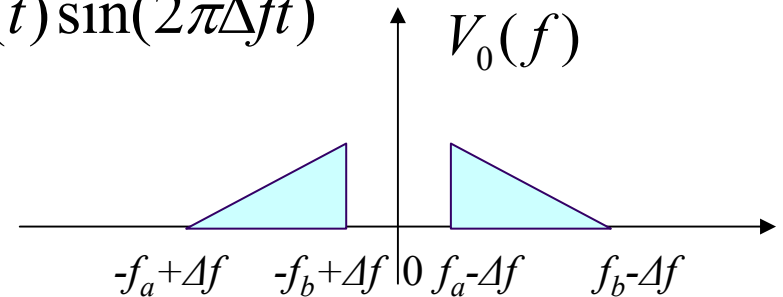


- LSB  $\Delta f > 0$ , USB  $\Delta f < 0$

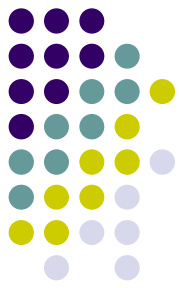


$$v_0(t) = \frac{1}{4} A'_c A_c m(t) \cos(2\pi\Delta f t) + \frac{1}{4} A'_c A_c \hat{m}(t) \sin(2\pi\Delta f t)$$

- USB  $\Delta f > 0$ , LSB  $\Delta f < 0$



$$v_0(t) = \frac{1}{4} A'_c A_c m(t) \cos(2\pi\Delta f t) - \frac{1}{4} A'_c A_c \hat{m}(t) \sin(2\pi\Delta f t)$$

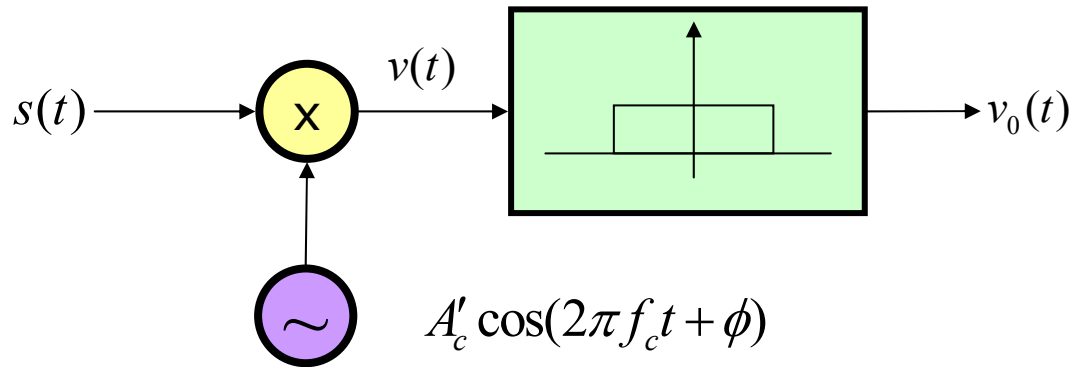


# Φαινόμενο Donald Duck

- Η παραμόρφωση που δημιουργεί η ολίσθηση της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή καθιστά την SSB ακατάλληλη για μετάδοση μουσικής
- Σε περίπτωση μετάδοσης φωνής, ολίσθηση μικρότερη των  $\pm 10$  Hz, γίνεται ανεκτή
- Εάν είναι μεγαλύτερη, η φωνή ακούγεται όπως του **Donald Duck**



# Ομόδυνη φώραση SSB με σφάλμα φάσης



$$\begin{aligned}
 v(t) &= \frac{1}{2} A'_c \cos(2\pi f_c t + \phi) A_c \left[ m(t) \cos(2\pi f_c t) \mp \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t) \right] = \\
 &= \frac{1}{4} A'_c A_c \left[ m(t) \cos(\phi) + m(t) \cos(4\pi f_c t + \phi) \right. \\
 &\quad \left. \mp \hat{m}(t) \sin(4\pi f_c t + \phi) \pm_c \hat{m}(t) \sin \phi \right] \Rightarrow \\
 v_0(t) &= \frac{1}{4} A'_c A_c \left[ m(t) \cos(\phi) \pm \hat{m}(t) \sin \phi \right]
 \end{aligned}$$

# Ομόδυνη φώραση SSB με σφάλμα φάσης



$$V_0(f) = \frac{1}{4} A'_c A_c \left[ M(f) \cos(\phi) \pm \widehat{M}(f) \sin \phi \right]$$

$$\widehat{M}(f) = -j \operatorname{sgn}(f) M(f) \Rightarrow$$

$$V_0(f) = \begin{cases} \frac{1}{4} A'_c A_c M(f) \exp(-j\phi) & f > 0 \\ \frac{1}{4} A'_c A_c M(f) \exp(+j\phi) & f < 0 \end{cases}$$

# Παραμόρφωση καθυστέρησης



- Η ολίσθηση φάσης του φέροντος στην SSB, δημιουργεί μια παραμόρφωση καθυστέρησης (delay distortion)
- Στην ακραία περίπτωση  $\phi = \pm 90^\circ$  το αποδιαμορφωμένο σήμα είναι ο μετασχηματισμός Hilbert  $\hat{m}(t)$  του σήματος
- Όμως το ανθρώπινο αυτί μπορεί να ανεχθεί μεγάλες παραμορφώσεις καθυστερήσεις
  - Η ολίσθηση φάσης δεν είναι πολύ κρίσιμη για σήματα φωνής



# Παρατηρήσεις

- Η δημιουργία φίλτρων με απότομο πέρασμα από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη φραγής είναι δύσκολη
- Η διαμόρφωση SSB είναι κατάλληλη όταν το φασματικό περιεχόμενο του σήματος είναι αμελητέο σε μια ζώνη γύρω από το μηδέν, όπως π.χ. συμβαίνει στη φωνή
  - Όμως αυτό δεν συμβαίνει στο τηλεοπτικό ή μουσικό σήμα
- Οι παραμορφώσεις φάσης στην αποδιαμόρφωση είναι ανεκτές για την περίπτωση φωνής, αλλά απαράδεκτες για βίντεο ή μουσική



# Εφαρμογές SSB

- Η διαμόρφωση SSB είναι το de facto στάνταρ για μετάδοση αναλογικού σήματος φωνής σε μεγάλες αποστάσεις
  - Η SSB χρησιμοποιείται για μετάδοση φωνής π.χ. στα βραχέα κύματα ή σε φερέσυχνα στην τηλεφωνία





# Ραδιοφωνικός δέκτης (I)

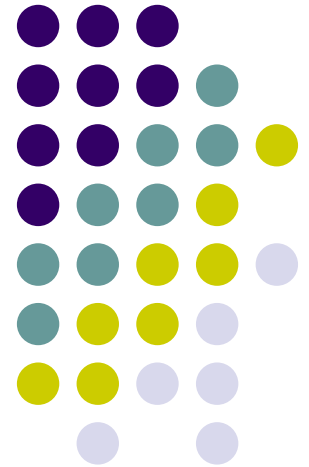


# Ραδιοφωνικός δέκτης (II)



# Διαμόρφωση υπολειπόμενης πλευρικής ζώνης

Vestigial Sideband Modulation  
(VSB)



