



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ψηφιακές Επικοινωνίες

Ενότητα 4: Ψηφιακές Διαμορφώσεις Υψηλής
Φασματικής Αποδοτικότητας

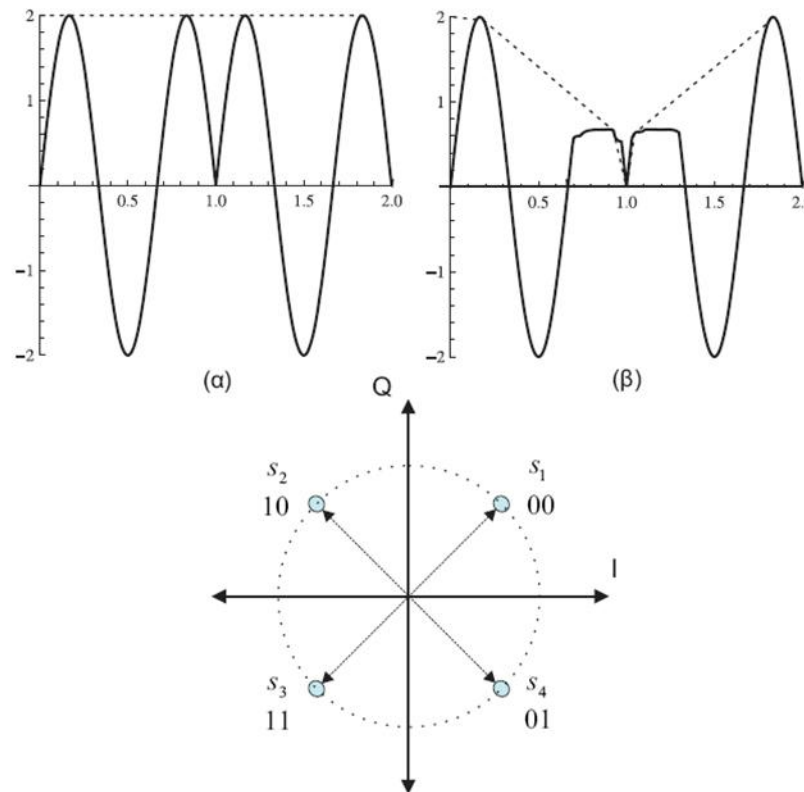
Παναγιώτης Μαθιόπουλος
Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Ψηφιακές Διαμορφώσεις Υψηλής Φασματικής Αποδοτικότητας

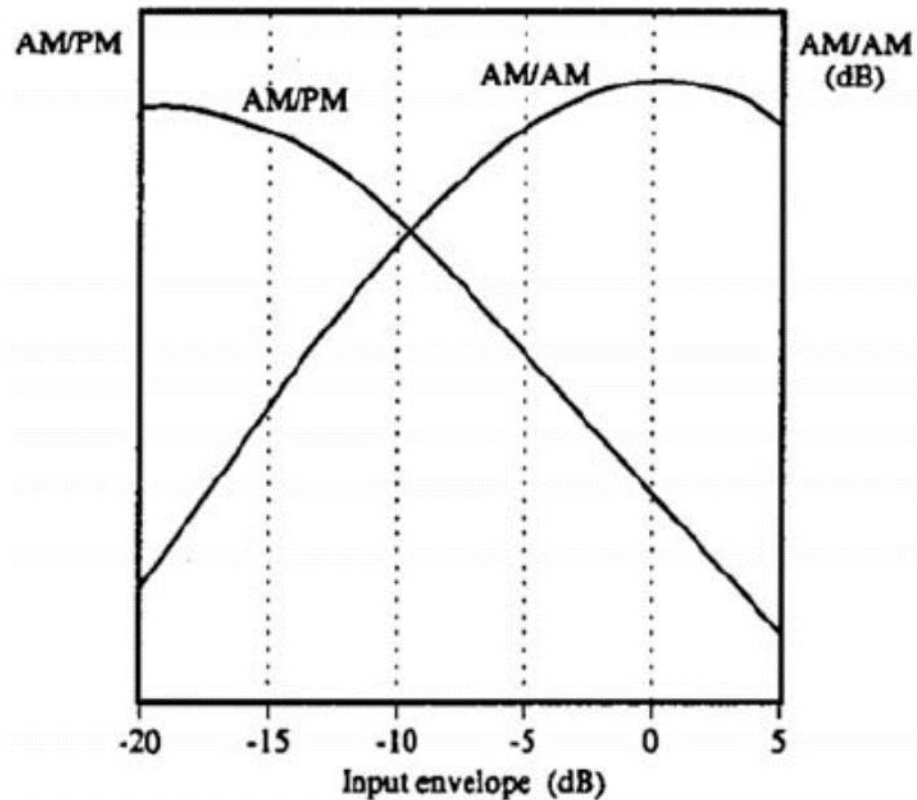
Μειονεκτήματα διαμορφώσεων PSK (1)

- Σχετικά μεγάλο απαιτούμενο εύρος ζώνης
- Παραμόρφωση της περιβάλλουσας από τη χρήση ζωνοπερατών φίλτρων.

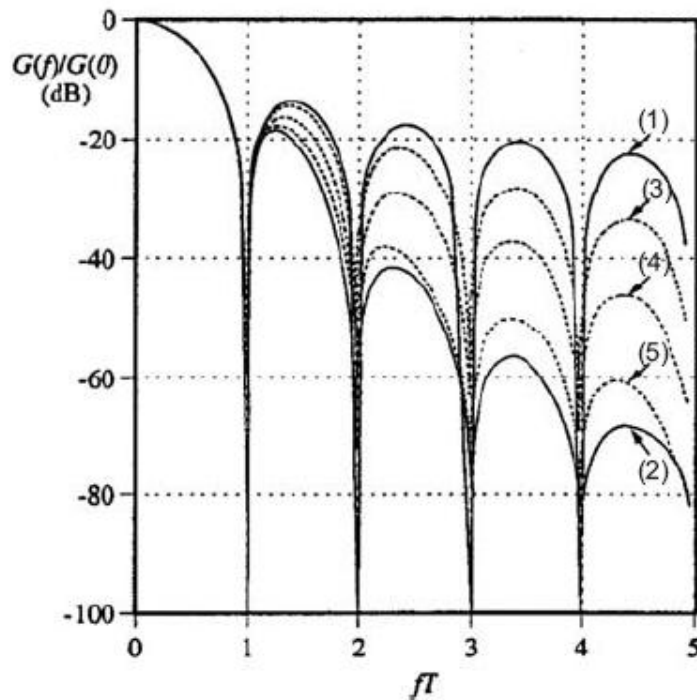


Μειονεκτήματα διαμορφώσεων PSK (2)

- Αρνητική συμπεριφορά όταν χρησιμοποιούνται ενισχυτές υψηλής ισχύος



Μειονεκτήματα διαμορφώσεων PSK (3)



- (1) στην έξοδο του διαμορφωτή,
- (2) στην έξοδο του ζωνοπερατού φίλτρου (περιορισμός των πλευρικών λοβών),
- (3) στην έξοδο του ενισχυτή για λειτουργία στον κόρο (επανεμφάνιση των πλευρικών λοβών),
- (4) στην έξοδο του ενισχυτή για λειτουργία στην περιοχή 6 dB χαμηλότερα από τον κόρο (6 dB Back-off),
- (5) στην έξοδο του ενισχυτή για 12 dB Back-off

Μειονεκτήματα διαμορφώσεων PSK

(4)

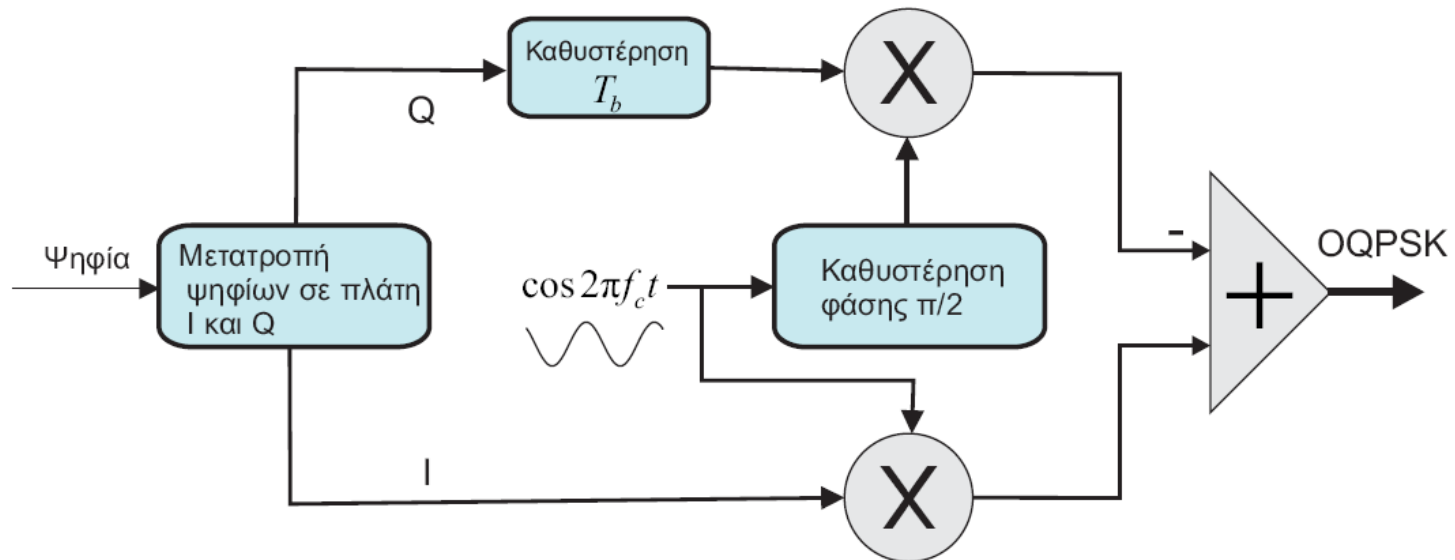
- Η χρήση back-off, δηλαδή η λειτουργία του ενισχυτή σε περισσότερο γραμμική περιοχή (χαμηλότερα από το κόρο) αντιμετωπίζει εν μέρει το πρόβλημα. Όμως, τότε ο πομπός λειτουργεί αντίθετα με την απαίτηση για αποτελεσματική διαχείριση της παρεχόμενης ισχύος
- Δεν μπορεί να γίνει τοποθέτηση του ζωνοπερατού φίλτρου μετά τον ενισχυτή, γιατί το εύρος ζώνης του φίλτρου είναι πολύ μικρό συγκρινόμενο με τη συχνότητα του φέροντος. Έτσι, ο δείκτης ποιότητας (Q-factor) του φίλτρου πρέπει να είναι πολύ μεγάλος, γεγονός που καθιστά σχεδόν απαγορευτική από πλευράς κόστους και πολυπλοκότητα υλοποίησης τη δημιουργία τέτοιων φίλτρων.
- Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό η ανάγκη για χρησιμοποίηση τεχνικών διαμόρφωσης οι με περιορισμένο εύρος ζώνης ή τουλάχιστον να αποφεύγουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις απότομες μεταβολές της φάσης, κατά την αλλαγή των συμβόλων.



