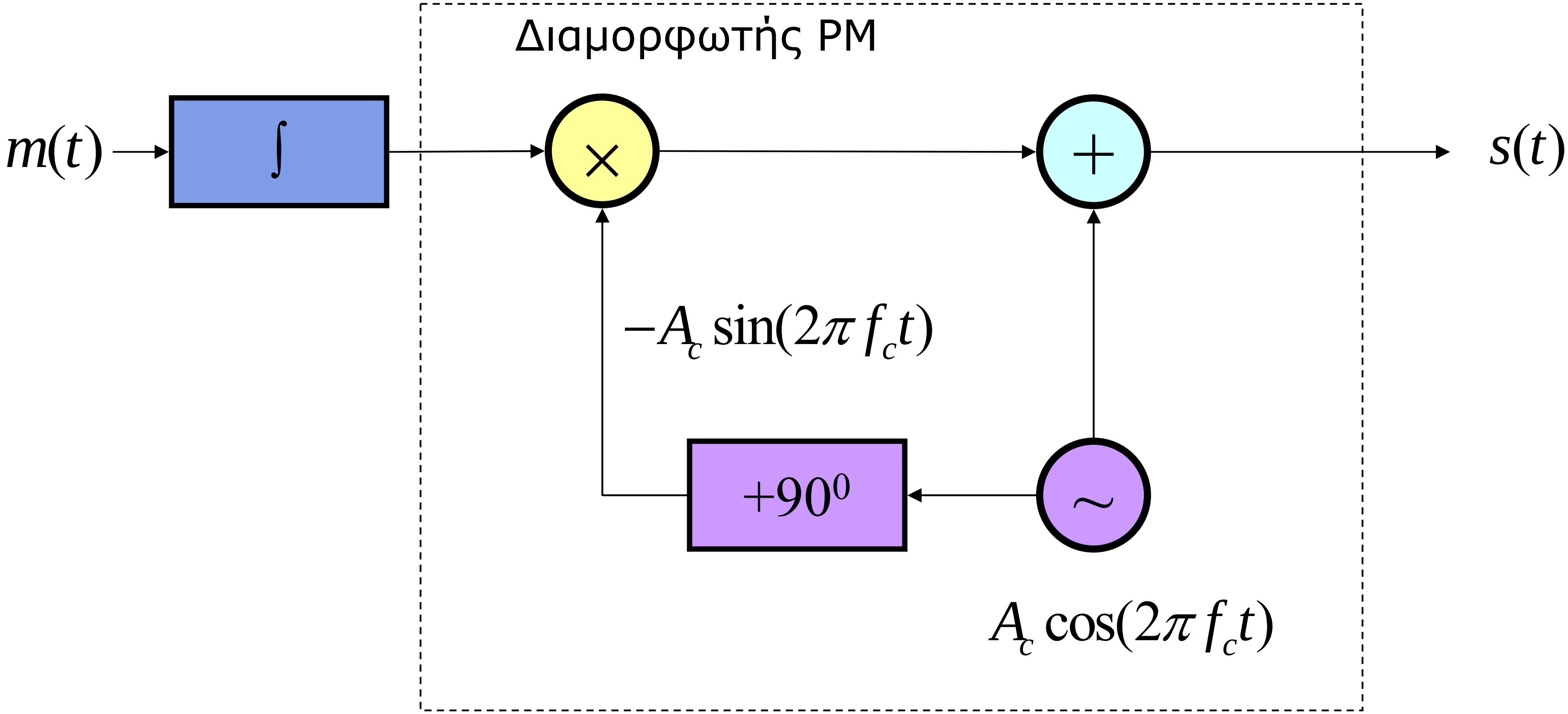
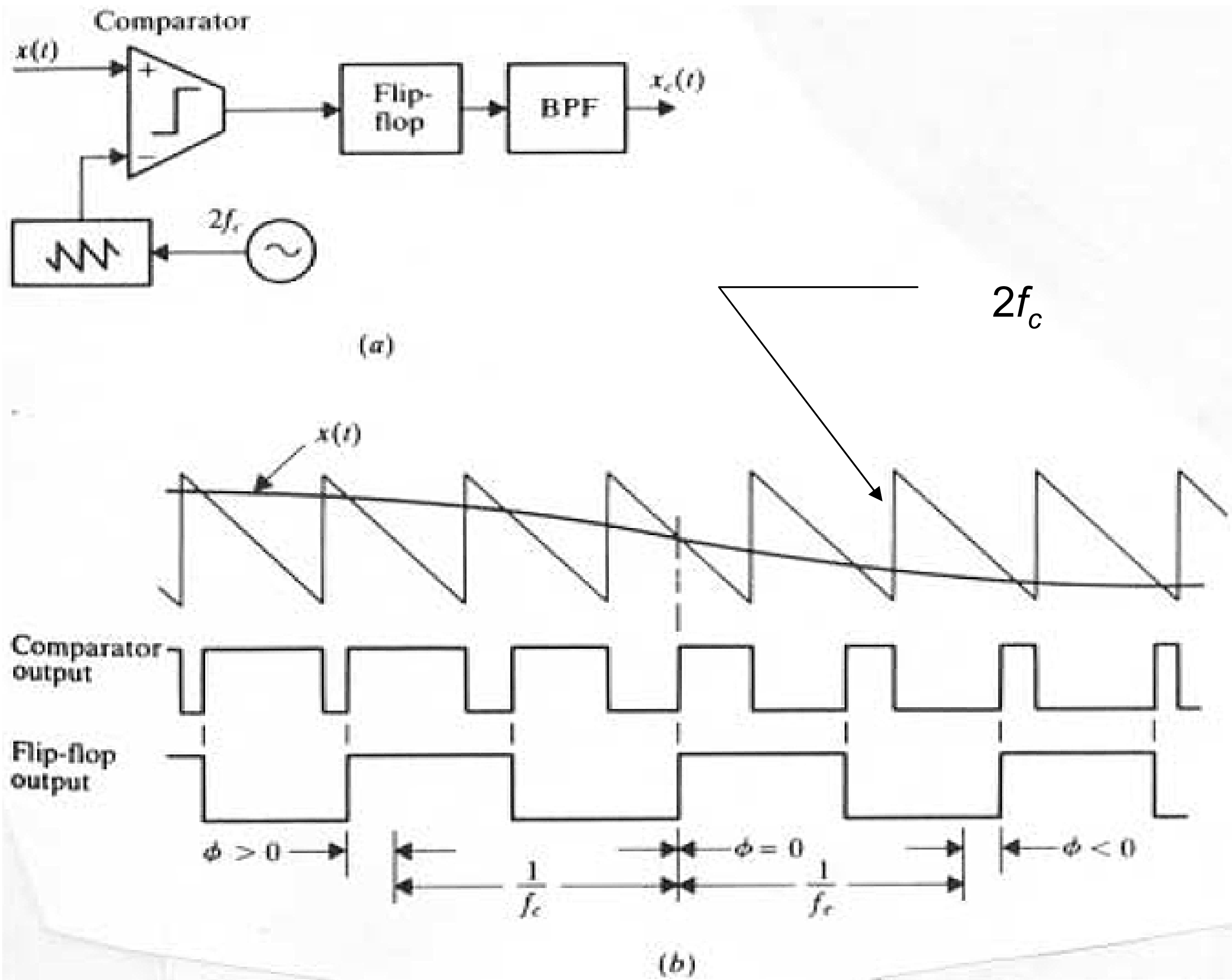
Παραγωγή σημάτων FM

