

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

1ο Τμήμα (Α - Κ): Αμφιθέατρο 4, Νέα Κτίρια ΣΗΜΜΥ

Διαμόρφωση Γωνίας (Angle Modulation) - 1

- 0.0: Μετάδοση Αναλογικής & Ψηφιακής Πληροφορίας (Baseband, Bandpass)
Σύντομη Ανασκόπηση
- 4.2: Βασικοί Ορισμοί (Frequency Modulation – FM, Phase Modulation – PM)

καθ. Βασίλης Μάγκλαρης
maglaris@netmode.ntua.gr
www.netmode.ntua.gr

Τρίτη 14/5/2019, Παρασκευή 17/5/2019

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

0.0 Μετάδοση Αναλογικής & Ψηφιακής Πληροφορίας (1/4)

Μετάδοση Βασικής Ζώνης

Σχήμα 8.1

Φάσμα Πλάτους

➤ Αναλογική Μετάδοση

- Μετάδοση αδιαμόρφωτου σήματος αναλογικής φωνής 300 – 3300 Hz σε δισύρματο Συνδρομητικό Βρόχο παραδοσιακής τηλεφωνίας – PSTN Subscriber Loop
- Αναλογικό video/audio σε καλώδια μικρού μήκους
- Pulse Amplitude Modulation (**PAM**) για μετάδοση αναλογικού σήματος bandwidth W μέσω δειγμάτων του ανά $T_b = 1/(2W)$ sec (**Nyquist Sampling Rate**)

PAM

<http://physics.tutorcircle.com/waves/amplitude-modulation.html>



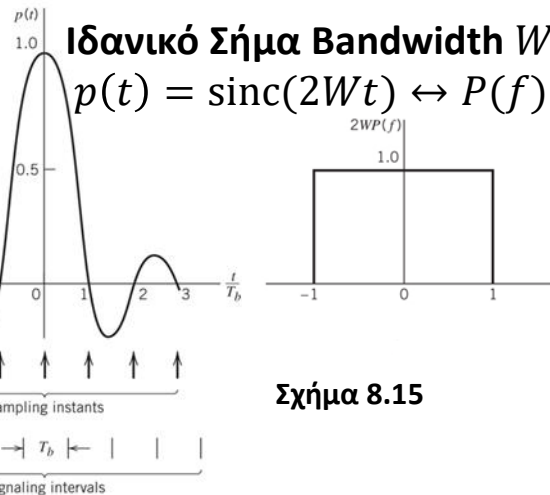
➤ Ψηφιακή Μετάδοση Πληροφορίας

- Ορθογώνιοι Παλμοί σε ενσύρματα Τοπικά Δίκτυα με διάφορες μορφές **Ψηφιακής Κωδικοποίησης**
- Προσέγγιση **Ιδανικού**

