

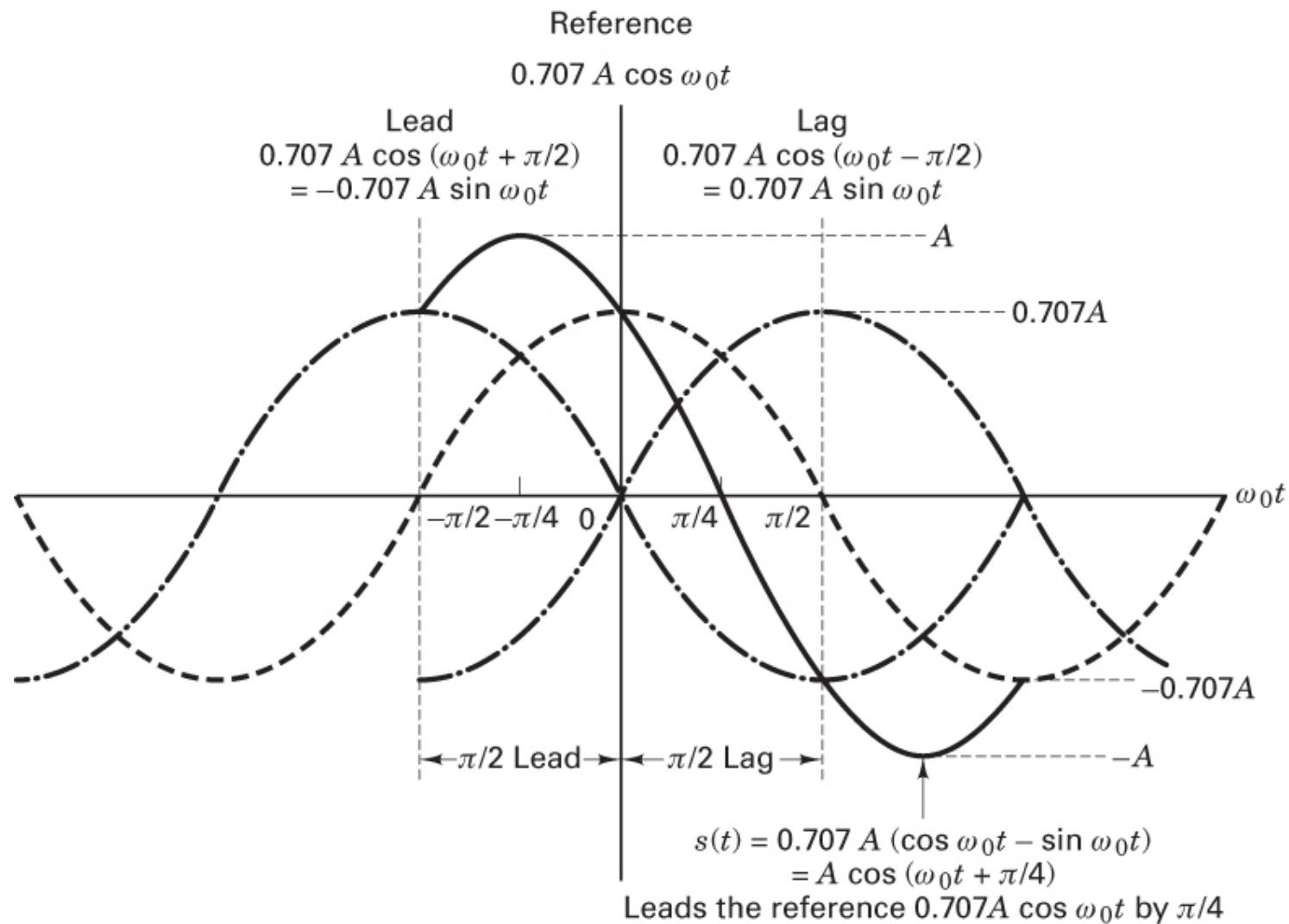
Ψηφιακές Επικοινωνίες

**Κεφ 4: Διαμόρφωση & Αποδιαμόρφωση Ζώνης
Διέλευσης**

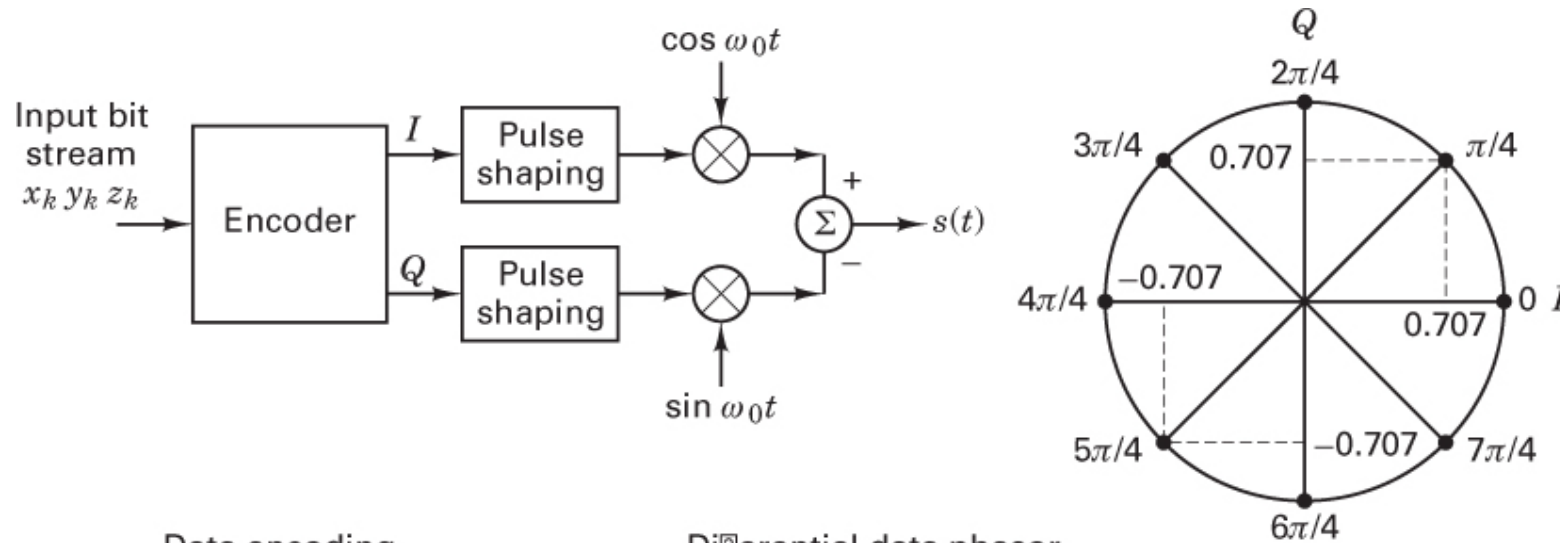
Συνέχεια

Μιγαδική Περιβάλλουσα

Προπορεία / Υστέρηση σε Ημιτονοειδή



Εγκάρσια Υλοποίηση Διαμορφωτή D8PSK



Data encoding

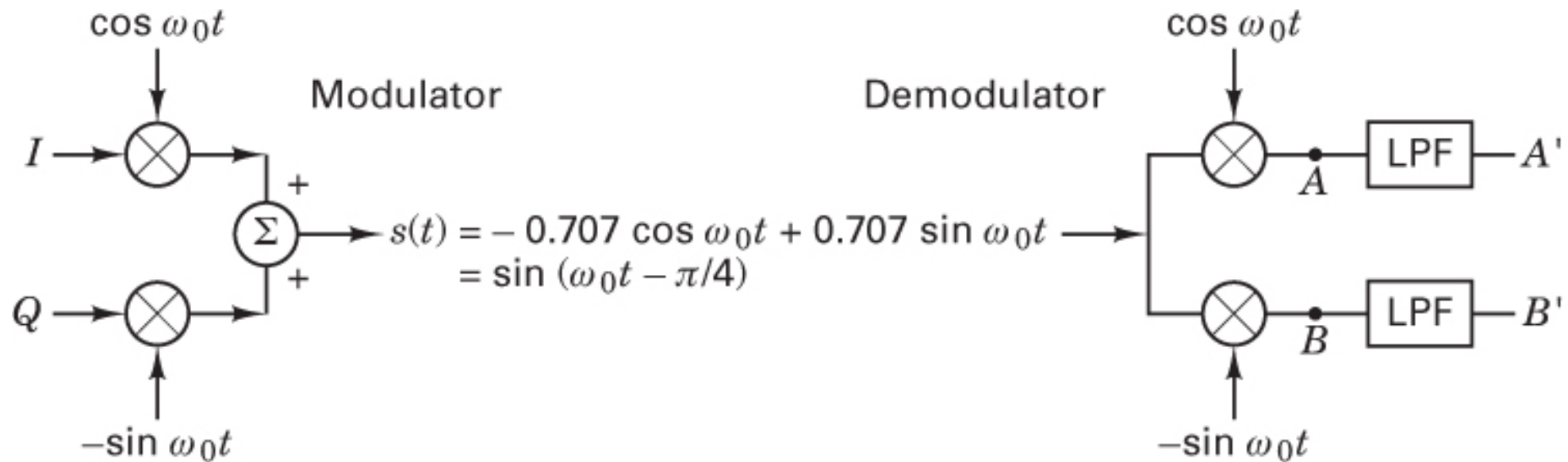
x_k	y_k	z_k	$\Delta\phi_k$
0	0	0	0
0	0	1	$\pi/4$
0	1	1	$2\pi/4$
0	1	0	$3\pi/4$
1	1	0	$4\pi/4$
1	1	1	$5\pi/4$
1	0	1	$6\pi/4$
1	0	0	$7\pi/4$

Differential data phasor

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \Delta\phi_k$$

Let $\phi_0 = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
$x_k y_k z_k$	110	001	110	010
$\Delta\phi_k$:	π	$\pi/4$	π	$3\pi/4$
ϕ_k :	π	$5\pi/4$	$\pi/4$	π
I :	-1	-0.707	0.707	-1
Q :	0	-0.707	0.707	0

Παράδειγμα Διαμορφωτή / Αποδιαμορφωτή



Επίδοση Δυναμικών Συστημάτων ως προς τα Σφάλματα

Μέτρα Επίδοσης

- Λόγος σήματος-προς-θόρυβο – SNR
- Λόγος σήματος-προς-παρεμβολή και θόρυβο – SINR
- Ρυθμός σφάλματος bit ή συμβόλου – BER ή SER
- Αποδοτικότητα ισχύος – Power efficiency
- Φασματική αποδοτικότητα – Spectral efficiency
- Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας – Bit rate
 - Χωρητικότητα καναλιού – Channel capacity
- Πιθανότητα διακοπής επικοινωνίας – Outage probability

SNR

Ορισμός: Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio (SNR)) είναι ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς την ισχύ του θορύβου που εισάγει ο δέκτης, δηλαδή

$$SNR = \frac{P_r}{P_N}$$

Σε ασύρματες εφαρμογές, ο θόρυβος είναι τυχαία μεταβλητή, οπότε χρησιμοποιείται η μέση τιμή του SNR.