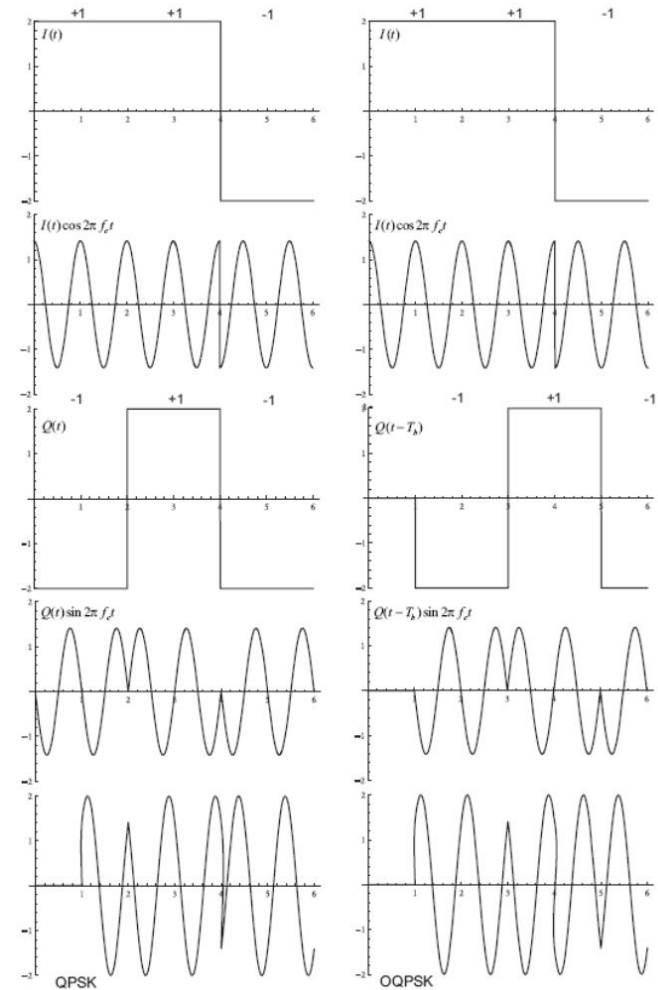
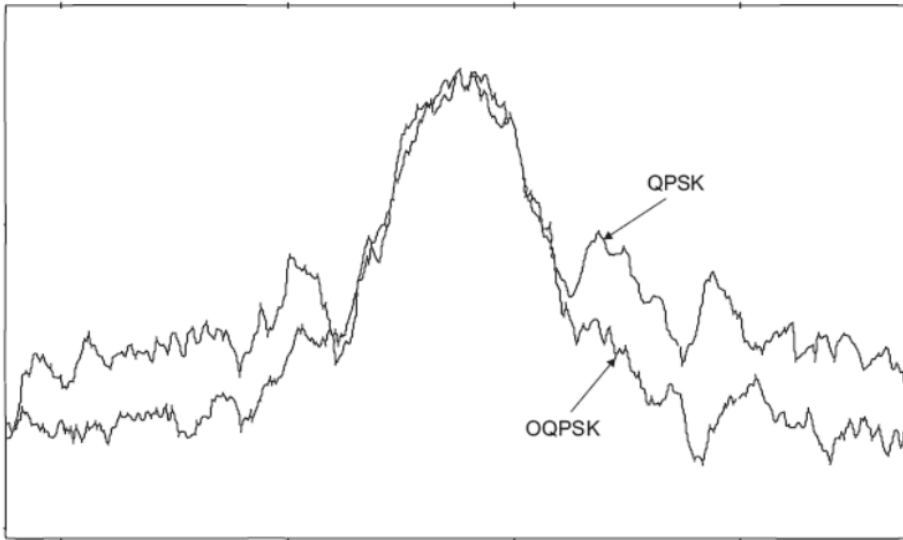
Off-set QPSK (OQPSK) (1)

- Σύμφωνα με την τεχνική OQPSK ή staggered QPSK, επιβάλλεται μια καθυστέρηση των δεδομένων του QPSK στην Q συνιστώσα κατά μισή περίοδο συμβόλου.

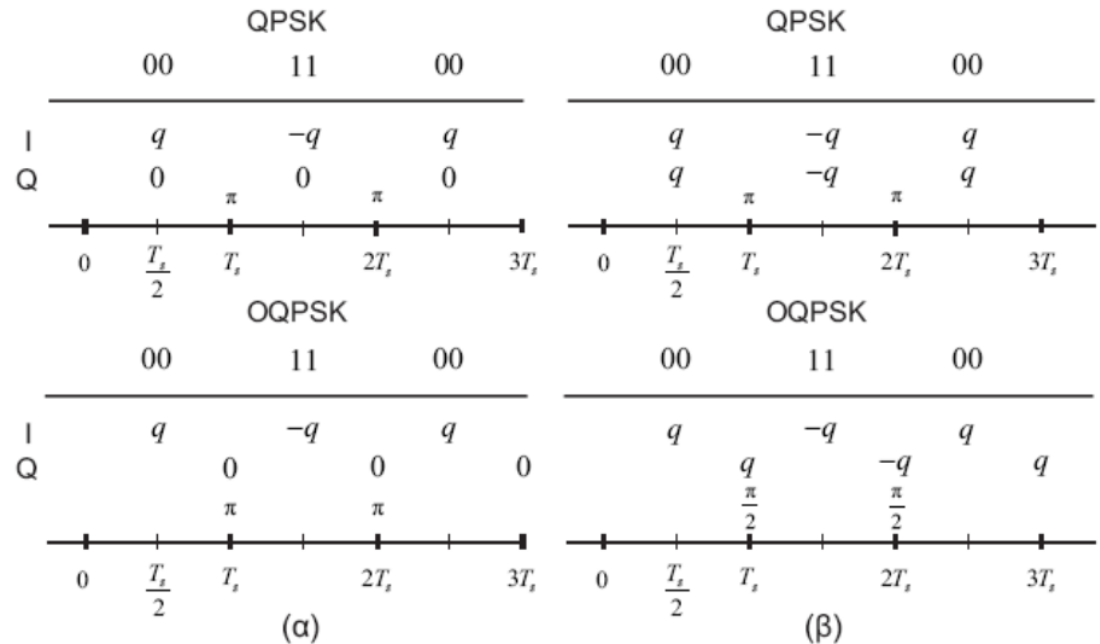
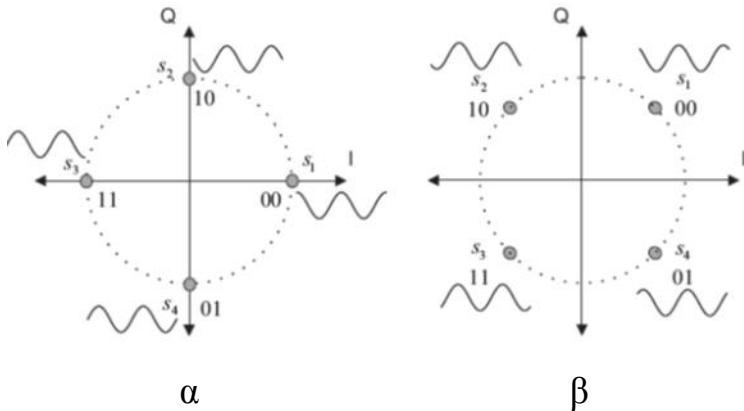
$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} I(t) \cos 2\pi f_c t - \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} Q(t - T_b) \sin 2\pi f_c t$$



Off-set QPSK (OQPSK) (2)



Off-set QPSK (OQPSK) (3)

