



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

## **Diversity, Spatial Multiplexing - Άσκηση 2**

Οικονομίδης Κωνσταντίνος (ΑΜ:2021030075)  
Διδάσκων: Αθανασιος Π. Λιάβας

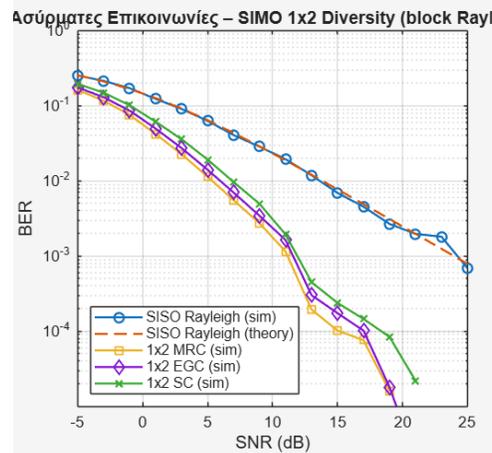
Πολυτεχνείο Κρήτης - Σχολή ΗΜΜΥ  
**Ασύρματες Επικοινωνίες**

Χειμερινό εξάμηνο 2025-2026

**Ερώτημα 1:** Αρχικά, θα υλοποιήσουμε ένα σύστημα με μια κεραία εκπομπής, δυο κεραίες λήψης και block fading, με κανάλια  $h_1$  και  $h_2$ , ανεξάρτητα μεταξύ τους, όμοια καταναμεμένα,  $CN(0,1)$ .

**Απάντηση:**

Υλοποιήθηκε το παραπάνω σύστημα και τα αποτελέσματα, είναι τα εξής:



Σύνολο bits ανά SNR: 500000

SNRdB	BER_SISO_sim	BER_SISO_theory
-5	0.25319	0.25492
-3	0.21431	0.2111
-1	0.17159	0.16733
1	0.12349	0.12673
3	0.090866	0.091913
5	0.06299	0.064183
7	0.040738	0.043474
9	0.028574	0.028782
11	0.019476	0.018748
13	0.011892	0.012078
15	0.006916	0.007723
17	0.004536	0.0049147
19	0.002678	0.0031179
21	0.001976	0.0019741
23	0.00181	0.0012483
25	0.00069	0.0007887

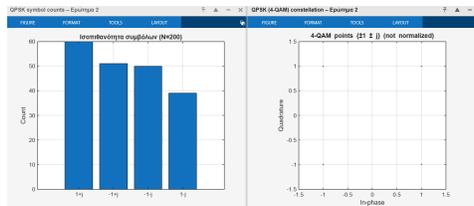
SNRdB	BER_MRC	BER_EGC	BER_SC
-5	0.16227	0.17545	0.19589
-3	0.11721	0.12978	0.1493
-1	0.075682	0.086484	0.10185
1	0.042134	0.049748	0.061332
3	0.022658	0.027378	0.035916
5	0.011418	0.01409	0.019224
7	0.005544	0.007002	0.009682
9	0.002732	0.003436	0.004948
11	0.001152	0.001634	0.001944
13	0.000194	0.000302	0.00045
15	0.000102	0.000174	0.000238
17	7.6e-05	0.000102	0.000146
19	1.6e-05	1.8e-05	8.4e-05
21	0	2e-06	2.2e-05
23	0	2e-06	0
25	0	0	0

Τα κανάλια  $h_1$  και  $h_2$  είναι τυχαία, ανεξάρτητα και αλλάζουν από block σε block. Στο διάγραμμα, φαίνεται το σφάλμα bit ως προς το SNR. Η μπλε καμπύλη είναι με μια κεραία λήψης(SISO) και όπως φαίνεται πλησιάζει αρκετά την θεωρητική καμπύλη. Οι υπόλοιπες καμπύλες είναι οι τρόποι συνδυασμού των 2 κεραιών. Είναι φανερό, ότι με 2 ανεξάρτητες λήψεις το σφάλμα πέφτει πολύ γρήγορα. Το MRC, μειώνει το BER σημαντικά σε σχέση με το SISO. Αυτό είναι το κέρδος diversity.

**Ερώτημα 2:** Να δημιουργησετε πακέτα 4-QAM είσοδου  $\{s[k]\}_{k=1}^N$ , με τιμές  $\pm 1 \pm j$ , ισοπίθανες (ενδεικτικά,  $N=200$ ).