SINR

Ορισμός: Ο λόγος σήματος προς παρεμβολές και (signal to interference plus noise ratio (SINR)) είναι ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς το άθροισμα της ισχύος του θορύβου και των παρεμβολών , δηλαδή

$$SINR = \frac{P_r}{P_N + P_I}$$

Σε ασύρματες εφαρμογές, ο θόρυβος και οι παρεμβολές είναι τυχαίες μεταβλητές, οπότε χρησιμοποιείται η μέση τιμή του SINR.

BER ή SER

Ορισμός: Ο ρυθμός σφάλματος δυαδικών ψηφίων (bit error rate (BER)) είναι το παρατηρούμενο ή το εκτιμώμενο μέσο ποσοστό σφαλμάτων σε bits. Συχνά ονομάζεται και πιθανότητα σφάλματος bit και συμβολίζεται ως P_B .

Ορισμός: Ο ρυθμός σφάλματος συμβόλων (symbol error rate (SER)) είναι το παρατηρούμενο ή το εκτιμώμενο μέσο ποσοστό σφαλμάτων σε σύμβολα.

Ποια η διαφορά των δύο παραπάνω μετρικών;

Power Efficiency

Ορισμός: Η αποδοτικότητα ισχύος (power efficiency) είναι το απαιτούμενο SNR για την επίτευξη συγκεκριμένου BER ή SER.

Spectral Efficiency

Ορισμός: Η φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency) είναι ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης σε bits προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης, δηλαδή

$$N_{BW} = \frac{R}{W}$$

Άνω όριο: Προκύπτει από το Θεώρημα Shannon-Hartley και είναι

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{2^{N_{BW}} - 1}{N_{BW}}$$

E_b είναι η ενέργεια ανά bit και N_0 είναι η φασματική πυκνότητα θορύβου (ισχύς θορύβου ανά 1 Hz).

Bit Rate – Channel Capacity

Ορισμός: Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας (bit rate) ή η χωρητικότητα του καναλιού (channel capacity) είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς σφάλματα για δεδομένο SNR.

Θεώρημα (Shannon-Hartley)

$$C = W \log_2(1 + SNR)$$

Συνέπειες του Θεωρήματος S-H

- Μας δίνει ένα ανώτατο όριο αξιοπιστίας μετάδοσης δεδομένων μέσα από AWGN κανάλι.
- Προσφέρει τη δυνατότητα για ανταλλαγή (trade-off) σήματος-προς-θόρυβο (SNR) με εύρος ζώνης
- «Συμπίεση» εύρους ζώνης μεταδιδόμενου σήματος

Outage Probability

Ορισμός: Η πιθανότητα διακοπής της επικοινωνίας (outage probability) είναι η πιθανότητα ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας να γίνει μικρότερος από ένα ελάχιστο κατώφλι που απαιτείται για την αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη, δηλαδή

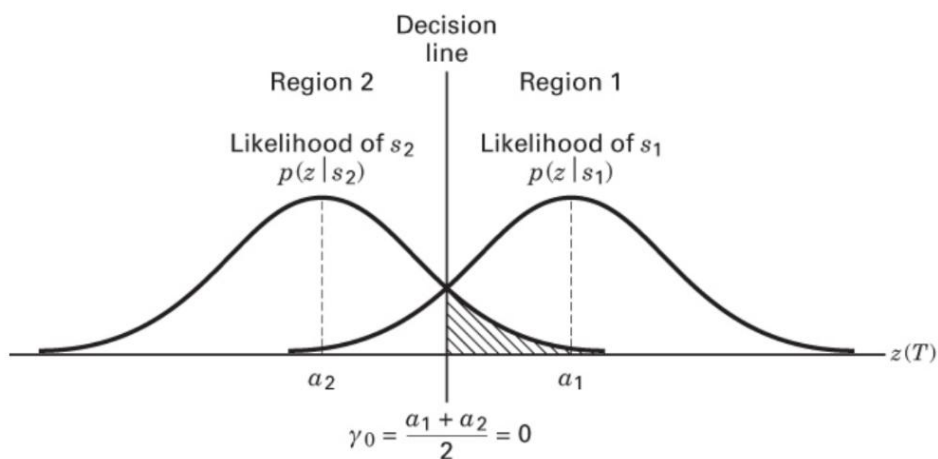
$$P_{out} = (C < R_t)$$

ή

$$P_{out} = (SNR < \gamma_t)$$

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

BPSK με Σύμφωνη Φώραση (Πιθανότητα Bit = Πιθανότητα συμβόλου)



$$P_B = \int_{\sqrt{2E_b/N_0}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} du = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

όπου

$$Q(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Πιθανότητα Σφάλματος Bit - Παράδειγμα

Παράδειγμα 4.4 Πιθανότητα Σφάλματος Bit για Σηματοδοσία BPSK

Βρείτε την πιθανότητα σφάλματος bit για ένα σύστημα BPSK με ρυθμό bit 1 Mbit/s. Οι λαμβανόμενες κυματομορφές $s_1(t) = A \cos \omega_0 t$ και $s_2(t) = -A \cos \omega_0 t$, περνούν από σύμφωνη φώραση, με χρήση ενός προσαρμοσμένου φίλτρου. Η τιμή του A είναι 10 mV. Υποθέστε ότι η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου είναι $N_0 = 10^{-11}$ W/Hz, καθώς και ότι τα μεγέθη ισχύος σήματος και ενέργειας ανά bit είναι κανονικοποιημένα σε σχέση μ' ένα φορτίο 1 Ω.

Λύση

$$A = \sqrt{\frac{2E_b}{T}} = 10^{-2} \text{ V} \quad T = \frac{1}{R} = 10^{-6} \text{ s}$$

Συνεπώς,

$$E_b = \frac{A^2}{2} T = 5 \times 10^{-11} \text{ J} \quad \text{και} \quad \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} = 3.16$$

Επίσης,

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = Q(3.16)$$

Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα Β.1 ή την Εξίσωση (3.44), παίρνουμε

$$P_B = 8 \times 10^{-4}$$

Συνάρτηση Σφάλματος $Q(X)$

Όσο μεγαλύτερη η ενέργεια σήματος ως προς το θόρυβο, τόσο μικρότερη η πιθανότητα λάθους

x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$
0.00	0.5	2.30	0.010724	4.55	2.6823×10^{-6}	6.80	5.231×10^{-12}
0.05	0.48006	2.35	0.0093867	4.60	2.1125×10^{-6}	6.85	3.6925×10^{-12}
0.10	0.46017	2.40	0.0081975	4.65	1.6597×10^{-6}	6.90	2.6001×10^{-12}
0.15	0.44038	2.45	0.0071428	4.70	1.3008×10^{-6}	6.95	1.8264×10^{-12}
0.20	0.42074	2.50	0.0062097	4.75	1.0171×10^{-6}	7.00	1.2798×10^{-12}
0.25	0.40129	2.55	0.0053861	4.80	7.9333×10^{-7}	7.05	8.9459×10^{-13}
0.30	0.38209	2.60	0.0046612	4.85	6.1731×10^{-7}	7.10	6.2378×10^{-13}
0.35	0.36317	2.65	0.0040246	4.90	4.7918×10^{-7}	7.15	4.3389×10^{-13}
0.40	0.34458	2.70	0.003467	4.95	3.7107×10^{-7}	7.20	3.0106×10^{-13}
0.45	0.32636	2.75	0.0029798	5.00	2.8665×10^{-7}	7.25	2.0839×10^{-13}
0.50	0.30854	2.80	0.0025551	5.05	2.2091×10^{-7}	7.30	1.4388×10^{-13}
0.55	0.29116	2.85	0.002186	5.10	1.6983×10^{-7}	7.35	9.9103×10^{-14}
0.60	0.27425	2.90	0.0018658	5.15	1.3024×10^{-7}	7.40	6.8092×10^{-14}
0.65	0.25785	2.95	0.0015889	5.20	9.9644×10^{-8}	7.45	4.667×10^{-14}
0.70	0.24196	3.00	0.0013499	5.25	7.605×10^{-8}	7.50	3.1909×10^{-14}
0.75	0.22663	3.05	0.0011442	5.30	5.7901×10^{-8}	7.55	2.1763×10^{-14}
0.80	0.21186	3.10	0.0009676	5.35	4.3977×10^{-8}	7.60	1.4807×10^{-14}
0.85	0.19766	3.15	0.00081635	5.40	3.332×10^{-8}	7.65	1.0049×10^{-14}
0.90	0.18406	3.20	0.00068714	5.45	2.5185×10^{-8}	7.70	6.8033×10^{-15}
0.95	0.17106	3.25	0.00057703	5.50	1.899×10^{-8}	7.75	4.5946×10^{-15}
1.00	0.15866	3.30	0.00048342	5.55	1.4283×10^{-8}	7.80	3.0954×10^{-15}
1.05	0.14686	3.35	0.00040406	5.60	1.0718×10^{-8}	7.85	2.0802×10^{-15}
1.10	0.13567	3.40	0.00033693	5.65	8.0224×10^{-9}	7.90	1.3945×10^{-15}
1.15	0.12507	3.45	0.00028029	5.70	5.9904×10^{-9}	7.95	9.3256×10^{-16}
1.20	0.11507	3.50	0.00023263	5.75	4.4622×10^{-9}	8.00	6.221×10^{-16}
1.25	0.10565	3.55	0.00019262	5.80	3.3157×10^{-9}	8.05	4.1397×10^{-16}
1.30	0.0968	3.60	0.00015911	5.85	2.4579×10^{-9}	8.10	2.748×10^{-16}
1.35	0.088508	3.65	0.00013112	5.90	1.8175×10^{-9}	8.15	1.8196×10^{-16}
1.40	0.080757	3.70	0.0001078	5.95	1.3407×10^{-9}	8.20	1.2019×10^{-16}
1.45	0.073529	3.75	8.8417×10^{-5}	6.00	9.8659×10^{-10}	8.25	7.9197×10^{-17}
1.50	0.066807	3.80	7.2348×10^{-5}	6.05	7.2423×10^{-10}	8.30	5.2056×10^{-17}
1.55	0.060571	3.85	5.9059×10^{-5}	6.10	5.3034×10^{-10}	8.35	3.4131×10^{-17}
1.60	0.054799	3.90	4.8096×10^{-5}	6.15	3.8741×10^{-10}	8.40	2.2324×10^{-17}
1.65	0.049471	3.95	3.9076×10^{-5}	6.20	2.8232×10^{-10}	8.45	1.4565×10^{-17}
1.70	0.044565	4.00	3.1671×10^{-5}	6.25	2.0523×10^{-10}	8.50	9.4795×10^{-18}
1.75	0.040059	4.05	2.5609×10^{-5}	6.30	1.4882×10^{-10}	8.55	6.1544×10^{-18}
1.80	0.03593	4.10	2.0658×10^{-5}	6.35	1.0766×10^{-10}	8.60	3.9858×10^{-18}
1.85	0.032157	4.15	1.6624×10^{-5}	6.40	7.7688×10^{-11}	8.65	2.575×10^{-18}
1.90	0.028717	4.20	1.3346×10^{-5}	6.45	5.5925×10^{-11}	8.70	1.6594×10^{-18}
1.95	0.025588	4.25	1.0689×10^{-5}	6.50	4.016×10^{-11}	8.75	1.0668×10^{-18}
2.00	0.02275	4.30	8.5399×10^{-6}	6.55	2.8769×10^{-11}	8.80	6.8408×10^{-19}
2.05	0.020182	4.35	6.8069×10^{-6}	6.60	2.0558×10^{-11}	8.85	4.376×10^{-19}
2.10	0.017864	4.40	5.4125×10^{-6}	6.65	1.4655×10^{-11}	8.90	2.7923×10^{-19}
2.15	0.015778	4.45	4.2935×10^{-6}	6.70	1.0421×10^{-11}	8.95	1.7774×10^{-19}
2.20	0.013903	4.50	3.3977×10^{-6}	6.75	7.3923×10^{-12}	9.00	1.1286×10^{-19}
2.25	0.012224						

