



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ & ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αρχές Τηλ/ων Συστημάτων

Εργαστήριο 4^ο : Διαμόρφωση Συχνότητας FM

Βασική Θεωρία

Εισαγωγή

Στις γραμμικές διαμορφώσεις AM, DSB-SC, SSB, το πλάτος ενός ημιτονικού φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα πληροφορίας. Η διαμόρφωση γωνίας, είναι μια άλλη διαμόρφωση ημιτονικής κυματομορφής, μη γραμμική, στην οποία το πλάτος του φέροντος μένει σταθερό, αλλά η γωνία του (φάση ή συχνότητα) αλλάζει σύμφωνα με την πληροφορία. Λόγω της καλής ανοχής της στον θόρυβο και στις παρεμβολές, χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα, όπως στην ραδιοφωνία, στην μετάδοση ήχου του τηλεοπτικού σήματος, σε synthesizers κτλ...

Η γωνία ενός ημιτονικού σήματος μπορεί να αλλάξει, είτε μεταβάλλοντας την συχνότητα, είτε μεταβάλλοντας την φάση του. Έχουμε λοιπόν την διαμόρφωση συχνότητας (FM) και την διαμόρφωση φάσης (PM) αντίστοιχα. Οι δύο αυτές διαμορφώσεις έχουν πολλά κοινά σημεία και είναι στενά συνδεδεμένες.

Διαμόρφωση φάσης (PM)

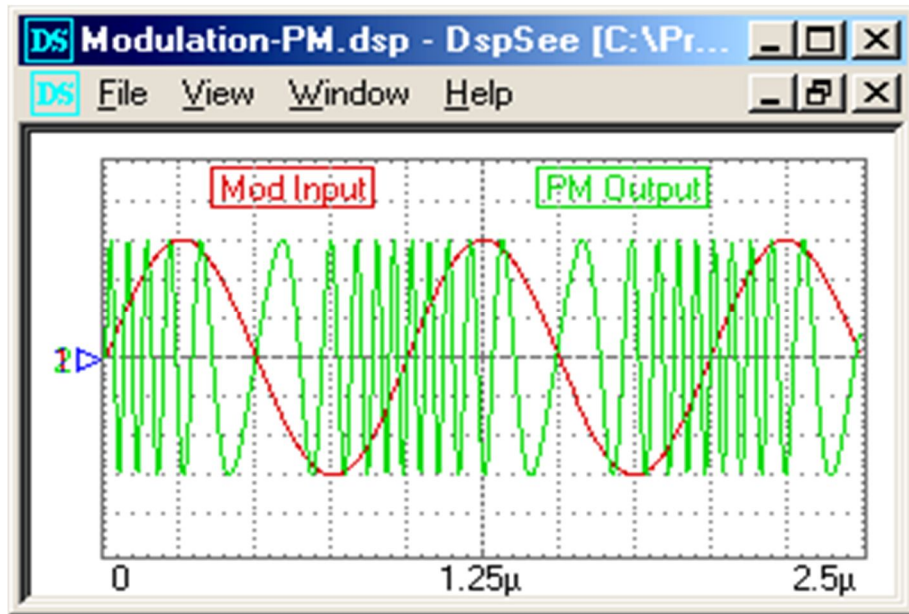
Στην διαμόρφωση φάσης, η γωνία του ημιτονικού φέροντος θ_i , μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα πληροφορίας $m(t)$.

Έστω ημιτονικό φέρον της μορφής $x(t) = A_c \cos[\theta_i(t)]$.

Η γωνία θα μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα πληροφορίας $\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t)$, όπου k_p είναι η ευαισθησία φάσης.

Το διαμορφωμένο σήμα θα είναι της μορφής $s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$.