**Απάντηση:**

Υλοποιήθηκε το παραπάνω και τα αποτελέσματα, είναι τα εξής:



=== Ερώτημα 2: 4-QAM πακέτο (N=200) ===

Point	Count
1+1i	60
-1+1i	51
-1-1i	50
1-1i	39

Από τις γραφικές, φαίνονται τα 4 σημεία της 4-QAM και οι εμφανίσεις του κάθε σημείου. Οι αριθμοί που εμφανίζονται (60, 51, 50, 39) δείχνουν ότι παρά τις μικρές διαφορές, οι τιμές είναι σχεδόν ισοπίθανες.

**Ερώτημα 3:** Να υπολογίσετε τις εξόδους

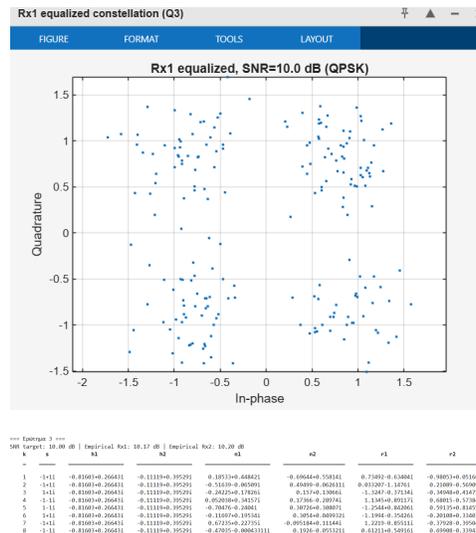
$$r_i[k] = h_i[k]s[k] + n_I[k], \quad i = 1, 2 \quad k = 1, \dots, N$$

όπου  $n_i[k]$  λευκός Gaussian προσθετικός θόρυβος με διασπορά  $N_0$ . Το SNR ορίζεται ως εξής:

$$SNR_{db} = 10 \log_{10} \frac{\text{συνολική ισχύς εκπεμπόμενου σήματος}}{\text{ισχύς θορύβου στο δέκτη}}$$

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα λάβαμε τα εξής αποτελέσματα:



Από τους πίνακες, παρατηρείται πως:

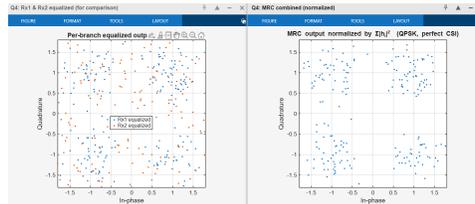
- Στήλες  $h_1, h_2$ : δείχνουν τα σταθερά κέρδη του καναλιού
- Στήλες  $n_1, n_2$ : οι στιγμιαίες τιμές θορύβου
- Στήλες  $r_1, r_2$ : το αποτέλεσμα που ζητά η εκφώνηση

Από το γράφημα, παρατηρείται ότι τα σημεία συγκεντρώνονται γύρω από τις 4 γωνίες του QPSK και όσο το SNR μεγαλώνει, τόσο το νέφος σφίγγει.

**Ερώτημα 4:** Να υποθέσετε ότι στο δέκτη γνωρίζετε τις ακριβείς τιμές των καναλιών  $h_1$  και  $h_2$  και να υλοποιήσετε τη μέθοδο maximum ratio combining.

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:



=== Ερώτημα 4: MRC με τέλει CSI ===  
 SNR (στόχος από Ep.3): 10.00 dB  
 SER (SISO, Rx1): 0.005 | SER (SISO, Rx2): 0.205 | SER (MRC): 0

Παρατηρείται, ότι στο αριστερό γράφημα, πριν εφαρμόσουμε MRC, τα σημεία είναι πιο "σκόρπια".

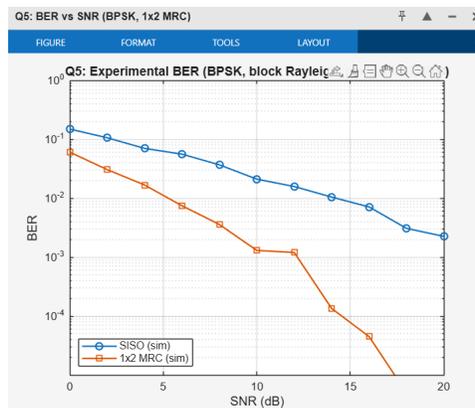
Ωστόσο, αφού εφαρμοστεί MRC, τα σημεία μαζεύονται γύρω από τα 4 σημεία QPSK και ο αστερισμός είναι λίγο πιο ξεκάθαρος.

Άρα εφόσον γνωρίζουμε το κανάλι, το SNR μεγιστοποιείται και το σφάλμα πέφτει.