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

Διαφορική BPSK

$$P_B = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}}$$

Συγκρίνοντας με το προηγούμενο, προκύπτει εδώ η απαίτηση για 3dB επιπλέον στην τιμή του E_b/N_0 για να πετύχουμε το ίδιο P_b (αλλά έχουμε πιο απλό σύστημα λήψης λόγω ασύμφωνης φώρασης)

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

QPSK (τετραφασική PSK) σε AWGN με Σύμφωνη Φώραση

$$P_B = 2Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right) \left[1 - Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right) \right]$$

Πιθανότητα σφάλματος σε ένα από τα δύο bit του συμβόλου (δύο περιπτώσεις)

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

Ορθογώνια FSK με Σύμφωνη Φώραση

$$P_B = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

Πιθανότητα Σφάλματος Bit

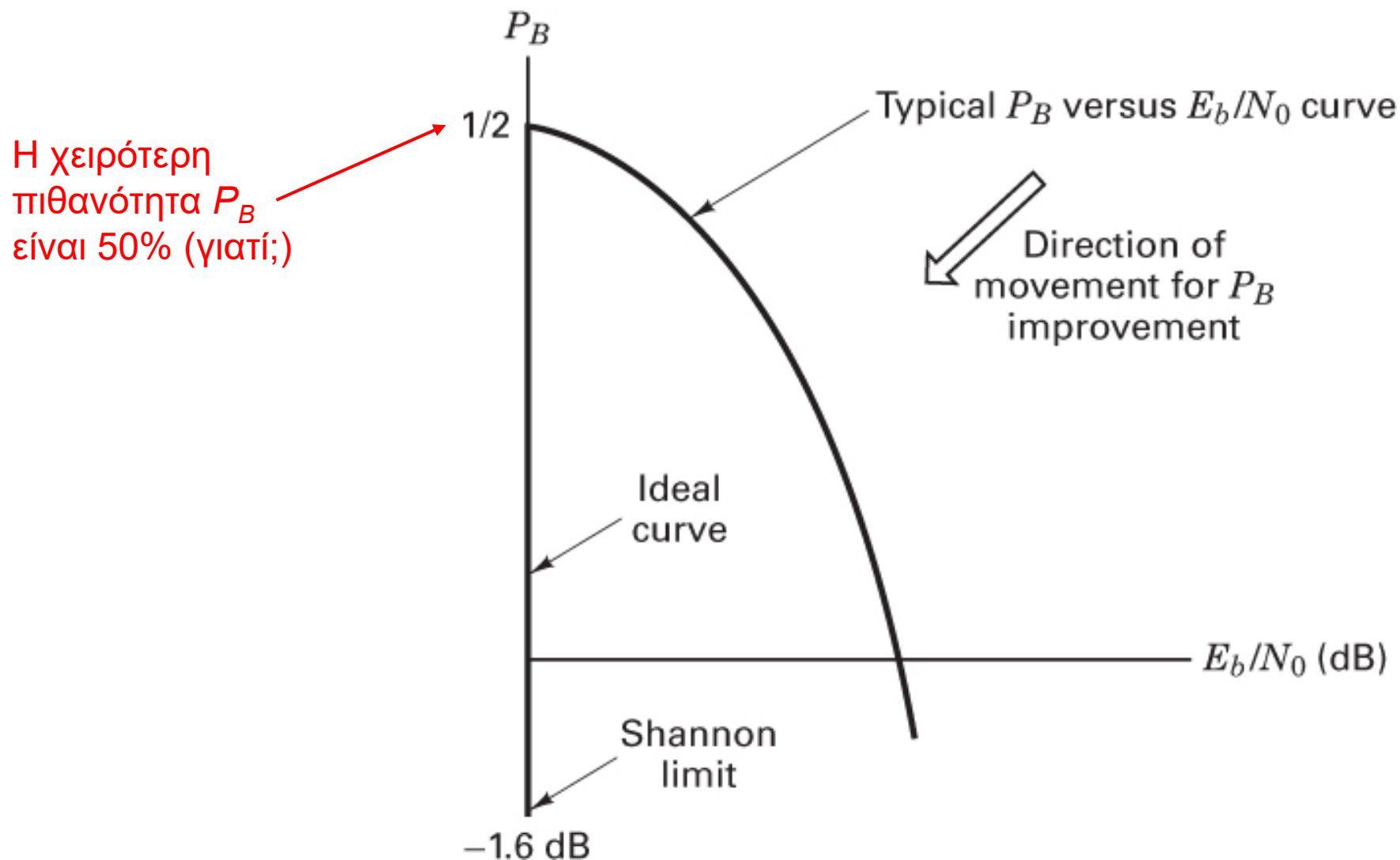
Ορθογώνια FSK με Ασύμφωνη Φώραση

$$P_B = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2N_0}}$$

Συγκρίνοντας με το προηγούμενο, προκύπτει εδώ η απαίτηση για 1dB επιπλέον στην τιμή του E_b/N_0 για να πετύχουμε το ίδιο P_b (αλλά έχουμε πιο απλό σύστημα λήψης)

Μ-αδικη Σηματοδοσία και Επίδοση

Ιδανική Επίδοση ως προς P_B



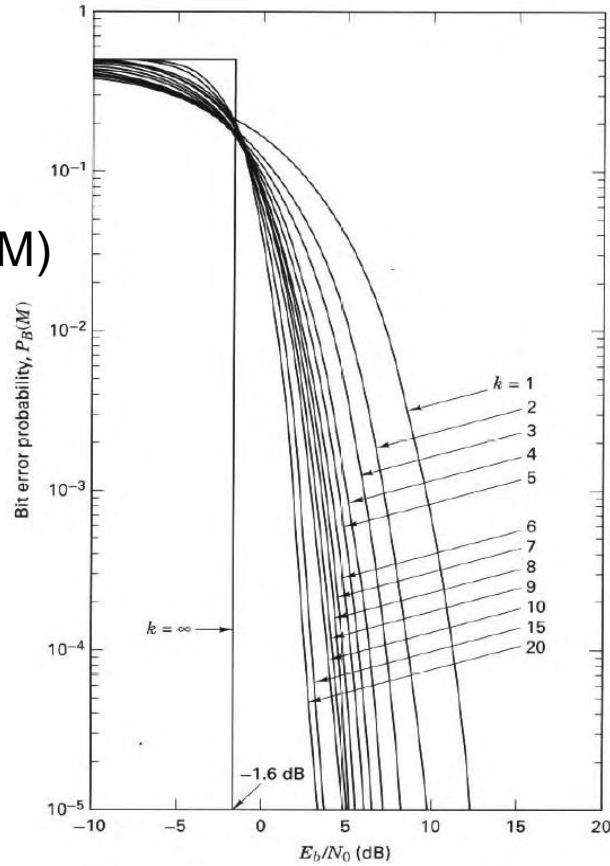
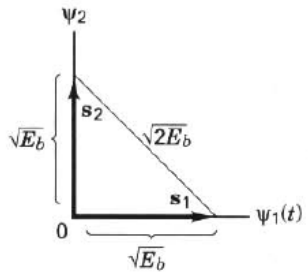
Σχήμα Καταρράκτη
Waterfall shape

P_B σε Μ-αδικη Σηματοδοσία για k bits per symbol ($M=2^k$)

Μ-αδική **ορθογώνια** σηματοδοσία (πχ OFDM)