Διαμόρφωση FM στενής ζώνης

$$s(t) \approx A_c\left[\cos(2\pi f_c t) - \phi(t)\sin(2\pi f_c t)\right]$$



Διαμόρφωση PM στενής ζώνης

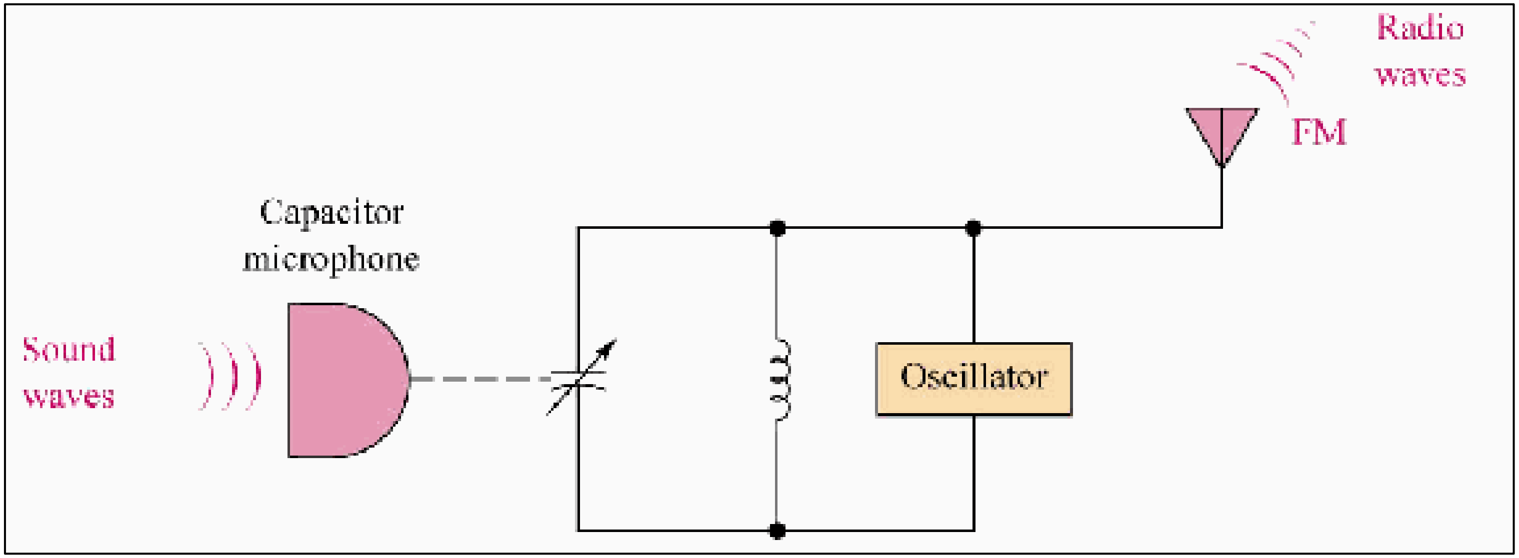


Άμεση FM

- Η συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα μέσω ενός VCO (Voltage-Controlled Oscillator)
- VCO: η έξοδος αλλάζει γραμμικά σε σχέση με την είσοδο
- Απλός VCO: συντονισμένο κύκλωμα με μεταβλητό πυκνωτή

Η βασική ιδέα

- Η χωρητικότητα του μικροφώνου μεταβάλλεται βάση του ηχητικού σήματος



Γιατί παράγεται σήμα FM;

$$f_c(t) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC(t)}}$$

$$C(t) = C_0 + \Delta C m(t)$$

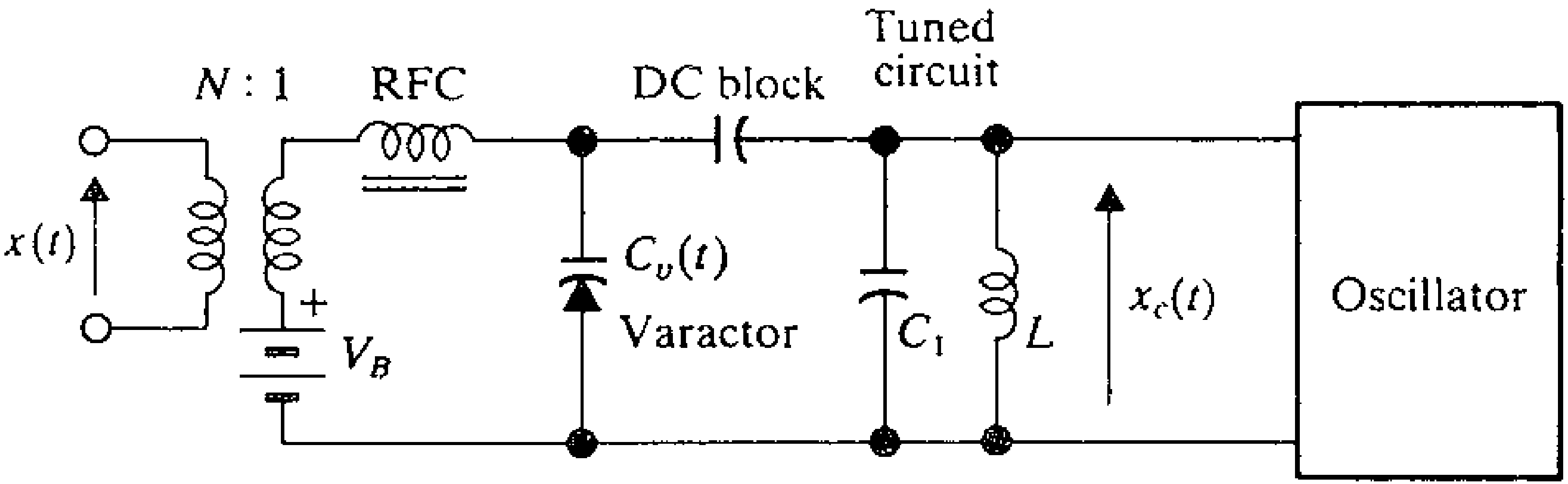
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

$$f_c = f_0\left(1 + \Delta C m(t)/C_0\right)^{-1/2} \approx f_0\left(1 - \frac{\Delta C}{2C_0} m(t)\right)$$