**Ερώτημα 5:** Να υπολογίσετε πειραματικά το BER για  $SNR_{dB} = [0 : 2 : 20]$  χρησιμοποιώντας K πακέτα με N σύμβολα το καθένα (ενδεικτικά, K = 1000)

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, το αποτέλεσμα είναι το εξής:



SNRdB	BER_SISO	BER_MRC
0	0.1498	0.06077
2	0.10658	0.03073
4	0.070375	0.016825
6	0.05619	0.007465
8	0.036985	0.00359
10	0.02114	0.001305
12	0.01586	0.001205
14	0.01049	0.000135
16	0.00714	4.5e-05
18	0.00309	5e-06
20	0.00226	0.4

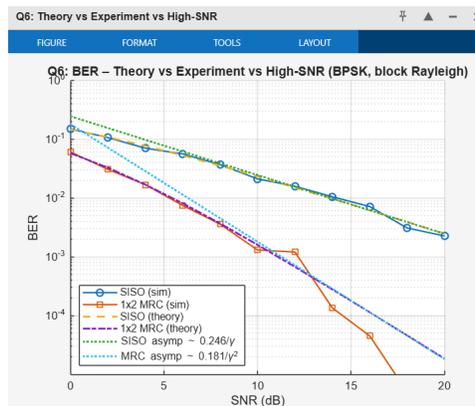
Στο διάγραμμα, φαίνεται το σφάλμα bit καθώς αυξάνεται το SNR, για την περίπτωση SISO και MRC(1x2). Συγκεκριμένα:

- Όσο το SNR μεγαλώνει, το BER πέφτει και για τις 2 περιπτώσεις.
- Η καμπύλη MRC είναι χαμηλότερα από την καμπύλη SISO για όλο το εύρος.
- Για να πετύχουμε  $BER \approx 10^{-2}$ , το SISO χρειάζεται 12dB, ενώ το MRC χρειάζεται περίπου 9 dB. Δηλαδή πετυχαίνουμε κέρδος περίπου 3dB

**Ερώτημα 6:** Να συγκρίνετε το πειραματικό BER με το θεωρητικό και την προσέγγιση υψηλού SNR.

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, παίρνουμε το εξής αποτέλεσμα:



SNRdB	BER_MRC_sim	BER_MRC_theory	BER_MRC_asym
0	0.06077	0.058058	0.18066
2	0.03073	0.032753	0.071923
4	0.016825	0.016932	0.028633
6	0.007465	0.0081289	0.011399
8	0.00359	0.0036829	0.004538
10	0.001305	0.0015991	0.0018066
12	0.001205	0.000674	0.00071923
14	0.000135	0.00027843	0.00028633
16	4.5e-05	0.00011351	0.00011399
18	5e-06	4.5879e-05	4.538e-05
20	0	1.8442e-05	1.8066e-05

Παρατηρείται ότι οι καμπύλες πλησιάζουν αρκετά τις θεωρητικές. Οι διακεκομμένες ευθείες είναι για μεγάλο SNR:

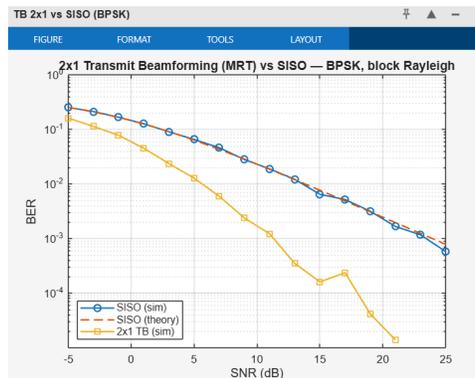
- Για SISO, η ουρά πέφτει σαν  $\frac{1}{SNR}$
- Για MRC, η ουρά πέφτει σαν  $\frac{1}{SNR^2}$ , είναι δηλαδή πιο απότομη