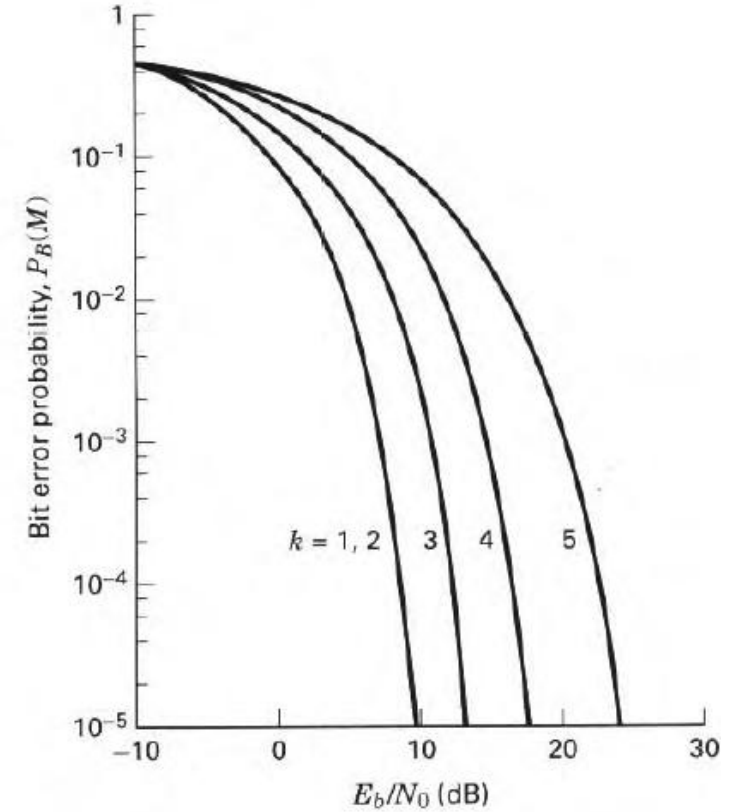
$k \uparrow \quad P_B \downarrow$

$$\int_0^T s_1(t) s_2(t) dt = 0$$



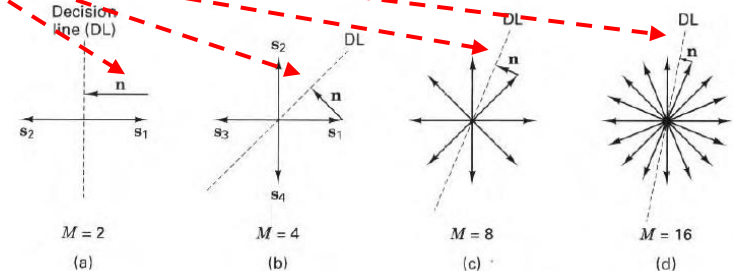
Μ-αδική σηματοδοσία **πολλαπλών φάσεων**

$K \uparrow \quad P_B \uparrow$

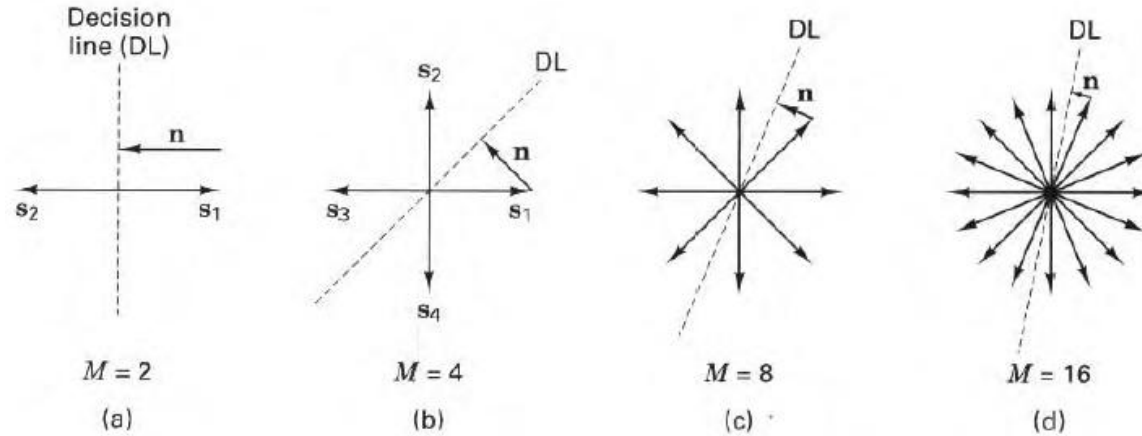


Μικραίνει η περιοχή απόφασης άρα αυξάνονται τα λάθη

Μειονέκτημα: Περισσότερο φάσμα για $k > 1$

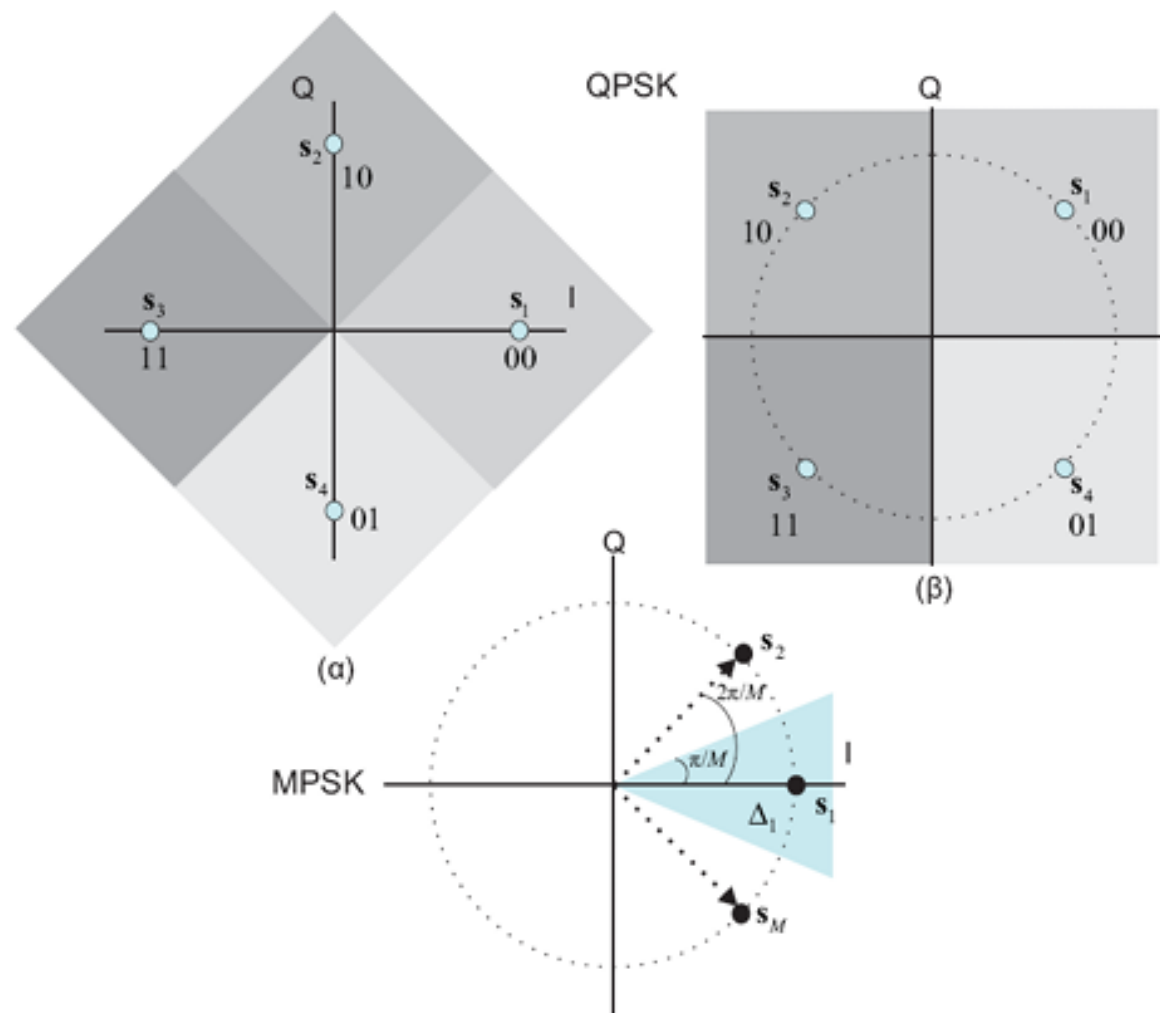


Βελτίωση πιθανότητας σηματοδοσία MPSK

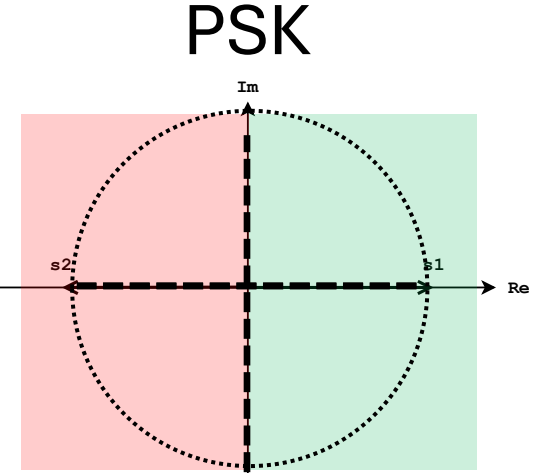


Τι θα γίνει αν αυξήσουμε την ένταση των μεταδιδόμενων σημάτων (αύξηση ισχύος μετάδοσης);

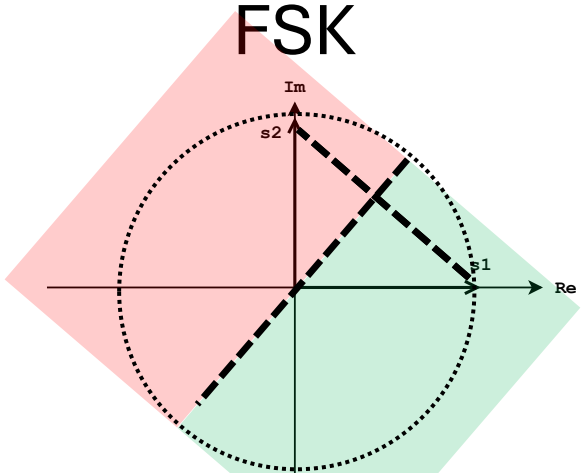
Περιοχές απόφασης



Σύγκριση BPSK vs. FSK



αντίποδα

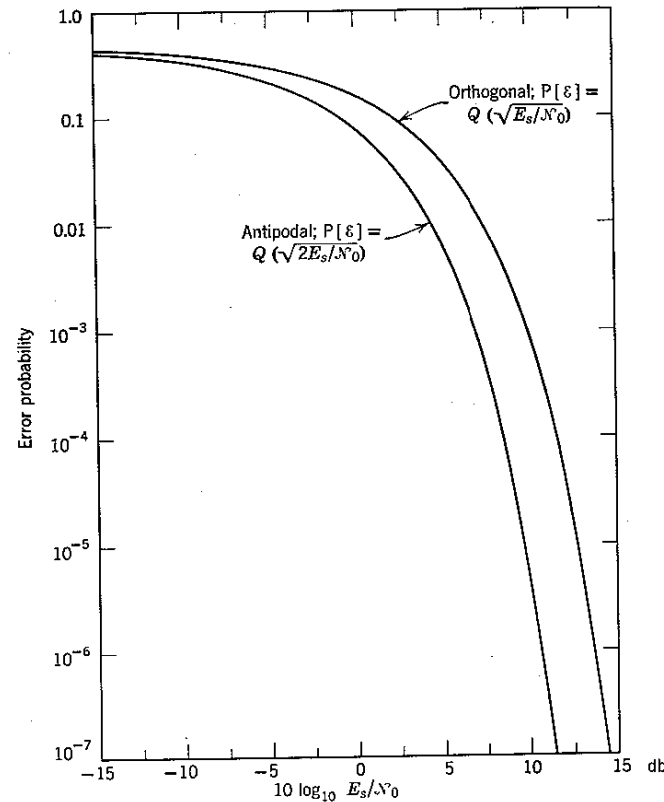


ορθογώνια

Πιθανότητα σφάλματος σε BPSK και FSK (k=1)