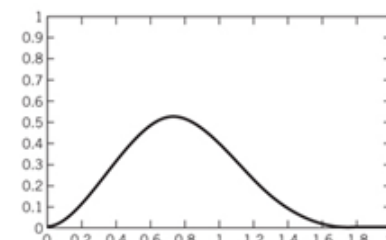
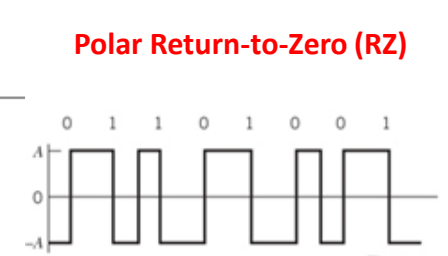
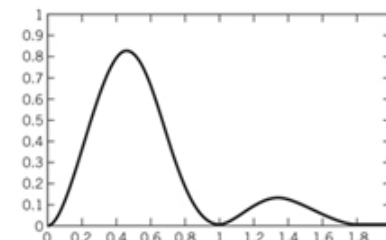
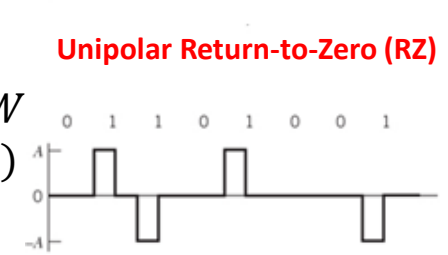
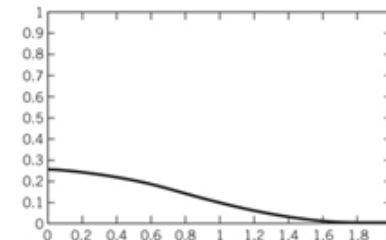
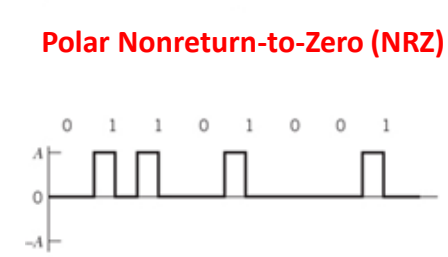
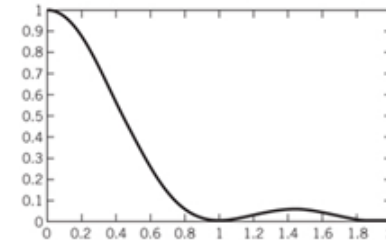
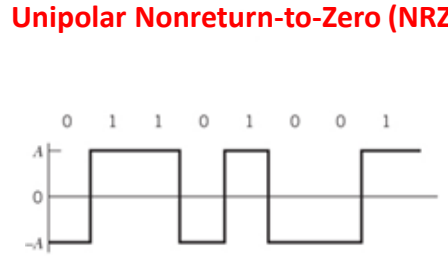
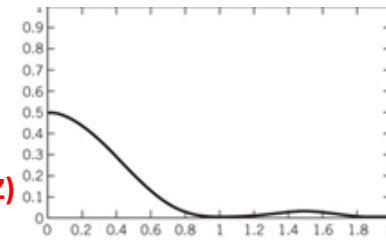
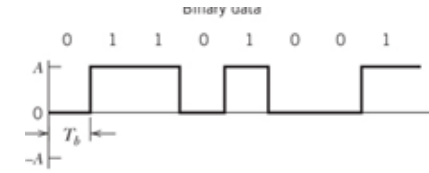
Σήματος σαν Παλμοί **Raised Cosine** $p(t)$ με bandwidth μεταξύ $(W, 2W)$ σε δίκτυα RF για οικονομία bandwidth με Ελάχιστη Παρεμβολή Συμβόλων (**Intersymbol**

Interference - ISI) σε

Nyquist Sampling Rate



Σχήμα 8.15



ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

0.0 Μετάδοση Αναλογικής & Ψηφιακής Πληροφορίας (2/4)

Ζωνοπερατή Μετάδοση - Είδη Διαμόρφωσης

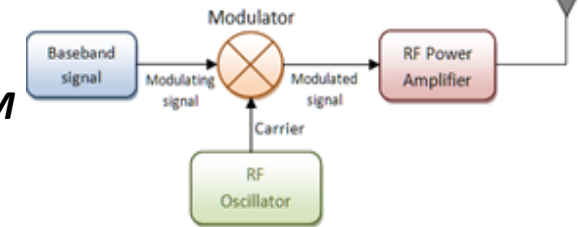
➤ Αναλογική Διαμόρφωση Φέροντος (Carrier)

- Διαμόρφωση Πλάτους (**AM**, **DSB-SC**, **QAM**, **SSB**, **VSF**)
- Διαμόρφωση Γωνίας (Phase Modulation **PM**, Frequency Modulation **FM**)

➤ Ψηφιακή Διαμόρφωση με 2 (*binary*) ή M (*M-ary*) Phasors

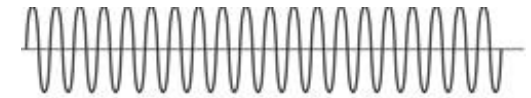
- Δυαδική (**binary**) Διαμόρφωση Μετατόπισης Πλάτους (AM: Amplitude-Shift Key **ASK**, On-Off Key **OOK**)
- Δυαδική Διαμόρφωση Μετατόπισης Συχνότητας (FM: Frequency-Shift Key **FSK**)
- Δυαδική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης (PM: Phase-Shift Key **PSK**)
- Αστερισμοί (**M-ary** Transmission Constellations) συνδυασμών n bits διαμορφωμένων σε $M = 2^n$ Phasors

