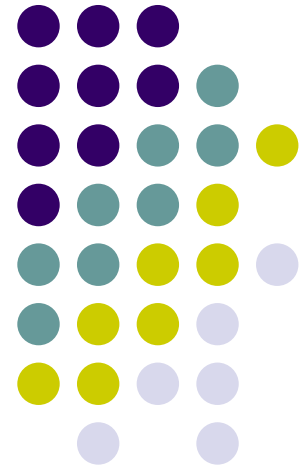
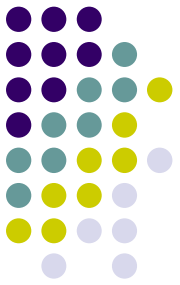


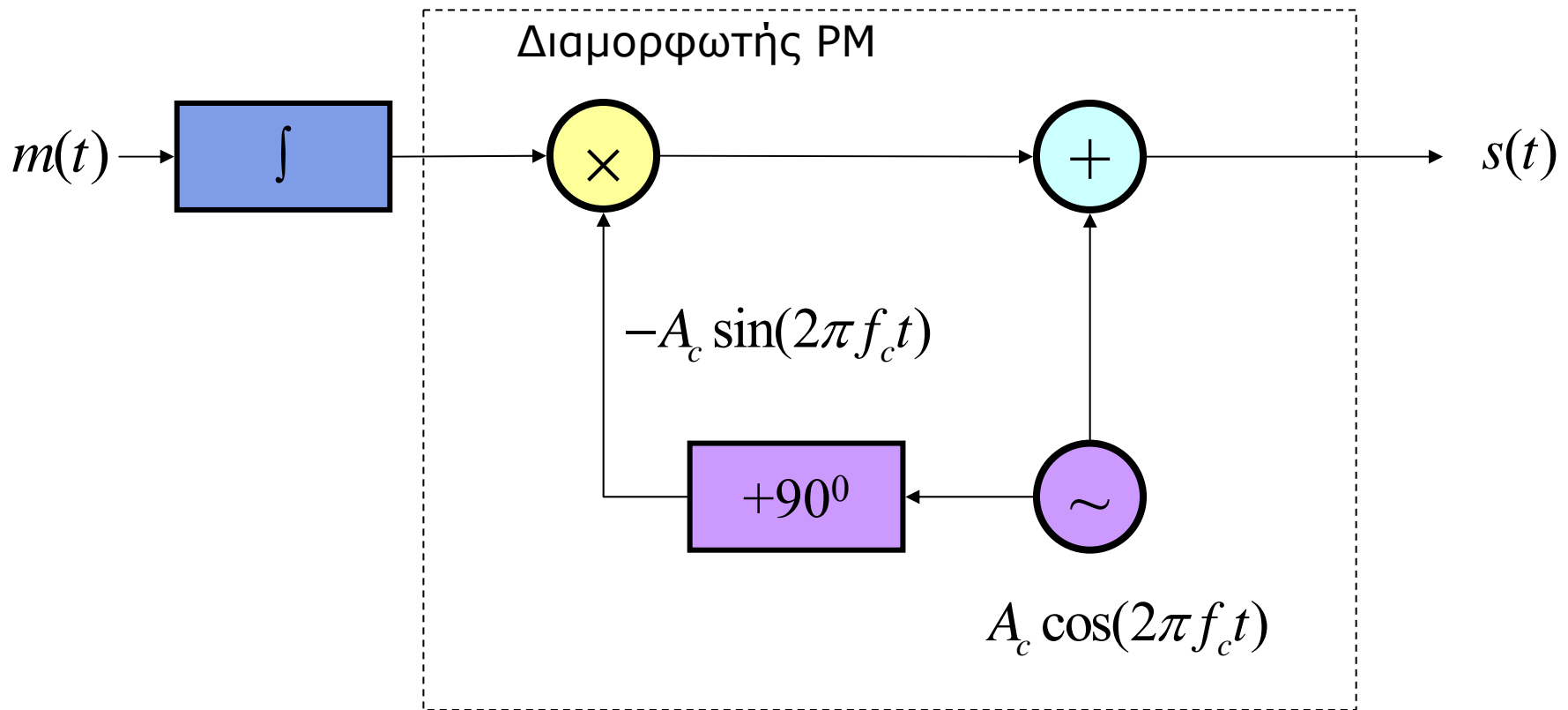
Παραγωγή σημάτων FM



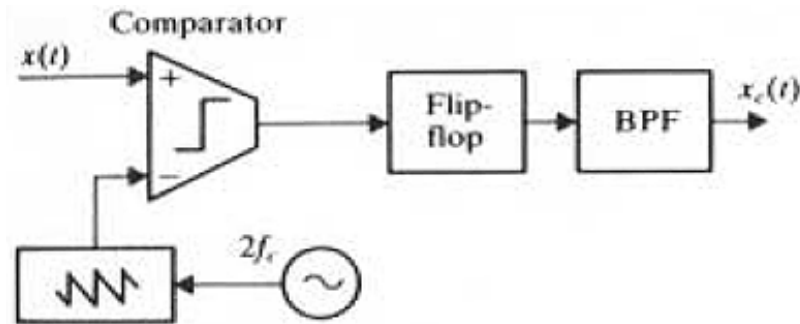
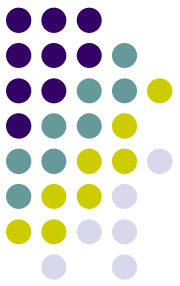
Διαμόρφωση FM στενής ζώνης



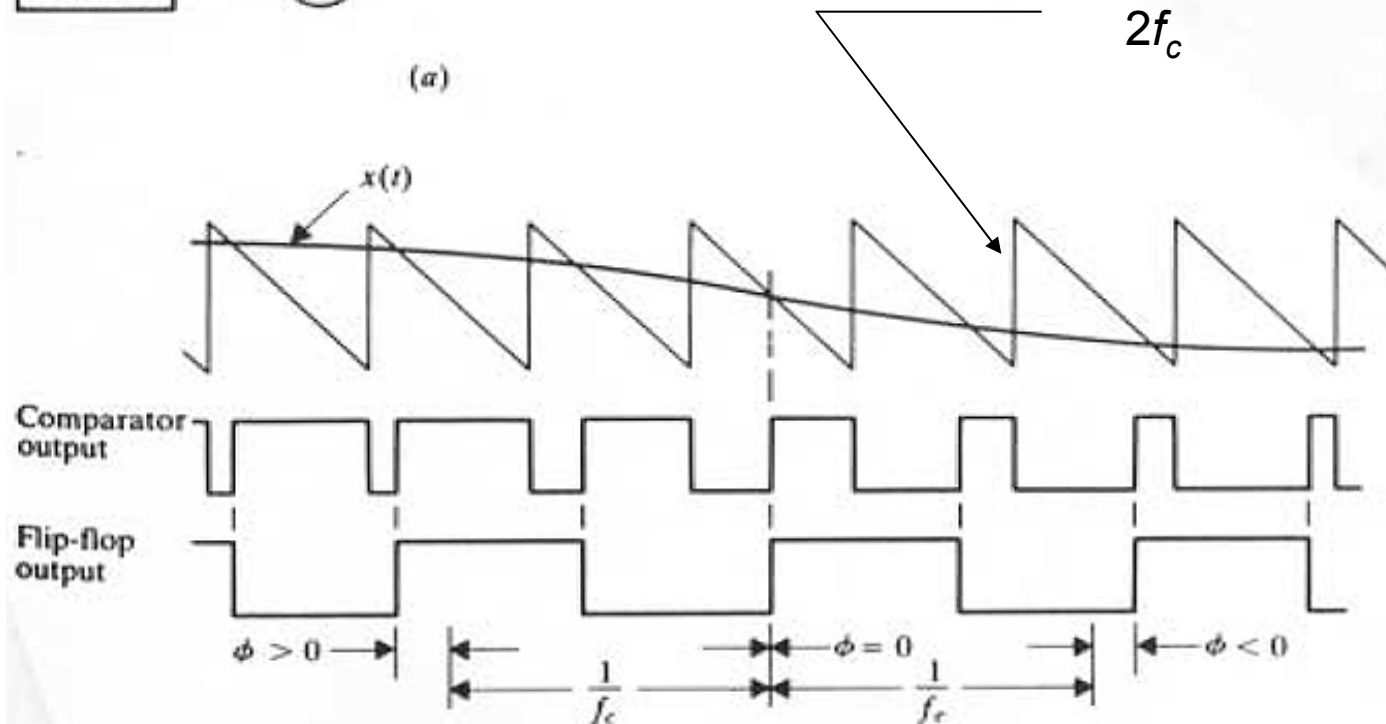
$$s(t) \approx A_c [\cos(2\pi f_c t) - \phi(t) \sin(2\pi f_c t)]$$