Ποσοτικά

Η αντίποδη σηματοδοσία είναι πιο αποδοτική ως προς την πιθανότητα σφάλματος κατά 3dB



Ποιοτικά

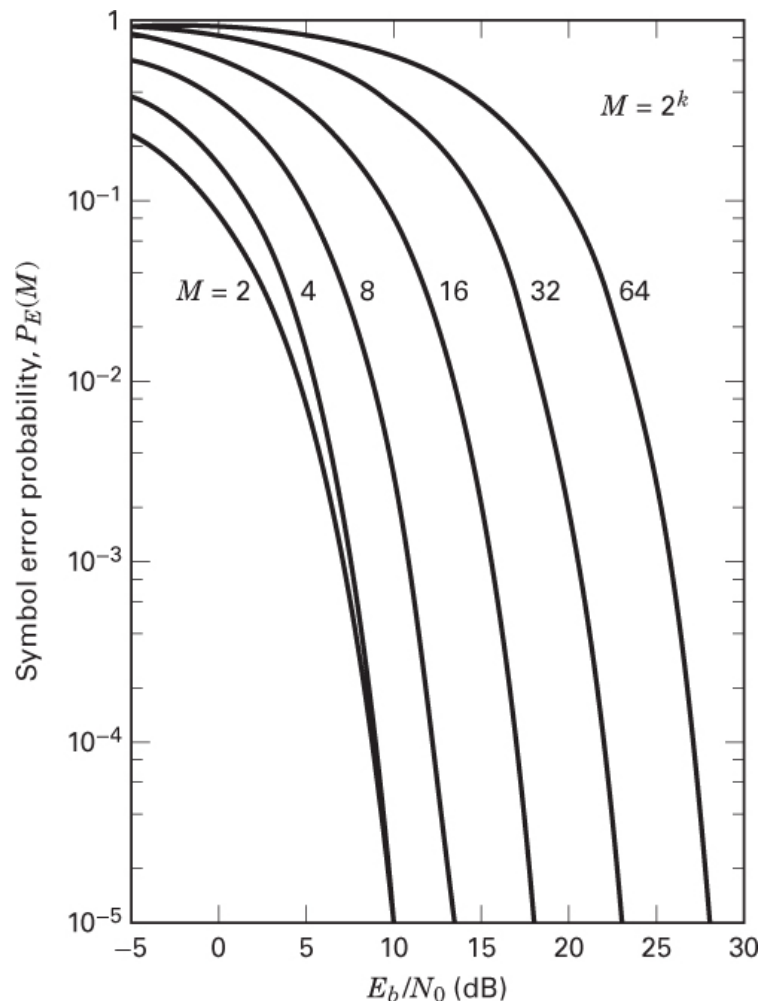
Στην αντίποδη σηματοδοσία, οι αστερισμοί είναι αντιδιαμετρικοί \Rightarrow απέχουν τη μέγιστη απόσταση στον κύκλο

Για $k=1$ BPSK καλύτερο

Για $k>1$ η συμπεριφορά αλλάζει καθώς για M-PSK η πιθανότητα αυξάνεται ενώ για M-FSK μειώνεται

Πιθανότητα Σφάλματος
Συμβόλου για Μ-αδικα
Συστήματα ($M > 2$)

Πιθανότητα Σφάλματος Συμβόλου σε MPSK



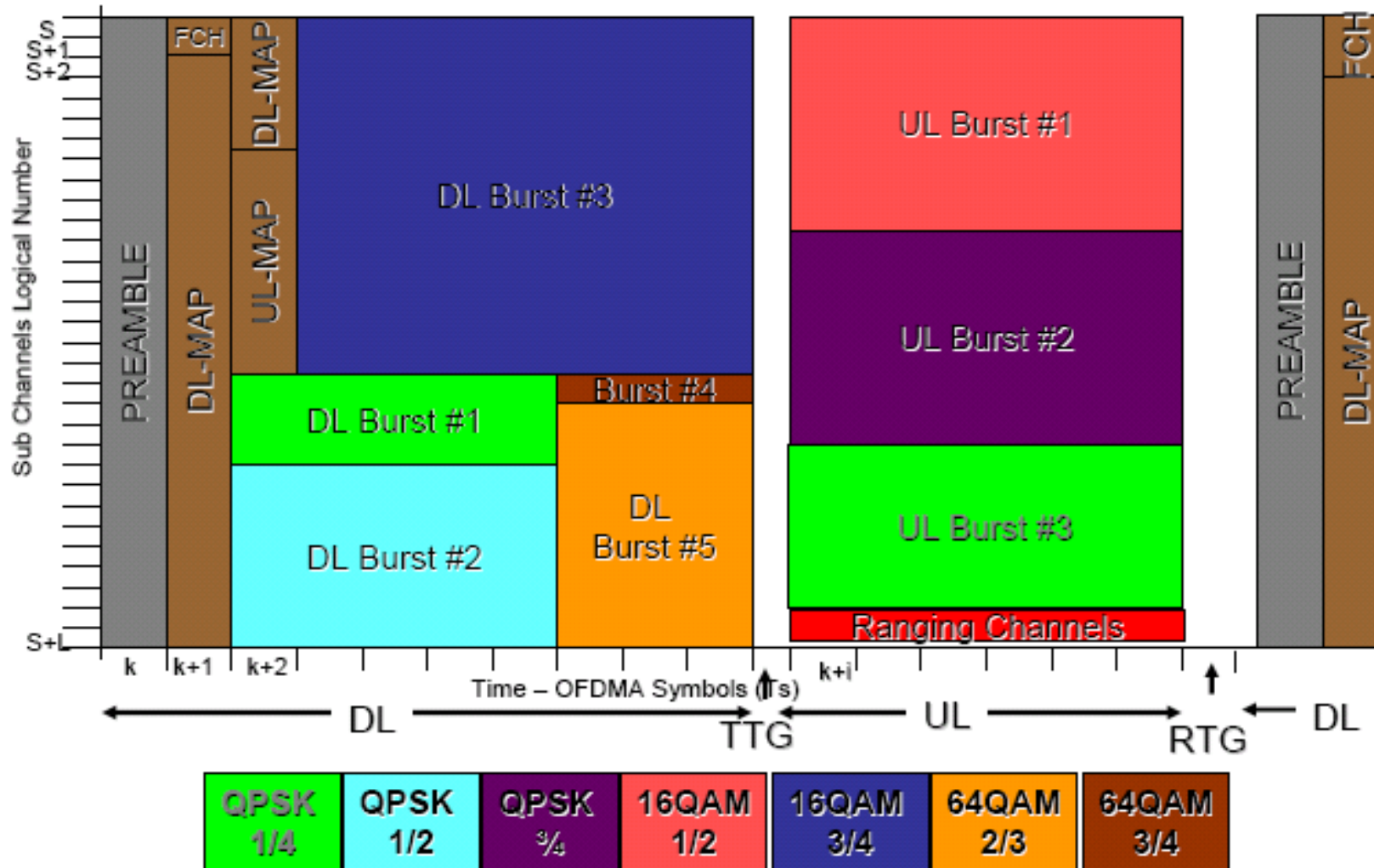
$$P_{b,BPSK} = P_{b,BPAM} = Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right)$$

$$\begin{aligned} P_{s,QPSK} &= 1 - (1 - P_{b,I})(1 - P_{b,Q}) \\ &= 1 - \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right)\right] \left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right)\right] \\ &= 2Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right) - Q^2\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_b}{N_0}}\right) \end{aligned}$$