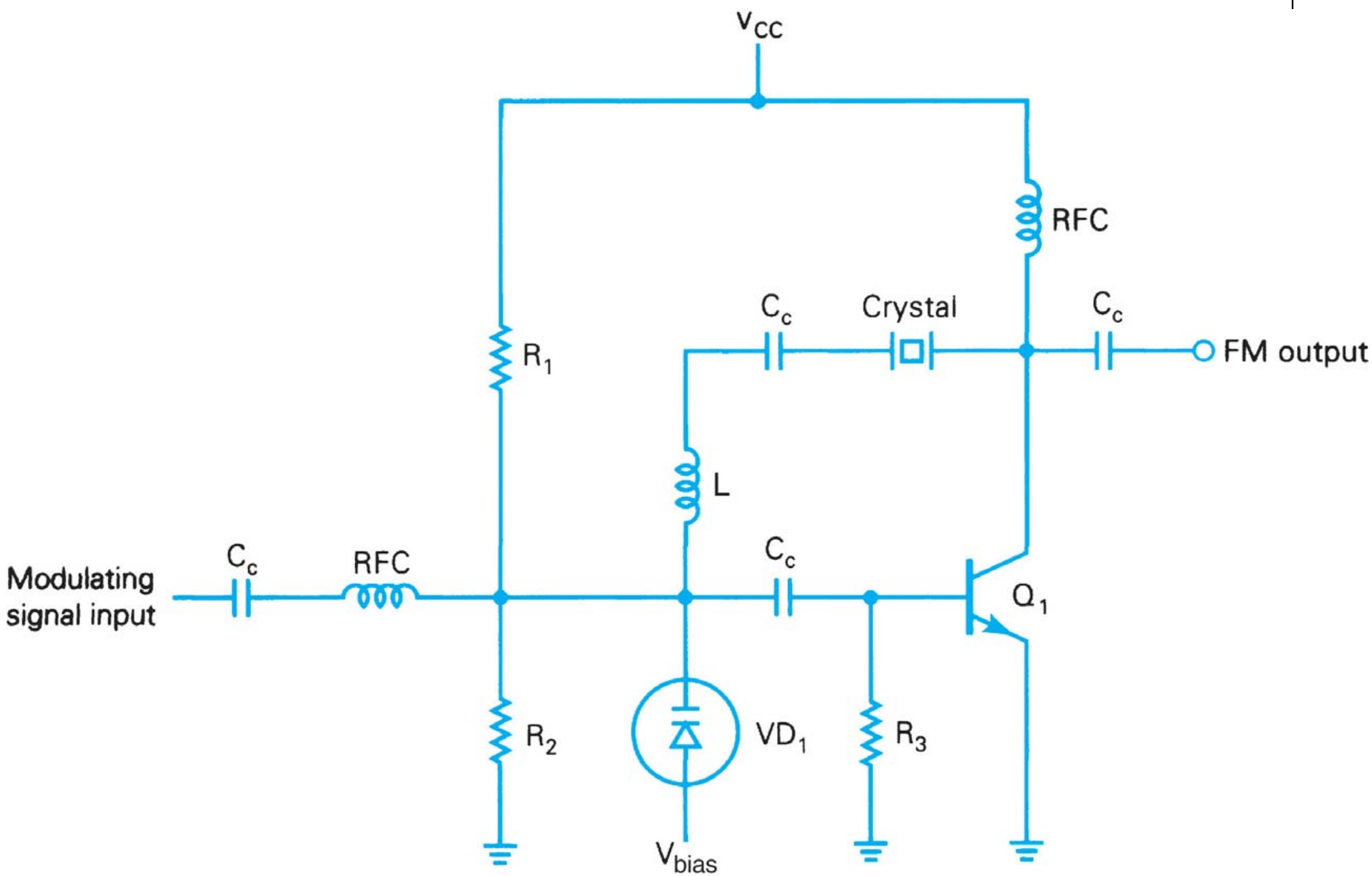
Ιδιότητες άμεσης FM

- Απλό, φτηνό κύκλωμα
- Δυσκολία σταθεροποίησης συχνότητας φέροντος
  - Η συχνότητα του φέροντος ολισθαίνει

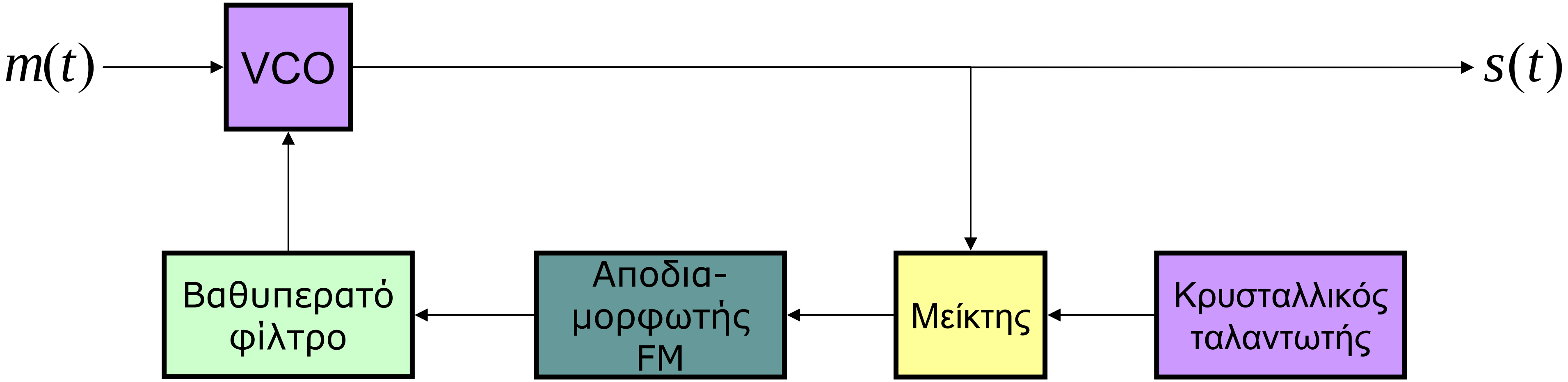
Πρακτική υλοποίηση άμεσης FM



Ένα ακόμη κύκλωμα άμεσης FM



Σταθεροποίηση συχνότητας στην άμεση FM



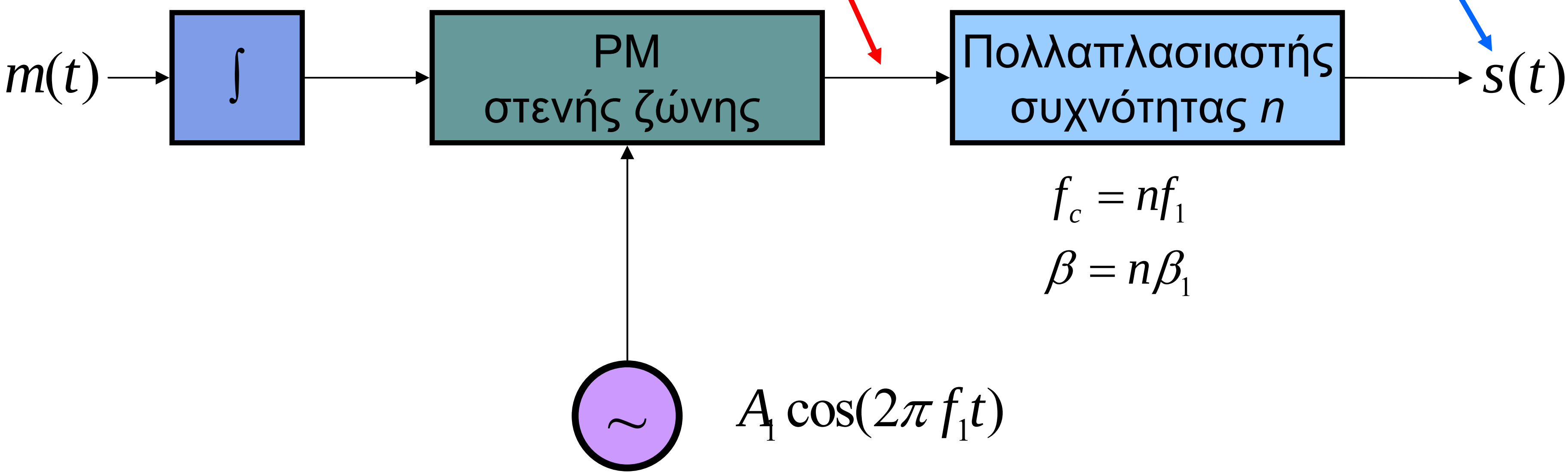
Έμμεση FM

- Πρώτα, παραγωγή σήματος FM στενής ζώνης
- Μετά το σήμα FM πολλαπλασιάζεται κατά συχνότητα ώστε να προκύψει η επιθυμητή απόκλιση συχνότητας
- Εύκολη σταθεροποίηση της συχνότητας φέροντος
- Η εμπορική ραδιοφωνία FM βασίζεται σε αυτή την τεχνική

Έμμεση FM

$$s(t) = A_c \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi n k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right]$$

$$s_1(t) = A_c \cos\left[2\pi f_1 t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)d\tau\right]$$