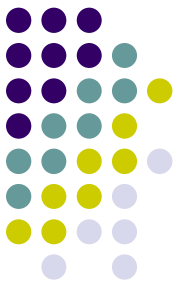
Διαμόρφωση PM στενής ζώνης



(a)

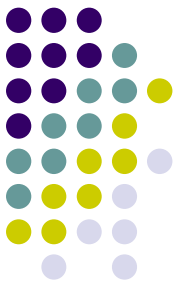


(b)



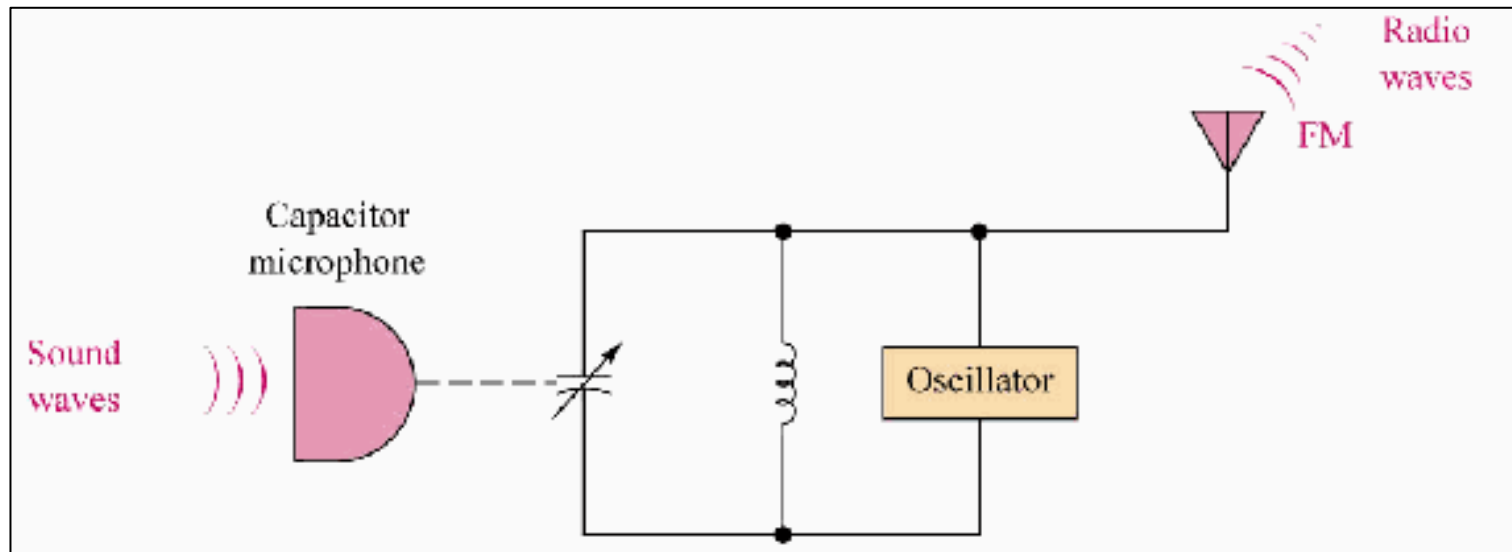
Άμεση FM

- 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

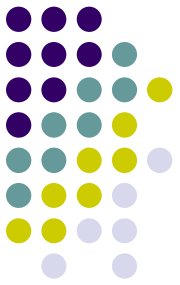


Η βασική ιδέα

- Η χωρητικότητα του μικροφώνου μεταβάλλεται βάση του ηχητικού σήματος



Γιατί παράγεται σήμα FM;

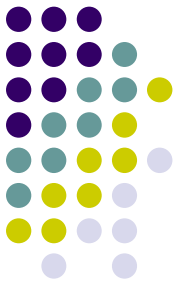


$$f_c(t) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC(t)}}$$

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

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

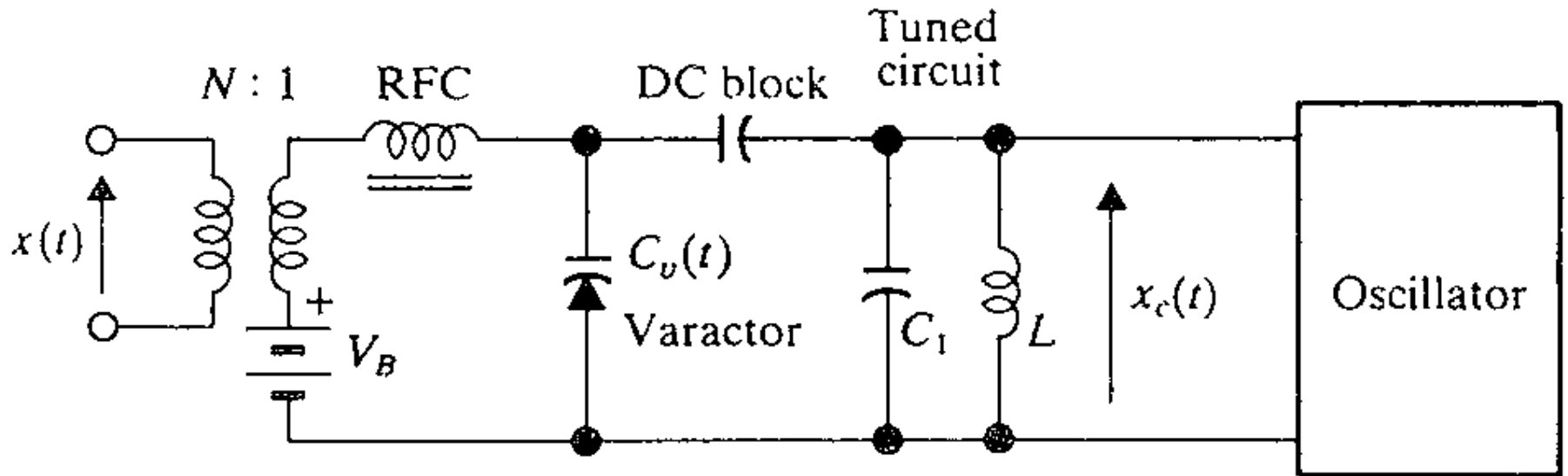
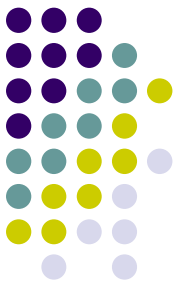
$$f_c = f_0 \left(1 + \Delta C m(t) / C_0\right)^{-1/2} \approx f_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_0} m(t)\right)$$



