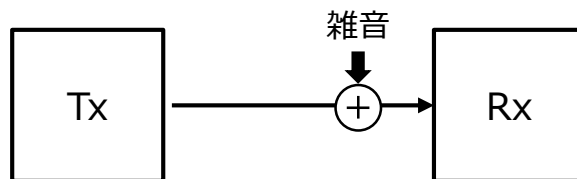


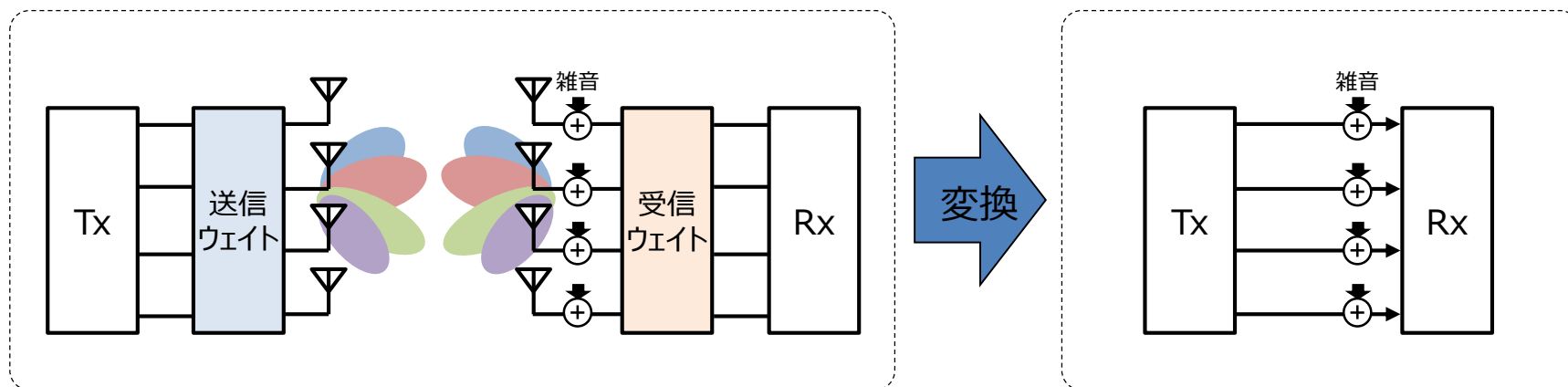
4×4 SVD-MIMOシステムの所要C/Nの 考え方について（案）

平成30年10月4日

- 従来のFPUにおける所要C/Nは理想的な値として直結状態のAWGNで規定
 - 回線設計等ではAWGNの所要C/Nにフェージングマージンなどの損失を積算
 - STTC-MIMOについてもSISO-AWGNの所要C/Nを使用し、回線設計でMIMOのマージン（相関マージン）を考慮。



- 高度化方式の 4×4 SVD-MIMOは、MIMOチャンネルを4つのSISOチャンネルに変換する技術
⇒ 所要C/NはSISO-AWGN×4として考え方を踏襲できる



所要C/Nを規定する考え方②

■ 高度化方式で考慮すべき点：

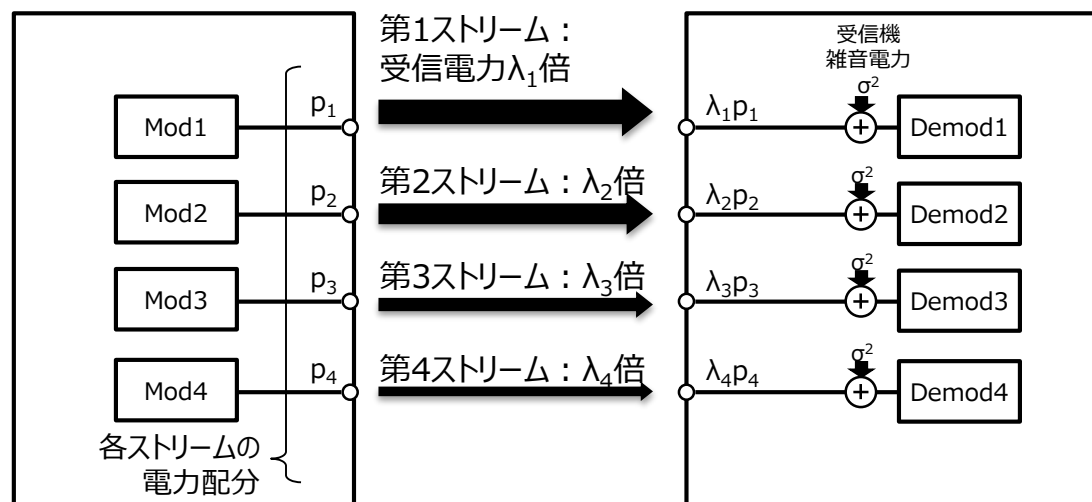
- ①各SISOチャネル(ストリーム)の品質は固有値 λ に比例
- ②各ストリームの品質に応じてビット配分(変調方式)と電力配分を変更