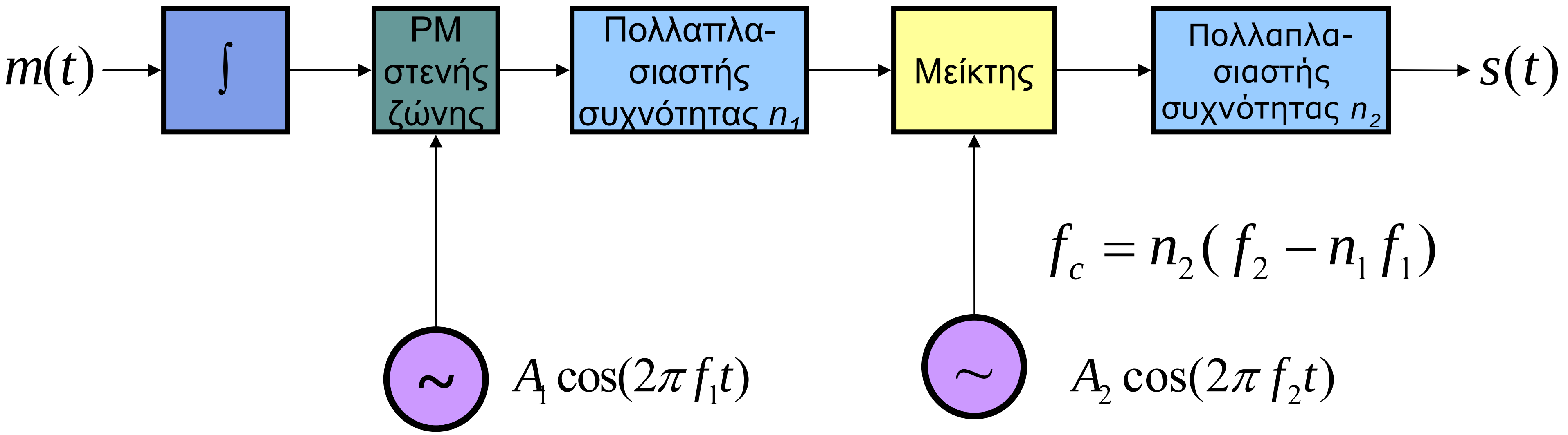


Έμμεση FM σε δύο στάδια

- Ο πολλαπλασιασμός επί n οδηγεί ταυτόχρονα σε πολλαπλασιασμό της συχνότητας του φέροντος f_c, της απόκλισης συχνότητας Δf και του δείκτη διαμόρφωσης β επί n
- Τι γίνεται εάν η ανάγκη για πολλαπλασιασμό συχνότητας φέροντος και δείκτη διαμόρφωσης διαφέρει;

Έμμεση FM σε δύο στάδια

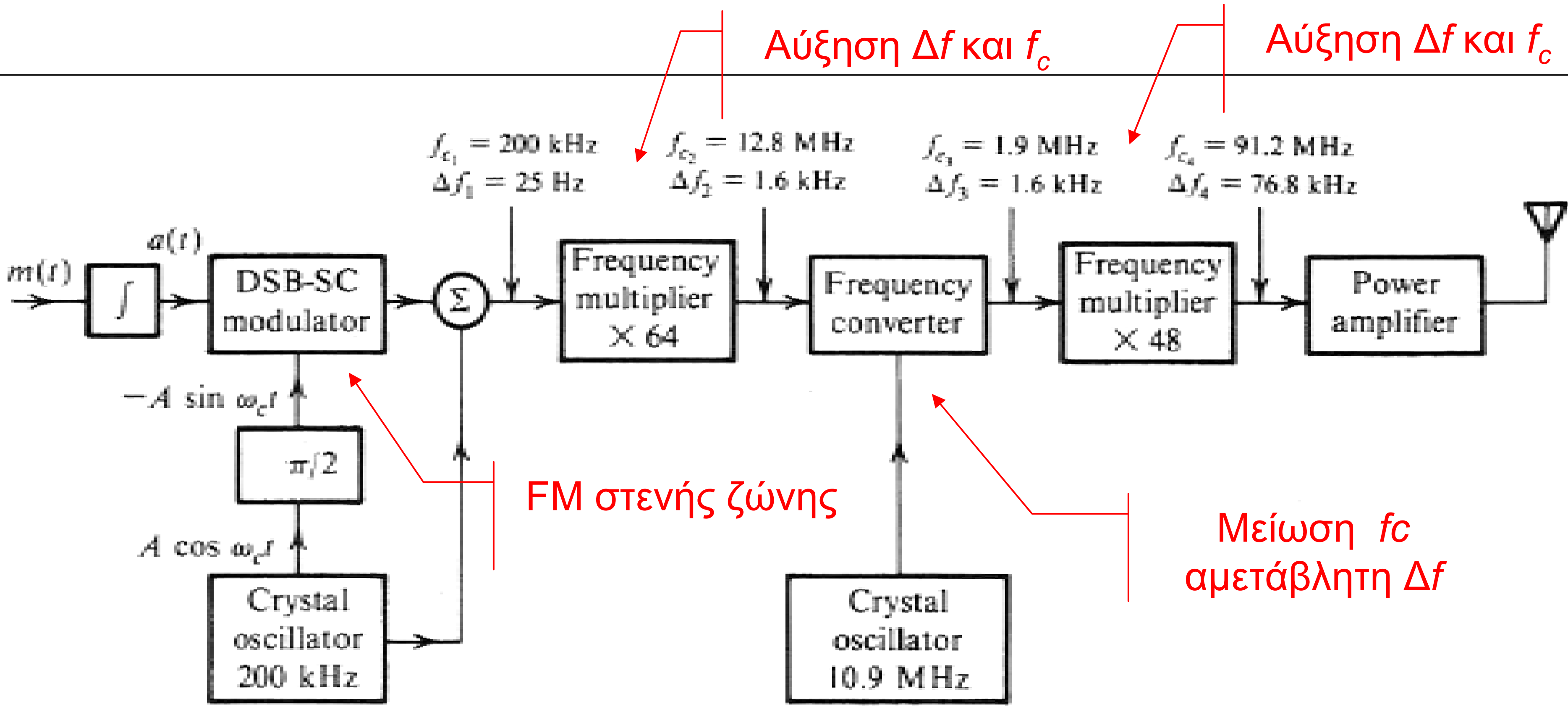
$$\beta = n_1 n_2 \beta_1$$



$$f_c = n_2 (f_2 - n_1 f_1)$$

Πομπός Armstrong

- Συνήθης υλοποίηση έμμεσης FM σε δύο στάδια



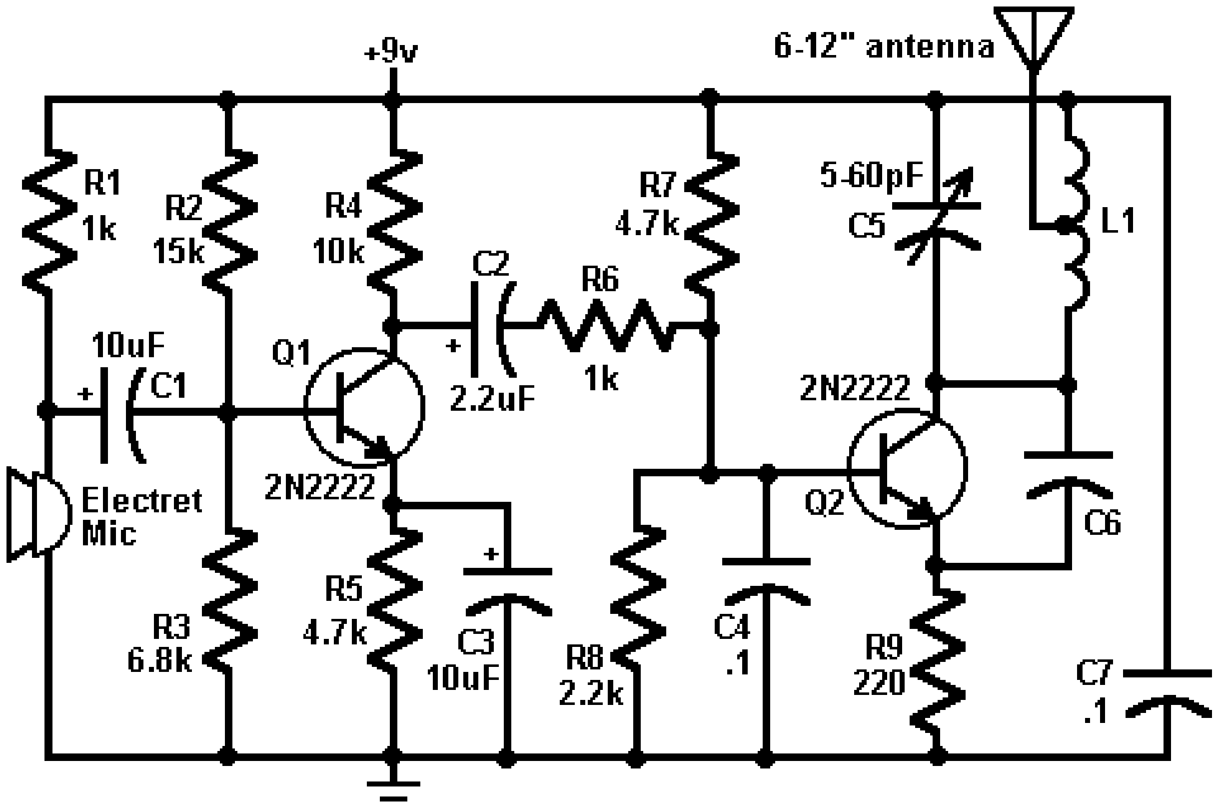
Προσωπική εκπομπή FM

- Στις ΗΠΑ η εκπομπή FM σε μικρές αποστάσεις είναι νόμιμη
- Π.χ., μπορεί κανείς να ακούσει μουσική στο ραδιόφωνο του αυτοκινήτου του μέσω του iPod
  - Συνδέοντας το iTrip που χρησιμοποιεί εκπομπή FM http://www.griffintechnology.com/products/itrip/
- Στην ΕΕ εκδόθηκε πρόσφατα (Μάιος 2007) σύσταση για τα κράτη μέλη ώστε να επιτραπεί η προσωπική εκπομπή με ισχύ κάτω από 50 nW ERP (Effective radiated power)
  - Απόσταση εκπομπής περί τα 8 m