Η **ευαισθησία φάσης** ισούται με $k_p = \Delta\phi/A_m$, όπου A_m το πλάτος του σήματος της πληροφορίας και $\Delta\phi$ η **απόκλιση φάσης** η οποία ορίζεται ως η μέγιστη διαφορά φάσης του διαμορφωμένου σήματος σε σχέση με την φάση του αδιαμόρφωτου. Η μορφή της PM διαμόρφωσης από ημιτονικό σήμα στο πεδίο του χρόνου φαίνεται στο σχήμα 1. Παρατηρούμε ότι η PM διαμόρφωση παρουσιάζει την μέγιστη απόκλιση συχνότητας (frequency deviation max), όταν το σήμα βασικής ζώνης αλλάζει πρόσημο.



Σχήμα 1: Διαμόρφωση PM

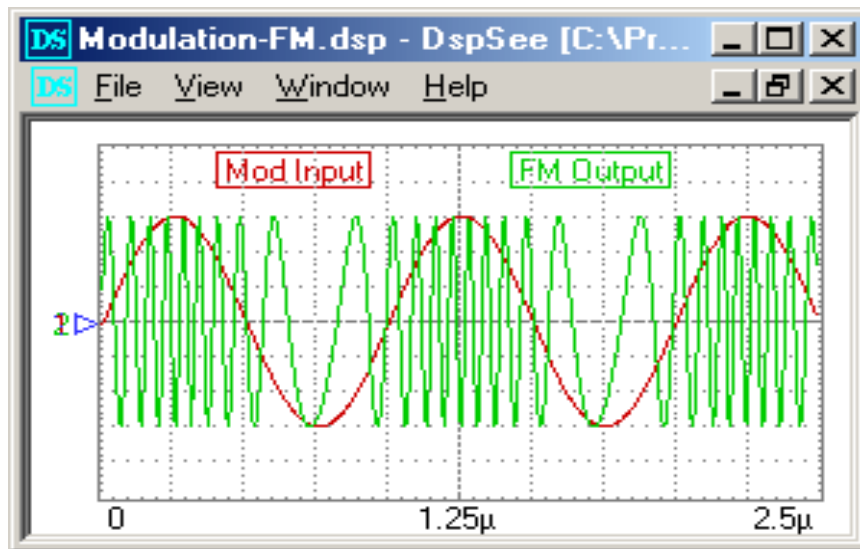
Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)

Στην διαμόρφωση συχνότητας FM, το σήμα πληροφορίας $m(t)$ μεταβάλλει γραμμικά την συχνότητα f_c του φέροντος ημιτονικού σήματος σχήμα 2:

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t) \quad (1)$$

όπου k_f η **ευαισθησία συχνότητας** (frequency sensitivity Hz/Volt), και δείχνει πόσο μεταβάλλεται η συχνότητα, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση του σήματος πληροφορίας.

Η FM διαμόρφωση είναι μη γραμμική και έτσι, σε αντίθεση με την διαμόρφωση AM, το φάσμα της δεν συνδέεται με απλό τρόπο με το φάσμα του σήματος πληροφορίας.



Σχήμα 2: Διαμόρφωση FM

Στη συνέχεια θα μελετηθεί μια απλή περίπτωση FM διαμόρφωσης, αυτή από απλό τόνο (ημιτονικό σήμα).

Έστω σήμα πληροφορίας:

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

και φέρον κύμα:

$$x(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

Από την (1) προκύπτει ότι η στιγμιαία συχνότητα θα είναι $f_i = f_c + k_f A_m \cos(2\pi f_m t)$, και λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνολική γωνία του διαμορφωμένου σήματος είναι

$$\theta_i(t) = 2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau = 2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \sin(2\pi f_m t)$$

η διαμόρφωση FM παίρνει την μορφή:

$$S(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)], \text{ όπου } \beta = \Delta f / f_m \text{ είναι ο δείκτης διαμόρφωσης.}$$

Δf είναι η απόκλιση συχνότητας και ισούται με $\Delta f = k_f A_m$.

Ανάλογα με την τιμή του β , η FM διαμόρφωση διακρίνεται σε **διαμόρφωση στενής ζώνης** ($\beta \ll 1$) και σε **διαμόρφωση ευρείας ζώνης** ($\beta \gg 1$).