Αναλογική Διαμόρφωση



<http://www.equestionanswers.com/notes/modulation-analog-digital.php>

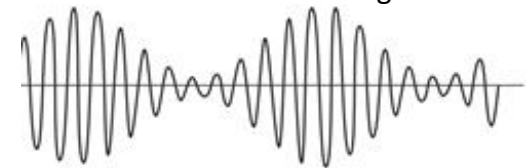
Carrier



Modulating Analog Signal



AM-DSB Modulated Signal



FM Modulated Signal



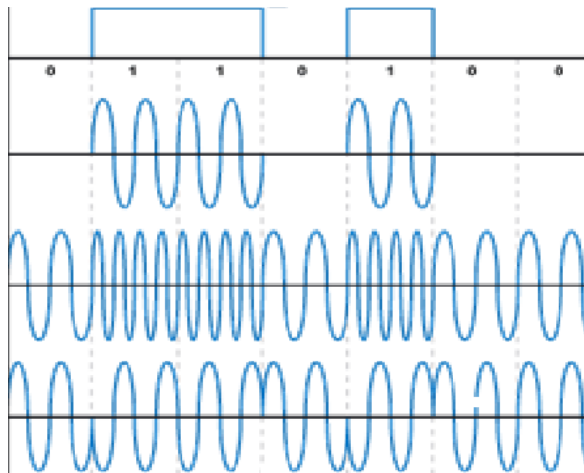
PM Modulated Signal



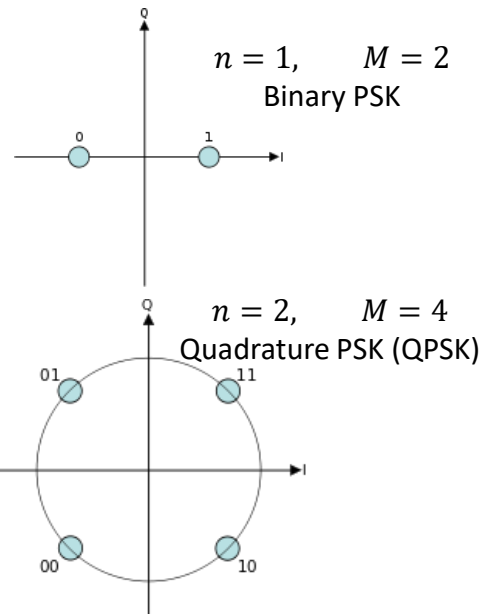
Ψηφιακή Διαμόρφωση

Binary Data: 01110100

Modulating Binary Pulse Train - NRZ Format



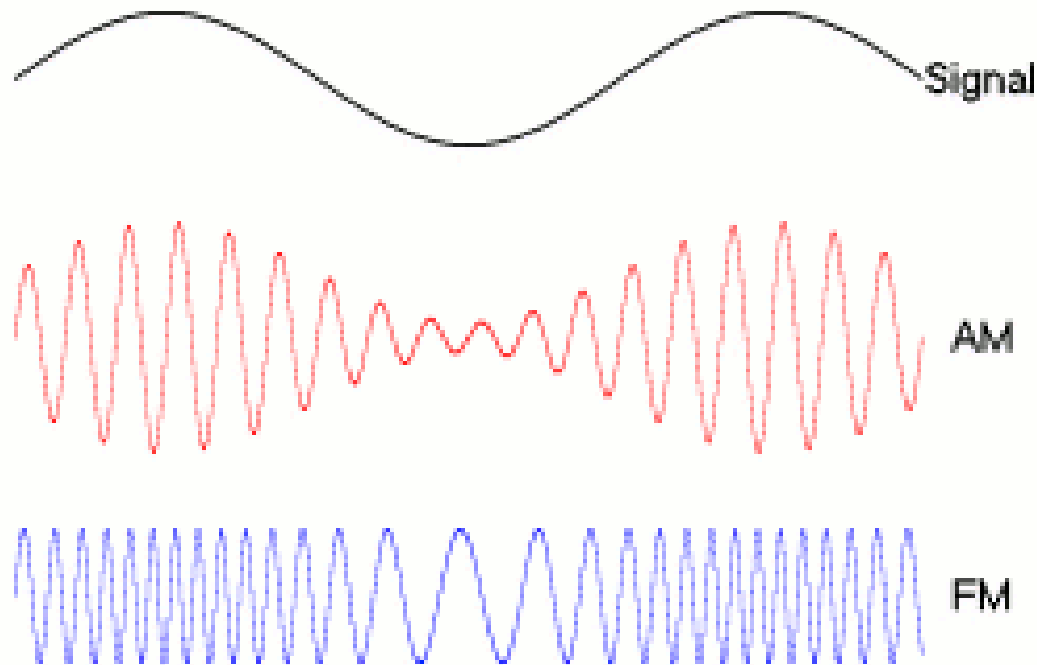
PSK Constellations



ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

Διαμόρφωση AM & FM Αναλογικού Ημιτονοειδούς Σήματος

https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_modulation



ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

0.0 Μετάδοση Αναλογικής & Ψηφιακής Πληροφορίας (3/4)

Ψηφιοποίηση Αναλογικών Σημάτων

- Ψηφιακά αρχεία που προκύπτουν από την ψηφιοποίηση δειγμάτων PAM αναλογικών σημάτων π.χ. audio-video-image
- Κωδικοποίηση με συμπίεση της ψηφιοποιημένης πληροφορίας, κρυπτογράφηση και επεξεργασία - αποθήκευση αρχείων σε Smart Phones, PCs, Servers, Clusters, Cloud...
- Ψηφιακή διαμόρφωση (FSK, PSK, ASK...) και ποιοτική μετάδοση μέσω ψηφιακών δικτύων (ψηφιακά τηλεφωνικά δίκτυα κορμού με πολυπλεξία χρόνου, **Internet**, ψηφιακά δίκτυα **Κινητής Τηλεφωνίας** GSM - LTE → ενοποιημένα ψηφιακά δίκτυα 5G)