Προσωπική εκπομπή FM

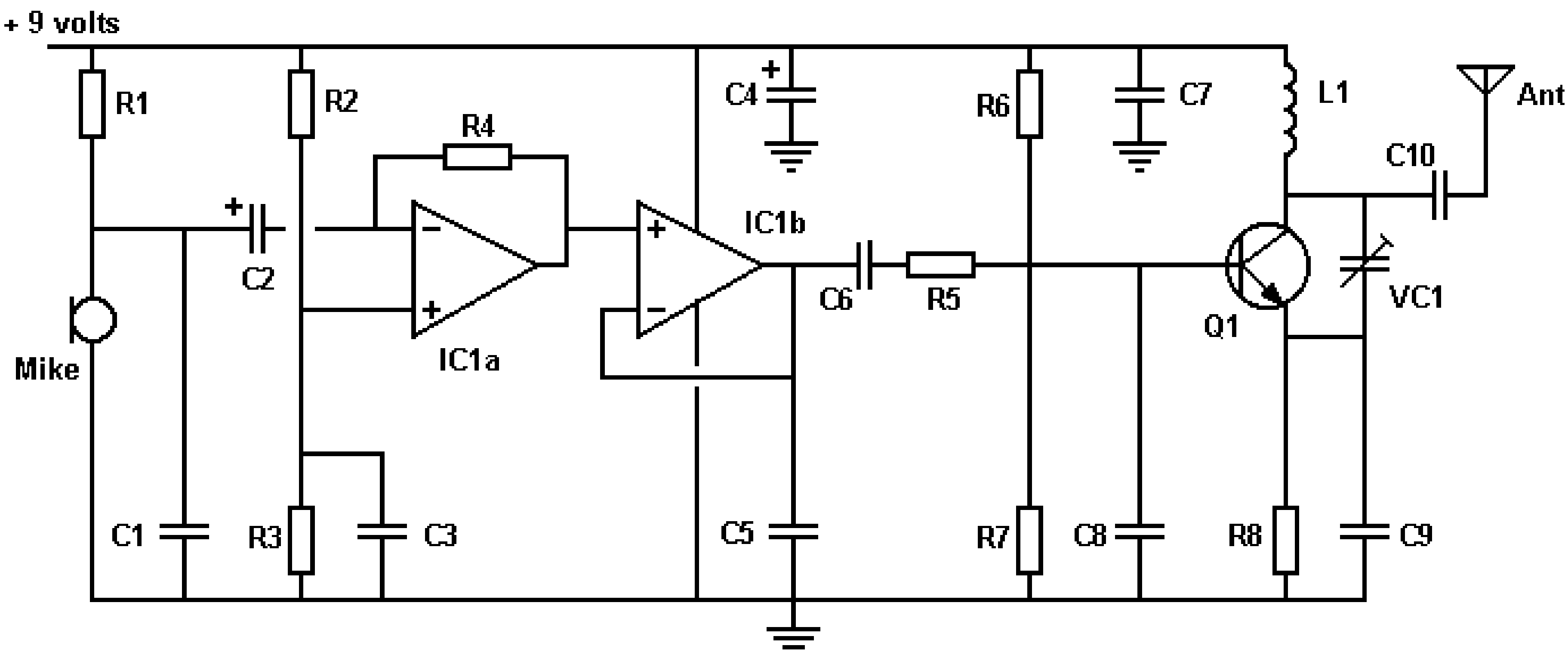
Απλός πομπός FM

- Ένας απλός πομπός FM http://www.free-electronic-circuits.com/circuits/fm-transmitter.html



Απλός πομπός FM

- Και ένας άλλος από το http://www.zen22142.zen.co.uk/Circuits/rf/txcct.htm



Απόκριση γραμμικών συστημάτων

Απόκριση γραμμικών φίλτρων σε είσοδο FM

- Η μαθηματική λύση σε κλειστή μορφή είναι εξαιρετικά δύσκολη στη γενική περίπτωση (έξοδος ζωνοπερατού συστήματος σε ζωνοπερατή είσοδο)

$$s(t) \longrightarrow \boxed{h(t)} \longrightarrow y(t)$$

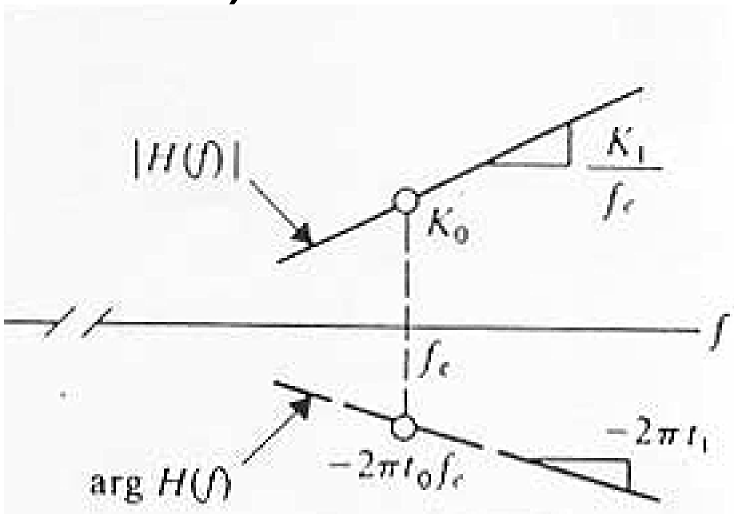
- Μπορούμε να εργαστούμε με το ισοδύναμο βαθυπερατό φίλτρο και τις μιγαδικές περιβάλλουσες

$$\tilde{s}(t) \longrightarrow \boxed{\tilde{h}(t)} \longrightarrow \tilde{y}(t)$$

- Εν γένει δεν οδηγεί σε κλειστές λύσεις, παρότι η αριθμητική λύση με χρήση υπολογιστή είναι εύκολη

Γραμμική παραμόρφωση

- Προσέγγιση γραμμικής απόκρισης πλάτους και φάσης (linear distortion)



$$H(f+f_c)=\left(K_0+\frac{K_1}{f_c}f\right)\exp\{-j2\pi(t_0 f_c+t_1 f)\},\qquad f+f_c>0$$

Γραμμική παραμόρφωση

- Η έξοδος είναι

$$y(t) = A_c\left[K_0 + \frac{K_1}{2\pi f_c}\frac{d}{dt}\phi(t-t_1)\right]\cos\left[2\pi f_c(t-t_0)+\phi(t-t_1)\right]$$

$$= A_c\left[K_0 + \frac{K_1\Delta f}{f_c}x(t-t_1)\right]\cos\left[2\pi f_c(t-t_0)+\phi(t-t_1)\right]$$

- Παρουσιάζεται μετατροπή FM σε AM σε συνδυασμό με καθυστέρηση φέροντος t_0 και καθυστέρηση ομάδας t_1

Παραμόρφωση πλάτους

- Η μετατροπή FM σε AM δεν είναι ιδιαίτερο πρόβλημα διότι μπορεί να απαλειφθεί με χρήση περιοριστή (limiter)
  - Εν γένει μπορούμε να αγνοήσουμε την παραμόρφωση πλάτους που εισάγει οποιαδήποτε ομαλή καμπύλη ενίσχυσης