Διαμόρφωση FM στενής ζώνης

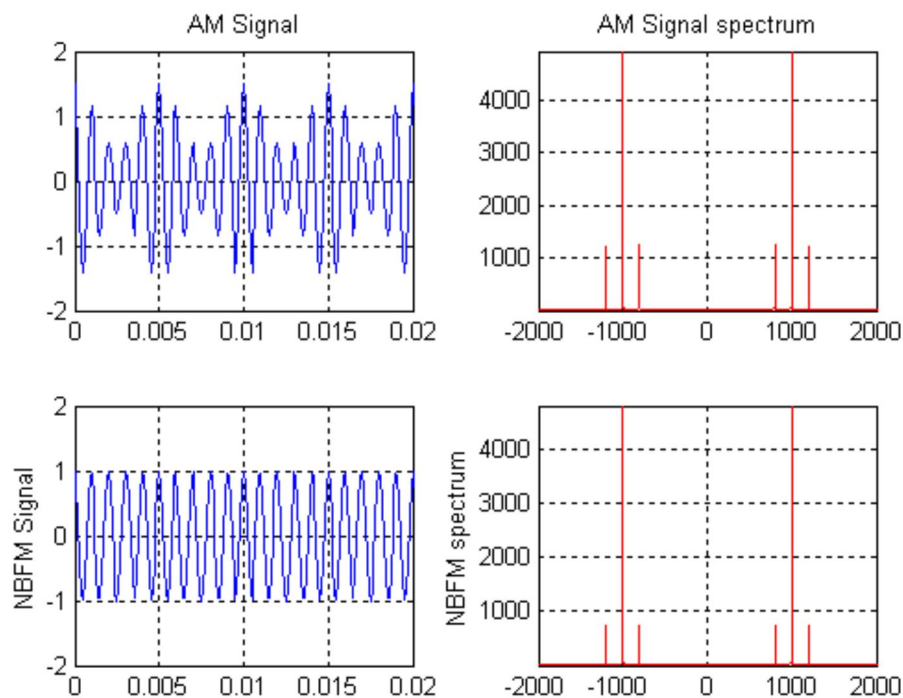
Στην διαμόρφωση FM στενής ζώνης ισχύει ότι $\beta \ll 1$ και έτσι η εξίσωση του διαμορφωμένου σήματος είναι:

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

η οποία είναι παρόμοια με αυτή της διαμόρφωσης AM.

Έτσι λοιπόν, η διαμόρφωση στενής ζώνης, έχει παρόμοιο φάσμα στο πεδίο των συχνοτήτων με αυτό της AM διαμόρφωσης, δηλαδή δύο πλευρικές ζώνες εκατέρωθεν

της συχνότητας του φέροντος και εύρος ζώνης περίπου ίσο με το διπλάσιο του εύρους της πληροφορίας (σχήμα 3).