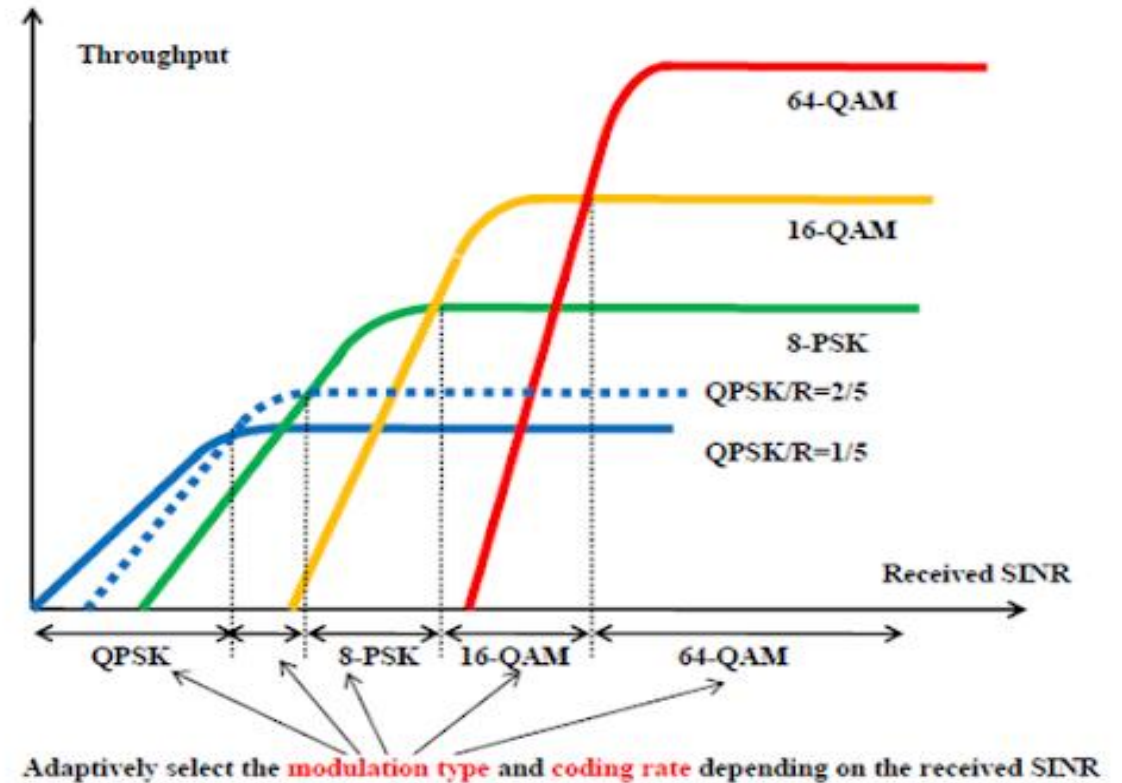
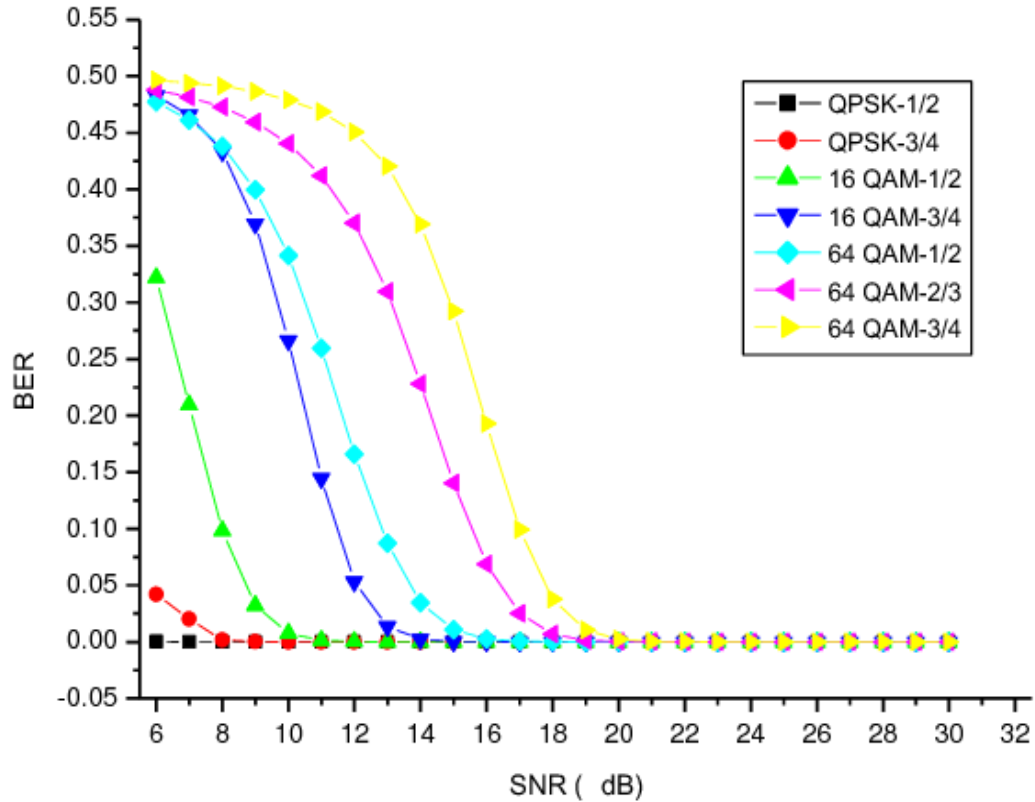
$$P_{s,M-PSK} \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{M}\right) \quad M > 4$$

Διαμόρφωση σε πραγματικά
συστήματα

Δομή χρονοπλαισίου 4G



Προσαρμοσμένη διαμόρφωση



WiFi 4 (802.11n) – WiFi 5 (802.11ac)

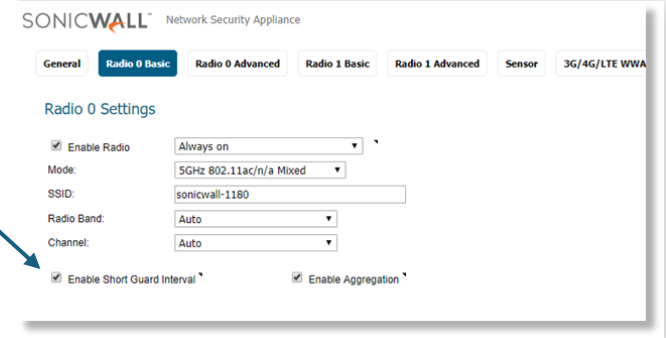
802.11n and 802.11ac

MCS, SNR and RSSI



HT MCS	VHT MCS	Modulation	Coding	20MHz				40MHz				80MHz				160MHz			
				Data Rate		Min. SNR	RSSI	Data Rate		Min. SNR	RSSI	Data Rate		Min. SNR	RSSI	Data Rate		Min. SNR	RSSI
				800ns	400ns			800ns	400ns			800ns	400ns			800ns	400ns		
1 Spatial Stream																			
0	0	BPSK	1/2	6.5	7.2	2	-82	13.5	15	5	-79	29.3	32.5	8	-76	58.5	65	11	-73
1	1	QPSK	1/2	13	14.4	5	-79	27	30	8	-76	58.5	65	11	-73	117	130	14	-70
2	2	QPSK	3/4	19.5	21.7	9	-77	40.5	45	12	-74	87.8	97.5	15	-71	175.5	195	18	-68
3	3	16-QAM	1/2	26	28.9	11	-74	54	60	14	-71	117	130	17	-68	234	260	20	-65
4	4	16-QAM	3/4	39	43.3	15	-70	81	90	18	-67	175.5	195	21	-64	351	390	24	-61
5	5	64-QAM	2/3	52	57.8	18	-66	108	120	21	-63	234	260	24	-60	468	520	27	-57
6	6	64-QAM	3/4	58.5	65	20	-65	121.5	135	23	-62	263.3	292.5	26	-59	526.5	585	29	-56
7	7	64-QAM	5/6	65	72.2	25	-64	135	150	28	-61	292.5	325	31	-58	585	650	34	-55
8	8	256-QAM	3/4	78	86.7	29	-59	162	180	32	-56	351	390	35	-53	702	780	38	-50
9	9	256-QAM	5/6			31	-57	180	200	34	-54	390	433.3	37	-51	780	866.7	40	-48
2 Spatial Streams																			
8	0	BPSK	1/2	13	14.4	2	-82	27	30	5	-79	58.5	65	8	-76	117	130	11	-73
9	1	QPSK	1/2	26	28.9	5	-79	54	60	8	-76	117	130	11	-73	234	260	14	-70
10	2	QPSK	3/4	39	43.3	9	-77	81	90	12	-74	175.5	195	15	-71	351	390	18	-68
11	3	16-QAM	1/2	52	57.8	11	-74	108	120	14	-71	234	260	17	-68	468	520	20	-65
12	4	16-QAM	3/4	78	86.7	15	-70	162	180	18	-67	351	390	21	-64	702	780	24	-61
13	5	64-QAM	2/3	104	115.6	18	-66	216	240	21	-63	468	520	24	-60	936	1040	27	-57
14	6	64-QAM	3/4	117	130.3	20	-65	243	270	23	-62	526.5	585	26	-59	1053	1170	29	-56
15	7	64-QAM	5/6	130	144.4	25	-64	270	300	28	-61	585	650	31	-58	1170	1300	34	-55
	8	256-QAM	3/4	156	173.3	29	-59	324	360	32	-56	702	780	35	-53	1404	1560	38	-50
	9	256-QAM	5/6			31	-57	360	400	34	-54	780	866.7	37	-51	1560	1733	40	-48
3 Spatial Streams																			
16	0	BPSK	1/2	19.5	21.7	2	-82	40.5	45	5	-79	87.8	97.5	8	-76	175.5	195	11	-73
17	1	QPSK	1/2	39	43.3	5	-79	81	90	8	-76	175.5	195	11	-73	351	390	14	-70
18	2	QPSK	3/4	58.5	65	9	-77	121.5	135	12	-74	263.3	292.5	15	-71	526.5	585	18	-68
19	3	16-QAM	1/2	78	86.7	11	-74	162	180	14	-71	351	390	17	-68	702	780	20	-65
20	4	16-QAM	3/4	117	130	15	-70	243	270	18	-67	526.5	585	21	-64	1053	1170	24	-61
21	5	64-QAM	2/3	156	173.3	18	-66	324	360	21	-63	702	780	24	-60	1404	1560	27	-57
22	6	64-QAM	3/4	175.5	195	20	-65	364.5	405	23	-62			26	-59	1580	1755	29	-56
23	7	64-QAM	5/6	195	216.7	25	-64	405	450	28	-61	877.5	975	31	-58	1755	1950	34	-55
	8	256-QAM	3/4	234	260	29	-59	486	540	32	-56	1053	1170	35	-53	2106	2340	38	-50
	9	256-QAM	5/6	260	288.9	31	-57	540	600	34	-54	1170	1300	37	-51			40	-48