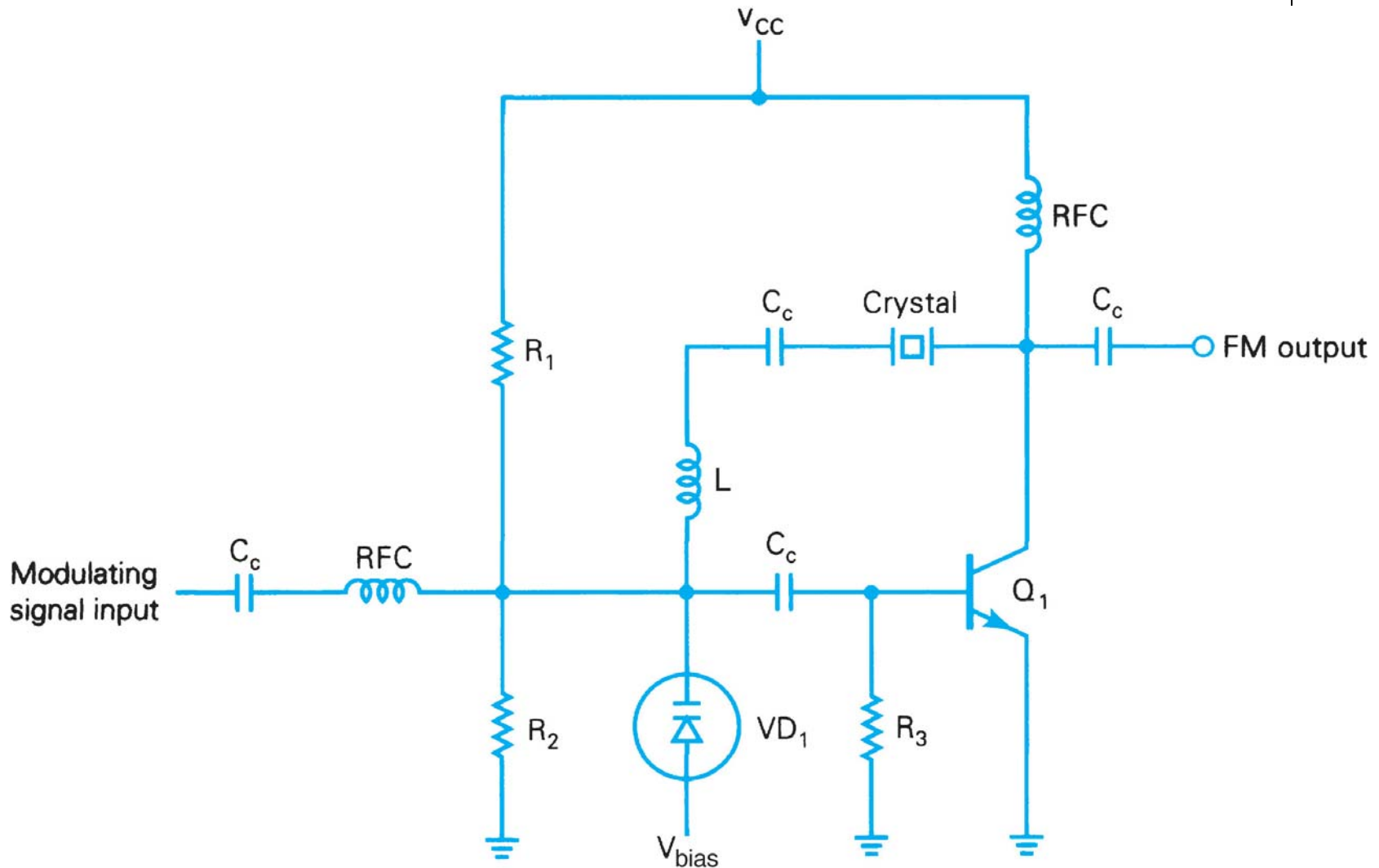
Ιδιότητες άμεσης FM

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

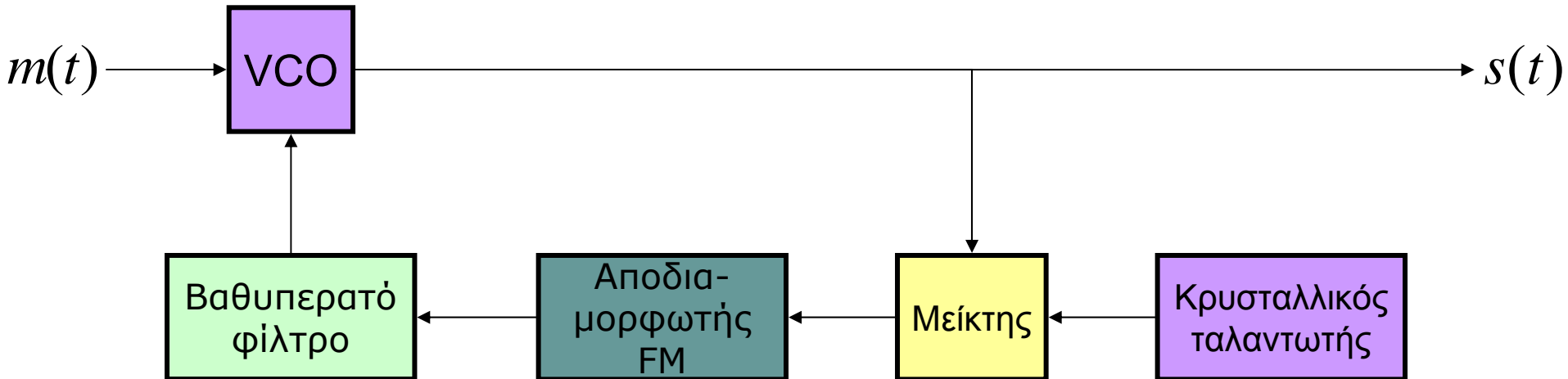
Πρακτική υλοποίηση άμεσης FM

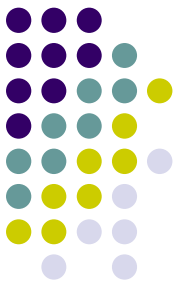


Ένα ακόμη κύκλωμα άμεσης FM



Σταθεροποίηση συχνότητας στην άμεση FM

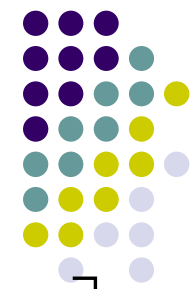




Έμμεση FM

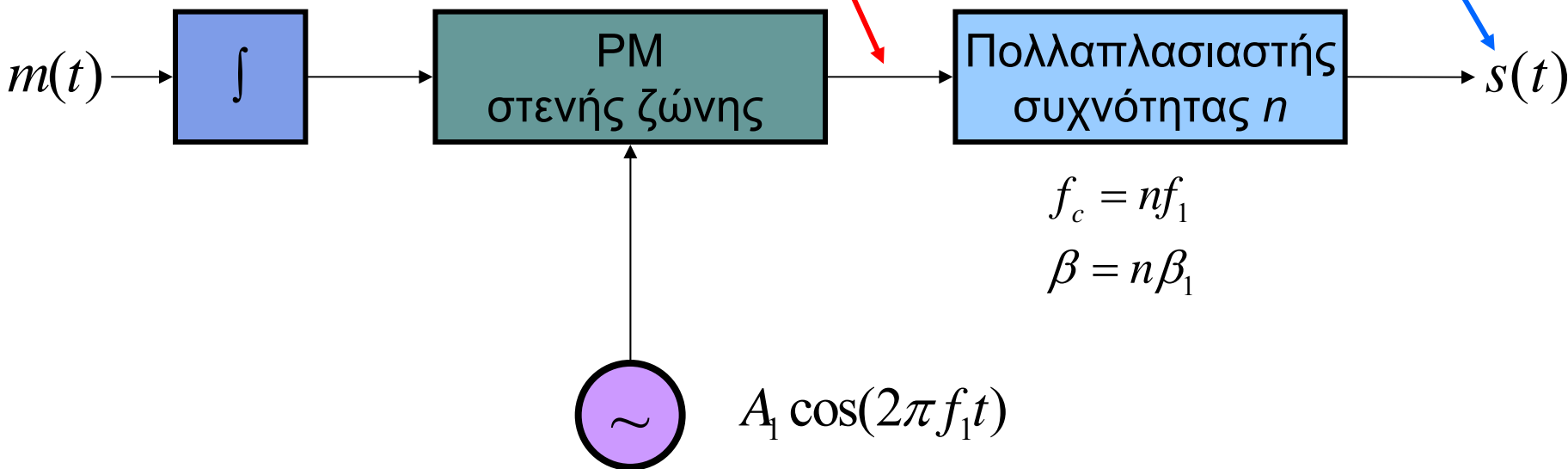
- Πρώτα, παραγωγή σήματος FM στενής ζώνης
- Μετά το σήμα FM πολλαπλασιάζεται κατά συχνότητα ώστε να προκύψει η επιθυμητή απόκλιση συχνότητας
- Εύκολη σταθεροποίηση της συχνότητας φέροντος
- Η εμπορική ραδιοφωνία FM βασίζεται σε αυτή την τεχνική