- Μεγάλη αντοχή σε θόρυβο και δυνατότητα ασφαλούς επικοινωνίας (αλγόριθμοι error detection, error correction, encryption)

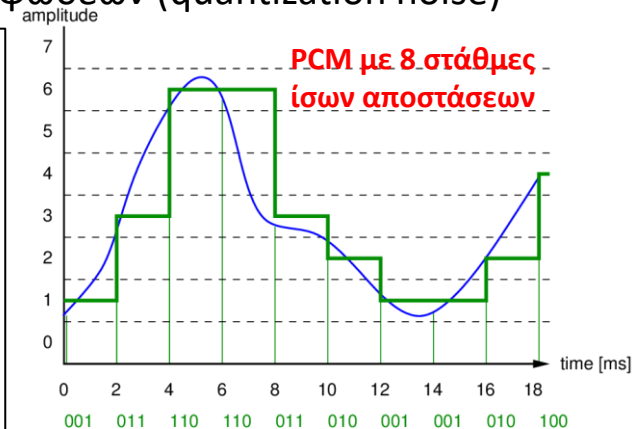
Pulse-Code Modulation (PCM) @ 64 Kbps

- Αναλογική φωνή εύρους ζώνης $W = 4$ KHz (απόδοση παραδοσιακής τηλεφωνίας)
- Sampling: Δειγματοληψία με ρυθμό $2W = 8000$ samples/sec (**Nyquist Sampling Rate**)
- Quantization: Προσέγγιση στη πλησιέστερη από 256 στάθμες (quanta) με αντιστοίχιση 8 bits/sample → 64 Kbits/sec ψηφιακό σήμα **PCM**
- Επιλογή αριθμού και αποστάσεων σταθμών για μείωση παραμορφώσεων (quantization noise)

Ποιότητα Αναπαραγωγής και Απόδοση Μετάδοσης

Αποτελεσματική κωδικοποίηση - διαμόρφωση προς το θεωρητικό όριο του **Θεωρήματος του Shannon**: Για μεταβίβαση δεδομένων χωρίς λάθη η μέγιστη χωρητικότητα διαύλου (σε bits/sec) με bandwidth B Hz για μέση ισχύ σήματος S Watts και λευκό θόρυβο Gauss μέσης ισχύος N Watts είναι $C = B \log_2(1 + \frac{S}{N})$

π.χ. κανάλι με $B = 4$ KHz και $\frac{S}{N} = 20$ db (SNR, Signal-to-Noise Ratio) έχει μέγιστη χωρητικότητα $C = 4 \log_2(1 + 100) = 26.63$ Kbits/sec