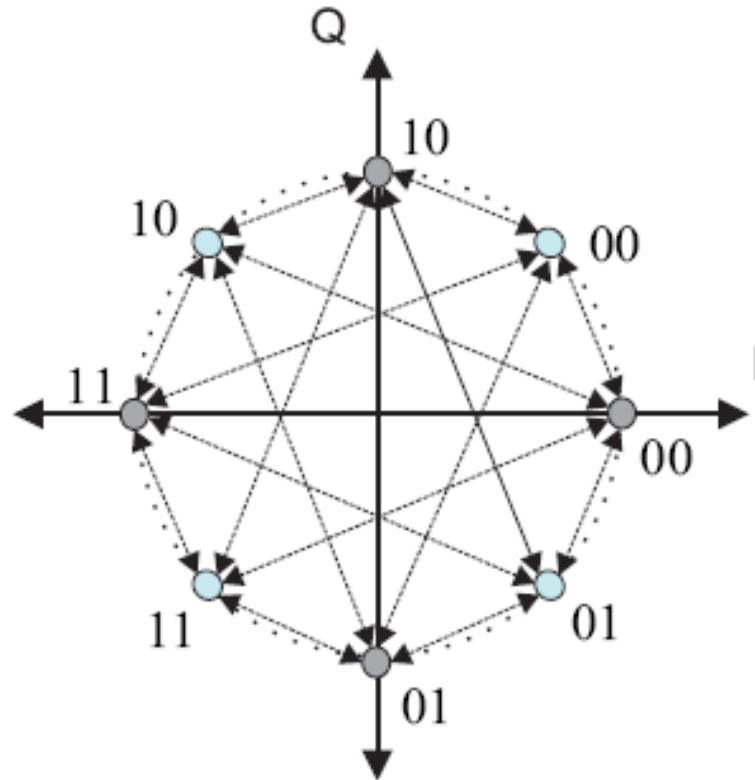


(α)

(β)



$\pi/4$ -QPSK ή Ψευδο-οκταδικό QPSK



Διαμορφώσεις Συνεχούς Φάσης (Continuous Phase Modulation-CPM)

$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{T}} \cos [2\pi f_c t + \Phi(t, \mathbf{a})]$$

$$\Phi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n q(t - nT)$$

$$\mathbf{a} = \{a_0 a_1 a_2 \dots\} \quad \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\} \text{ με } M = 2^K$$

h , είναι ο δείκτης διαμόρφωσης

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau.$$

↑ Απόκριση φάσης ↓ Απόκριση συχνότητας



$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi h \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \int_{-\infty}^{t-nT} g(\tau) d\tau \right]$$



Παλμοί απόκρισης συχνότητας (1)

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) d\tau = \frac{1}{2}$$

Ορθογώνιος παλμός (Rectangular pulse) LREC-CPM

$$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT}, & 0 \leq t \leq LT \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau = \begin{cases} \frac{t}{2LT}, & 0 \leq t \leq LT \\ \frac{1}{2}, & t > LT \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

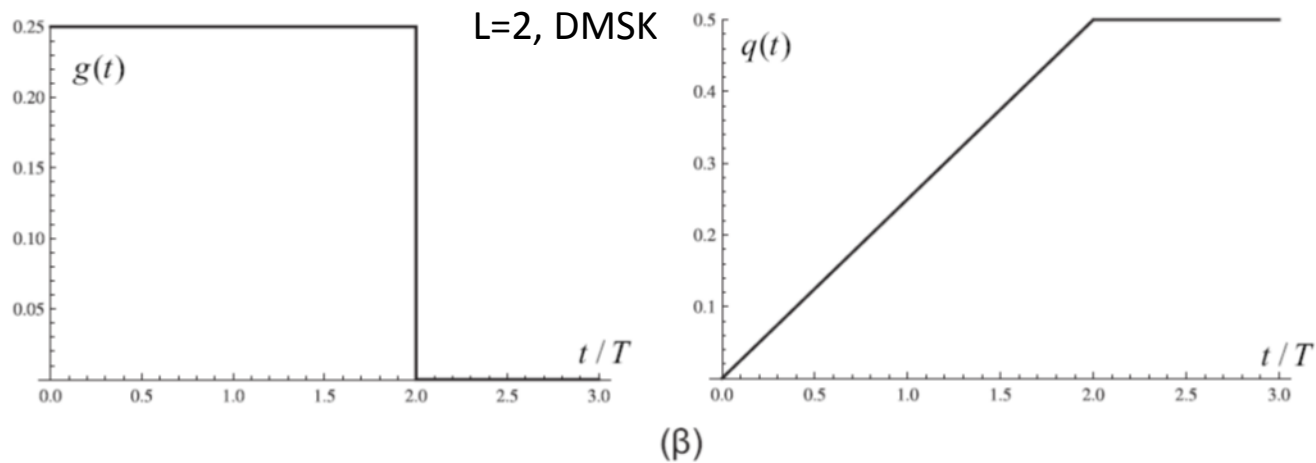
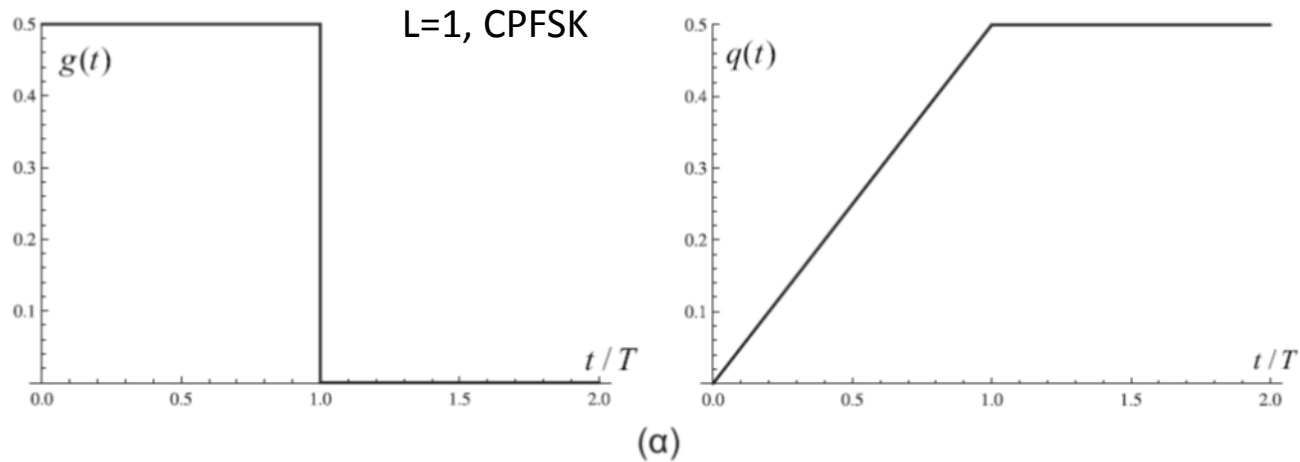
1REC-CPM \rightarrow *Continuous Phase FSK (CPFSK)*

CPFSK με $h = \frac{1}{2}$ \rightarrow *Minimum Shift Keying-MSK*

2REC-CPM \rightarrow *διπλοδυαδικό (duobinary) MSK (DMSK)*



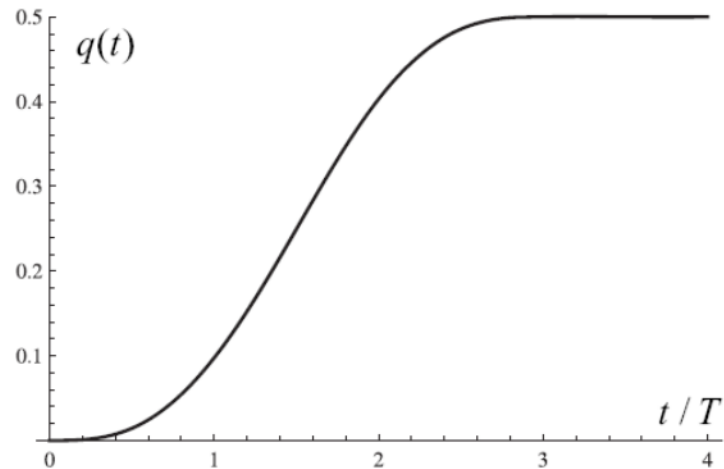
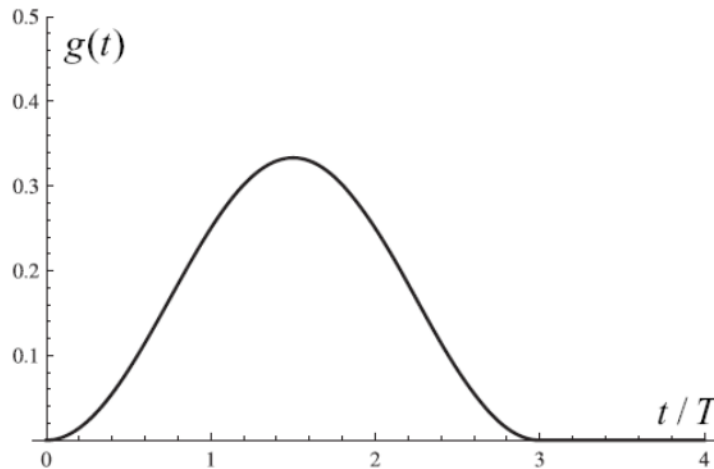
Παλμοί απόκρισης συχνότητας (2)



Παλμοί απόκρισης συχνότητας (3)