# VSB



- Συμβιβασμός μεταξύ SSB, DSB
- Μετάδοση ολόκληρης της άνω (κάτω) πλευρικής και μέρους της κάτω (άνω) πλευρικής
- Γιατί;
  - Μείωση των απαιτήσεων για ζωνοπερατό φίλτρο
  - Μείωση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης
  - Επιτρέπονται σήματα με συνιστώσα dc

# VSB

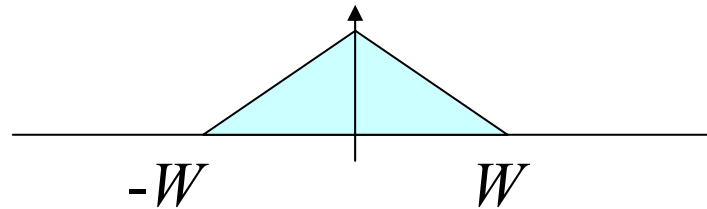


- Το φίλτρο αποκοπής δεν είναι πολύ απότομο
- Έχει όμως κάποιες επιθυμητές ιδιότητες ώστε να διευκολύνεται η αποδιαμόρφωση
- Κατάλληλη για σήμα βίντεο (τηλεόραση)
  - που έχει χαμηλές συχνότητες και μεγάλο εύρος ζώνης

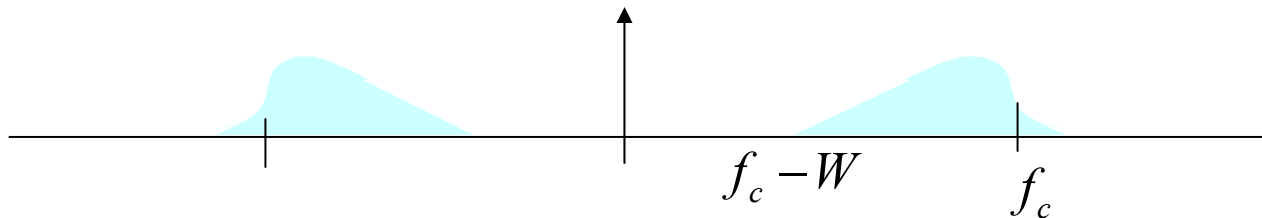


# VSB

- Εάν το προς διαμόρφωση σήμα έχει φάσμα

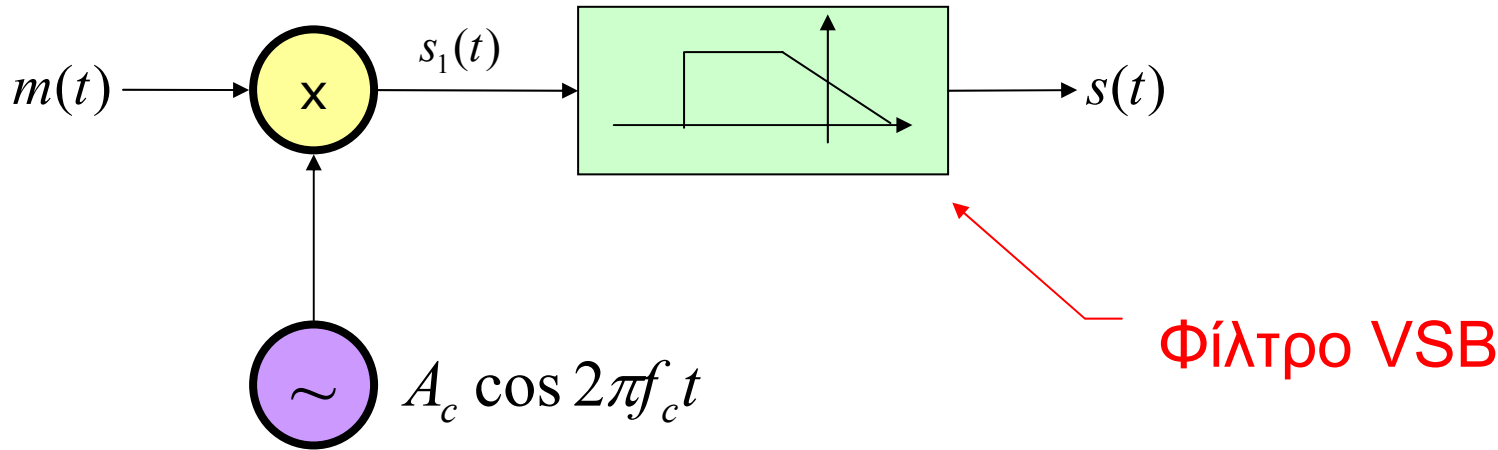


- το διαμορφωμένο VSB σήμα (κάτω πλευρικής) έχει ως εξής:





# Παραγωγή σήματος VSB



$$s_1(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

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

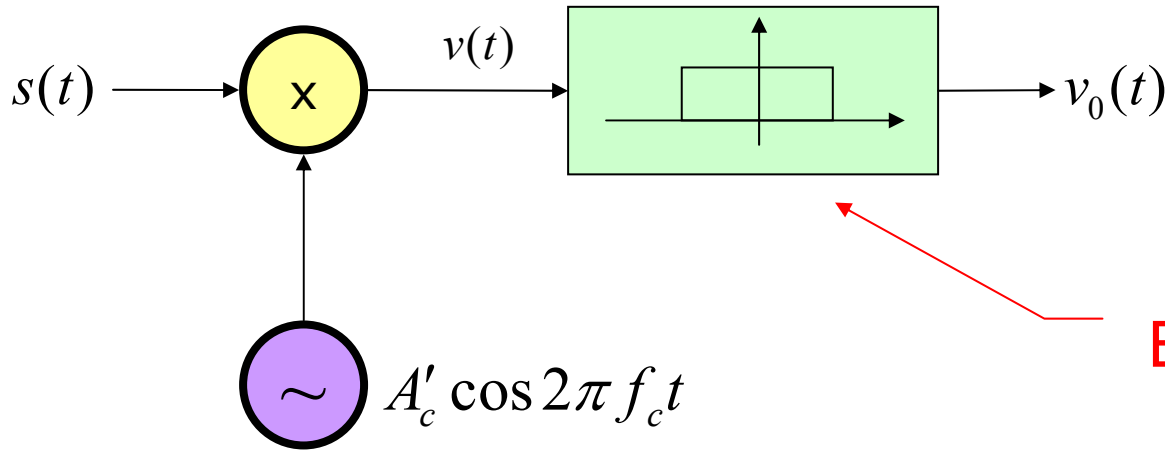


# Παραγωγή σήματος VSB

- Το εύρος ζώνης του σήματος VSB είναι κάπου μεταξύ  $W$  και  $2W$ 
  - Εξαρτάται από την υλοποίηση του φίλτρου VSB
- Η ισχύς του σήματος είναι κατά τι μεγαλύτερη από αυτήν του σήματος SSB
  - Λόγω της μετάδοσης της υπολειπόμενης πλευρικής συνιστώσας