<http://ict.sit.tu.ac.th/~steven/resources/images/pcm-sampling-1-r274.png>

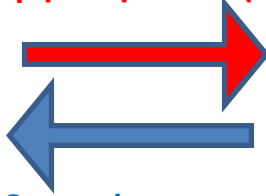
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

0.0 Μετάδοση Αναλογικής & Ψηφιακής Πληροφορίας (4/4)

Γενικές Κατηγορίες Σημάτων Πληροφορίας

Αναλογικά Σήματα

Δειγματοληψία, Ψηφιοποίηση
Διαμόρφωση PCM... (7.2, 7.3)



Κωδικοποίηση, Μετάδοση
Θεωρητικό Όριο Shannon (10.9)

Ψηφιακή Πληροφορία (0,1)

Εργαλεία Ανάλυσης

- Μετασχηματισμοί Fourier (2)
- Πιθανότητες & Στοχαστικές Ανεξίξεις (5)
- Θεωρία Πληροφορίας, Κώδικες (10)
- Προσομοίωση (MATLAB...)

Τρόποι Μετάδοσης Σημάτων

Μετάδοση Βασική Ζώνης (Baseband)

Μετάδοση Αναλογικής Πληροφορίας (7)

- Πλήρης Αναλογική Μετάδοση (Φωνή, Video)
- Μετάδοση Δειγμάτων μέσω Παλμικής Διαμόρφωσης PAM

Ψηφιακή Κωδικοποίηση (8)

- Ορθογώνιοι Παλμοί (NRZ, RZ, Manchester)
- Raised Cosine

Διαμόρφωση Φέρουσας Συχνότητας (Bandpass)

Διαμόρφωση Αναλογικής Πληροφορίας

- Διαμόρφωση AM/QAM/DSB/SSB/VSB (3)
- Διαμόρφωσης Γωνίας PM, FM (4)

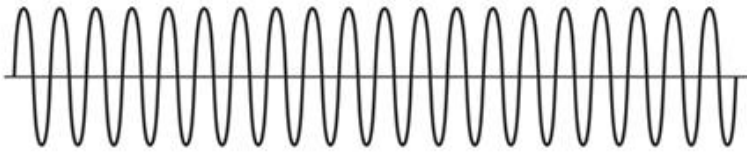
Ψηφιακή Μετατόπιση, Shift Keys (9)

- Δυαδικά Shift Keys (ASK/OOK, FSK, PSK)
- Αστερισμοί M Phasors (M -ary Constellations, QPSK...)

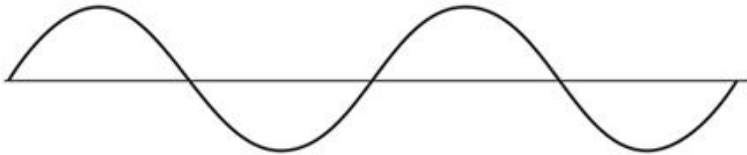
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

4.2 Βασικοί Ορισμοί Διαμόρφωσης Γωνίας (1/4)

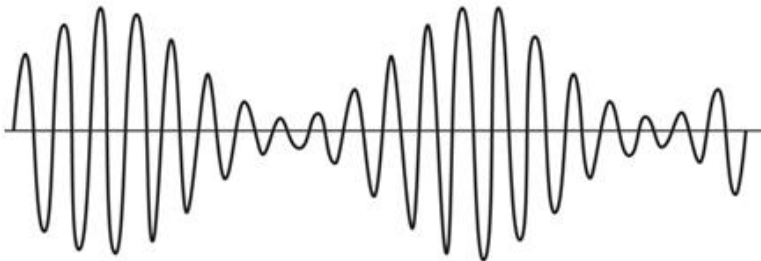
Carrier Wave $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$



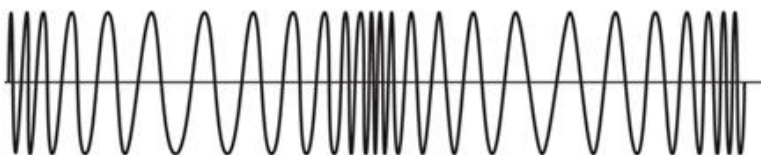
Modulating Signal $m(t) = A_m \sin(2\pi f_m t)$