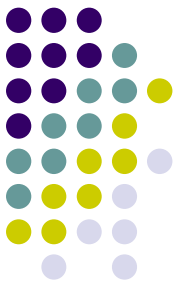
Έμμεση FM



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

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





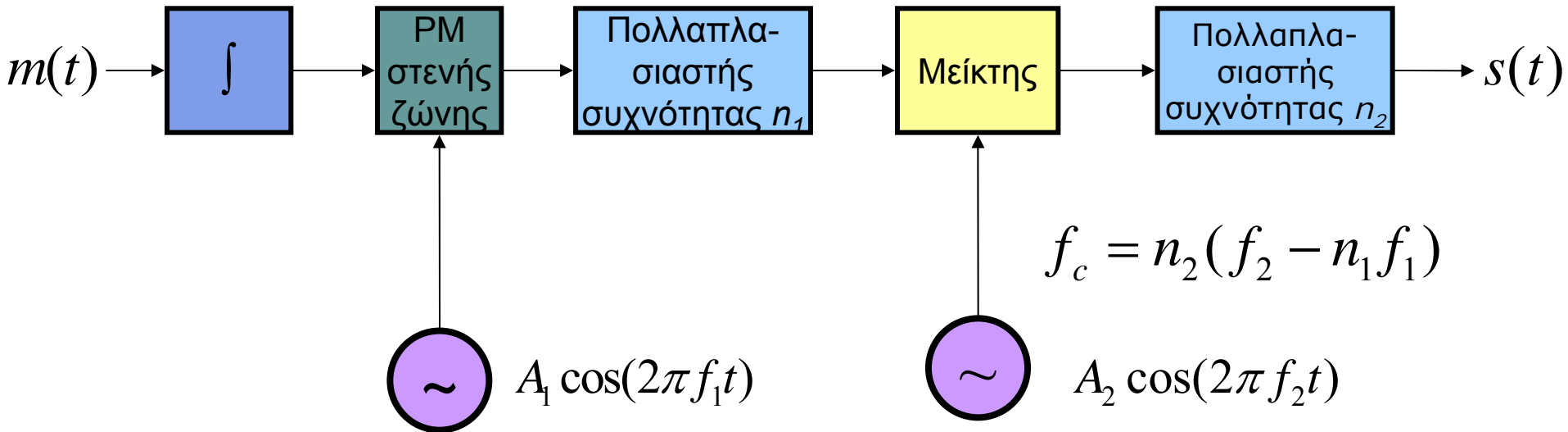
Έμμεση FM σε δύο στάδια

- 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



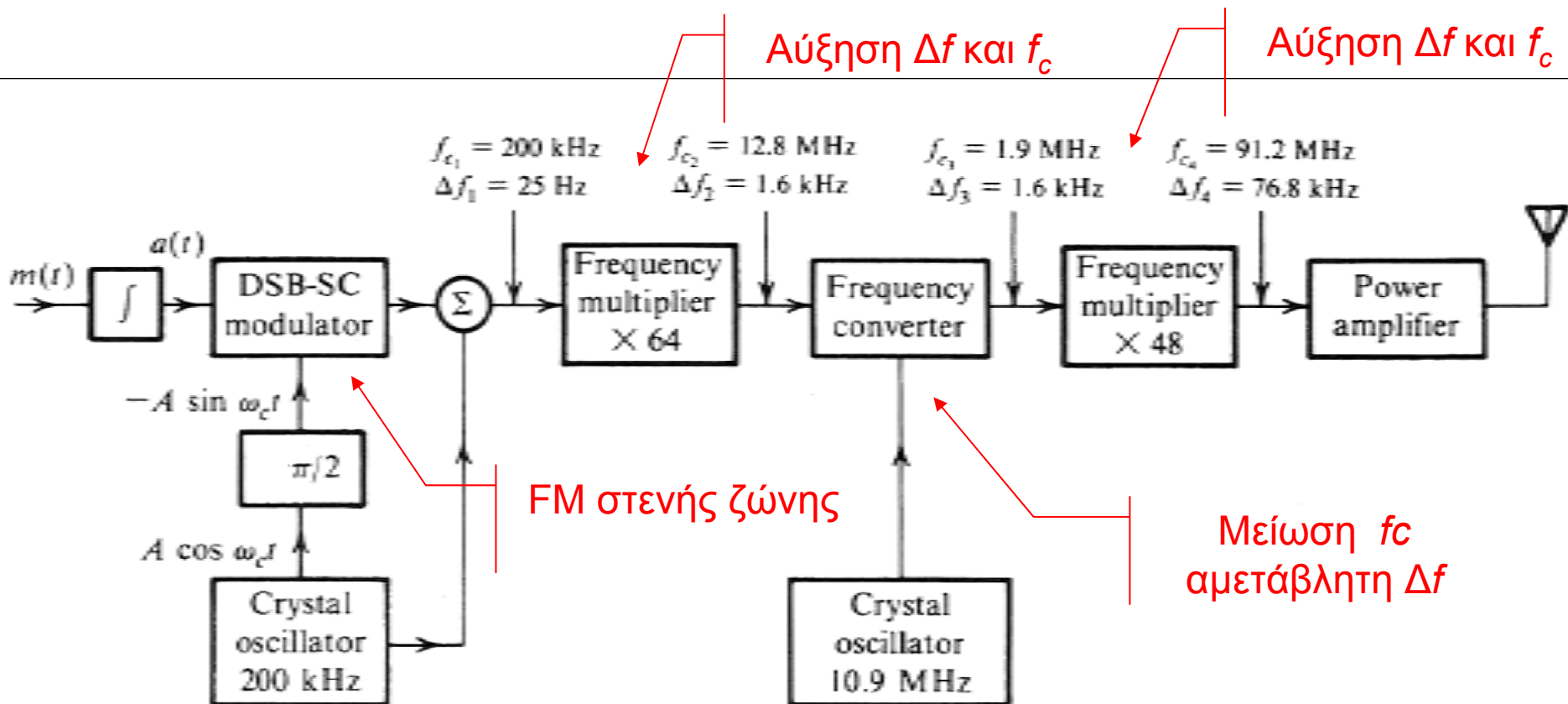
$$\beta = n_1 n_2 \beta_1$$

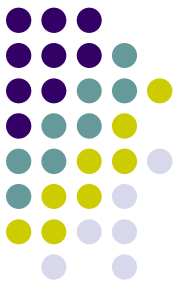




Πομπός Armstrong

- Συνήθης υλοποίηση έμμεσης FM σε δύο στάδια

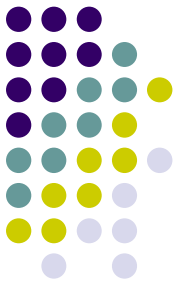


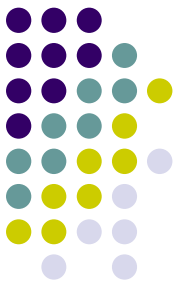


Προσωπική εκπομπή FM

- 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.griffintechology.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