WiFi 5



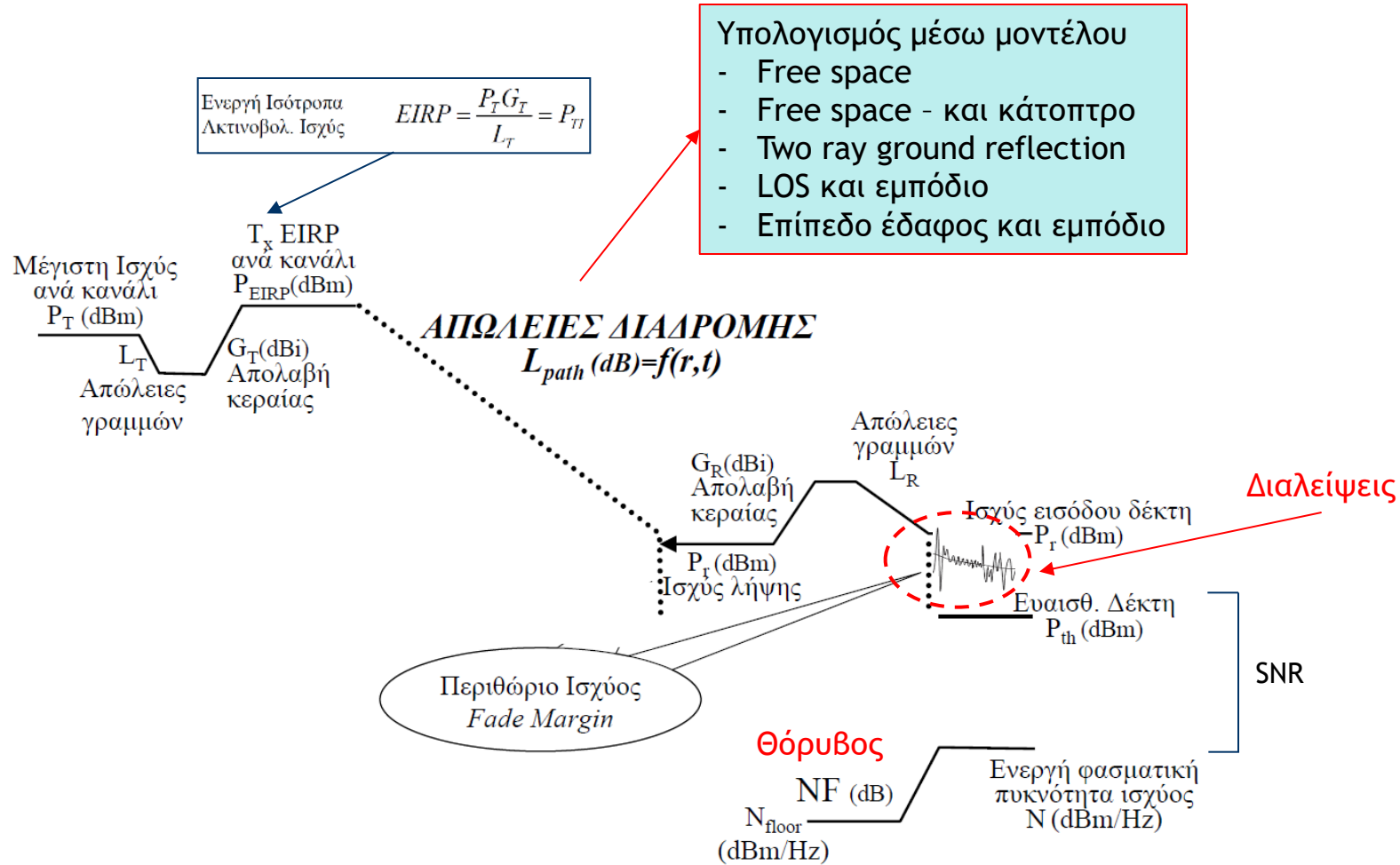
Πρόσθετο Ερευνητικό Υλικό

1. Nyquist H., “Certain Factors Affecting Telegraph Speed”, The Bell System Technical Journal, 1924
2. Nyquist H., “Certain Topics in Telegraph Transmission Theory”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1928
3. Nyquist H., “Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors”, American Physical Society, 1928
4. Hartley R. V. L., “Transmission of Information”, The Bell System Technical Journal, 1928
5. Shannon C. E., “A Mathematical Theory of Communication ”, The Bell System Technical Journal, 1948
6. Shannon C. E., “Communication in the Presence of Noise”, Proceedings of the IRE, 1949
7. Hamming R. W., “Error Detecting and Error Correcting Codes”, The Bell System Technical Journal, 1950

Ψηφιακές Επικοινωνίες

Κεφ 5: Ανάλυση Ζεύξης

Ισοζύγιο Ζεύξης (Link budget)



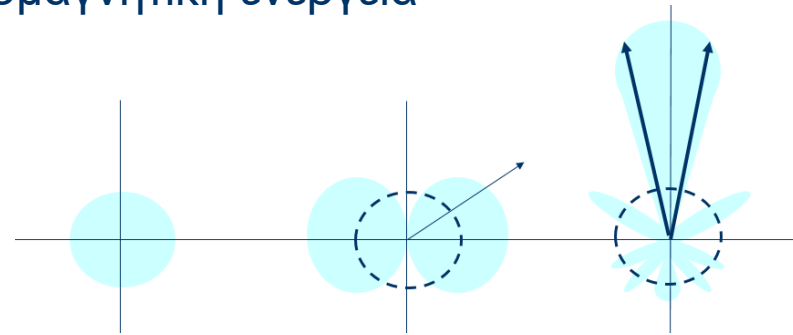
Θόρυβος δέκτη: Noise floor (αναπόφευκτο) + Noise figure (κατασκευαστικό)

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Κεραίες
 - Η κεραία είναι ένας ηλεκτρικός αγωγός (ή σύστημα αγωγών) που μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα και αντίστροφα
- Μια κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπομπή και λήψη
 - εκπέμπει ή/και συλλέγει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια

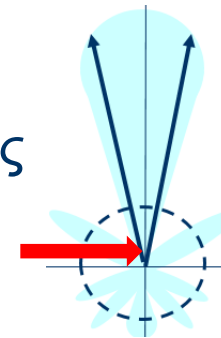
- Κάθε κεραία χαρακτηρίζεται από:

- το διάγραμμα ακτινοβολίας
- την κατευθυντικότητά της
- το κέρδος της (απολαβή με βάση της ενεργό περιοχής της)



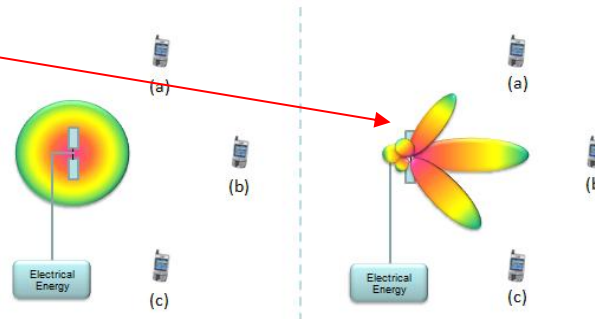
Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Ισοτροπική κεραία: εκπέμπει την ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις
 - διάγραμμα ακτινοβολίας: μοναδιαίος κύκλος
- Το συνηθέστερο μέτρο της κατευθυντικότητας μιας κεραίας είναι το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος
- Εύρος Δέσμης Ημίσειας ισχύος:
 - η γωνία μεταξύ δύο κατευθύνσεων στις οποίες η εκπεμπόμενη ισχύς είναι η μισή της μέγιστης ισχύος



Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Κάθε τύπος κεραίας έχει εφαρμογές σε διαφορετικούς τύπους δικτύων (?)
 - Κεραία κινητού τηλεφώνου, σταθμού βάσης?
 - Κεραία για point to point ζεύξη?
- Sectorization
- MIMO
- Beamforming(!)



Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- **Κέρδος (ή απολαβή) κεραίας G :** Ο λόγος της ισχύος που μια κεραία παράγει/λαμβάνει ως προς την ισχύ που παράγει/λαμβάνει μια ισοτροπική κεραία αν η εισερχόμενη ισχύς είναι ίδια

$$G = \frac{P^{ant}}{P_{iso}^{ant}}$$

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{\text{ένταση ακτινοβολίας}}{\text{ισχύς εισόδου}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$$

- **Ένταση ακτινοβολίας:** σε συγκεκριμένη κατεύθυνση ορίζεται ως «η ισχύς που ακτινοβολείται από μια κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας» προς την κατεύθυνση αυτή.

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- **Κέρδος (ή απολαβή) κεραίας G :** Ο λόγος της ισχύος που μια κεραία παράγει/λαμβάνει ως προς την ισχύ που παράγει/λαμβάνει μια ισοτροπική κεραία αν η εισερχόμενη ισχύς είναι ίδια

$$G = \frac{P^{ant}}{P_{iso}^{ant}} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f^2 A_e}{c^2}$$

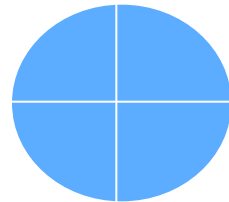
Ενεργός περιοχή ισότροπης $\lambda^2/4\pi$

$c = \lambda * f$ Εξίσωση κυματικής

- f : συχνότητα εκπεμπόμενου η/μ κύματος
- λ : μήκος εκπεμπόμενου η/μ κύματος
- c : ταχύτητα φωτός (3×10^8 m/s)
- A_e : ενεργός περιοχή κεραίας λήψης - ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που λαμβάνει μια κεραία προς την πυκνότητα ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει σε αυτή.

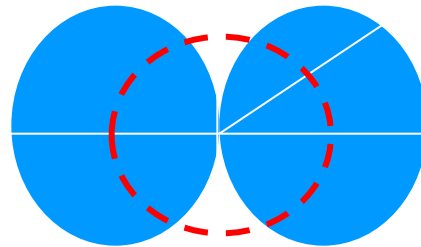
Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