Παλμός ανυψωμένου συνημιτόνου (Raised cosine pulse) LRC-CPM

$$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT} \left[1 - \cos \frac{2\pi t}{LT} \right], & 0 \leq t \leq LT \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$



Παράδειγμα δυαδικού 3RC-CPM

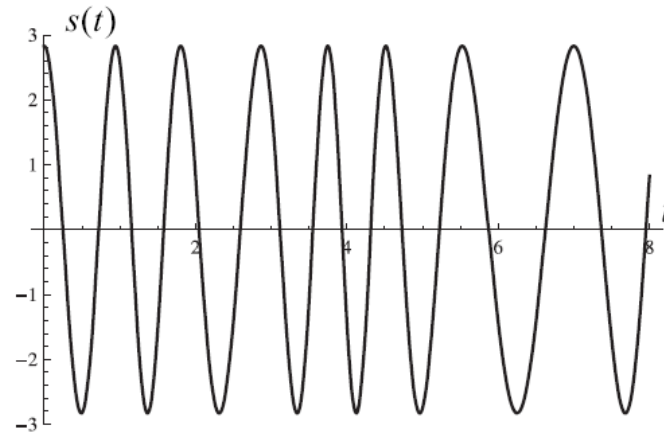
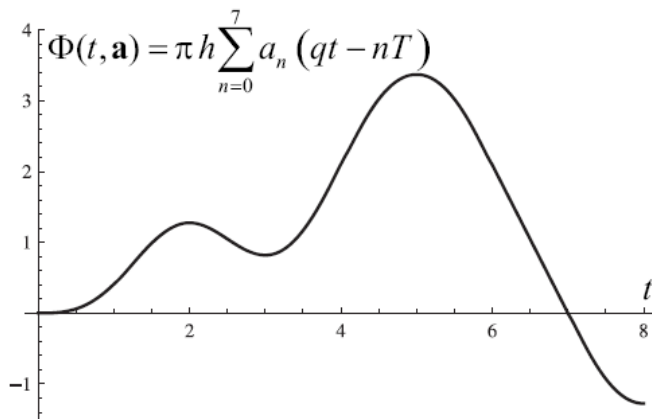
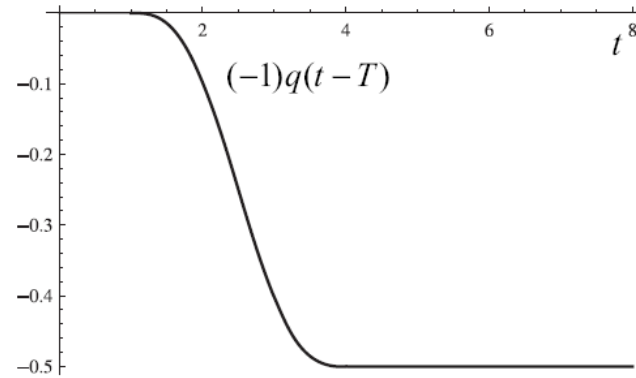
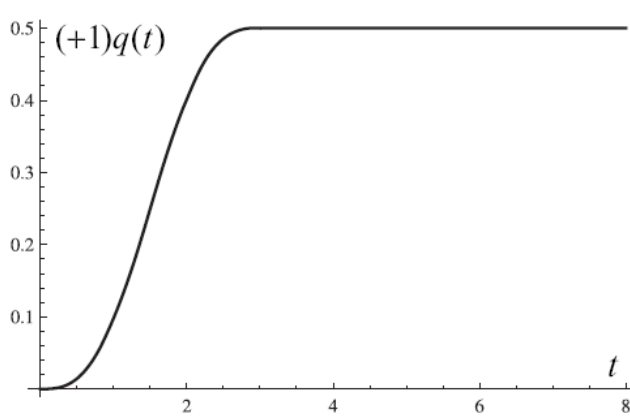
$$h = \frac{2}{3}$$

$$T = 1$$

$$\mathbf{a} = \{+1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1\}$$

$$f_c = \frac{1}{T}$$

$$\mathcal{E}_s = 4$$



Minimum Shift Keying (MSK)

1REC-CPM με $M = 2$ και $h = \frac{1}{2}$

$$\begin{aligned}\Phi(t, \mathbf{a}) &= 2\pi h \sum_{n=-\infty}^k a_n q(t - nT) = \pi \sum_{n=-\infty}^k a_n q(t - nT) \\ &= \pi \left[\sum_{n=-\infty}^{k-1} a_n \frac{1}{2} + a_k \frac{1}{2T}(t - kT) \right] = a_k \frac{\pi t}{2T} + \phi_k\end{aligned}$$

$$\phi_k = \left[\frac{\pi}{2} \left(\sum_{n=-\infty}^{k-1} a_n - ka_k \right) \right] \text{mod } 2\pi$$



$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos [2\pi f_c t + \Phi(t, \mathbf{a})] = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos \left(2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T} + \phi_k \right)$$



Η αντιστοιχία μεταξύ MSK και BFSK (1)

$$\begin{aligned} s(t) &= \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos \left(2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T} + \phi_k \right) \\ &= \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos \left[2\pi \left(f_c + a_k \frac{1}{4T} \right) t + \phi_k \right] \end{aligned}$$

- Επειδή, $a_k = \pm 1$, το MSK αντιστοιχεί σε ένα σήμα BFSK με διακριτές στιγμιαίες συχνότητες,

$$f_1 = f_c + \frac{1}{4T} \text{ και } f_2 = f_c - \frac{1}{4T}. \quad (1.20)$$



Η αντιστοιχία μεταξύ MSK και BFSK (2)

$$\mathbf{a} = \{-1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1\}$$

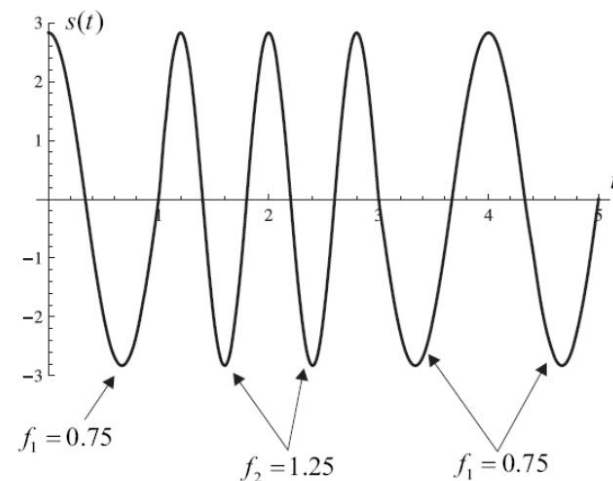
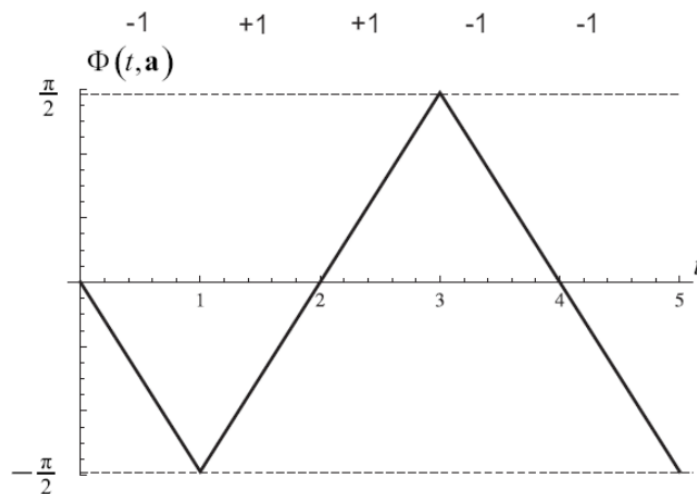
$$\mathcal{E}_b = 4, f_c = \frac{1}{T} = 1$$

$$\Phi(0, \mathbf{a}) = 0$$

$$\Phi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{n=0}^4 a_n q(t - nT) = \pi \sum_{n=0}^4 a_n q(t - n)$$

$$\Phi_{\max}(t, \mathbf{a}) = \frac{\pi}{2} \text{ και } \Phi_{\min}(t, \mathbf{a}) = -\frac{\pi}{2}$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau = \begin{cases} \frac{t}{2LT}, & 0 \leq t \leq LT \\ \frac{1}{2}, & t > LT \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$



Η αντιστοιχία μεταξύ MSK και OQPSK (1)

Το MSK μπορεί να προκύψει από τη διαμόρφωση OQPSK, αν οι συνιστώσες $I(t)$ και $Q(t)$ πολλαπλασιαστούν (προδιαμορφωθούν) με σήματα μισής περιόδου συνημιτόνου ή ημιτόνου, τα οποία έχουν περίοδο ίση με $4T$. Τα σήματα αυτά είναι: $\cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right)$ και $\sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right)$, αντίστοιχα.