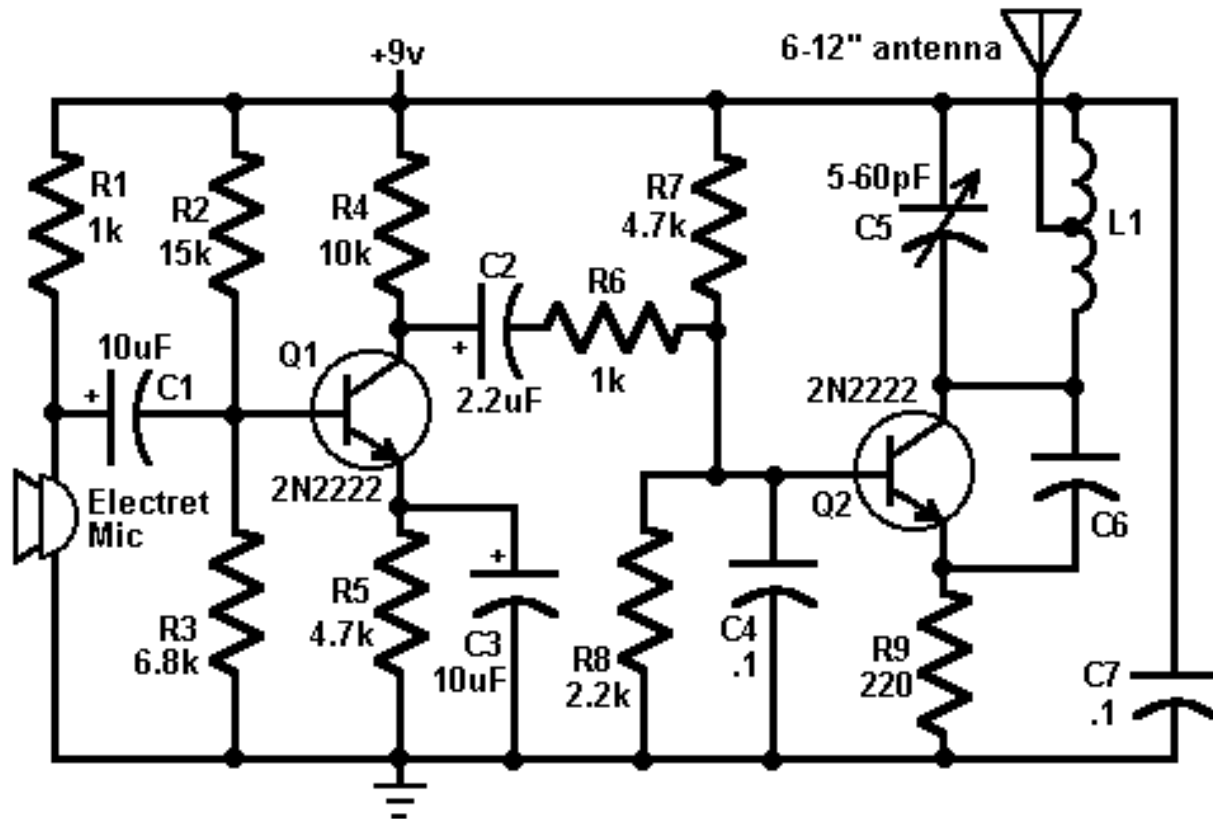
Προσωπική εκπομπή FM





Απλός πομπός FM

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

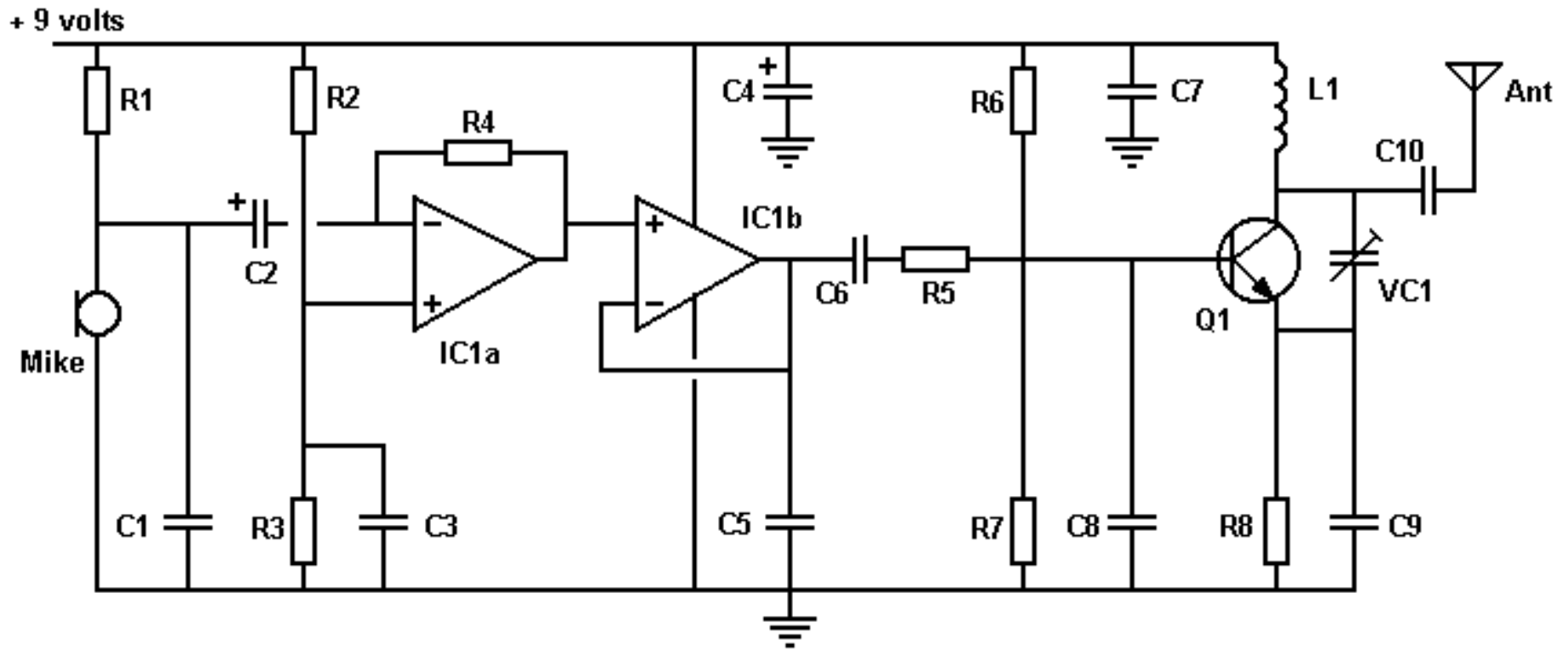


Απλός πομπός FM

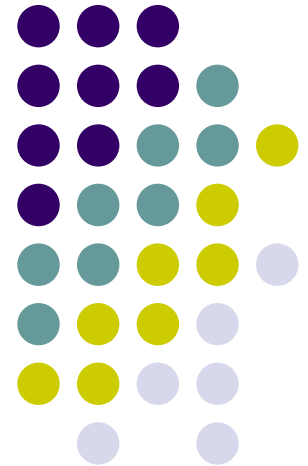


- Και ένας άλλος από το

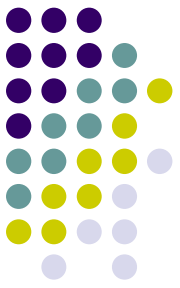
<http://www.zen22142.zen.co.uk/Circuits/rf/txcct.htm>



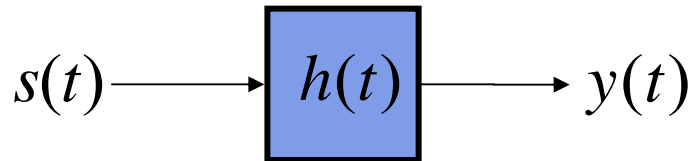
Απόκριση γραμμικών συστημάτων



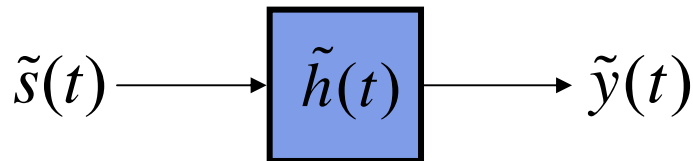
Απόκριση γραμμικών φίλτρων σε είσοδο FM



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



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

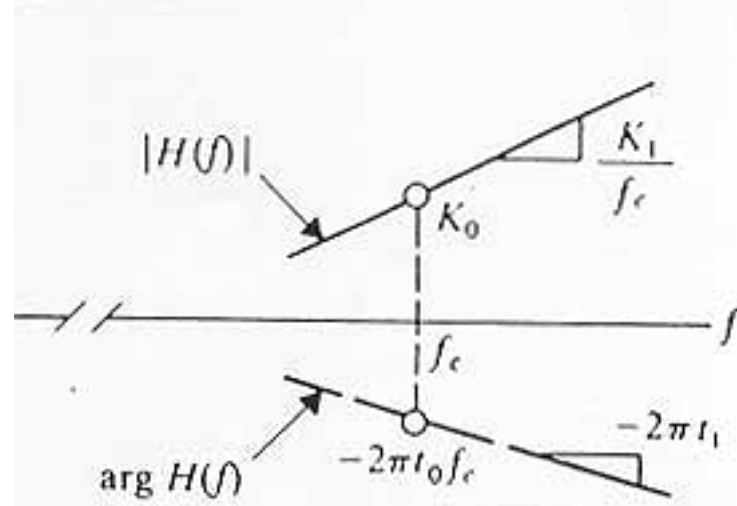


- Εν γένει δεν οδηγεί σε κλειστές λύσεις, παρότι η αριθμητική λύση με χρήση υπολογιστή είναι εύκολη