Σχήμα 3: Σύγκριση AM και FM στενής ζώνης

Διαμόρφωση FM ευρείας ζώνης

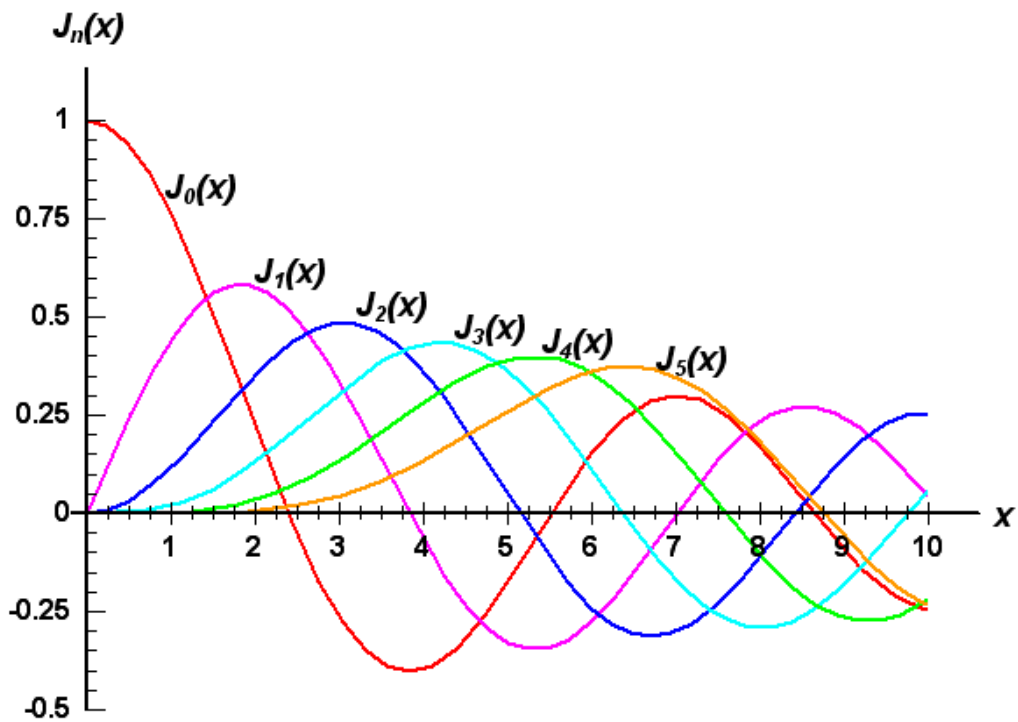
Στην γενική περίπτωση όπου το β δεν είναι μικρό σε σχέση με το 1 rad, το φάσμα της FM διαμόρφωσης δεν είναι απλό και απαιτεί πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις, λόγω της μη γραμμικότητας. Ωστόσο, εάν το σήμα πληροφορίας είναι περιοδικό, τότε είναι δυνατή η ανάλυση σε αρμονικές συνιστώσες. Στην περίπτωση διαμόρφωσης από απλό ημιτονικό τόνο, στο πεδίο του χρόνου είναι

$$S(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)],$$

Και αν παρασταθεί με σειρά Fourier

$$s(t) = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos(2\pi(f_c + n f_m)t)$$

Στο πεδίο των συχνοτήτων, τα πλάτη των συνιστωσών του φάσματος δίνονται από την n -στής τάξης συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και ορίσματος β σχήμα 4 και 5.