$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} I(t) \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos 2\pi f_c t + \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} Q(t) \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin 2\pi f_c t,$$

$$s(t) = \pm \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \cos 2\pi f_c t \pm \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \sin 2\pi f_c t.$$

$$a_k = -I_k Q_k$$

$$s(t) = I_k \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos\left[2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T}\right] = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T_b}} \cos\left[2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T_b} + \phi_k\right]$$

$$\phi_k = \frac{\pi}{2}(1 - I_k)$$



Η αντιστοιχία μεταξύ MSK και OQPSK (2)

$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos [2\pi f_c t + \Phi(t, \mathbf{a})] = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos \left(2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T} + \phi_k \right)$$



$$s(t) = I_k \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T} \right] = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{T_b}} \cos \left[2\pi f_c t + a_k \frac{\pi t}{2T_b} + \phi_k \right]$$

$$a_k = -I_k Q_k$$

Αν η ακολουθία των bits πληροφορίας είναι \mathbf{a} , τότε αποδεικνύεται ότι ο περιορισμός που εκφράζει η σχέση (1.27) ικανοποιείται αν οι $I(t)$ και $Q(t)$ προκύψουν από την ακολουθία των περιττών και των άρτιων bits, αντίστοιχα, μιας νέας ακολουθίας, \mathbf{d} , η οποία είναι η διαφορικά απο-κωδικοποιημένη έκδοση της \mathbf{a} . Δηλαδή, αν εφαρμοστεί στην ακολουθία \mathbf{d} η λογική λειτουργία exclusive OR (XOR) μεταξύ ενός bit και του προηγούμενου, τότε η νέα ακολουθία που θα προκύψει θα είναι η \mathbf{a} .

$$\mathbf{a} = \{+1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1\},$$

$$\mathbf{d} = \{+1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1\}$$



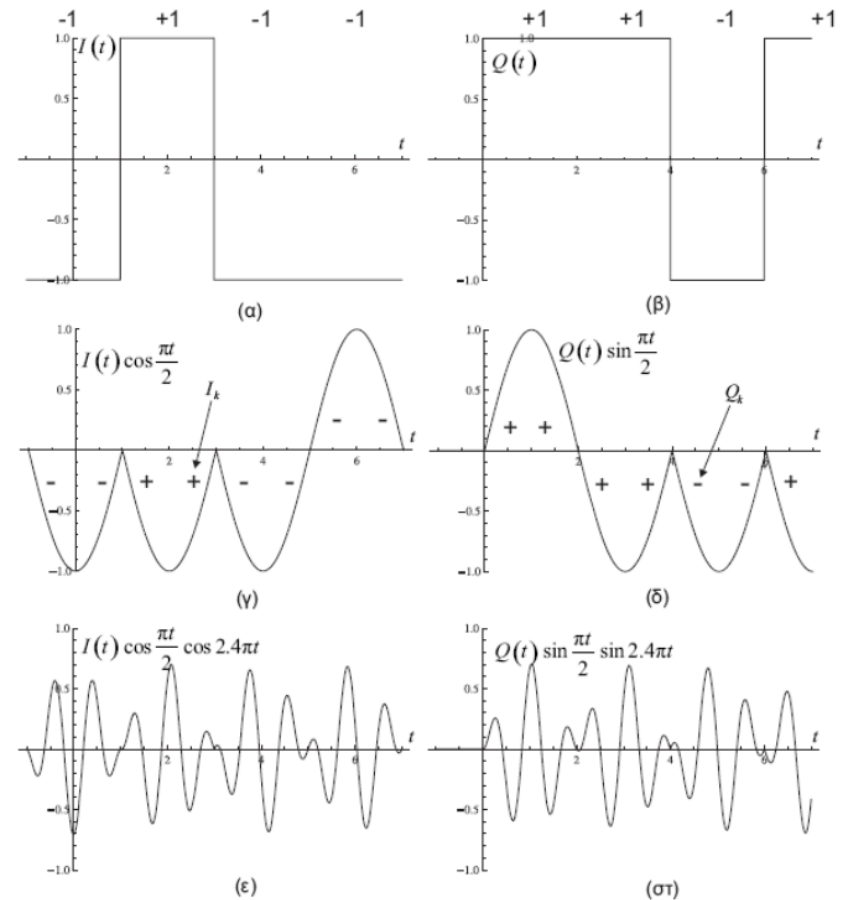
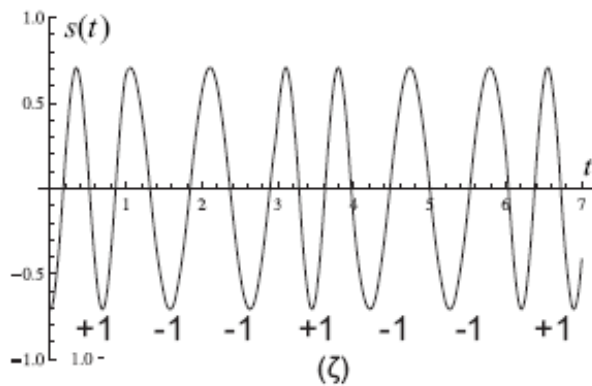
Η αντιστοιχία μεταξύ MSK και OQPSK (3)

$$\mathbf{a} = \{+1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1\}$$

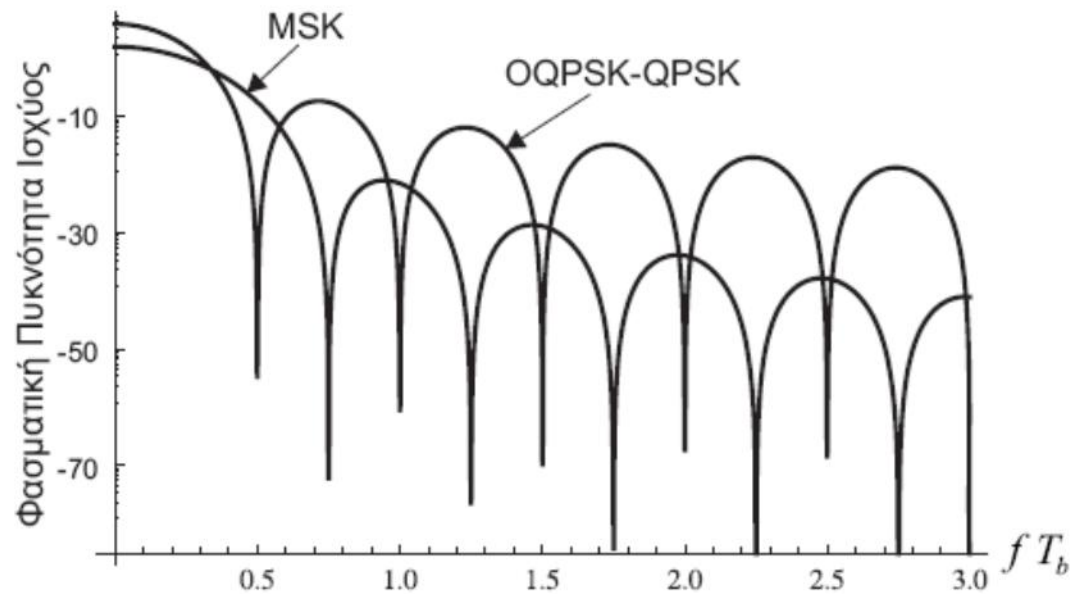
$$\mathcal{E}_b = \frac{1}{2}, \quad f_c = 1.2 \text{ και } T = 1$$

$$\mathbf{d} = \{-1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1\}$$

$$I(t) \Rightarrow (-1 \ +1 \ -1 \ -1) \quad Q(t) \Rightarrow (+1 \ +1 \ -1 \ +1)$$