# Αποδιαμόρφωση σήματος VSB



Βαθυπερατό φίλτρο

$$\begin{aligned} V(f) &= \frac{A'_c}{2} [S(f - f_c) + S(f + f_c)] = \\ &= \frac{A_c A'_c}{4} M(f) [H(f - f_c) + H(f + f_c)] + \\ &+ \frac{A_c A'_c}{4} [M(f - 2f_c)H(f - f_c) + M(f + 2f_c)H(f + f_c)] \Rightarrow \\ V_0(f) &= \frac{A_c A'_c}{4} M(f) [H(f - f_c) + H(f + f_c)] \end{aligned}$$

# Αποδιαμόρφωση σήματος VSB



- Εάν  $H(f - f_c) + H(f + f_c) = 1$  τότε λαμβάνομε το επιθυμητό σήμα

$$V_0(f) = \frac{A_c A'_c}{4} M(f) \Rightarrow v_0(t) = \frac{A_c A'_c}{4} m(t)$$



# Συνθήκη για το φίλτρο VSB

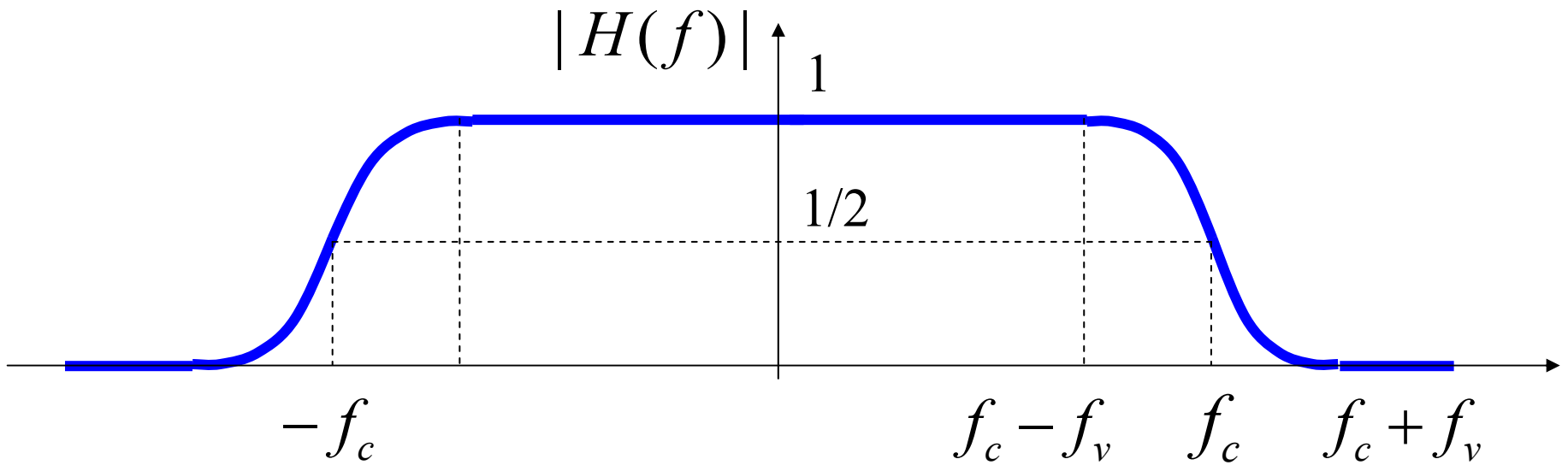
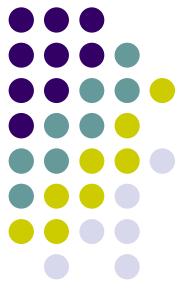
- Η γενική συνθήκη για αποδιαμόρφωση VSB είναι

$$H(f - f_c) + H(f + f_c) = \text{σταθερά} \quad \text{για } |f| < W$$

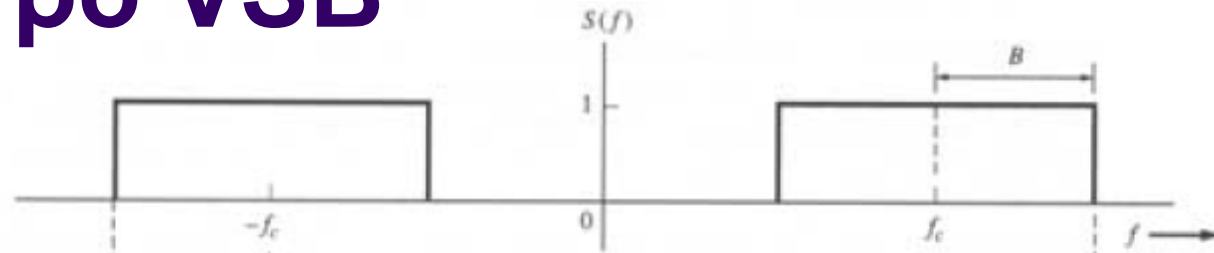
$$\Rightarrow H(f - f_c) + H(f + f_c) = e^{-j2\pi f\tau_0} \quad \text{για } |f| < W$$