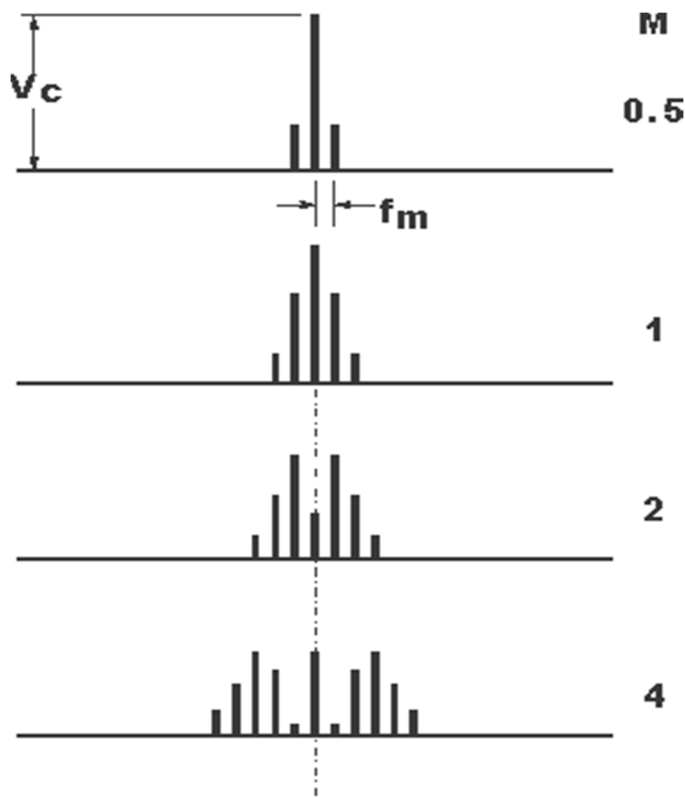


Σχήμα 4: Συνάρτηση Bessel

x	Bessel-function order, n																
	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}	J_{16}
0.00	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	0.98	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	0.94	0.24	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.41	0	0.52	0.43	0.20	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
5.53	0	-0.34	-0.13	0.25	0.40	0.32	0.19	0.09	0.03	0.01	—	—	—	—	—	—	—
6.0	0.15	-0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—
7.0	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	—	—	—	—	—
8.65	0	0.27	0.06	-0.24	-0.23	0.03	0.26	0.34	0.28	0.18	0.10	0.05	0.02	—	—	—	—
9.0	-0.09	0.25	0.14	-0.18	-0.27	-0.06	0.20	0.33	0.31	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—	—
10.0	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.32	0.29	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—
12.0	0.05	-0.22	-0.08	0.20	0.18	-0.07	-0.24	-0.17	0.05	0.23	0.30	0.27	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01

Σχήμα 5: Πίνακας τιμών συνάρτησης Bessel πρώτου είδους

Από τα σχήματα 3,4 παρατηρούμε ότι οι πλευρικές συχνότητες της FM διαμόρφωσης αυξάνονται όσο μεγαλώνει ο δείκτης διαμόρφωσης β (m_i στο σχήμα 5), μειώνεται το πλάτος τους όσο απομακρυνόμαστε από την κεντρική συχνότητα, περνάει στην αρνητική περιοχή και αυξάνεται ξανά (ημιτονική συμπεριφορά). Το αρνητικό πρόσημο στο πλάτος σημαίνει ότι υπάρχει διαφορά φάσης 180° , αλλά αυτό παίζει κάποιο ρόλο μόνο στην διαμόρφωση από πολλούς τόνους. Έτσι, το φάσμα της FM διαμόρφωσης έχει την μορφή του σχήματος 6 και παρατηρούμε ότι οι πλευρικές συχνότητες απέχουν από την κεντρική κατά $+n f_m$ και $-n f_m$.



Σχήμα 6: Φάσμα της FM διαμόρφωσης

Θεωρητικά λοιπόν μια κυματομορφή FM, περιέχει έναν άπειρο αριθμό πλευρικών συχνοτήτων, άρα και το εύρος της είναι άπειρο. Στην πράξη όμως, ανάλογα με τον δείκτη διαμόρφωσης, ένας αριθμός συχνοτήτων είναι μόνο σημαντικός, οι υπόλοιπες έχουν σχεδόν μηδενικό πλάτος. Πρακτικά λοιπόν το φάσμα είναι πεπερασμένο. Έτσι λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους σημαντικούς όρους (συχνότητες με πλάτος μεγαλύτερο του 1% του πλάτους του αδιαμόρφωτου σήματος), ορίζουμε το **ενεργό εύρος ζώνης** με τον κανόνα του Carson:

Κανόνας του Carson: $B_T = 2(\beta + 1)f_m$

Ο κανόνας αυτός, μας δίνει ένα πολύ καλό προσεγγιστικό αποτέλεσμα, αφού περιέχει περίπου το 99% του σήματος. Το πραγματικό εύρος ζώνης κανονικά είναι $B = n f_m$, όπου n είναι ο αριθμός των πλευρικών συχνοτήτων (που θεωρητικά είναι άπειρος).

Η μέση ισχύς στην FM διαμόρφωση, είναι σταθερή (οι πλευρικές συχνότητες κερδίζουν ισχύ σε βάρος της αρχικής ισχύος του φέροντος) και ισούται με την αρχική ισχύ του φέροντος.