Παραμόρφωση φάσης

- Όμως η παραμόρφωση φάσης, λόγω μη γραμμικής απόκρισης του φίλτρου, αποτελεί πρόβλημα γιατί επηρεάζει το σήμα πληροφορίας
  - Απαιτεί χρήση ισοσταθμιστών (equalizer) για την αντιμετώπισή της

Απόκριση μη γραμμικών συστημάτων

Απόκριση σε ασθενείς μη γραμμικότητες

- Θεωρήστε μια ασθενή μη γραμμικότητα, π.χ.

$$\upsilon_0(t) = a_1\upsilon_i(t) + a_2\upsilon_i^2(t) + a_3\upsilon_i^3(t)$$

$$\upsilon_i(t) = A_c \cos\left[2\pi f_c + \phi(t)\right]$$

$$\phi(t) = 2\pi k_f \int_0^t m(\tau)d\tau$$

- η έξοδος είναι τότε

Απόκριση σε ασθενείς μη γραμμικότητες

$$\upsilon_0(t) = \frac{1}{2}a_2 A_c^2 + \left(a_1 A_c + \frac{3}{4}a_3 A_c^3 \right)\cos\left[2\pi f_c + \phi(t)\right]$$

$$+\frac{1}{2}a_2 A_c^2 \cos\left[4\pi f_c + 2\phi(t)\right]$$

$$+\frac{1}{4}a_3 A_c^3 \cos\left[6\pi f_c + 3\phi(t)\right]$$

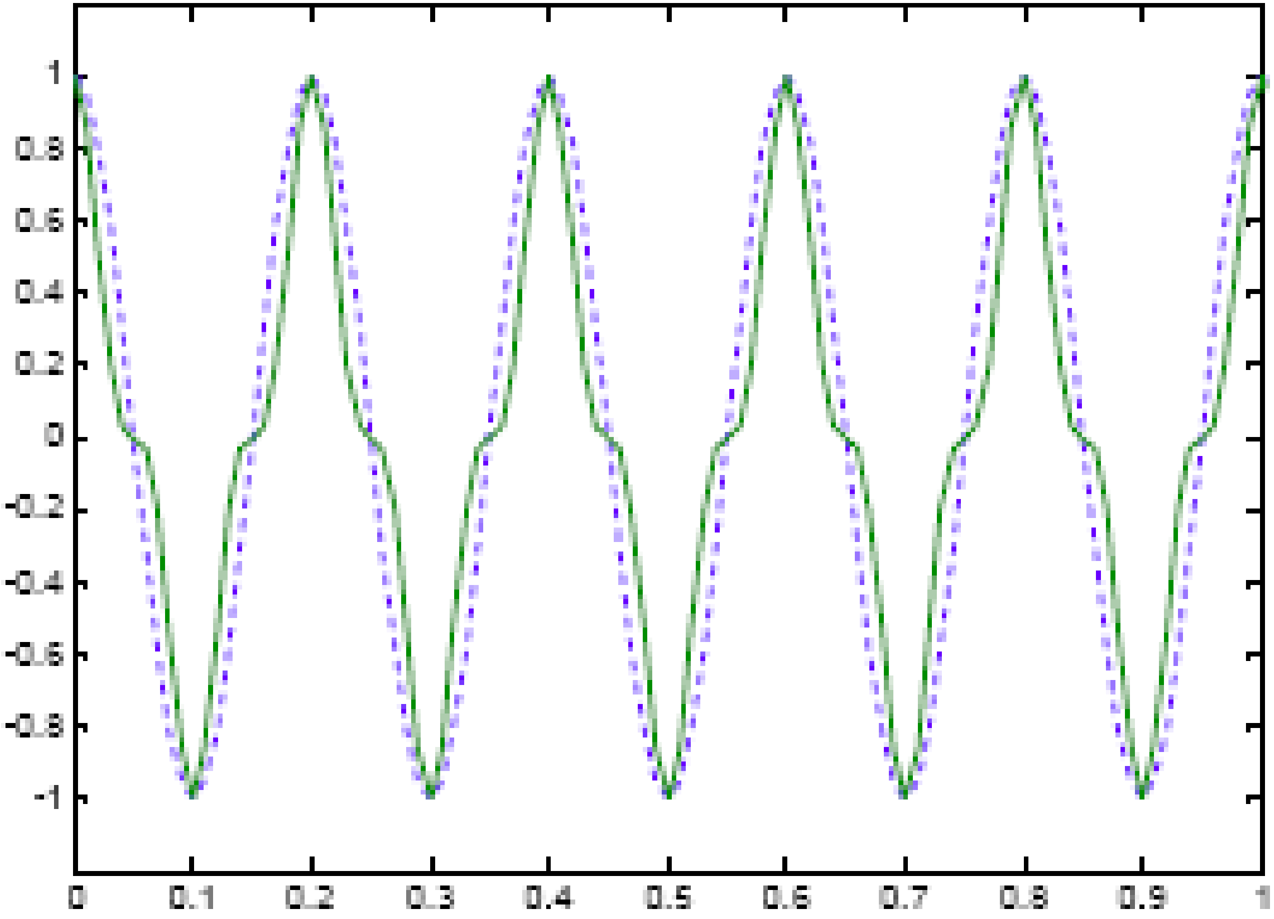
- και μετά από τη διάβαση μέσω ζωνοπερατού φίλτρου

$$\upsilon_0(t) = \left(a_1 A_c + \frac{3}{4}a_3 A_c^3 \right)\cos\left[2\pi f_c + \phi(t)\right]$$

Απόκριση σε ασθενείς μη γραμμικότητες

- επομένως η ασθενής μη γραμμικότητα μπορεί να δράσει ως ενισχυτής
- είτε ως πολλαπλασιαστής συχνότητας εάν διατηρήσουμε τους όρους διπλάσιας ή τριπλάσιας συχνότητας