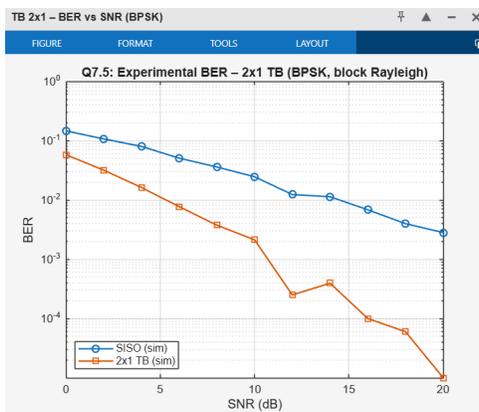
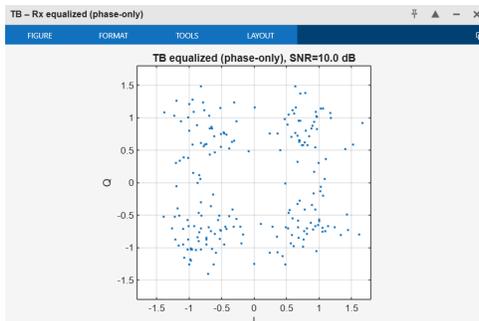
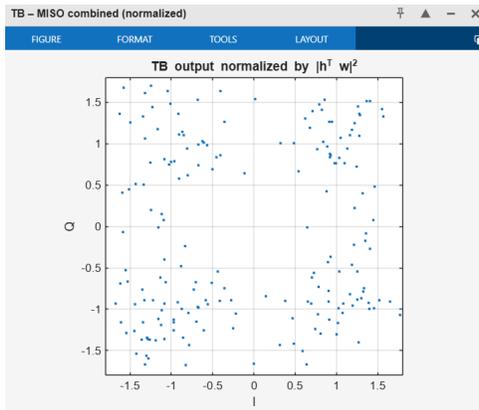
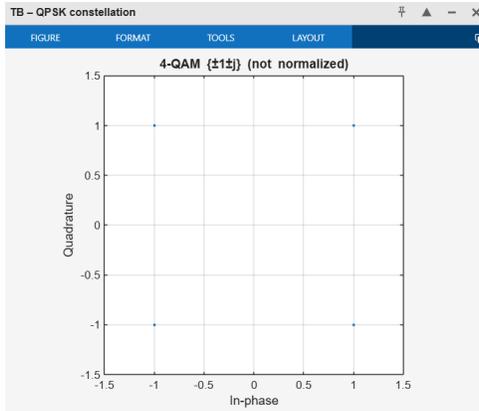
Παρατηρούνται ωστόσο, κάποιες μικρές αποκλίσεις στα μεγάλα SNR, λόγω του πεπερασμένου πλήθους των bit.

**Ερώτημα 7:** Να επαναλάβετε τα βήματα 1-5 για την περίπτωση που έχετε δύο κεραίες στον πομπό και χρησιμοποιείτε την τεχνική transmit beamforming (TB).

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, έχουμε τα εξής αποτελέσματα:





=== Ερώτημα 7.1: 2x1 Transmit Beamforming (BPSK) ===

SNRdB	BER_SISO	BER_TB
-5	0.25422	0.16259
-3	0.21394	0.11422
-1	0.16818	0.07851
1	0.12804	0.045466
3	0.091142	0.023824
5	0.065854	0.01287
7	0.046582	0.00599
9	0.028204	0.002394
11	0.01901	0.001232
13	0.012254	0.000352
15	0.006508	0.000162
17	0.00522	0.000238
19	0.00319	4.2e-05
21	0.00168	1.4e-05
23	0.001174	0
25	0.00058	0

=== Ερώτημα 7.2: 4-QAM πολεό για TB (N=200) ===

Point	Count
1+1i	47
-1+1i	43
-1-1i	62
1-1i	48

=== Ερώτημα 7.3: TB r[k] και SNR check ===

SNR σποράς: 10.00 dB | Εμπειρισμ. SNR: 10.11 dB | |h| = 0.754

k	s	h1	h2	gsh*Tw	n	r
1	-1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	-0.47013+0.27525i	-1.2242+1.0291i
2	1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	0.21202+0.29554i	0.96667+1.0131i
3	1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	-0.51298+0.0066077i	0.24106+0.76065i
4	-1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	-0.24244+0.14243i	0.3310+0.09640i
5	-1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	0.16456+0.32606i	-0.58901-1.0090i
6	1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	0.18589-0.20561i	0.93994+0.54844i
7	1+1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	-0.04153+0.19631i	0.71251+0.95251i
8	-1-1i	0.65792-0.27378i	-0.009263+0.22566i	0.75405	0.22226+0.24451i	-0.53179-0.58953i

=== Ερώτημα 7.4: TB (QPSK) ανίχνευση με τέλει CSI ===

SER(SISO): 0.015 | SER(TB): 0.025 (SNR=10.0 dB)

=== Ερώτημα 7.5: BER για 2x1 TB (BPSK), SNR=0:2:20 ===

SNRdB	BER_SISO	BER_TB
0	0.14692	0.05823
2	0.10749	0.03192
4	0.08039	0.0163
6	0.050865	0.007745
8	0.036145	0.003765
10	0.024675	0.002125
12	0.012375	0.00025
14	0.01136	0.000395
16	0.006845	0.0001
18	0.00399	6e-05
20	0.00282	1e-05

Από τα γραφήματα, έχουμε ότι:

- Τα σύννεφα του αστερισμού συγκεντρώνονται γύρω από τα 4 σημεία
- η καμπύλη TB είναι πιο κάτω από την SISO, με πιο απότομη πτώση

Γενικά η συμπεριφορά, ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό με την θεωρία, το TB με 2 κεραιές δίνει array gain σχεδόν 3dB.