- ώστε η έξοδος του αποδιαμορφωτή να είναι μια καθυστερημένη εκδοχή του σήματος

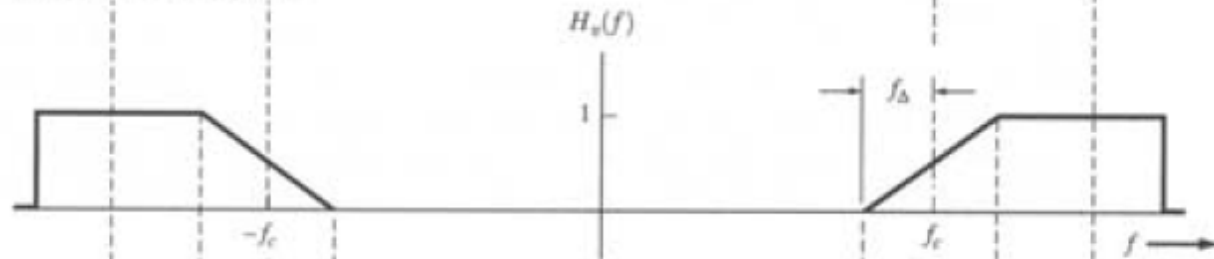
# Φίλτρο VSB



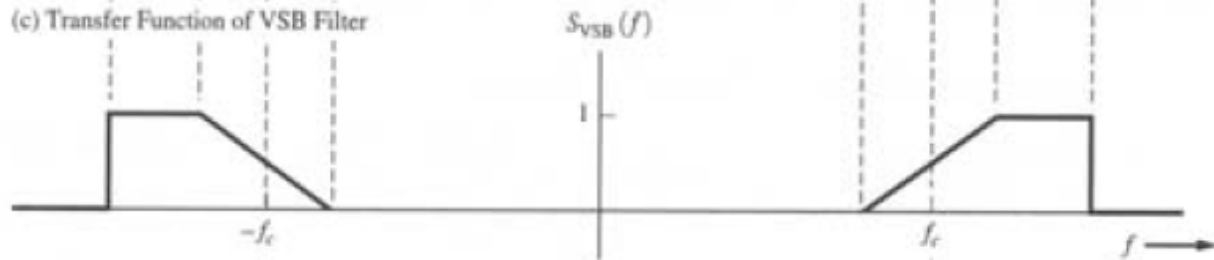
# Φίλτρο VSB



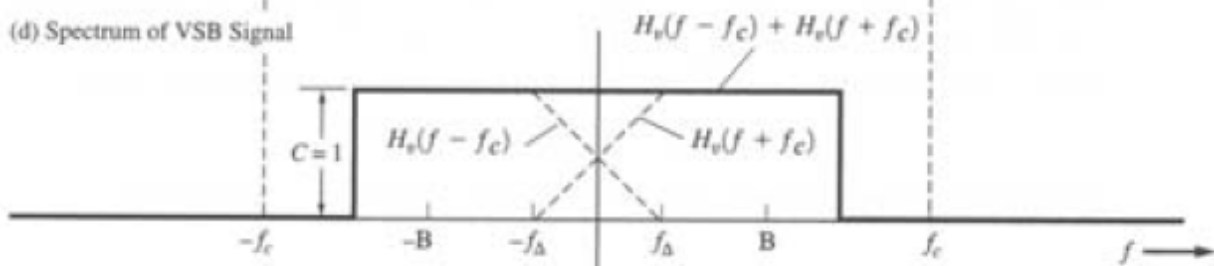
(b) Spectrum of DSB Signal



(c) Transfer Function of VSB Filter



(d) Spectrum of VSB Signal



(e) VSB Filter Constraint

# Σήμα VSB στο πεδίο του χρόνου



- Το διαμορφωμένο σήμα VSB είναι

$$\begin{aligned} s(t) &= h(t) \otimes A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) = \\ &= A_c \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \cos[2\pi f_c (t - \tau)] d\tau \\ &= A_c \cos(2\pi f_c t) \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau + \\ &\quad + A_c \sin(2\pi f_c t) \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau \\ &= \frac{A_c}{2} m_c(t) \cos(2\pi f_c t) - \frac{A_c}{2} m_s(t) \sin(2\pi f_c t) \end{aligned}$$

- **ΌΤΟΥ**  $m_c(t) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau$   
 $m_s(t) = -2 \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau$

# Σήμα VSB στο πεδίο του χρόνου



- Όμως

$$m_c(t) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau \Rightarrow$$

$$M_c(f) = 2M(f) \times \frac{1}{2} [H(f - f_c) + H(f + f_c)] \Rightarrow$$

$$\frac{M_c(f)}{M(f)} = H(f - f_c) + H(f + f_c) = 1 \Rightarrow$$

$$m_c(t) = m(t)$$

# Σήμα VSB στο πεδίο του χρόνου



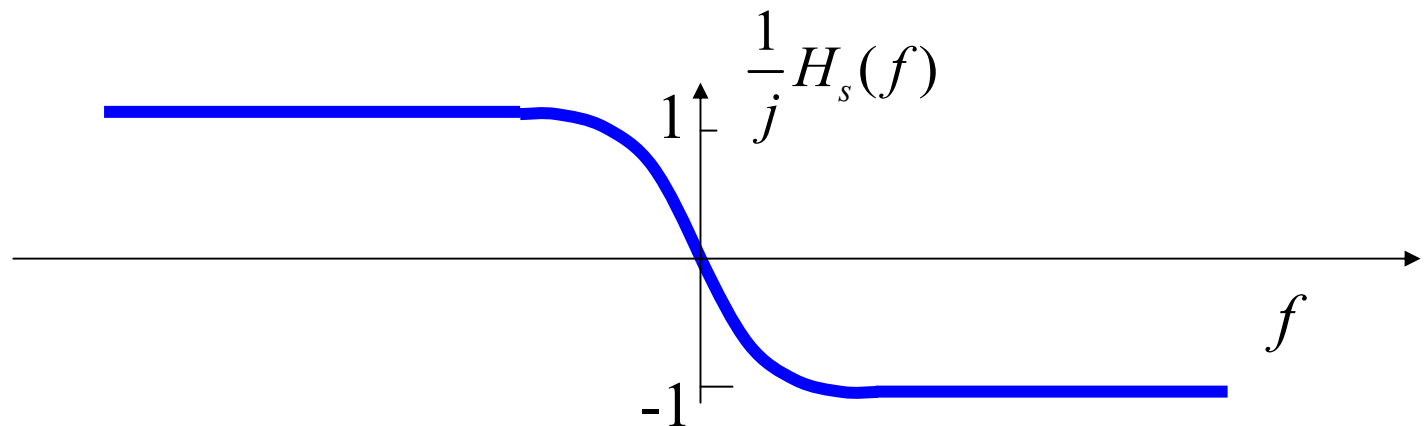
- Παρόμοια

$$m_s(t) = -2 \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) m(t - \tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau \Rightarrow$$

$$M_s(f) = -2M(f) \times \frac{1}{2j} [H(f - f_c) - H(f + f_c)] \Rightarrow$$

$$\frac{M_s(f)}{M(f)} = j[H(f - f_c) - H(f + f_c)] = H_s(f)$$

- ΟΤΠΟΥ





# Θεώρηση ζωνοπερατού σήματος



- Το σήμα VSB ως ζωνοπερατό σήμα γράφεται

$$s(t) = s_c(t) \cos(2\pi f_c t) - s_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Όπου τα  $s_c(t)$  και  $s_s(t)$  είναι βαθυπερατά σήματα

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

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

# Θεώρηση ζωνοπερατού σήματος



- Επομένως  $S_c(f) = \frac{1}{2} A_c M(f) [H(f - f_c) + H(f + f_c)] \Rightarrow$