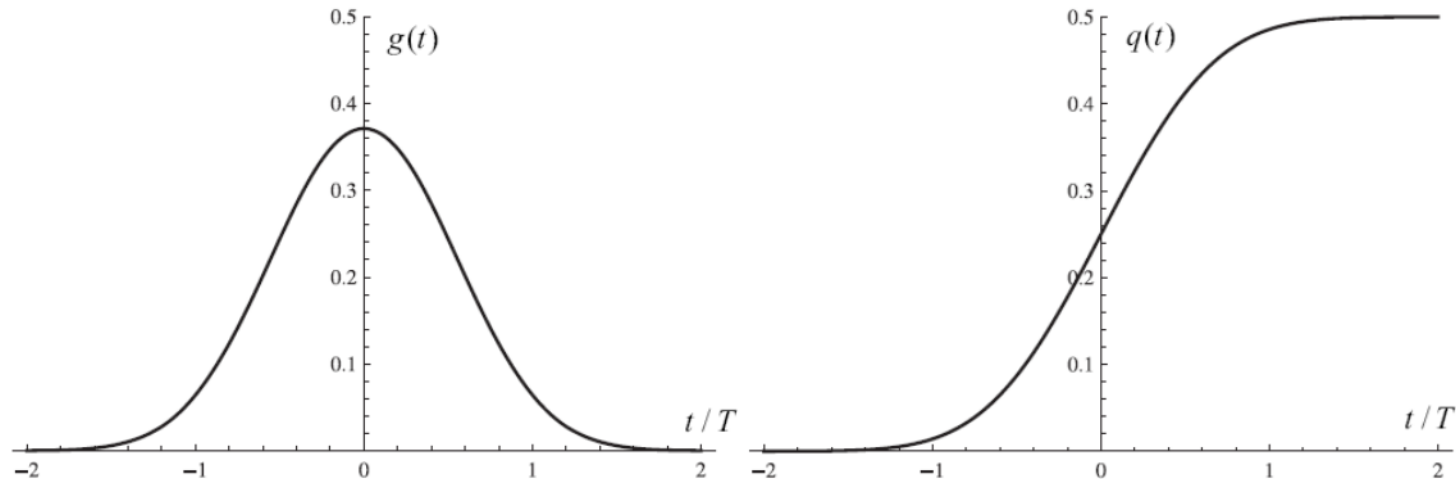
Φασματική πυκνότητα ισχύος



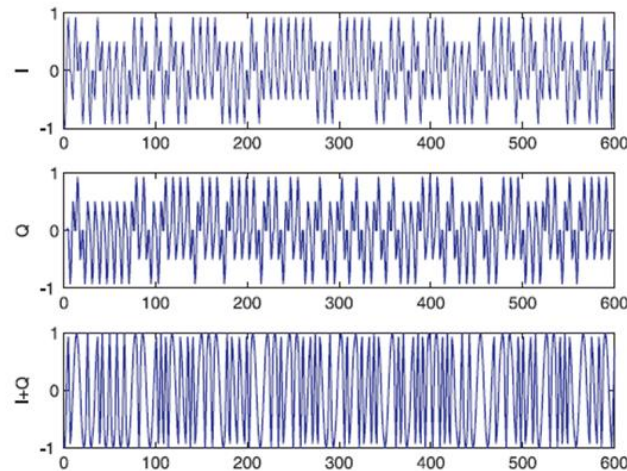
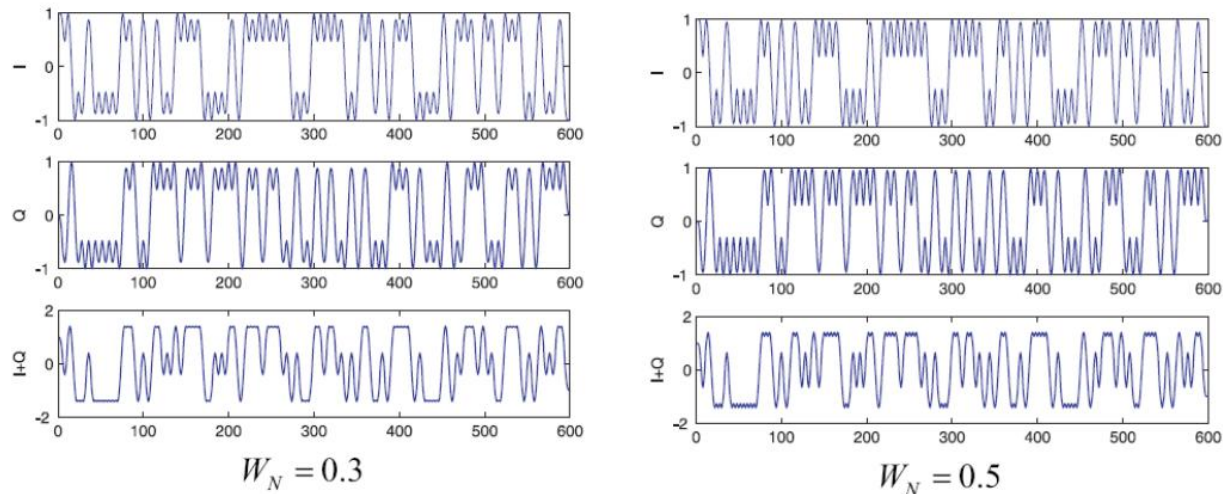
Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) (1)

LREC-CPM με $M = 2$, $h = \frac{1}{2}$ (όπως και στην MSK) και $L > 1$.

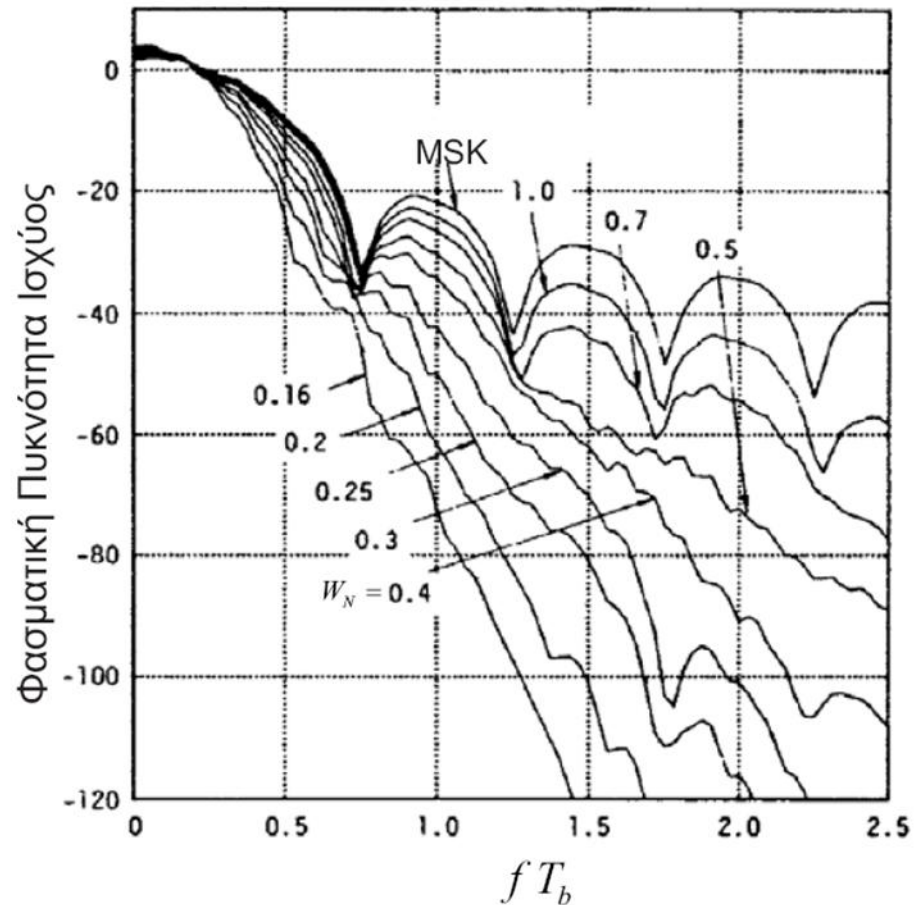
$$g(t) = \frac{1}{2T_b} \left(Q\left(2\pi W \frac{t - \frac{T_b}{2}}{\sqrt{\log 2}}\right) - Q\left(2\pi W \frac{t + \frac{T_b}{2}}{\sqrt{\log 2}}\right) \right), \quad W_N \in [0, \infty) \quad W_N = WT_b$$



Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) (2)



Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) (3)



Φασικές καταστάσεις, Φασικά δένδρα και Διαγράμματα Trellis (1)

$$\Phi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{n=k-(L-1)}^k a_n q(t - nT) + \phi_k = \phi(t, \mathbf{a}) + \phi_k$$

$$\phi_k = \left[\pi h \sum_{n=-\infty}^{k-L} a_n \right] \text{mod} 2\pi. \quad \Rightarrow \quad \text{συσσωρευμένη φάση (cumulate phase)}$$

$$\phi_{k+1} = \phi_k + h\pi a_{k-L+1}$$

$$\phi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{n=k-(L-1)}^k a_n q(t - nT) \quad \Rightarrow \quad \text{στιγμαία φάση (instant phase)}$$

κατάσταση (state) ενός σήματος CPM την χρονική στιγμή, $t = kT$.



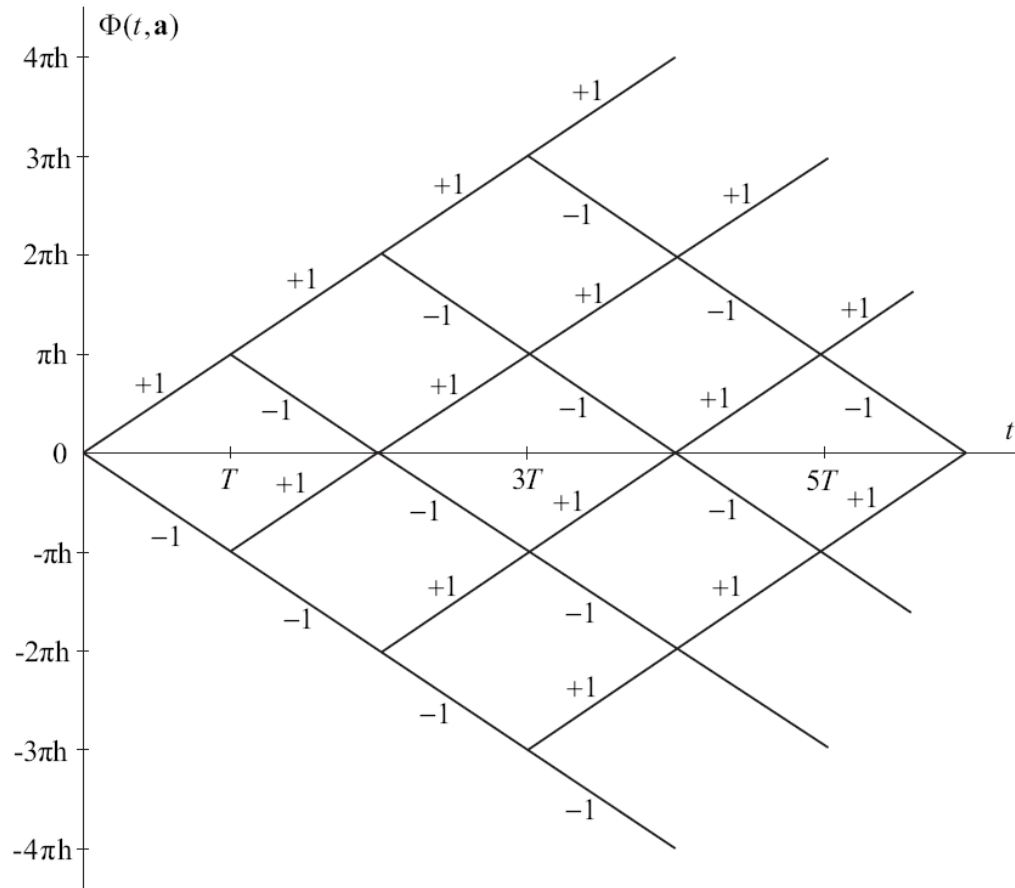
$$\mathbf{z}_k = \{\phi_k, a_{k-1}, a_{k-2}, \dots, a_{k-L+1}\}$$