**Ερώτημα 8:** Να συγκρίνετε τα BERs των τεχνικών MRC και TB. Τι παρατηρείτε;

**Απάντηση:**

Παρατηρείται ότι:

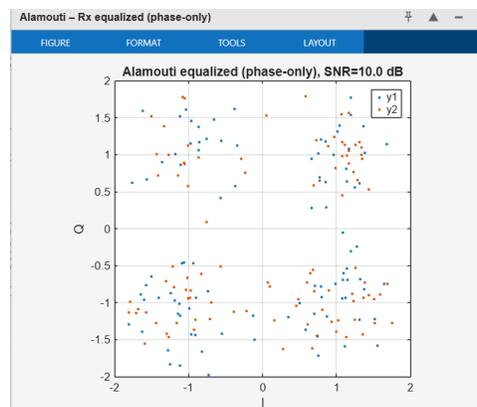
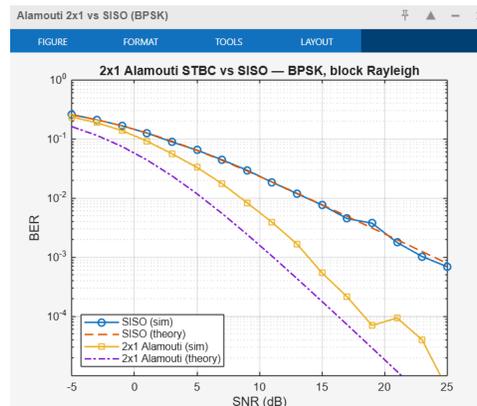
πό τα προηγούμενα γραφήματα και τους πίνακες, παρατηρείται ότι:

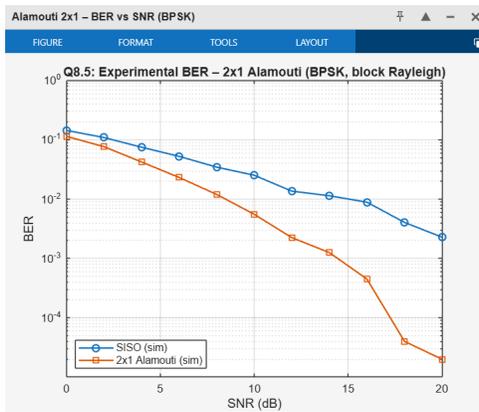
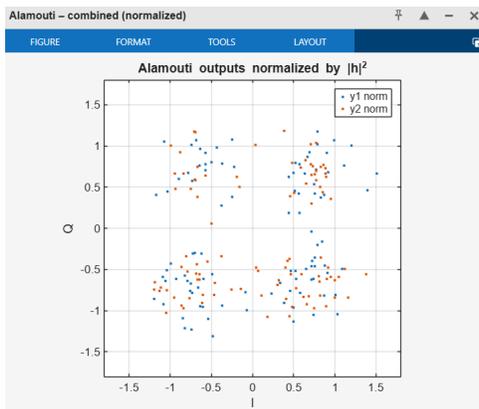
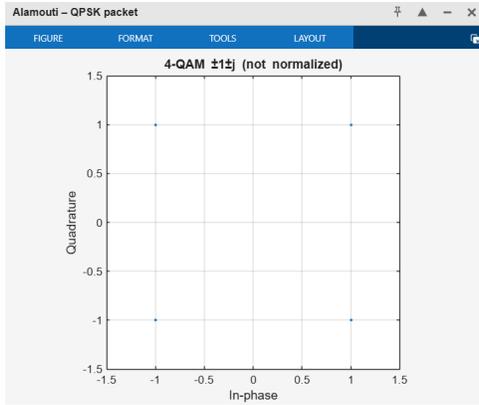
- MRC και TB δίνουν το ίδιο κέρδος.
- Η κλιση των καμπυλών TB και MRC στο γράφημα είναι πιο απότομη από του SISO
- Υπάρχουν μικρές αποκλίσεις, οι οποίες δικαιολογούνται από το πλήθος των δειγμάτων

**Ερώτημα 9:** Να επαναλάβετε τα βήματα 1-5 για την περίπτωση που έχετε δύο κεραίες στον πομπό και χρησιμοποιείτε τον κώδικα Alamouti (να προσέξετε στον ορισμό του SNR!).