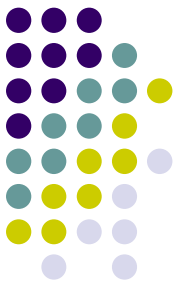
Γραμμική παραμόρφωση

- Προσέγγιση γραμμικής απόκρισης πλάτους και φάσης (linear distortion)



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

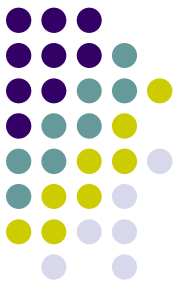
Γραμμική παραμόρφωση



- Η έξοδος είναι

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

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



Παραμόρφωση πλάτους

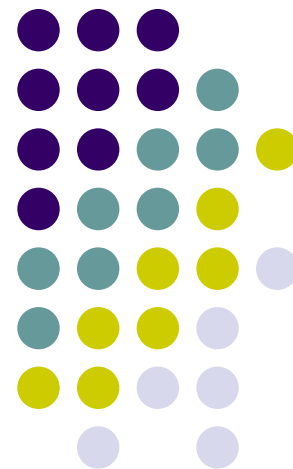
- Η μετατροπή FM σε AM δεν είναι ιδιαίτερο πρόβλημα διότι μπορεί να απαλειφθεί με χρήση **περιοριστή (limiter)**
 - Εν γένει μπορούμε να αγνοήσουμε την παραμόρφωση πλάτους που εισάγει οποιαδήποτε ομαλή καμπύλη ενίσχυσης



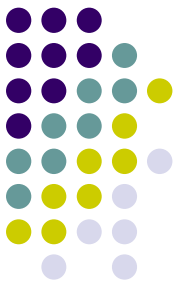
Παραμόρφωση φάσης

- 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.

$$v_0(t) = a_1 v_i(t) + a_2 v_i^2(t) + a_3 v_i^3(t)$$

$$v_i(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)]$$

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

- η έξοδος είναι τότε

Απόκριση σε ασθενείς μη γραμμικότητες



$$\begin{aligned}v_0(t) = & \frac{1}{2}a_2A_c^2 + \left(a_1A_c + \frac{3}{4}a_3A_c^3 \right) \cos[2\pi f_c + \phi(t)] \\ & + \frac{1}{2}a_2A_c^2 \cos[4\pi f_c + 2\phi(t)] \\ & + \frac{1}{4}a_3A_c^3 \cos[6\pi f_c + 3\phi(t)]\end{aligned}$$

- και μετά από τη διάβαση μέσω ζωνοπερατού φίλτρου

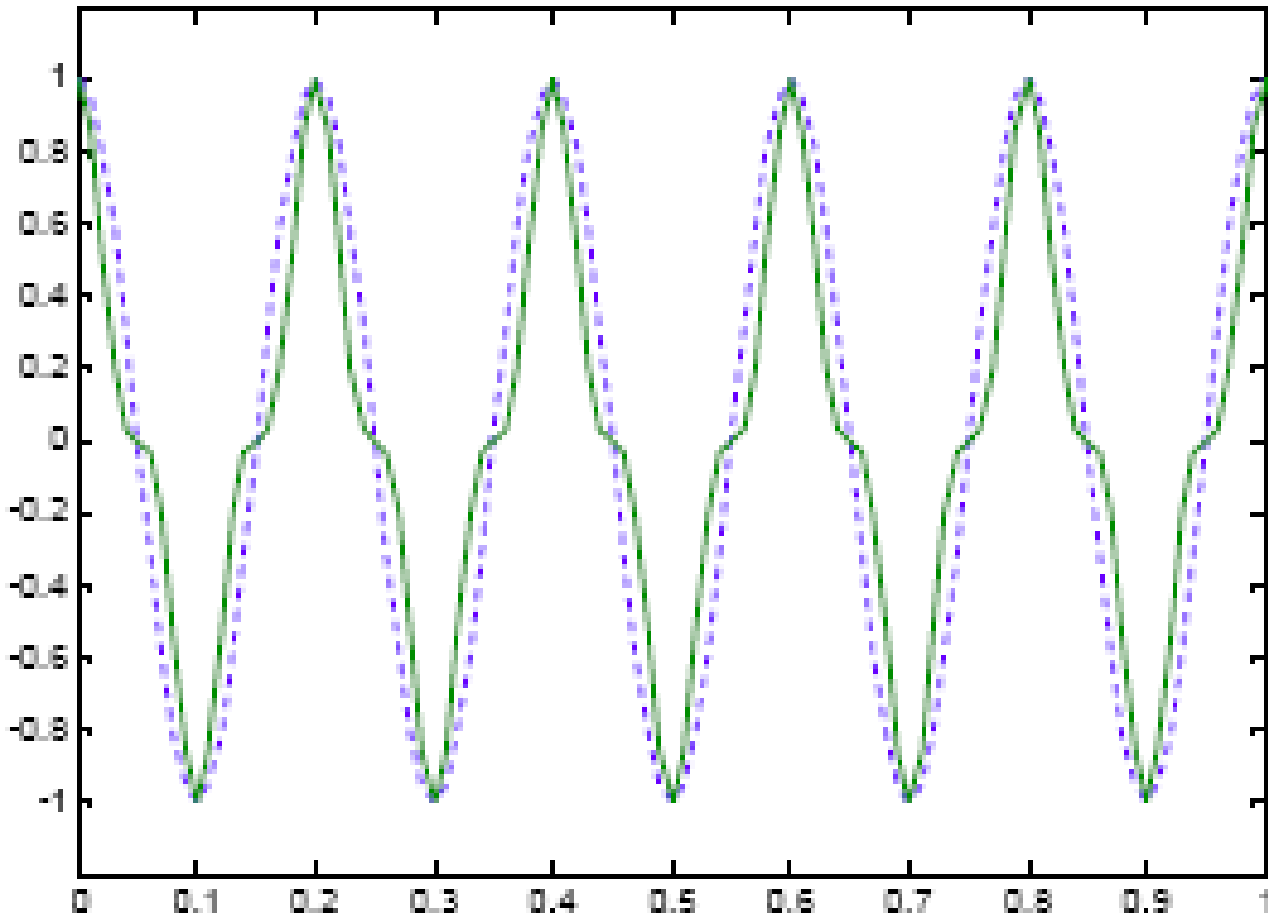
$$v_0(t) = \left(a_1A_c + \frac{3}{4}a_3A_c^3 \right) \cos[2\pi f_c + \phi(t)]$$