Φασικές καταστάσεις, Φασικά δένδρα και Διαγράμματα Trellis (2)

1REC-CPM.

$$\phi_{k+1} = \phi_k + h\pi a_{k-L+1}$$



Σχήμα 1.18: Φασικό δένδρο για το CPFSK (Παράδειγμα 1.6)



Φασικό δένδρο για MSK

$$\mathbf{a} = \{-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1\}$$

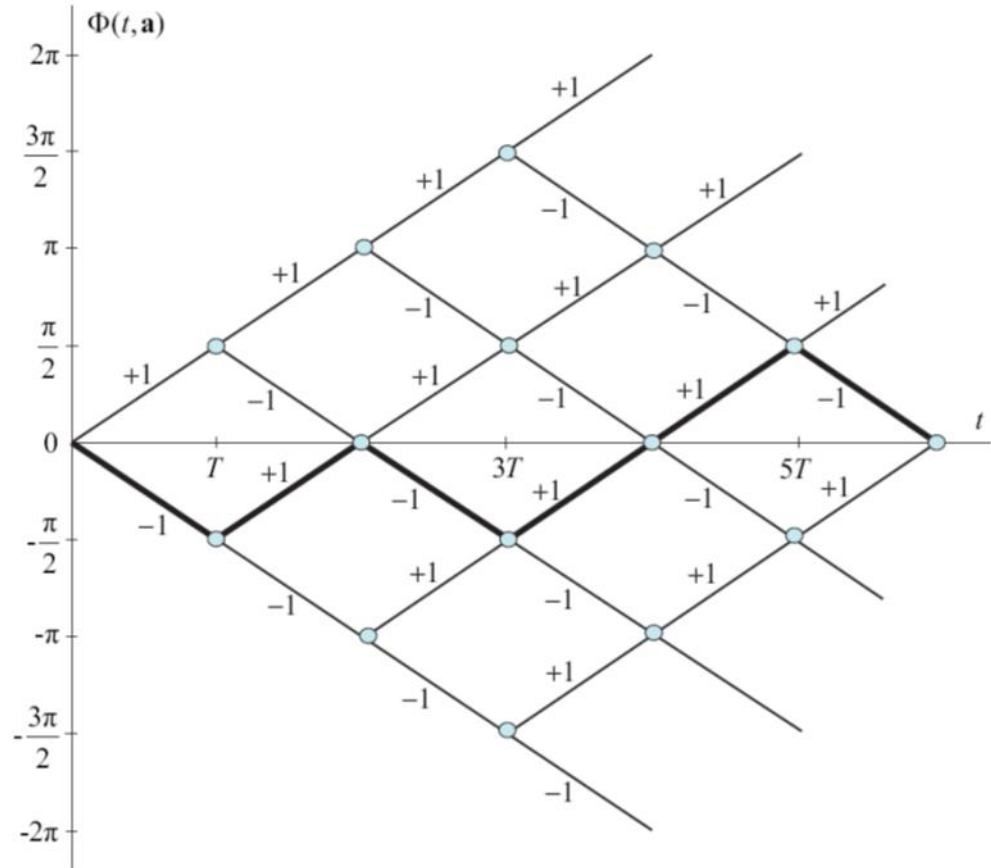
$$\phi_k =: \begin{cases} 0 \\ \frac{\pi}{2} \\ \pi \\ \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

$$\phi_{k+1} = \phi_k + h\pi a_{k-L+1}$$

$$L = 1 \text{ και } h = \frac{1}{2}$$



$$\phi_{k+1} = \phi_k + \frac{\pi}{2} a_k.$$



Διάγραμμα Trellis Φάσεων για MSK (1)

$$\mathbf{a} = \{-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1\}$$

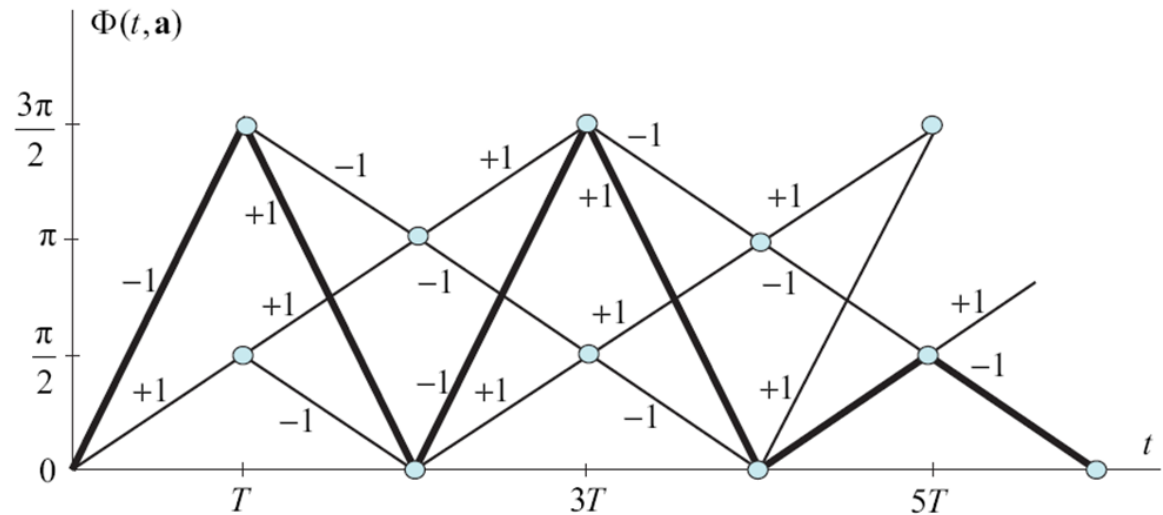
$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \frac{\pi}{2} \\ \pi \\ \frac{3\pi}{2} \end{array} \right.$$

$$\phi_{k+1} = \phi_k + h\pi a_{k-L+1}$$

$$L = 1 \text{ και } h = \frac{1}{2}$$



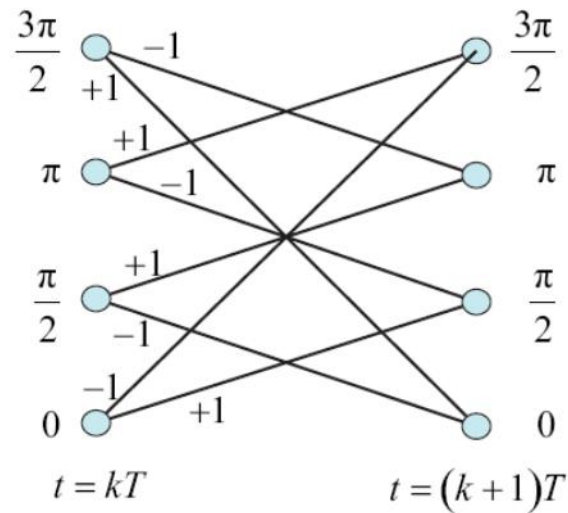
$$\phi_{k+1} = \phi_k + \frac{\pi}{2} a_k.$$



Διάγραμμα Trellis Φάσεων για MSK (2)

$$\mathbf{a} = \{-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1\}$$

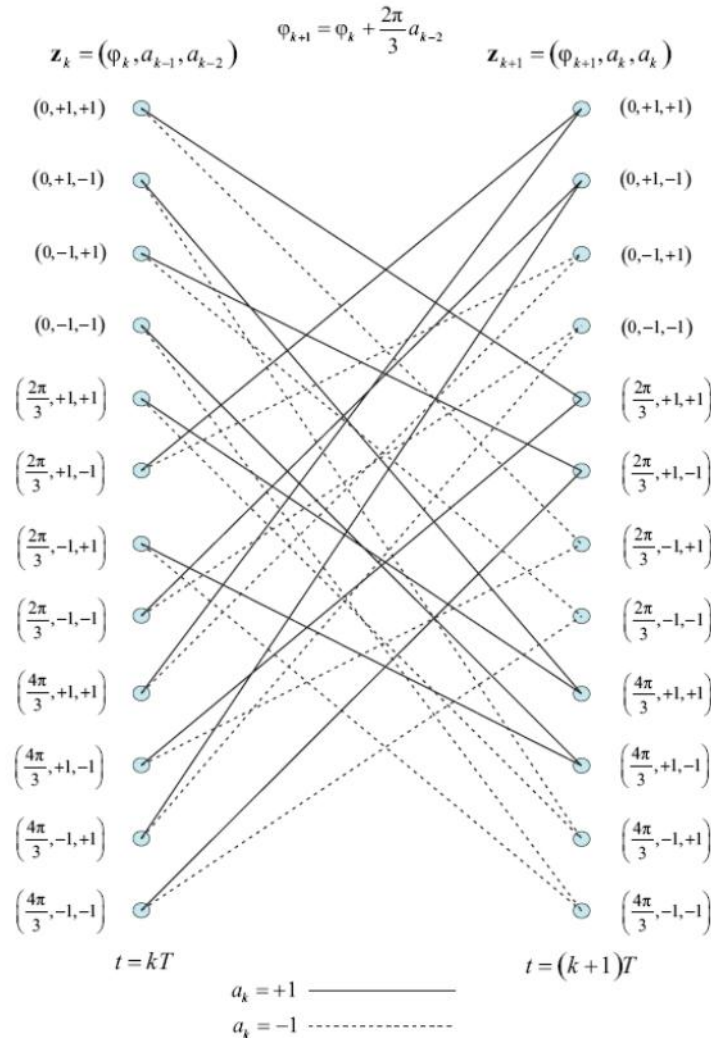
$$\phi_{k+1} = \phi_k + \frac{\pi}{2}a_k.$$