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

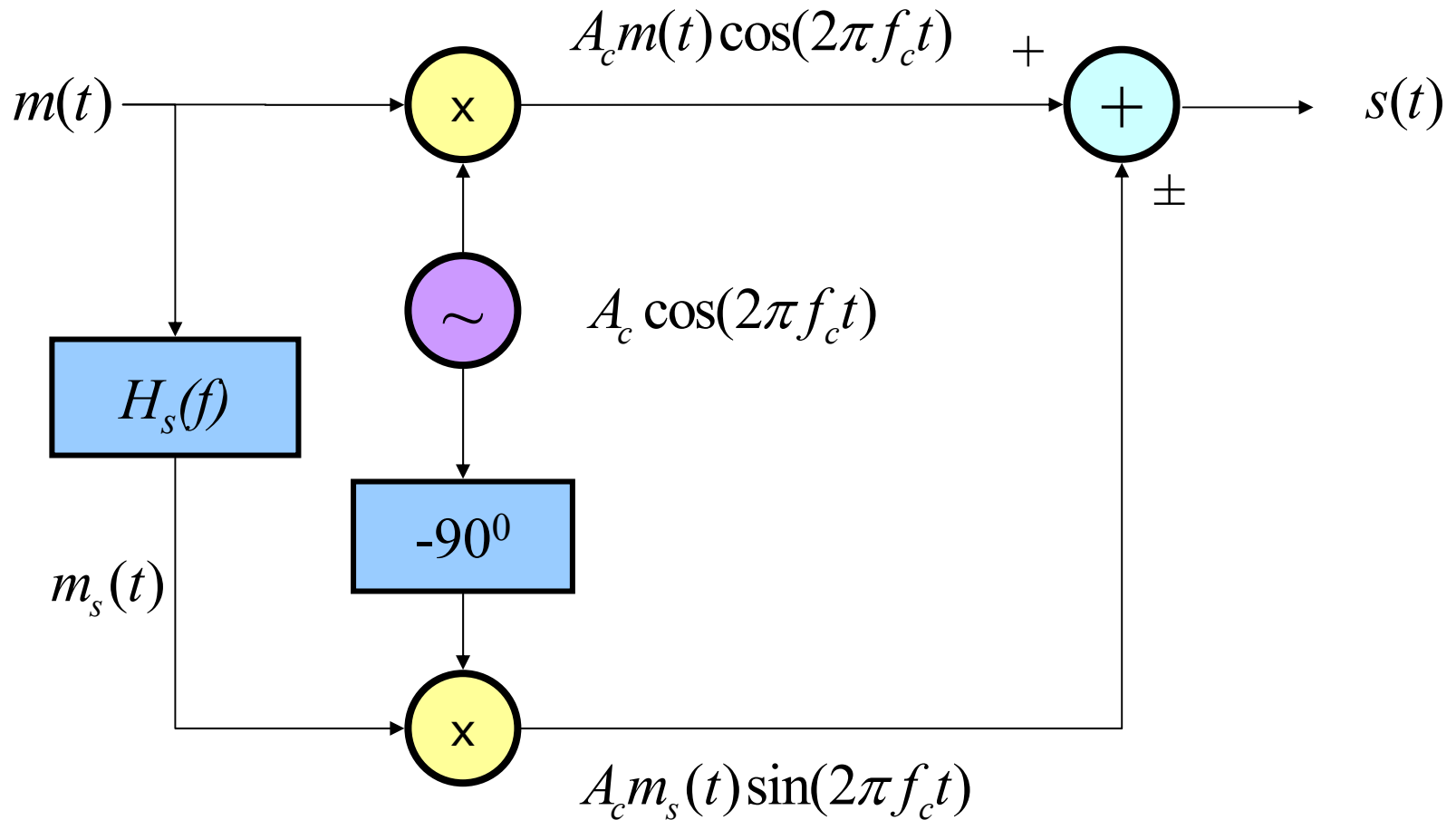
- Επίσης  $S_s(f) = \frac{j}{2} A_c M(f) [H(f - f_c) - H(f + f_c)] \Rightarrow$