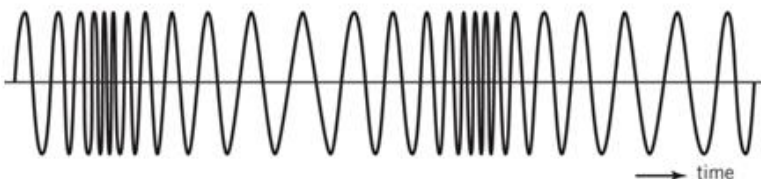
Amplitude Modulation - AM, DSB: $s(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$



Phase Modulation - PM: $s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$



Frequency Modulation - FM: $s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau]$



Γενικά Χαρακτηριστικά

- Το αποτέλεσμα Διαμόρφωσης Γωνιάς (Angle Modulation) είναι σήμα **phasor**

$$s(t) = A_c \cos[\theta_i(t)]$$

με **σταθερό πλάτος** A_c και γωνία $0 \leq \theta_i(t) \leq 2\pi$ radians που διαμορφώνεται από το $m(t)$

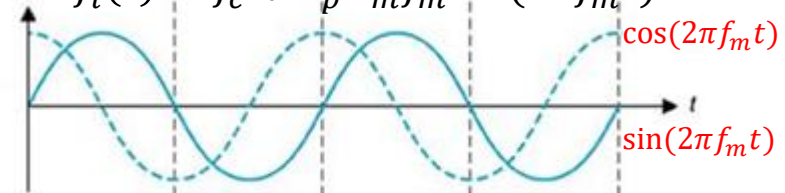
- Στιγμαία Συχνότητα (Instantaneous Frequency):

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt}$$

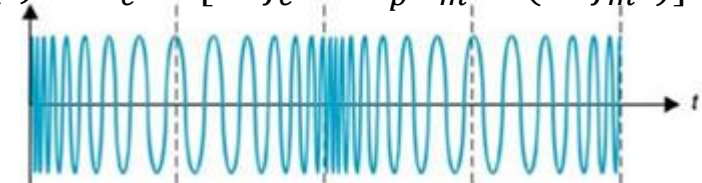
- Γωνιακή Ταχύτητα (Angular Velocity) του Phasor $s(t)$: $2\pi f_i(t)$ radians/sec

- Εφαρμογή σε PM με $m(t) = A_m \sin(2\pi f_m t)$:

$$f_i(t) = f_c + k_p A_m f_m \cos(2\pi f_m t)$$



$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p A_m \sin(2\pi f_m t)]$$



Σύγκριση Επίδοσης Angle Modulation με AM - DSB

Καλύτερη διάκριση σε παρεμβολές & θόρυβο αλλά μεγαλύτερες απαιτήσεις εύρους ζώνης (bandwidth)

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

4.2 Βασικοί Ορισμοί Διαμόρφωσης Γωνίας (2/4)

Τρόποι Διαμόρφωσης Σήματος $m(t) \rightarrow s(t)$ σε Φέρον Σήμα $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \rightarrow s(t)$

- Διαμόρφωση Πλάτους, **AM - DSB**:

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

- Διαμόρφωση Γωνίας – Angle Modulation

$$s(t) = A_c \cos[\theta_i(t)]$$

- Phase Modulation, **PM**:

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t) \Rightarrow s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$$

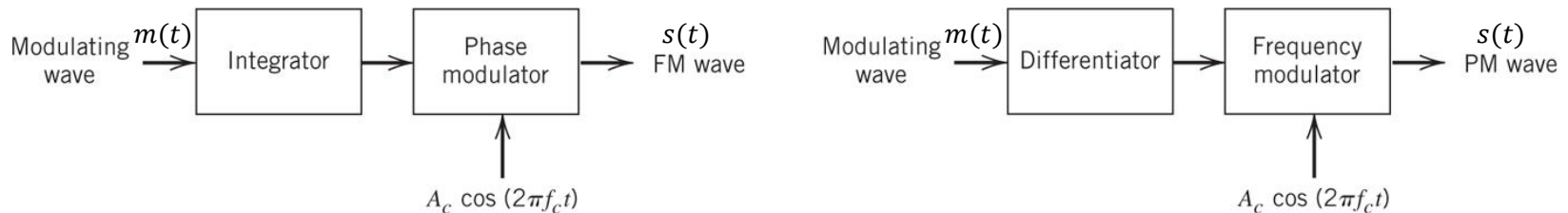
k_p : Ευαισθησία Φάσης (**Phase Sensitivity**), σε rad/volt αν $m(t)$ σε volt