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, πήραμε τα εξής αποτελέσματα:





=== Ερώτημα 8.1: 2x1 Alamouti (BPSK) - σύγκριση με SISO ===

SNRdB	BER_SISO	BER_Alamouti
-5	0.25869	0.23585
-3	0.21121	0.18792
-1	0.16734	0.13867
1	0.12587	0.092102
3	0.089038	0.056244
5	0.06474	0.033024
7	0.044544	0.017546
9	0.029644	0.008348
11	0.018594	0.003898
13	0.011874	0.001666
15	0.007642	0.000542
17	0.004508	0.000214
19	0.003758	7e-05
21	0.001776	9.4e-05
23	0.001026	4e-05
25	0.000692	6e-06

=== Ερώτημα 8.2: 4-QAM πακέτο για Alamouti (hi=200) ===

Point	Count
1+1i	50
-1+1i	36
-1-1i	53
1-1i	61

=== Ερώτημα 8.3: Alamouti r1,r2 και SNR check ===

SNR στόχος: 10.00 dB | Εμπειρικό SNR: 9.93 dB | |h|^2 = 1.510

k	s1	s2	h1	h2	r1	r2
1	1+1i	1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	0.16279-0.08014i	-0.62700+0.71616i
2	1+1i	1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	-0.55262-0.06791i	-1.08810+0.96577i
3	-1+1i	1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	0.60811+0.69989i	-0.60532+1.32221i
4	1-1i	1+1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	-1.5257-1.05781i	0.95909-0.00021i
5	1+1i	-1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	0.61824-0.98563i	-1.8406-0.15159i
6	1+1i	-1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	0.32383-1.02051i	-1.6103-0.44629i
7	-1-1i	-1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	-0.38866+2.16851i	-0.4556-0.15936i
8	-1-1i	-1-1i	-0.45371-1.02241i	-0.39093-0.32575i	0.23206+1.53511i	-0.93342-0.77144i

=== Ερώτημα 8.4: Alamouti (QPSK) ανίχνευση με τέλει CSI ===  
 SER(SISO): 0 | SER(Alamouti): 0.005 (SNR=10.0 dB)

=== Ερώτημα 8.5: BER για 2x1 Alamouti (BPSK), SNR=0:2:20 ===

SNRdB	BER_SISO	BER_Alamouti
0	0.14441	0.11467
2	0.10944	0.07669
4	0.075155	0.04241
6	0.052735	0.023215
8	0.03468	0.01202
10	0.0253	0.00555
12	0.013655	0.002245
14	0.01141	0.001255
16	0.008885	0.00045
18	0.00405	4e-05
20	0.002285	2e-05

**Ερώτημα 10:** Να συγκρίνεται τα BERs των τεχνικών MRC, TB και Alamouti. Τι παρατηρείται;

**Απάντηση:**

Από τα προηγούμενα γραφήματα και τους πίνακες, παρατηρείται ότι:

- Οι καμπύλες MRC, TB και Alamouti, πέφτουν πιο απότομα από το SISO
- Για  $BER \approx 10^{-3}$  οι μέθοδοι MRC, TB, Alamouti χρειάζονται περίπου 14dB, ενώ το SISO χρειάζεται περίπου 18dB. Υπάρχει δηλαδή 4dB κέρδος.
- Η καμπύλη του Alamouti, έχει περίπου ίδια κλίση και κοντικά BER με τα MRC, TB.

**Ερώτημα 11:** Να αποδείξετε ότι ο κώδικας Alamouti ικανοποιεί το κριτήριο του βαθμού (rank criterion). Δηλαδή, για οποιαδήποτε διαφορετικά ζεύγη  $(x_1, x_2)$  και  $(x'_1, x'_2)$ , οι αντίστοιχοι πίνακες είναι πλήρους βαθμού.

**Απάντηση:**

Από τις προηγούμενες γραφικές, φαίνεται ότι ο κώδικας Alamouti ικανοποιεί το κριτήριο του βαθμού, αλλά αυτό από μόνο του δεν το αποδεικνύει. Ακολουθεί η μαθηματική απόδειξη:

Κώδικας Alamouti:

$$S(s_1, s_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix}$$

Για τα ζεύγη  $(s_1, s_2)$  και  $(s'_1, s'_2)$ , θέτουμε:

$$\Delta_{s_1} = s_1 - s'_1$$

$$\Delta_{s_2} = s_2 - s'_2$$

$$\Delta_S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \Delta_{s_1} & \Delta_{s_2} \\ -\Delta_{s_2}^* & \Delta_{s_1}^* \end{bmatrix}$$