Πειραματικό μέρος

1. Συνδέστε τον παλμογράφο στον VCO (διαμορφωτής FM), χωρίς την παρουσία σήματος στην είσοδό του. Τι σήμα έχετε (μορφή, συχνότητα); Τι συμπεραίνετε;
2. Συνδέστε την εξωτερική γεννήτρια στην είσοδο του διαμορφωτή και ρυθμίστε την συχνότητά της στο μηδέν. Κατόπιν αυξομειώστε το πλάτος της και δείτε πώς αλλάζει η συχνότητα του VCO. Στη συνέχεια αυξήστε λίγο την συχνότητα της πηγής και περιγράψτε τι παρατηρείτε.
3. Ρυθμίστε την συχνότητα της εξωτερικής πηγής έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτη η διαμόρφωση συχνότητας (FM) και σχεδιάστε την κυματομορφή (στην έξοδο του VCO και πριν συνδέσετε τον παλμογράφο παρεμβάλετε τον limiter).
4. Στο κανάλι 2 του παλμογράφου συνδέστε το σήμα βασικής ζώνης και με κατάλληλες ρυθμίσεις δείτε τα δύο σήματα (FM και βασικής ζώνης) ταυτόχρονα και σχεδιάστε το αποτέλεσμα (για καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα ρυθμίστε την συχνότητα του σήματος βασικής ζώνης στα 32KHz και το πλάτος της στο max).
5. Συνδέστε το μικρόφωνο στην είσοδο του διαμορφωτή (αφού το περάσετε από έναν ενισχυτή) και παρατηρήστε την διαμόρφωση συχνότητας ενώ μιλάτε στο μικρόφωνο.
6. Σχεδιάστε το φάσμα της εξόδου του διαμορφωτή όταν δεν έχετε σήμα στην είσοδό του (για καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα μειώστε το πλάτος του φέροντος).
7. Συνδέστε την γεννήτρια ημιτονικού σήματος και αυξήστε το πλάτος της τόσο ώστε να έχετε FM στενής ζώνης. Σχεδιάστε το φάσμα της FM. Πόσο είναι το εύρος ζώνης;
8. Διατηρήστε σταθερή την συχνότητα της γεννήτριας και αυξήστε το πλάτος της. Τι αλλάζει στο φάσμα; Το εύρος ζώνης αυξάνει ή μειώνεται; Πώς μεταβάλλονται πλάτη των πλευρικών ζωνών στο φάσμα καθώς αυξάνεται το πλάτος του σήματος εισόδου;
9. Η ισχύς του σήματος μεταβάλλεται; Εξηγήστε.
10. Η ισχύς του φέροντος πριν και μετά την διαμόρφωση είναι διαφορετική ή όχι; Γιατί;
11. Διατηρήστε σταθερό το πλάτος του σήματος εισόδου και αυξήστε την συχνότητά του. Τι αλλάζει στο φάσμα; Το εύρος ζώνης αυξάνει ή μειώνεται;
12. Χρησιμοποιήστε σαν είσοδο ένα σήμα μουσικής (από τον υπολογιστή ή από το κινητό σας). Σε τι διαφέρει το φάσμα αυτής της διαμόρφωσης FM από το φάσμα της προηγούμενης περίπτωσης και γιατί;
13. Έχετε διαμόρφωση στενής ή ευρείας ζώνης και γιατί;
14. Ποιες είναι οι συχνότητες των AM και των FM στο ραδιόφωνο;
15. Γιατί οι συχνότητες των FM είναι μεγαλύτερες από αυτές των AM;
16. Έστω ότι θέλετε να μεταδώσετε το συγκεκριμένο μουσικό σήμα με διαμόρφωση FM (με φέρον στα 350KHz). Σε ποια συχνότητα πρέπει να είναι το φέρον του επόμενου πομπού (ο οποίος θα μεταδίδει το ίδιο μουσικό σήμα) ώστε να μην υπάρχει παρεμβολή;
17. Εξηγήστε ποιο είναι το κύριο πλεονέκτημα και μειονέκτημα της FM σε σχέση με την AM