Παράδειγμα

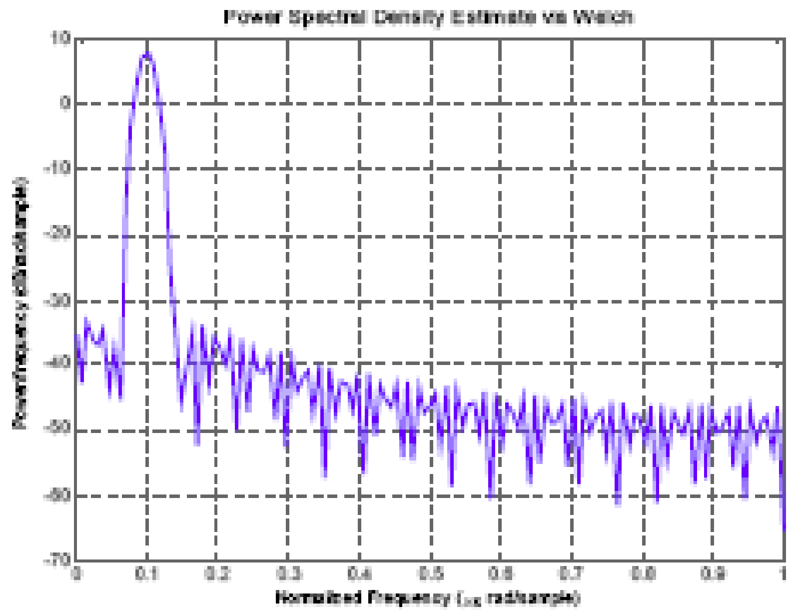


$$x(t) = \cos(2\pi 5t)$$

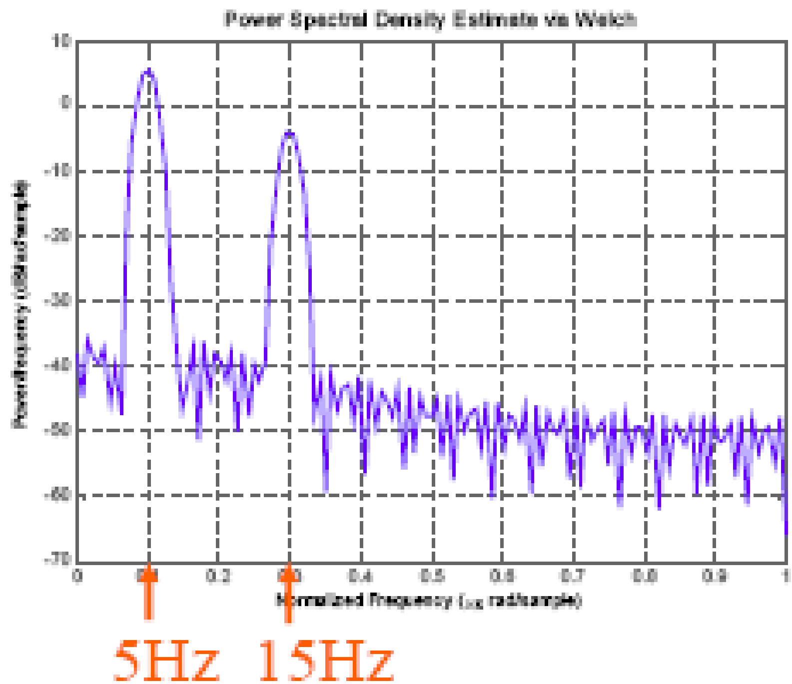
$$y(t) = x^3(t)$$

Παράδειγμα

- Φάσμα *x(t)*



- Φάσμα *y(t)*



Απόκριση σε ισχυρές μη γραμμικότητες

- Έστω η έξοδος μη γραμμικού στοιχείου

$$\upsilon_o(t) = T\left[\upsilon_i(t)\right], \qquad \upsilon_i(t) = A(t)\cos\theta_c(t)$$

- παρότι δεν είναι περιοδικό σήμα, μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Fourier συναρτήσει της γωνίας θ_c

$$\upsilon_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left|2a_n\right| \cos(n\theta_c + \angle a_n)$$

$$a_{\mathrm{n}} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} T\left[\upsilon_i(t)\right] e^{-jn\theta_c} d\theta_c$$

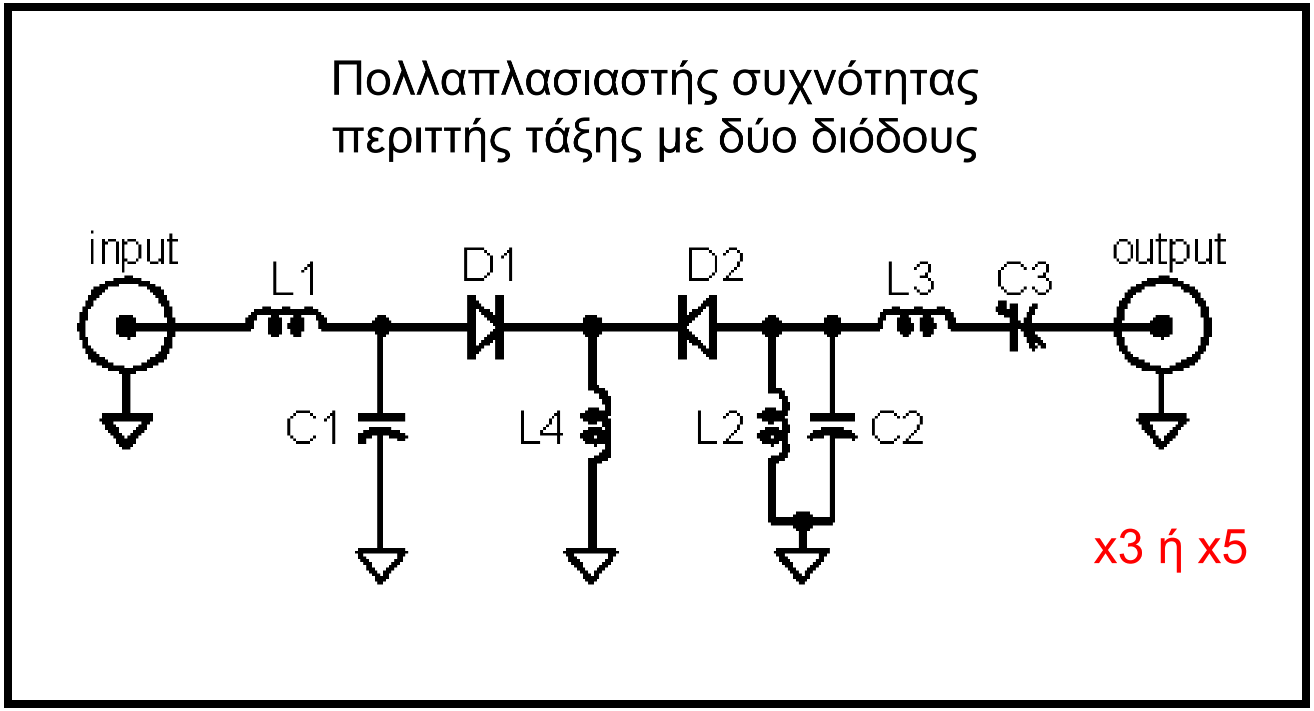
Απόκριση σε ισχυρές μη γραμμικότητες

- Η έξοδος θα είναι

$$
\begin{aligned}
\upsilon_o(t) = &\left|2a_1\right|\cos(2\pi f_c t + \phi(\tau) + \angle a_1) \\
&+\left|2a_2\right|\cos(4\pi f_c t + 2\phi(\tau) + \angle a_2) \\
&+\cdots
\end{aligned}
$$

- δηλαδή, λαμβάνουμε σήμα FM σε όλες τις αρμονικές της συχνότητας φέροντος
  - Εάν τα φάσματα των αρμονικών δεν επικαλύπτονται, μετά από διέλευση μέσω κατάλληλου ζωνοπερατού φίλτρου, έχουμε πολλαπλασιασμό συχνότητας

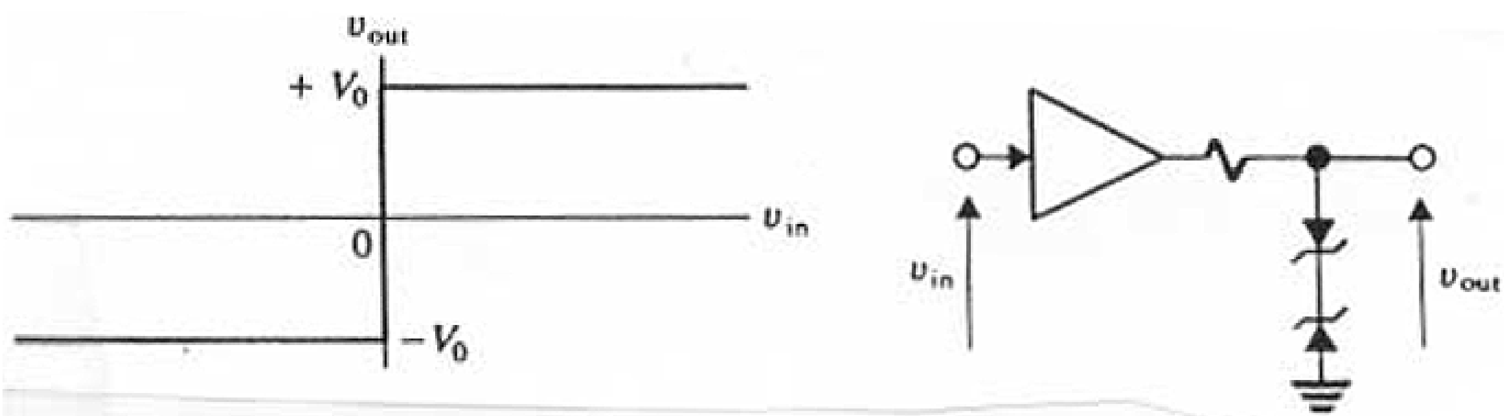
Απλός πολλαπλασιαστής



C1:100pF, L1:2.7μH. D:1N914
L2:.22μH, L3:1.8μH, L4:330μH
C2:120pF, C3:10pF.