Τότε το Hermitian γινόμενο είναι:

$$\Delta_S^H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \Delta_{s_1}^* & -\Delta_{s_2} \\ \Delta_{s_2}^* & \Delta_{s_1} \end{bmatrix}$$

$$\Delta_S^H \Delta_S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} |\Delta_{s_1}|^2 + |\Delta_{s_2}|^2 & 0 \\ 0 & |\Delta_{s_1}|^2 + |\Delta_{s_2}|^2 \end{bmatrix}$$

Επομένως:

$$\det(\Delta_S^H \Delta_S) = \left( \frac{|\Delta_{s_1}|^2 + |\Delta_{s_2}|^2}{2} \right) > 0$$

Δηλαδή,  $\text{rank}(\Delta_S) = 2$ . Συνεπώς ικανοποιείται το rank criterion.

**Ερώτημα 12:** Να δημιουργήσετε ανεξάρτητα όμοια κατανομημένα κανάλια  
 $h_{i,j} \sim CN(0, 1)$ ,  $i, j = 1, 2$

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, φαίνεται ότι:

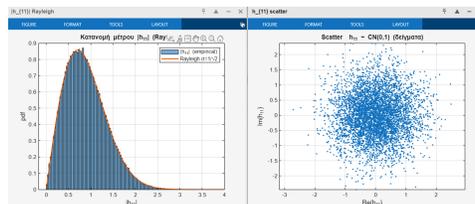
```

=== Ερώτημα 1: Δημιουργία i.i.d. καναλιών h_ij ~ CN(0,1) (2x2) ===
--- Δείγματα H για τα πρώτα 5 blocks (σταθερά εντός block) ---
Block 1:
      h11      h12      h21      h22
-----
-0.79147-0.41985i  0.4788+0.4704i  0.6946-0.4007i  -0.1391-0.0087138i
Block 2:
      h11      h12      h21      h22
-----
1.5932-1.0305i  -0.057076-0.50971i  0.56787+0.49553i  0.56514+0.312i
Block 3:
      h11      h12      h21      h22
-----
0.40926+1.2093i  -0.35381-1.6131i  -0.19442-0.16397i  0.27+0.91132i
Block 4:
      h11      h12      h21      h22
-----
0.89244-0.44391i  0.040429+0.57938i  -0.49339-0.3749i  -0.43095+0.039669i
Block 5:
      h11      h12      h21      h22
-----
0.8875+0.91762i  -0.065703+0.53559i  -2.2356-0.29823i  0.88691-0.0014326i

--- Στατιστικός έλεγχος (nBlocks=200000) ---
      mean      E{|h|^2}      var(Re)      var(Im)
-----
h11  0.00010075+0.00078598i  1.0049  0.5024  0.50255
h12  -0.00046856+0.001373i  1.0028  0.49942  0.50335
h21  -0.00069969-0.00054041i  0.99857  0.5001  0.49848
h22  -0.00086554+7.8017e-05i  1.0001  0.50137  0.49874

      rho(h11,h12)      rho(h11,h21)      rho(h11,h22)
-----
-0.002104-0.0007639i  0.0021863+0.0008858i  0.00043606-0.00024283i

```



Το ιστόγραμμα ταιριάζει με την Rayleigh pdf με:  $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}}$   
 Από τον πίνακα "Στατιστικός έλεγχος":

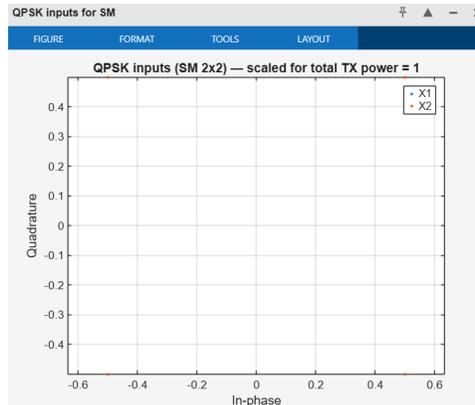
- $E\{|h|^2\} \approx 1$
- $\text{var}(R\{h\}) \approx \text{var}I\{h\} \approx 0.5$
- οι συσχετίσεις είναι πολύ κοντά στο 0. Άρα είναι ανεξάρτητοι οι συντελεστές

Επίσης οι τιμές εντός block μένουν σταθερές και αλλάζουν από block σε block.