Απόκριση σε ασθενείς μη γραμμικοί



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

Παράδειγμα

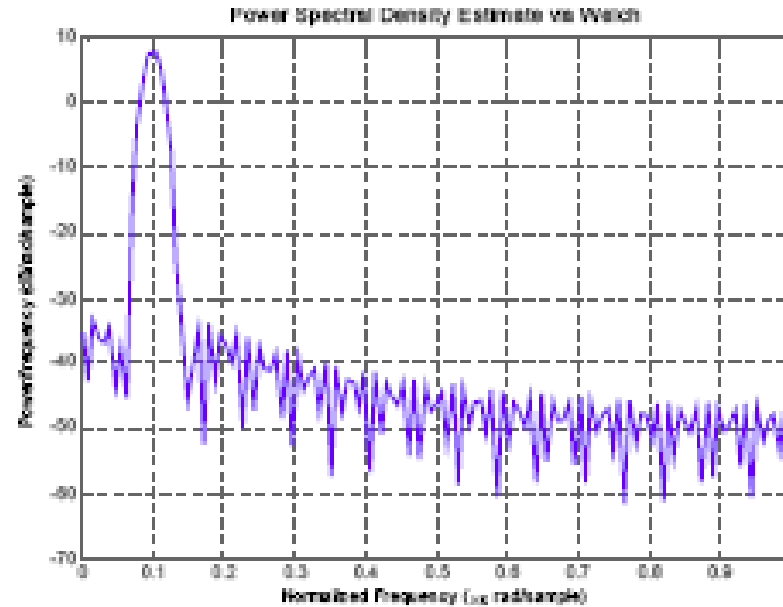


$$x(t) = \cos(2\pi 5t)$$

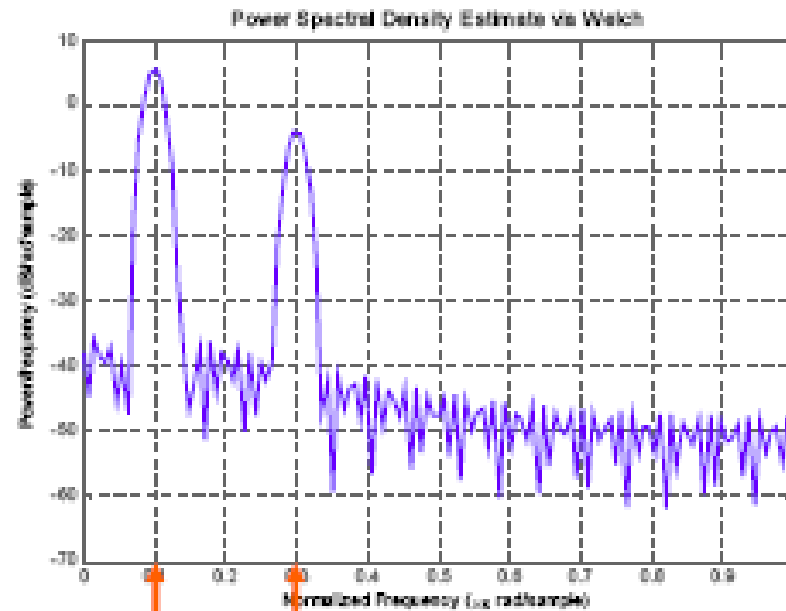
$$y(t) = x^3(t)$$

Παράδειγμα

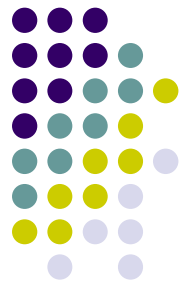
- Φάσμα $x(t)$



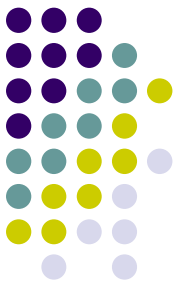
- Φάσμα $y(t)$



5Hz 15Hz



Απόκριση σε ισχυρές μη γραμμικότητες



- Έστω η έξοδος μη γραμμικού στοιχείου

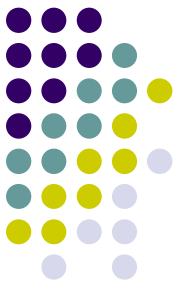
$$v_o(t) = T[v_i(t)], \quad v_i(t) = A(t) \cos \theta_c(t)$$

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

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

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T[v_i(t)] e^{-jn\theta_c} d\theta_c$$

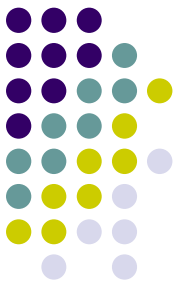
Απόκριση σε ισχυρές μη γραμμικότητες



- Η έξοδος θα είναι

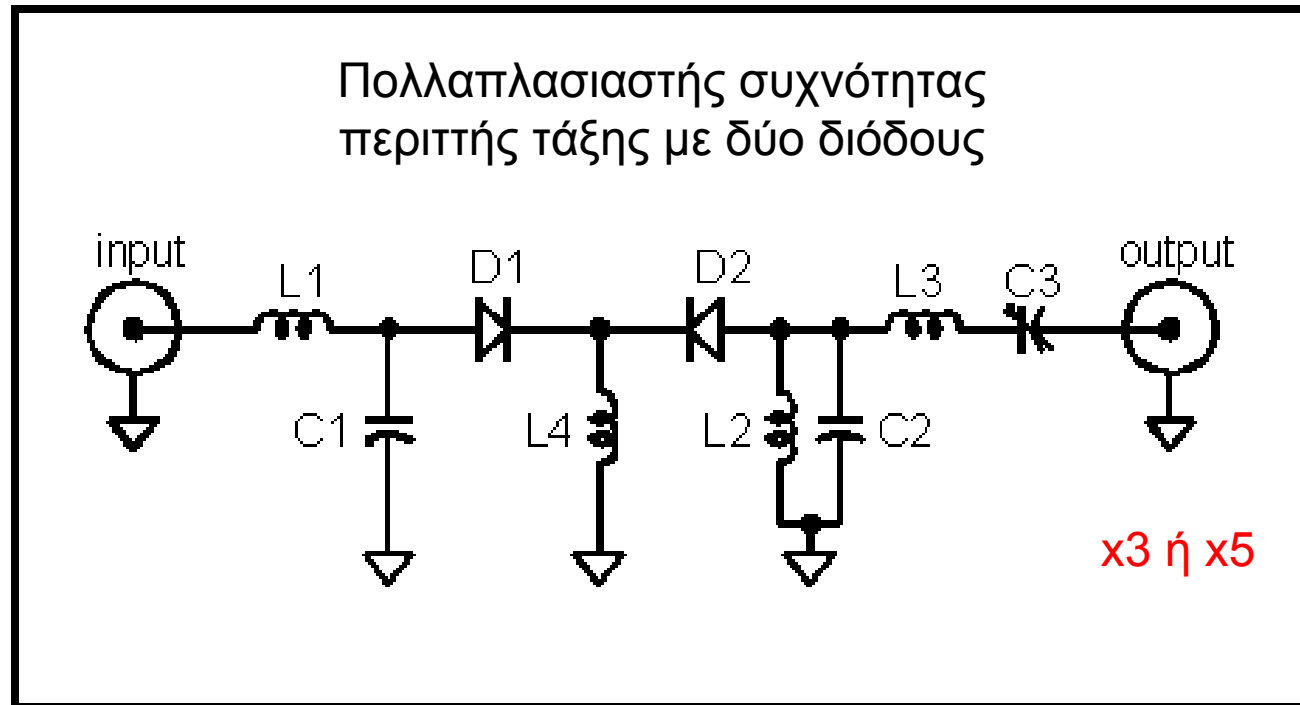
$$\begin{aligned}v_o(t) = & |2a_1| \cos(2\pi f_c t + \phi(\tau) + \angle a_1) \\ & + |2a_2| \cos(4\pi f_c t + 2\phi(\tau) + \angle a_2) \\ & + \dots\end{aligned}$$