- Frequency Modulation, **FM**:

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt}, \quad \theta_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \Rightarrow$$

$$s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right]$$

k_f : Ευαισθησία Συχνότητας (**Frequency Sensitivity**), σε hertz/volt αν $m(t)$ σε volt



(a) Σχέση Διαμόρφωσης Φάσης & Συχνότητας (b)

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

4.2 Βασικοί Ορισμοί Διαμόρφωσης Γωνίας (3/4)

Ιδιότητες Σημάτων $s(t)$ Διαμορφωμένων κατά Γωνία

- Σταθερότητα Μέσης Ισχύος: $P_{av} = \frac{1}{2} A_c^2$ (ανεξάρτητα από k_p, k_f)
- Μη Γραμμικότητα: Έστω $m(t) = m_1(t) + m_2(t)$
 $s_1(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m_1(t)]$, $s_2(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m_2(t)]$
 $s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p (m_1(t) + m_2(t))] \neq s_1(t) + s_2(t)$
⇒ Συγκριτικά με Διαμόρφωση Πλάτους: Δυσκολότερη Φασματική Ανάλυση αλλά (έμμεσο αποτέλεσμα) μεγαλύτερη αντοχή σε παρεμβολές & θόρυβο
- Μη Κανονικότητα στην Αλλαγή Πρόσημου (*Zero-Crossing Irregularity*): Η αλλαγή πρόσημου περιέχει όλη την πληροφορία του διαμορφώνοντος σήματος $m(t)$ αν $f_c \gg B_m$ όπου B_m η ζώνη διέλευσης (bandwidth) του $m(t)$
- Δυσκολία Οπτικής Αναπαράστασης Σήματος Πληροφορίας $m(t)$ από τη μορφή της $s(t)$. Στη Διαμόρφωση Πλάτους (AM) με ποσοστό διαμόρφωσης $100 \times \max_t |k_a m(t)| < 100$, η $m(t)$ είναι η περιβάλλουσα του $s(t)$

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ – 1ο Τμήμα

4.2 Βασικοί Ορισμοί Διαμόρφωσης Γωνίας (4/4)

Παράδειγμα: Zero-Crossings, $m(t) = \begin{cases} at, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$

$$f_c = \frac{1}{4} \text{ Hz}, a = 1 \text{ volt/s}$$

PM με Ευαισθησία $k_p = \frac{\pi}{2} \text{ rad/volt}$

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)] = \begin{cases} A_c \cos[2\pi f_c t + k_p at], & t \geq 0 \\ A_c \cos(2\pi f_c t), & t < 0 \end{cases}$$

Η $s(t)$ μηδενίζεται για $t \geq 0$ σε χρόνους t_n (zero-crossings) όταν

$$2\pi f_c t_n + k_p a t_n = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{ή}$$

$$t_n = \frac{\frac{1}{2} + n}{2f_c + \frac{k_p a}{\pi}} = \frac{1}{2} + n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

(zero-crossings με **σταθερές συχνότητες** $f_c = \frac{1}{4} \text{ Hz}$ για $t < 0$ και $f_c + k_p \frac{a}{2\pi} = \frac{1}{2} \text{ Hz}$ για $t \geq 0$)

FM με Ευαισθησία $k_f = 1 \text{ Hz/volt}$

$$s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] = \begin{cases} A_c \cos[2\pi f_c t + \pi k_f at^2], & t \geq 0 \\ A_c \cos(2\pi f_c t), & t < 0 \end{cases}$$

Η $s(t)$ μηδενίζεται για $t \geq 0$ σε χρόνους t_n (zero-crossings) όταν

$$2\pi f_c t_n + \pi k_f a t_n^2 = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{ή} \quad t_n = \frac{1}{ak_f} \left(-f_c + \sqrt{f_c^2 + ak_f \left(\frac{1}{2} + n \right)} \right) = \frac{1}{4} (-1 + \sqrt{9 + 16n})$$

Για $t \geq 0$ η στιγμιαία συχνότητα $f_i(t) = \frac{d[2\pi f_c t + \pi k_f at^2]}{dt} = 2\pi k_f at + 2\pi f_c$ **αυξάνεται γραμμικά ως προς t**