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

- Δηλαδή, τελικά

$$s_c(t) = \frac{1}{2} A_c m(t), \quad s_s(t) = \frac{1}{2} A_c m_s(t)$$

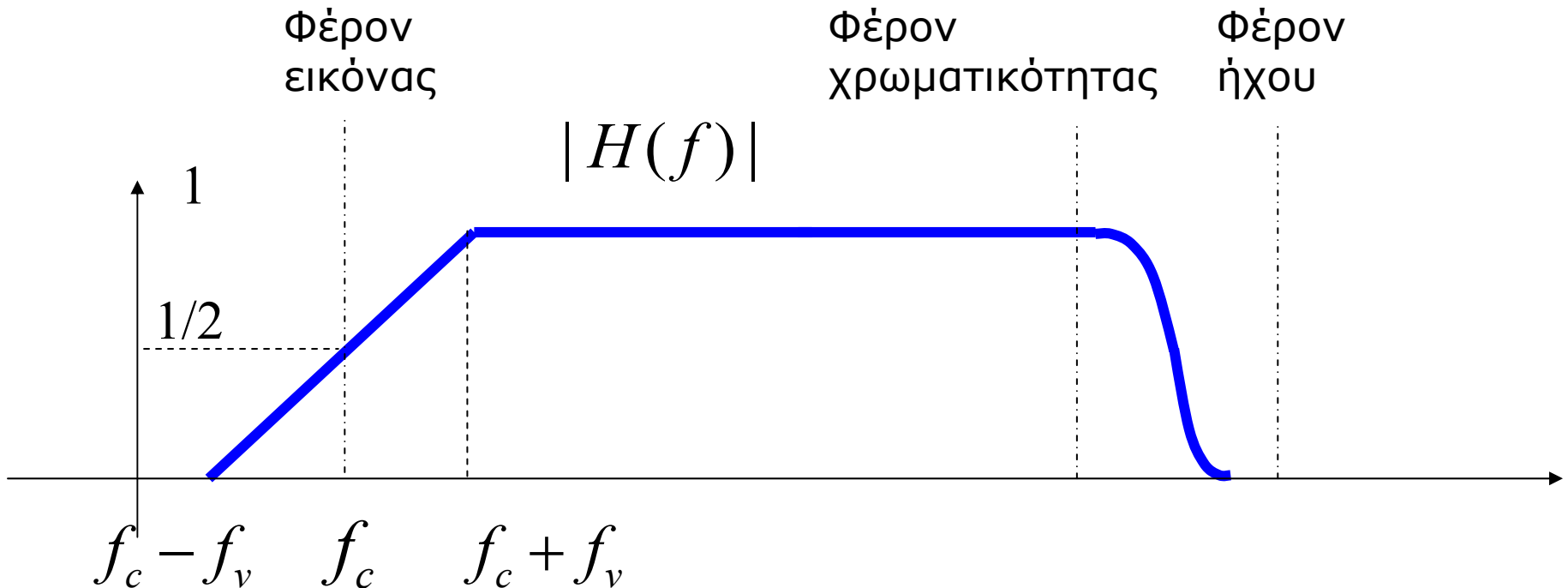
# Παραγωγή VSB με διευκρίνιση φάσης





# Χρήση VSB στην τηλεόραση

- Το φίλτρο VSB βρίσκεται στον δέκτη



# Αποδιαμόρφωση VSB με φέρον



- Στην εμπορική τηλεόραση εκπέμπεται και το φέρον, τότε

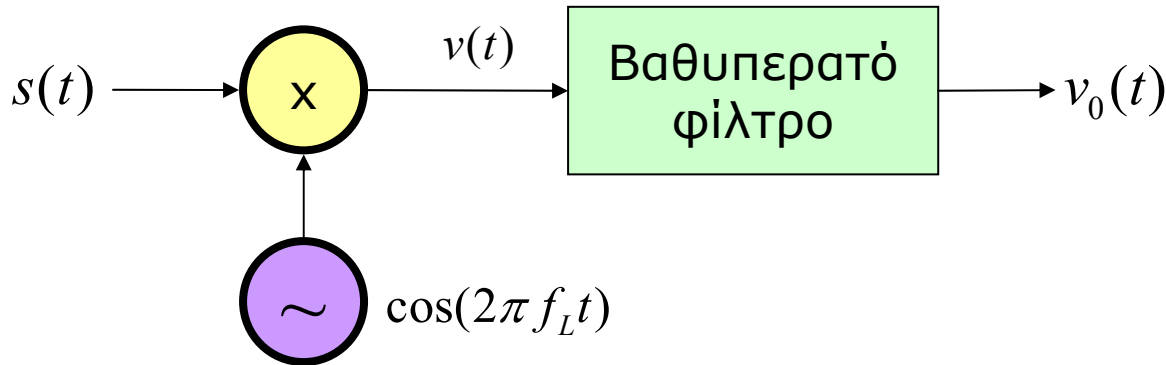
$$s(t) = A_c \left[ 1 + \frac{k_a}{2} m(t) \right] \cos(2\pi f_c t) - \frac{k_a}{2} m_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- Που έχει περιβάλλουσα

$$a(t) = A_c \sqrt{\left[ 1 + \frac{k_a}{2} m(t) \right]^2 + \left[ \frac{k_a}{2} m_s(t) \right]^2} =$$
$$A_c \left[ 1 + \frac{k_a}{2} m(t) \right] \left\{ \sqrt{1 + \left[ \frac{k_a m_s(t)}{2 + k_a m(t)} \right]^2} \right\} \approx A_c \left[ 1 + \frac{k_a}{2} m(t) \right]$$



# Ομόδυνος φωρατής VSB



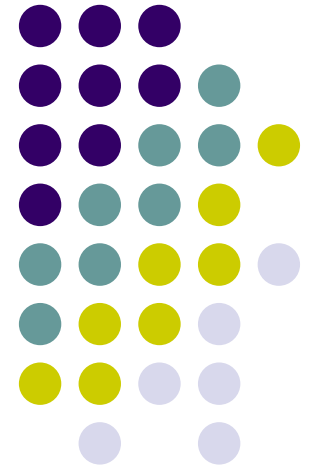
$$v(t) = s(t) \times \cos(2\pi f_c t) = \{ [A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)] \otimes h(t) \} \times \cos(2\pi f_c t)$$

$$V(f) = \left\{ \frac{A_c}{2} [M(f + f_c) + M(f - f_c)] H(f) \right\} \otimes \frac{1}{2} [\delta(f + f_c) + \delta(f - f_c)]$$
$$= \frac{A_c}{4} [M(f) + M(f + 2f_c)] H(f + f_c) + \frac{A_c}{4} [M(f - 2f_c) + M(f)] H(f - f_c)$$

$$V_0(f) = \frac{A_c}{4} M(f) [H(f + f_c) + H(f - f_c)] \Rightarrow v_0(t) = \frac{A_c}{4} m(t).$$

# Ανασκόπηση γραμμικών συστημάτων διαμόρφωσης

---



# Σε όλες τις περιπτώσεις που είδαμε

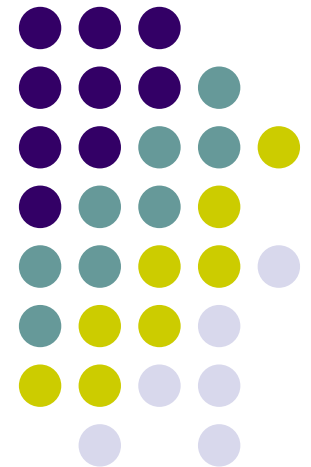


$$s(t) = A_c s_c(t) \cos(2\pi f_c t) - s_s(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- AM  $s_c(t) = 1 + k_a m(t), \quad s_s(t) = 0$
- DSB  $s_c(t) = m(t), \quad s_s(t) = 0$
- SSB  $s_c(t) = \frac{1}{2} m(t), \quad s_s(t) = \pm \frac{1}{2} \hat{m}(t)$
- VSB  $s_c(t) = \frac{1}{2} m(t), \quad s_s(t) = \pm \frac{1}{2} m_s(t)$



# Μετατροπή συχνότητας





# Μετατροπή συχνότητας

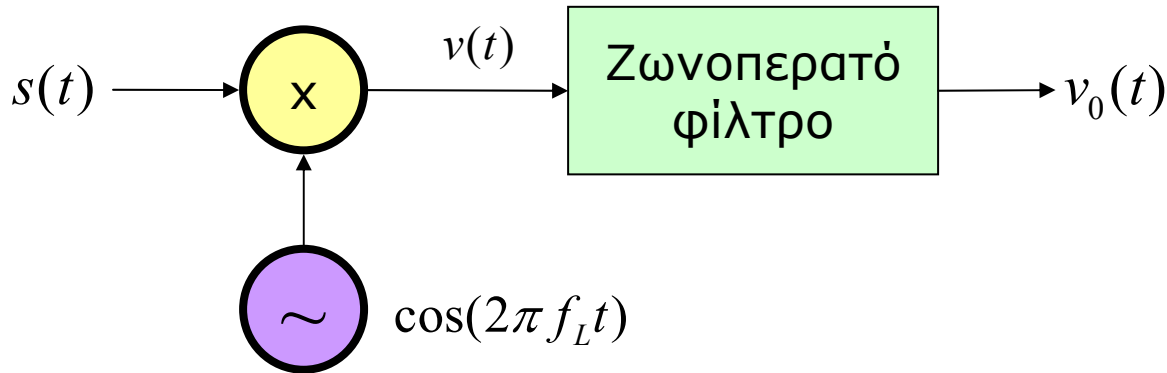
- **Ολίσθηση** του φάσματος ενός σήματος σε **διαφορετική** περιοχή συχνοτήτων, γνωστή και ως
  - Μείξη, ετεροδύνωση
- Παραδείγματα
  - Η διαμόρφωση AM είναι μετατροπή συχνότητας ενός βαθυπερατού σήματος σε ζωνοπερατό
  - Η ομόδυνα αποδιαμόρφωση είναι μετατροπή συχνότητας ζωνοπερατού σήματος σε βαθυπερατό

# Η γενική περίπτωση μετατροπής συχνότητας



- Ζωνοπερατό σήμα με φέρον  $f_1$  μεταφέρεται σε άλλο φέρον  $f_2$ 
  - Το είδος της διαμόρφωσης δεν αλλάζει!