- 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

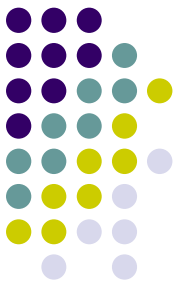


Απλός πολλαπλασιαστής

Πολλαπλασιαστής συχνότητας
περιττής τάξης με δύο διόδους

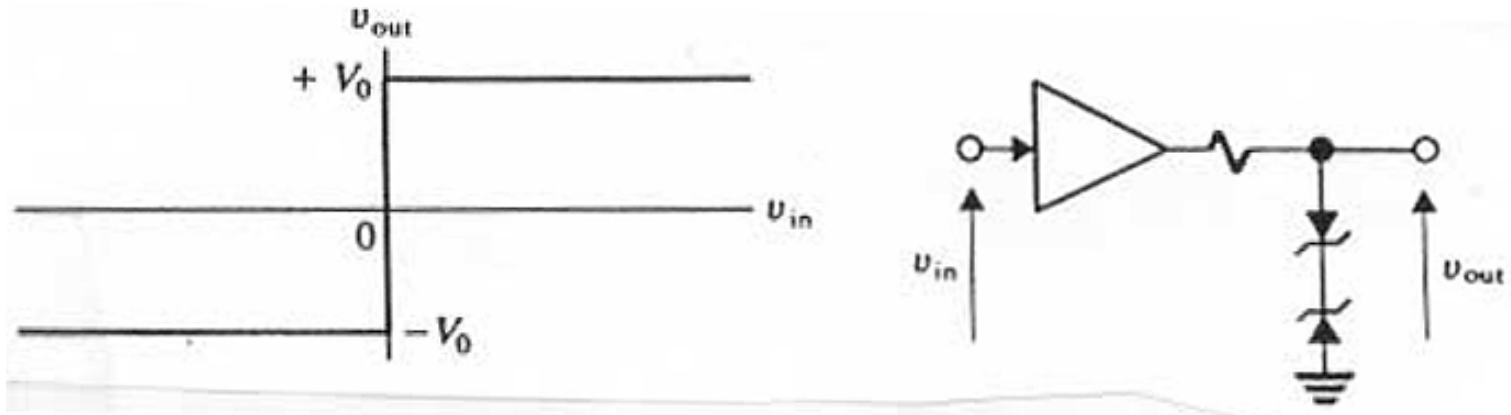


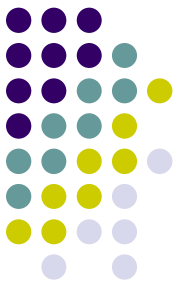
C1:100pF, L1:2.7μH. D:1N914
L2:22μH, L3:1.8μH, L4:330μH
C2:120pF, C3:10pF.



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

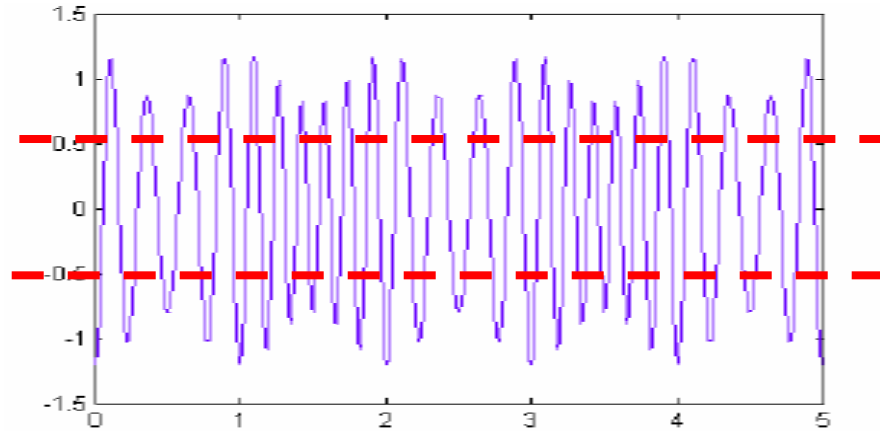
$$v_o(t) = \frac{4V_0}{\pi} \cos[2\pi f_c t + \phi(\tau)] - \frac{4V_0}{3\pi} \cos[6\pi f_c t + 3\phi(\tau)] + \dots$$

- 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

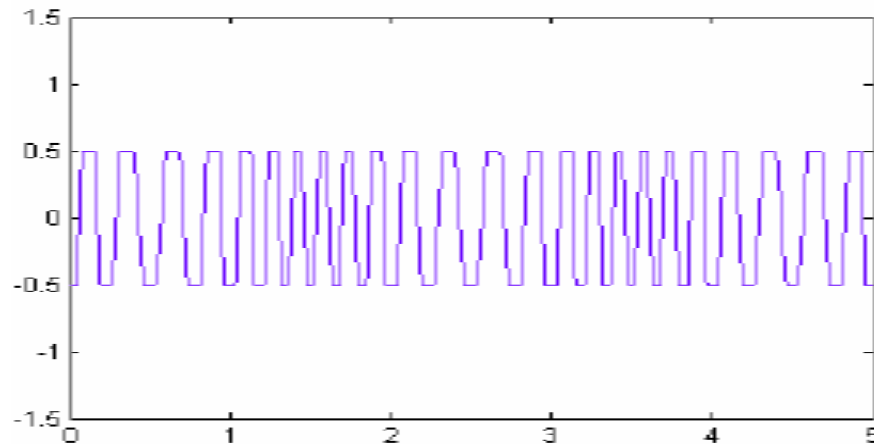
Παράδειγμα απόκρισης περιοριστή



● Πριν

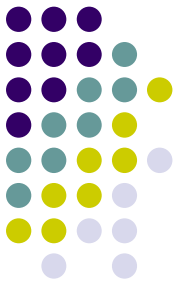
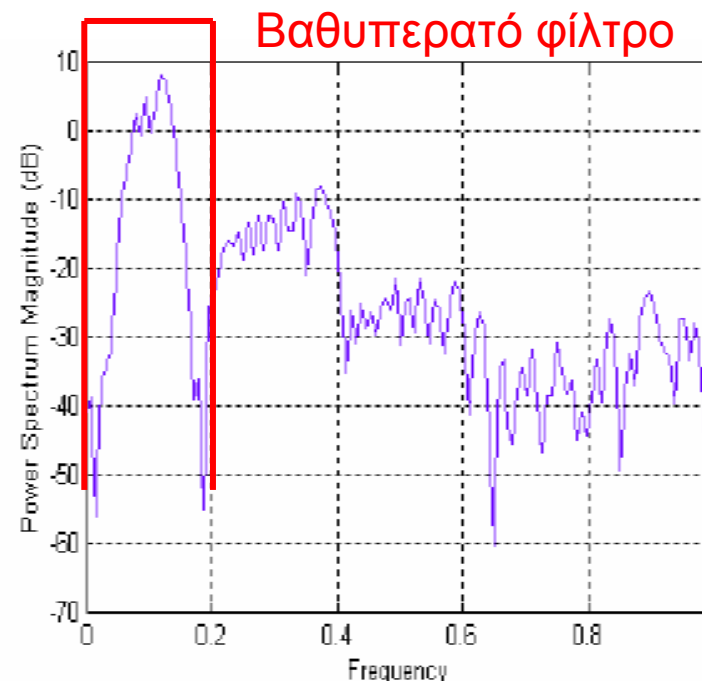
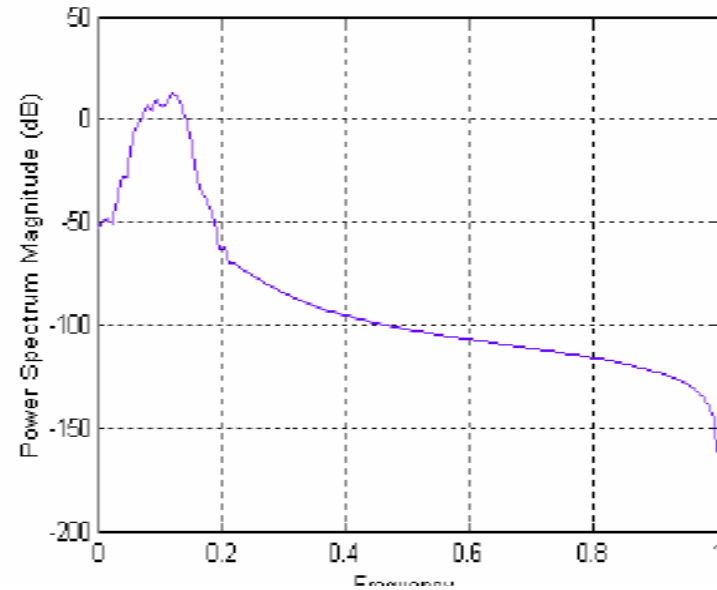


● Μετά



Παράδειγμα

- Φάσμα πριν τον περιοριστή
- Φάσμα μετά τον περιοριστή



Παράδειγμα

- Σήμα μετά το βαθυπερατό φίλτρο
- Φάσμα μετά το βαθυπερατό φίλτρο