Απόκριση περιοριστή

- Το κύκλωμα περιοριστή (limiter) χρησιμοποιείται για να λάβουμε σήμα FM με σταθερό πλάτος
  - Απαλοιφή φαινομένου μετατροπής FM σε AM



Απόκριση περιοριστή

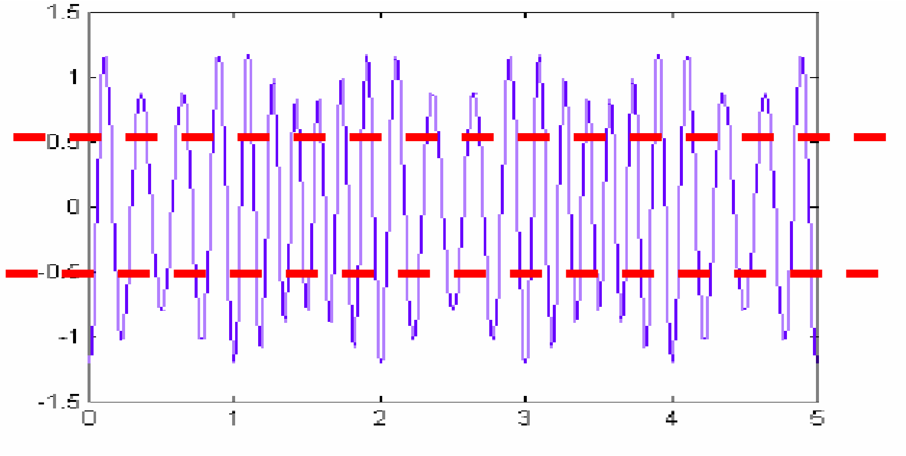
- Η έξοδος του περιοριστή θα είναι

$$\upsilon_o(t) = \frac{4V_0}{\pi}\cos\left[2\pi f_c t + \phi(\tau)\right] - \frac{4V_0}{3\pi}\cos\left[6\pi f_c t + 3\phi(\tau)\right] + \cdots$$

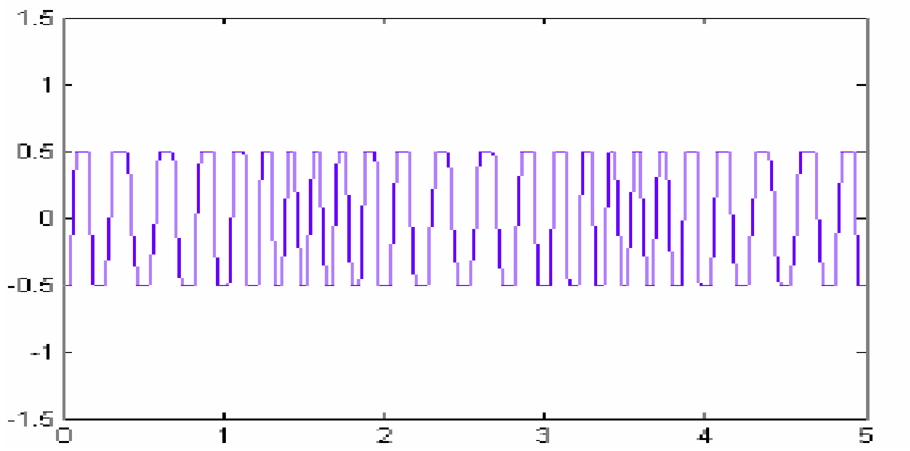
- Εάν δεν έχουμε επικάλυψη των φασμάτων των αρμονικών, η έξοδος ζωνοπερατού φίλτρου γύρω από τη συχνότητα του φέροντος είναι το αρχικό σήμα FM
- Εάν φιλτράρουμε κάποιο όρο ανώτερης τάξης έχουμε πολλαπλασιαστή συχνότητας

Παράδειγμα απόκρισης περιοριστή

- Πριν

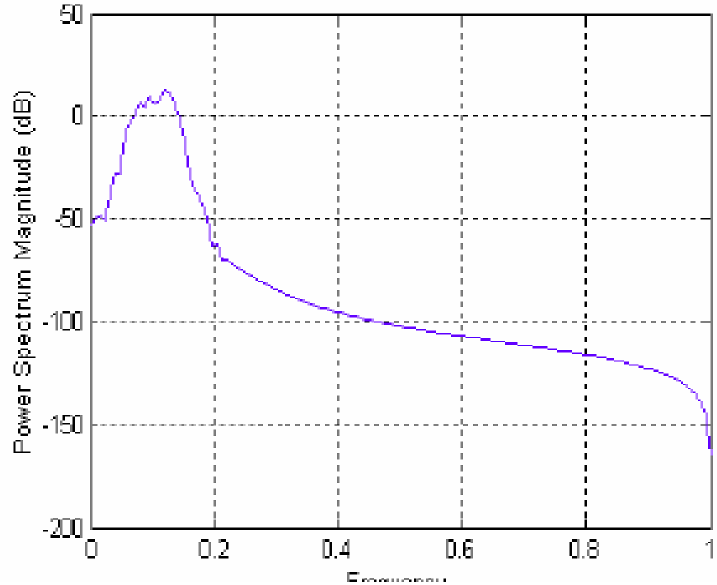


- Μετά

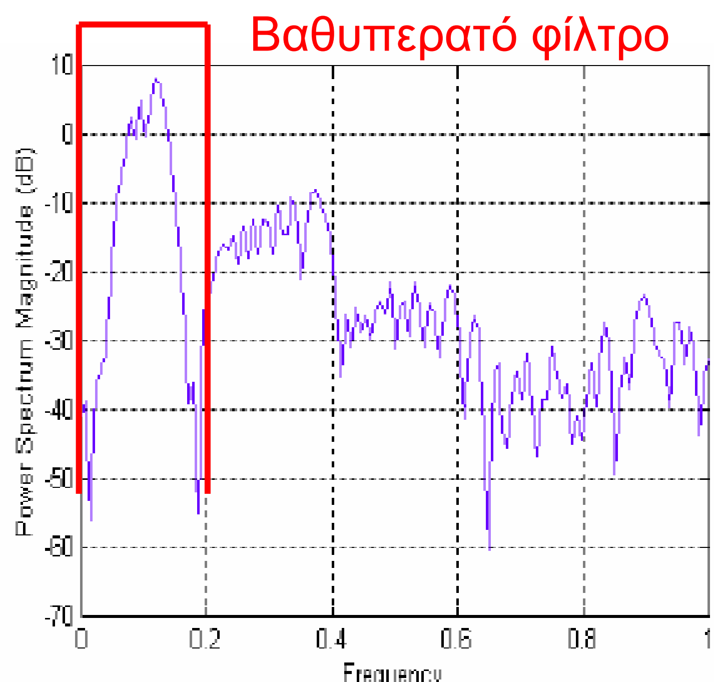


Παράδειγμα

- Φάσμα πριν τον περιοριστή

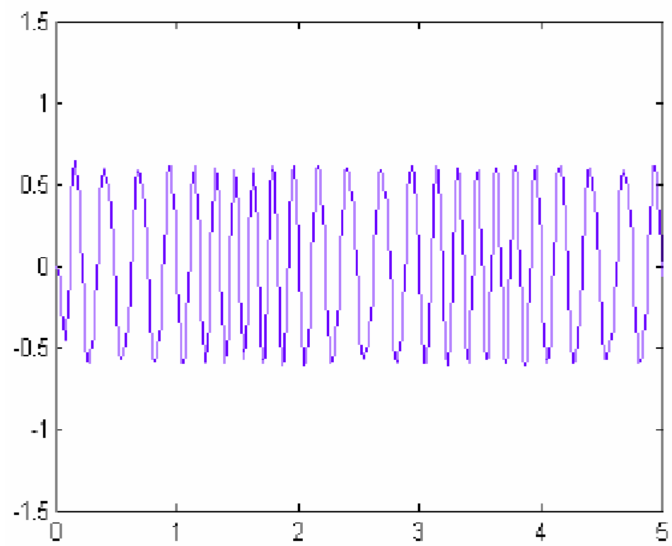


- Φάσμα μετά τον περιοριστή



Παράδειγμα

- Σήμα μετά το βαθυπερατό φίλτρο



- Φάσμα μετά το βαθυπερατό φίλτρο