Κέρδος κεραίας $G = \frac{P_{directional}}{P_{isotropic}}$



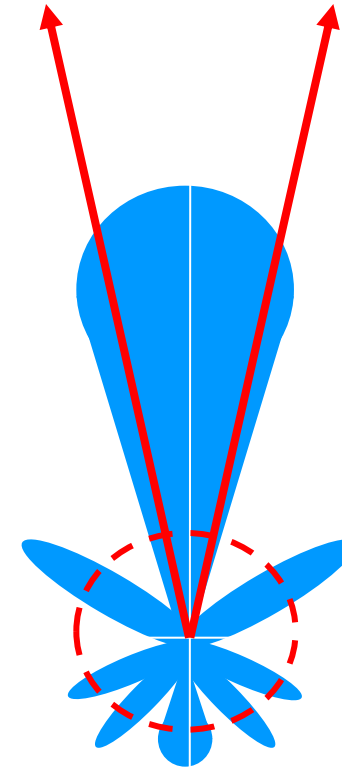
Isotropic
Ισοτροπική

0 dB_i



Dipole
Διπολική

2.2 dB_i



High gain Directional
Κατευθυντική υψηλού
κέρδους

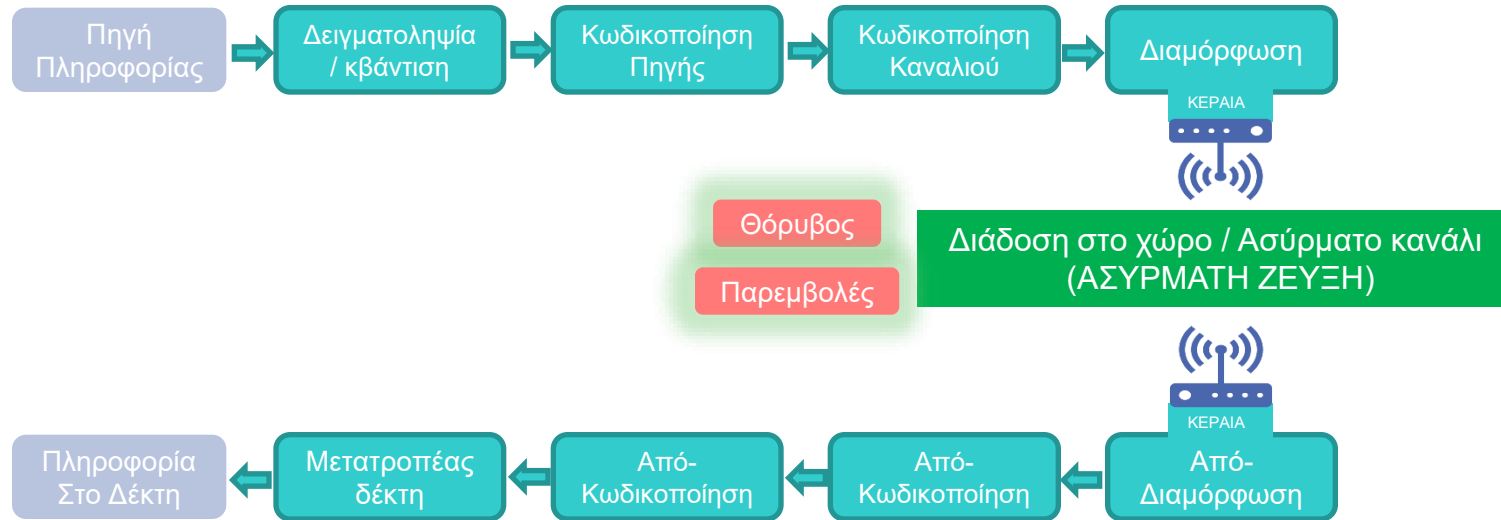
14 dB_i

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Η ενεργός περιοχή (A_e) εξαρτάται από το είδος της κεραίας

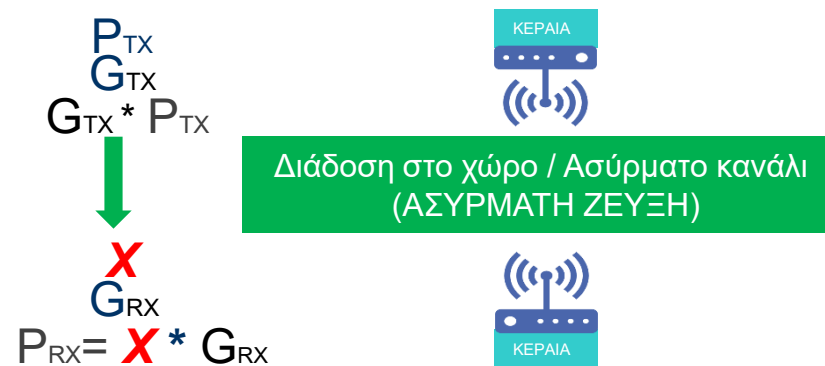
Type of Antenna	Effective Area A_e (m^2)	Power Gain (relative to isotropic)
Isotropic	$\lambda^2/4\pi$	1
Infinitesimal dipole or loop	$1.5 \lambda^2/4\pi$	1.5
Half-wave dipole	$1.64 \lambda^2/4\pi$	1.64
Horn, mouth area A	$0.81 A$	$10 A/\lambda^2$
Parabolic, face area A	$0.56 A$	$7 A/\lambda^2$
Turnstile (two crossed, perpendicular dipoles)	$1.15 \lambda^2/4\pi$	1.15

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες



Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

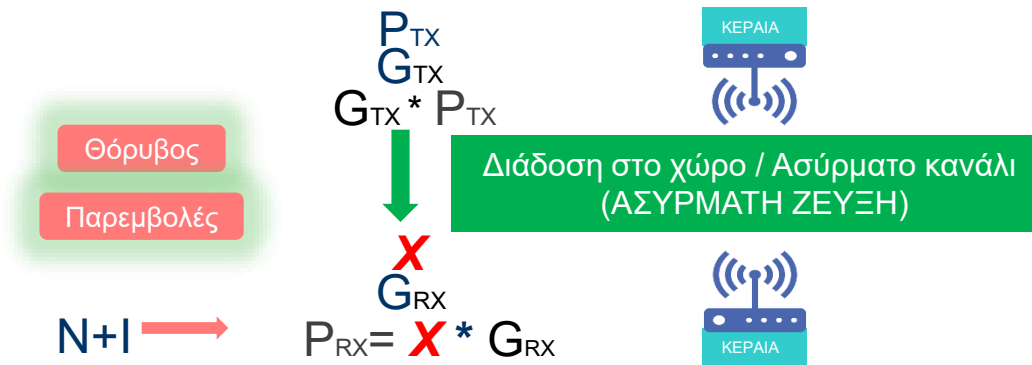
- Ο πομπός έχει σήμα ισχύος P_{TX}
- Η κεραία εκπομπής ενισχύει το σήμα με G_{TX} και εκπέμπει με $G_{TX} * P_{TX}$
- Η κεραία λήψης ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα X κατά G_{RX}



- Ο Δέκτης λαμβάνει $P_{RX} = X * G_{RX}$
- Κάθε Δέκτης έχει κατώφλι ισχύος P_{Th}
- **Εφικτή Ζεύξη:** $P_{RX} \geq P_{Th}$

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Θόρυβος N και παρεμβολές I , φτάνουν επίσης στον δέκτη



Ποιότητα Ζεύξης: $SINR = P_{RX} / (N+I)$

Αν δεν έχουμε παρεμβολές $SNR = P_{RX} / N$

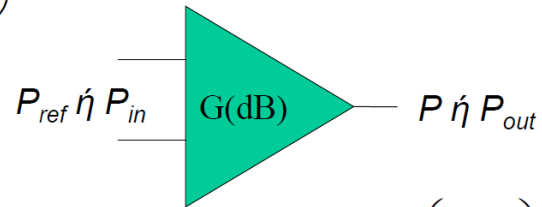
Εφικτή επικοινωνία: $SINR \geq SINR_{Threshold}$ ← **Ανάλογο της υπηρεσίας που θέλουμε**

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Decibel (Db) χρήση για αποφυγή πράξεων μεταξύ πολύ μεγάλων και πολύ μικρών αριθμών
- Τι σημαίνει ότι μία κεραία κάνει ενίσχυση $G=3$ dB, και τι το ότι έχει κέρδος 3 dBi
- Ευκολία κλίμακας - πράξεις

$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{X}{X_{ref}}\right)$$

Π.χ. Ενισχυτής ή Φίλτρο
Κεραία ή Γραμμή κ.ά.



Απολαβή ή Ενίσχυση Ισχύος:

$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$

P/P_{ref}	$G(dB)$
1	0 dB
* 2	+ 3 dB
/ 2	- 3 dB
* 10	+ 10 dB
* 100	+ 20 dB
/ 10	- 10 dB
/ 100	- 20 dB

← Παράδειγμα

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

→ Logarithm formulas

$$\log_a 1 = 0$$

$$\log_a a = 1$$

$$\log_a 0 = \begin{cases} -\infty & \text{if } a > 1 \\ +\infty & \text{if } a < 1 \end{cases}$$

$$\log_a \frac{x}{y} = \log_a x - \log_a y$$

$$\log_a (xy) = \log_a x + \log_a y$$

$$\log_a (x^n) = n \log_a x$$

$$\log_a \sqrt[n]{x} = \frac{1}{n} \log_a x$$

$$\log_a c = \frac{1}{\log_c a}$$

$$\log_a x = \frac{\log_c x}{\log_c a}$$

$$a^{\log_a x} = x$$

$$\log_e x = \ln x$$

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

- Η μονάδα μέτρησης dB

Ισχύς (dB or dBW) = $10 * \log_{10}$ (Ισχύς σε Watts)

Ισχύς (dBm) = $10 * \log_{10}$ (Ισχύς σε milli (m)-Watts)

Ισχύς (dBμm) = $10 * \log_{10}$ (Ισχύς σε micro (μ)-Watts)

$P(\text{dBW}) = 10 \log(P_1/1 \text{ Watt})$

$P(\text{dBm}) = 10 \log(P_1/1 \text{ mWatt})$

0 dBW = 30 dBm = 1 Watt

Παράδειγμα:

1 Watt	⇒	0 dBW
2 Watt	⇒	0 + 3 dB = 3 dBW
20 Watt	⇒	10 + 3 dB = 13 dBW

dB Algebra

$P_{\text{RX}} (\text{linear}) = P_{\text{TX}} (\text{linear}) * \text{Gain} (\text{linear}) / \text{Loss} (\text{linear})$

$P_{\text{RX}} (\text{dB}) = P_{\text{TX}} (\text{dB}) + \text{Gain} (\text{dB}) - \text{Loss} (\text{dB})$

$P_{\text{RX}} (\text{dBm}) = P_{\text{TX}} (\text{dBm}) + \text{Gain} (\text{dB}) - \text{Loss} (\text{dB})$

Ισοζύγιο Ζεύξης – Κεραίες

Η ισχύς ενός σήματος είναι 10 mW και η ισχύς του θορύβου 1 μ W;
Ποια είναι η τιμή του SNR and SNR_{dB} ?

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \text{SNR} = 10 \log_{10} 10000 = 40 \text{ dB}$$

- Συνήθεις τιμές του SNR :
 - Ήχος τηλεφωνικής ποιότητας: 26 dB (= 400 φορές)
 - Ήχος hi-fi: 60 dB (= 10⁶ φορές)
 - Τερματικό κινητής τηλεφωνίας: 14 - 18 dB (= 25 – 63 φορές)
- Σταθμός Βάσης κινητής τηλεφωνίας
 - εκπέμπει ραδιοκύματα με ισχύ $P_{\text{BS}} = 1 \text{ W}$
 - λαμβάνει με δέκτη που έχει ευαισθησία $P_{\text{thBS}} = -110 \text{ dBm}$
 - Οι κεραίες του έχουν απολαβή ισχύος $G_{\text{BS}} = 10 \text{ dBi}$.
- Οι κινητοί σταθμοί έχουν
 - ισχύ εκπομπής $P_{\text{MS}} = 0,2 \text{ W}$,
 - ευαισθησία $P_{\text{thMS}} = -104 \text{ dBm}$
 - απολαβή ισχύος $G_{\text{MS}} = 0 \text{ dBi}$.