# Παραγωγή



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

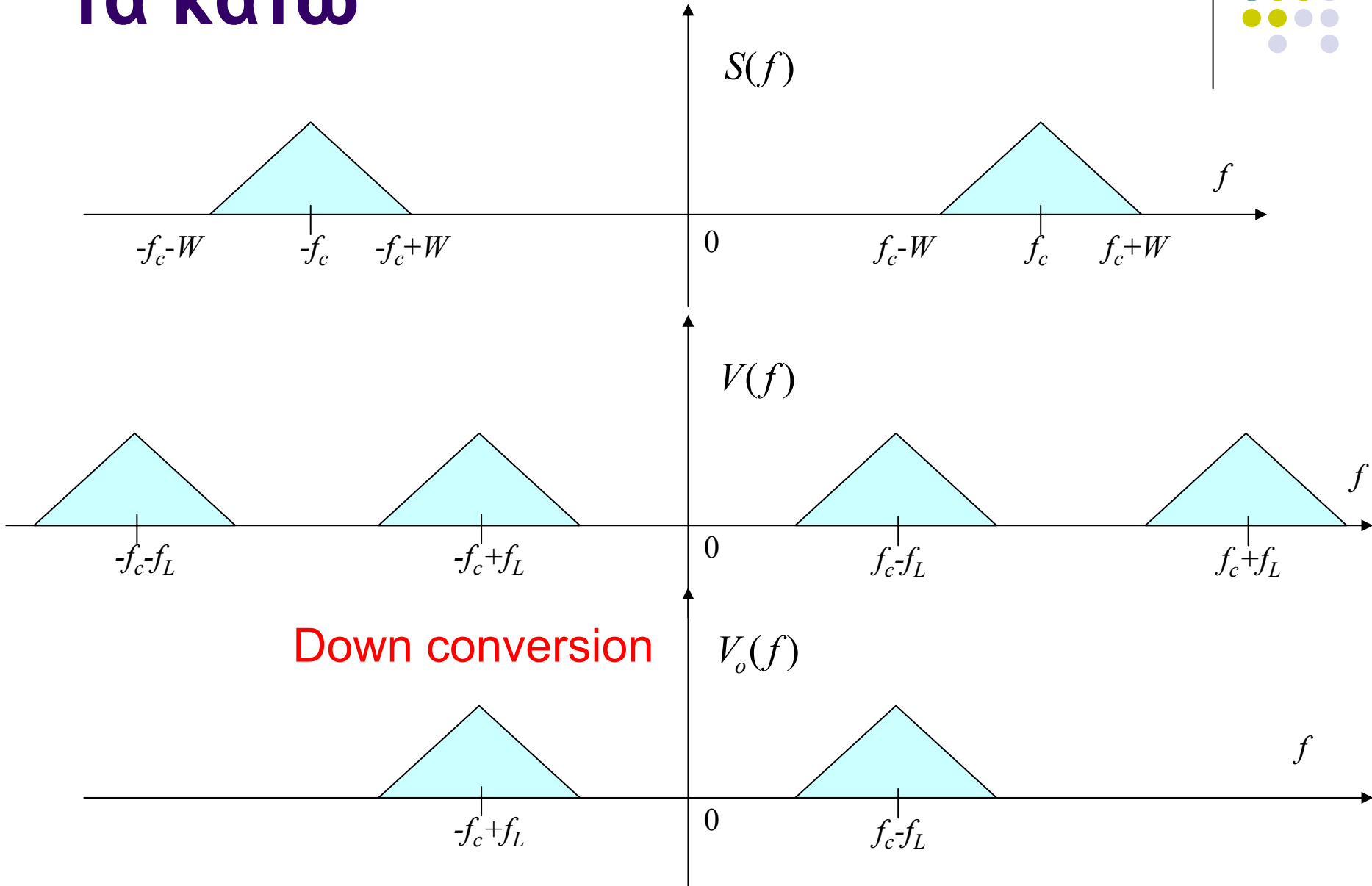
$$v(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_L t) =$$

$$\frac{A_c}{2} m(t) \cos[2\pi(f_c - f_L)t] + \frac{A_c}{2} m(t) \cos[2\pi(f_c + f_L)t] \Rightarrow$$

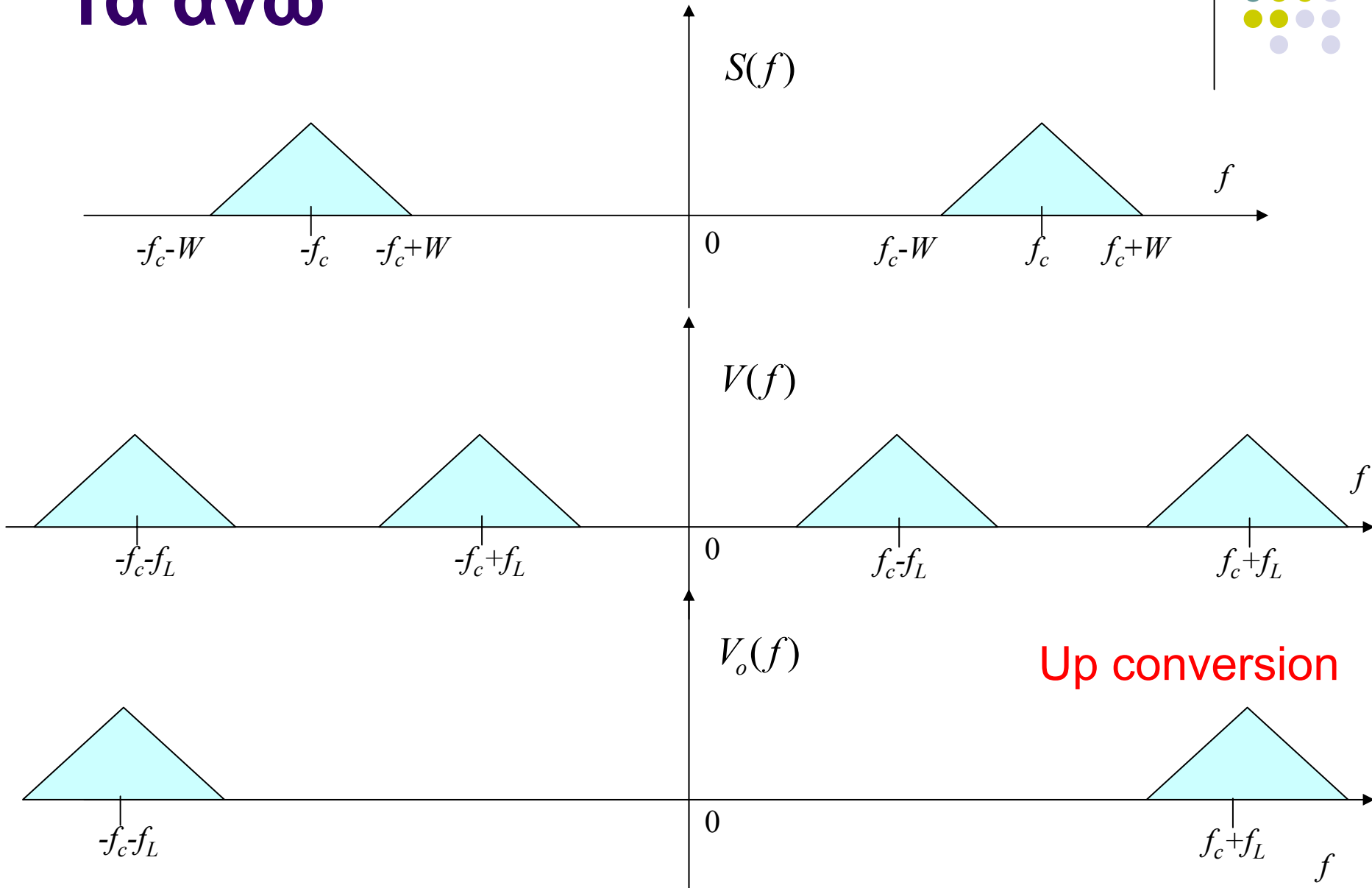
$$v_o(t) = \frac{A_c}{2} m(t) \cos[2\pi(f_c - f_L)t] = \frac{A_c}{2} m(t) \cos(2\pi f_L t)$$