Διάγραμμα Trellis καταστάσεων

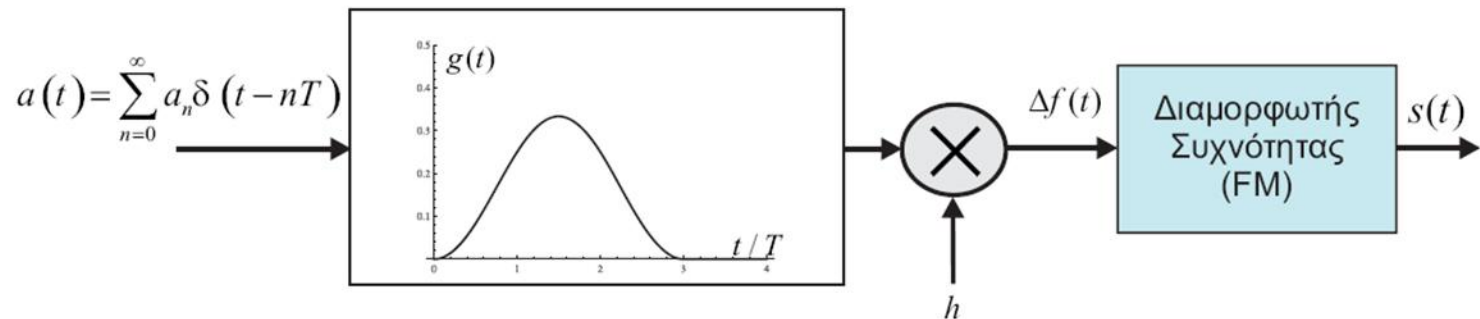
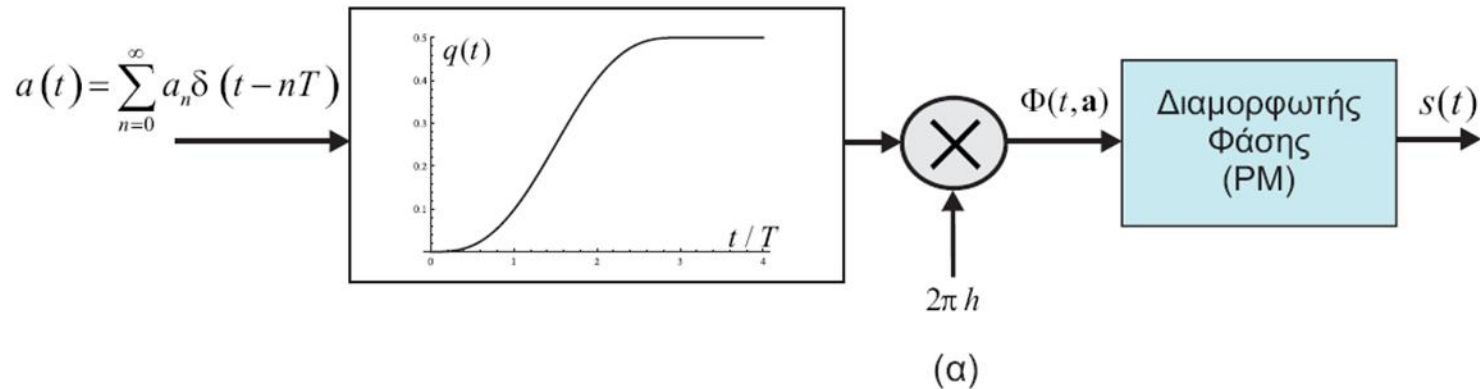
3RC-CPM, όταν $h = \frac{2}{3}$

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{2\pi}{3} a_{k-2}$$

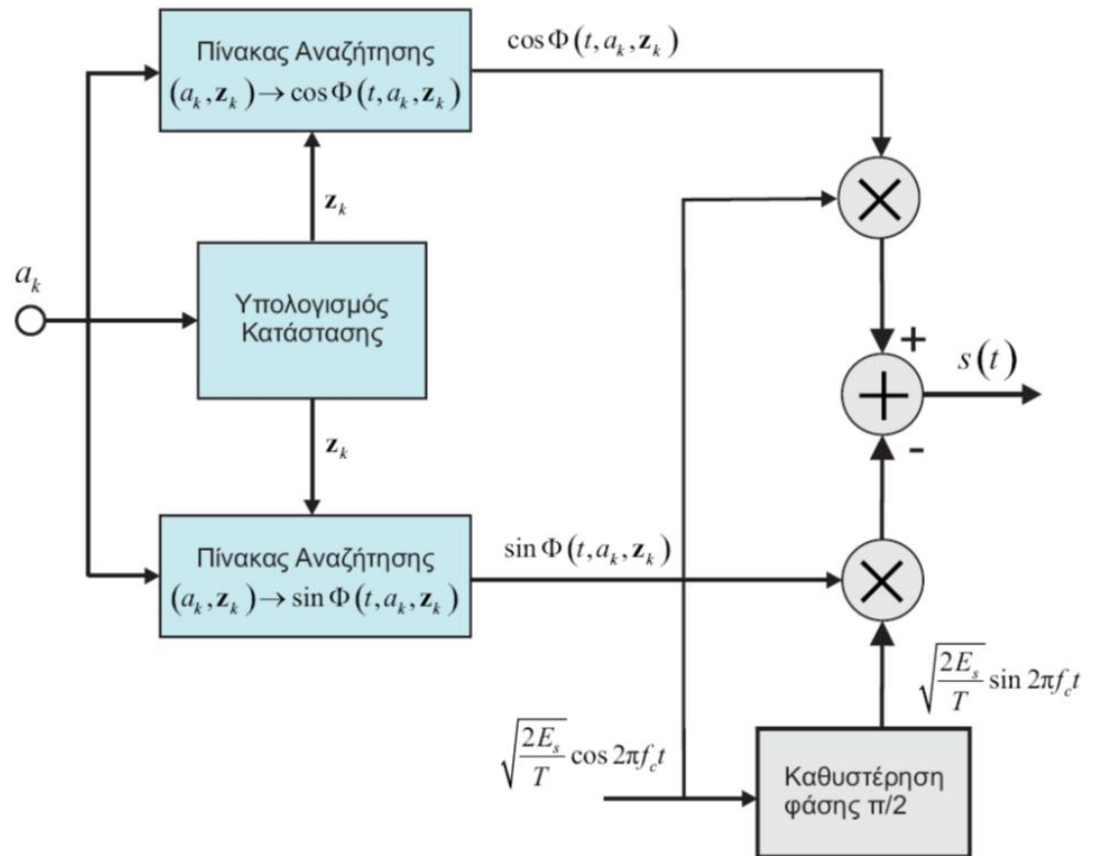


Διαμορφωτές CPM (1)

$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{T}} \cos [2\pi f_c t + \Phi(t, \mathbf{a})] \quad \Phi(t, \mathbf{a}) = 2\pi h \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n q(t - nT) \quad \mathbf{a} = \{a_0 a_1 a_2 \dots\}$$



Διαμορφωτές CPM (2)



$$s(t) = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{T}} \cos [2\pi f_c t + \Phi(t, \mathbf{a})]$$

$$= \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{T}} \cos \Phi(t, \mathbf{a}) \cos 2\pi f_c t - \sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{T}} \sin \Phi(t, \mathbf{a}) \sin 2\pi f_c t.$$



Τέλος Ενότητας

Ψηφιακές Διαμορφώσεις Υψηλής
Φασματικής Αποδοτικότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.

Έχουν προηγηθεί οι κάτωθι εκδόσεις:

- Έκδοση διαθέσιμη [εδώ](#).



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Μαθιόπουλος Παναγιώτης 2015. Παναγιώτης Μαθιόπουλος. «Ψηφιακές Επικοινωνίες, Ψηφιακές Διαμορφώσεις Υψηλής Φασματικής Αποδοτικότητας». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI38>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

"Η δομή και οργάνωση της παρουσίασης, καθώς και το υπόλοιπο περιεχόμενο, αποτελούν πνευματική ιδιοκτησία του συγγραφέα και του Πανεπιστημίου Αθηνών και διατίθενται με άδεια Creative Commons Αναφορά Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή Έκδοση 4.0 ή μεταγενέστερη.

Οι Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/φωτογραφίες που περιέχονται στην παρουσίαση αποτελούν πνευματική ιδιοκτησία τρίτων.

- Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα, Γ. Κ. Καραγιαννίδης, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2η Έκδοση, 2010
- Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα, J. Proakis και M. Salehi, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΕΩΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΥΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ, 2003

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή, αναδημοσίευση και διάθεσή τους στο κοινό με οποιονδήποτε τρόπο χωρίς τη λήψη άδειας από τους δικαιούχους. "