**Ερώτημα 13:** Να δημιουργήσετε δύο ακολουθίες εισόδου 4-QAM,  $\{X_{1,n}\}$  και  $\{X_{2,n}\}$

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:



=== Ερώτημα 2: 4-QAM ακολουθίες για SM (N=200) ===  
 Μέση ενέργεια ανά stream: Es1=0.5000, Es2=0.5000 | Σύνολο=1.0000

```
-- X1 (τεταρτημόρια) --
Point Count
-----
"+ +" 39
"- +" 53
"- -" 58
"+ -" 50

-- X2 (τεταρτημόρια) --
Point Count
-----
"+ +" 47
"- +" 47
"- -" 46
"+ -" 60
```

Φαίνεται ότι, όντως παράξαμε 2 i.i.d. ακολουθίες.

Στο διάγραμμα του αστερισμού τα νέφη των  $X_1$  και  $X_2$  συμπίπτουν, αλλά δεν φαίνεται καθαρά.

**Ερώτημα 14:** Να υπολογίσετε τις εξόδους

$$i,n = h_{i,1}X_{1,n} + h_{i,2}X_{2,n} + W_{i,n}, \quad W_{i,n} \sim CN(0, N_0), \quad i = 1, 2$$

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:



**Ερώτημα 15:** Να εκτιμήσετε τις ακολουθίες εισόδου με χρήση:

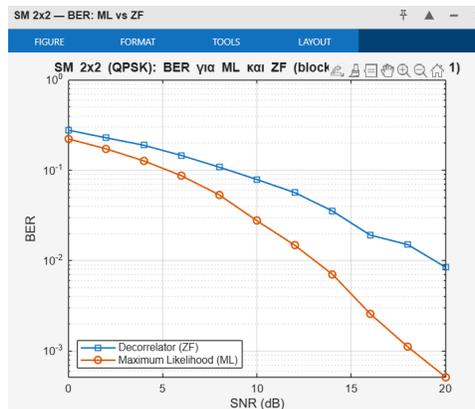
( $\alpha'$ ) του κανόνα μέγιστης πιθανοφάνειας,

( $\beta'$ ) του decorrelator,

και να υπολογίσετε τις αντίστοιχες πιθανότητες σφάλματος bit, σαν συνάρτηση του SNR. Τι παρατηρείτε;

**Απάντηση:**

Από τον κώδικα, παίρνουμε:



```
=== Ερώτημα 4 (SM 2x2): ML vs Decorrelator (ZF) - BER vs SNR ===
SNR= 0 dB | BER_ZF=0.2784 | BER_ML=0.22295
SNR= 2 dB | BER_ZF=0.22923 | BER_ML=0.17291
SNR= 4 dB | BER_ZF=0.18955 | BER_ML=0.12725
SNR= 6 dB | BER_ZF=0.14587 | BER_ML=0.087181
SNR= 8 dB | BER_ZF=0.10849 | BER_ML=0.053425
SNR=10 dB | BER_ZF=0.079016 | BER_ML=0.027714
SNR=12 dB | BER_ZF=0.056761 | BER_ML=0.014817
SNR=14 dB | BER_ZF=0.035467 | BER_ML=0.0070766
SNR=16 dB | BER_ZF=0.019214 | BER_ML=0.0025891
SNR=18 dB | BER_ZF=0.015048 | BER_ML=0.0011109
SNR=20 dB | BER_ZF=0.0084625 | BER_ML=0.00051563
```

SNRdB	BER_ZF	BER_ML
0	0.2784	0.22295
2	0.22923	0.17291
4	0.18955	0.12725
6	0.14587	0.087181
8	0.10849	0.053425
10	0.079016	0.027714
12	0.056761	0.014817
14	0.035467	0.0070766
16	0.019214	0.0025891
18	0.015048	0.0011109
20	0.0084625	0.00051563

Παρατηρείται, ότι:

- Για όλο το SNR, ισχύει: Maximum Likelihood > Decorrelator (π.χ. στα 10dB:  $BER_{MaxLikelihood} = 2.8 \times 10^{-2}$  ενώ  $BER_{Decorrelator} = 7.9 \times 10^{-2}$  και στα 20dB:  $BER_{MaxLikelihood} = 5.2 \times 10^{-4}$  ενώ  $BER_{Decorrelator} = 8.5 \times 10^{-3}$ )
- Η καμπύλη Maximum Likelihood πέφτει πιο απότομη κλίση από την αντίστοιχη καμπύλη του decorrelator.

- Για τα υψηλά SNR, ο decorrelator δεν φτάνει τα  $10^{-3}$  στα 20 dB, ενώ ο Maximum Likelihood είναι ήδη πιο κάτω από τα  $10^{-3}$  για τα ίδια dB
- Για τα χαμηλά SNR, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά, αλλά ο Maximum Likelihood παραμένει καλύτερος.