$$f_o = f_c - f_L$$

# Μετατροπή συχνότητας προς τα κάτω



# Μετατροπή συχνότητας προς τα άνω





# Εφαρμογές

- Οι πομποί συνήθως έχουν μετατροπές προς τα άνω
  - Αυξάνει η συχνότητα πριν την τελική ενίσχυση
- Οι δέκτες έχουν συνήθως μετατροπές προς τα κάτω
  - Κατεβαίνει η συχνότητα πριν την αποδιαμόρφωση



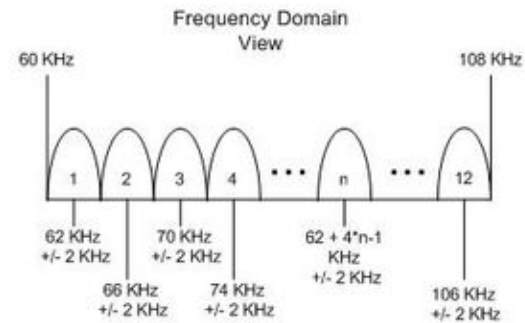
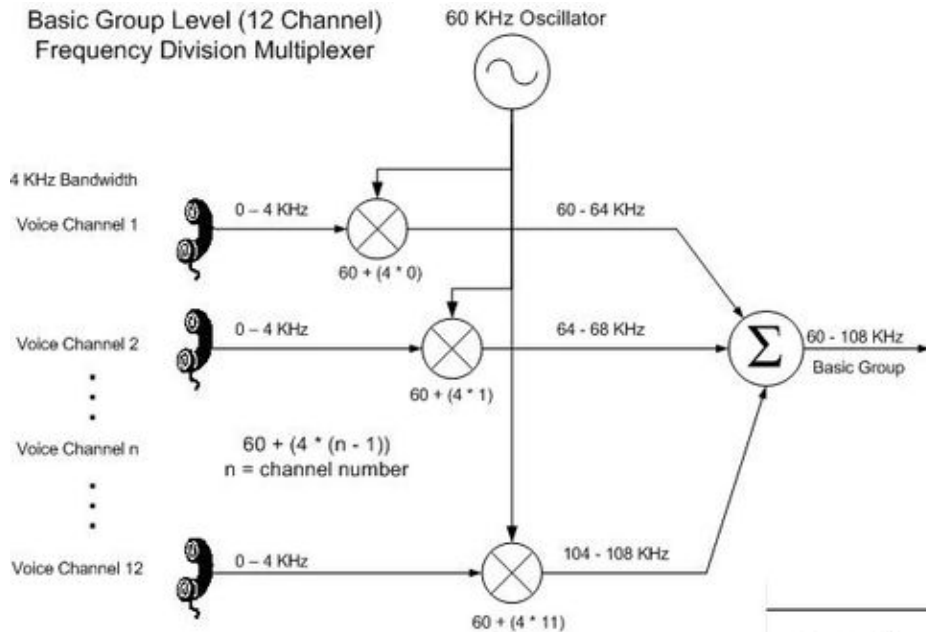
# Πολυπλεξία κατά συχνότητα

- Πολλά ανεξάρτητα σήματα συνδυάζονται σε ένα προς μετάδοση σήμα πάνω από κοινό δίαυλο
  - Π.χ. η QAM είναι μια μέθοδος πολυπλεξίας, αλλά με δύο μόνο ανεξάρτητα σήματα
  - Στη γενική περίπτωση έχουμε πολλά σήματα, όπως, π.χ. στην τηλεφωνική μετάδοση φωνής με φερέσυχο
  - Οι ραδιοφωνικές εκπομπές επίσης θα μπορούσαν να εκληφθούν ως μια μορφή πολυπλεξίας



# Φερέσυχο

Basic Group Level (12 Channel)  
Frequency Division Multiplexer



Input Freq + Osc + (BW \* Offset)  
Offset = channel No. - 1

Group Channel	Bandwidth (KHz)	Mix Freq (KHz)	Group Carrier (KHz)	
			60	108
Voice Channel 1	0 - 4	$60 + (4 * 0)$	60	64
Voice Channel 2	0 - 4	$60 + (4 * 1)$	64	68
Voice Channel 3	0 - 4	$60 + (4 * 2)$	68	72
Voice Channel 4	0 - 4	$60 + (4 * 3)$	72	76
Voice Channel 5	0 - 4	$60 + (4 * 4)$	76	80
Voice Channel 6	0 - 4	$60 + (4 * 5)$	80	84
Voice Channel 7	0 - 4	$60 + (4 * 6)$	84	88
Voice Channel 8	0 - 4	$60 + (4 * 7)$	88	92
Voice Channel 9	0 - 4	$60 + (4 * 8)$	92	96
Voice Channel 10	0 - 4	$60 + (4 * 9)$	96	100
Voice Channel 11	0 - 4	$60 + (4 * 10)$	100	104
Voice Channel 12	0 - 4	$60 + (4 * 11)$	104	108