⇒ i.i.d.固有値モデルを導入し、全てのビット配分について所要C/Nを算出して最小の値をシステムの理想的な所要C/Nとする。

i.i.d.固有値モデル

4×4の i.i.d. MIMOチャネル※1で無相関(送信相関・受信相関とも0)とした場合の固有値の平均値※2で各ストリームの品質に差があるモデル

$$\begin{cases} \lambda_1=2.45, \lambda_2=1.08, \lambda_3=0.41, \lambda_4=0.06 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4 \end{cases}$$



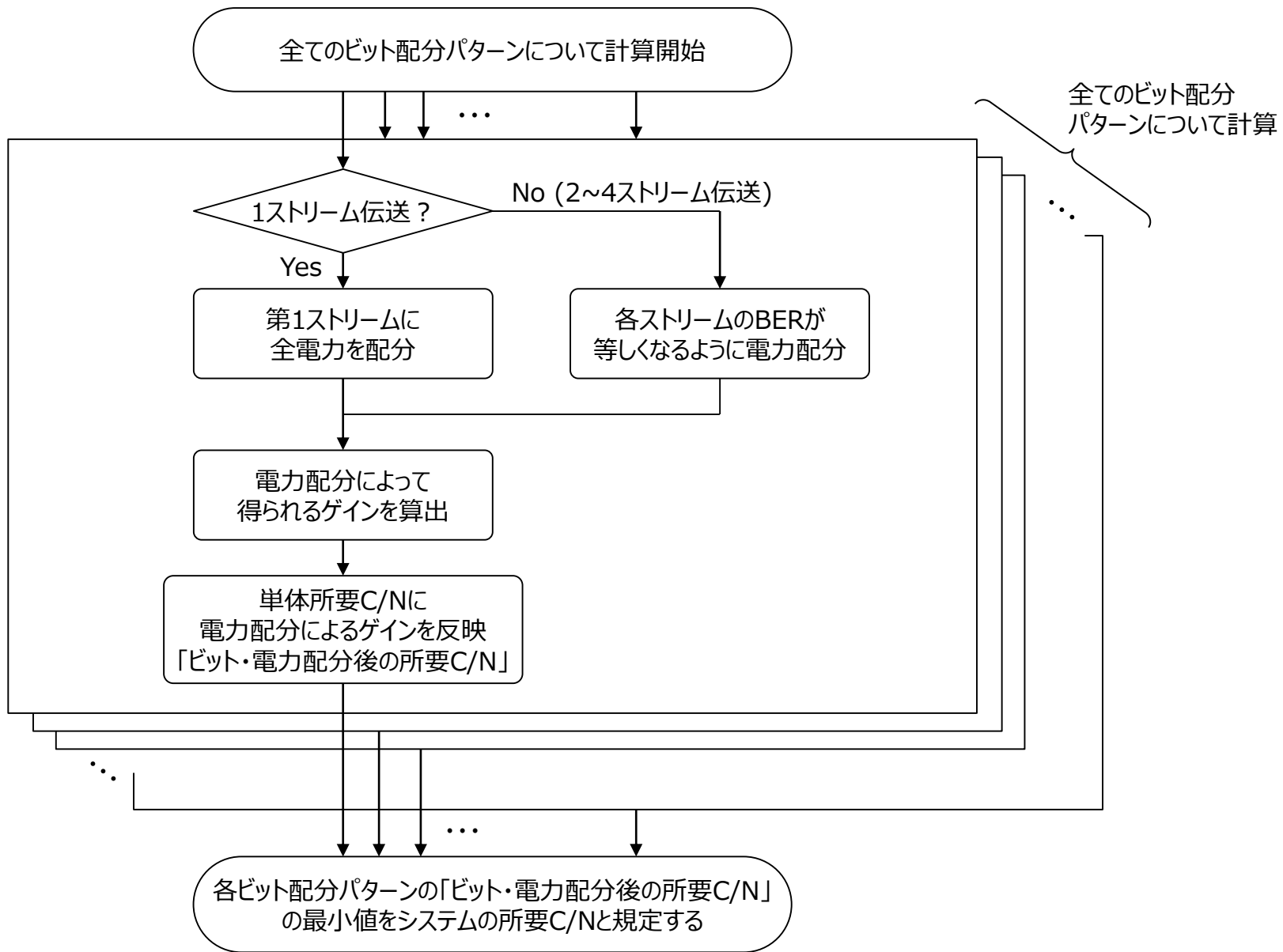
$$\begin{matrix} \lambda_1=2.45, & \lambda_2=1.08, & \lambda_3=0.41, & \lambda_4=0.06 \\ (3.89\text{dB}) & (0.31\text{dB}) & (-3.85\text{dB}) & (-12.04\text{dB}) \end{matrix}$$

※1 MIMOにとって理想的なチャネルモデル。チャネル行列の各要素が独立かつ同一の分布(レイリー分布)に従う。

i.i.d. : independent and identically distribution 独立同一分布

※2 [参考文献] Y. Karasawa, "MIMO Propagation Channel Modeling," IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No.5, pp.1829-1842, 2005.

所要C/N算出のフローチャート

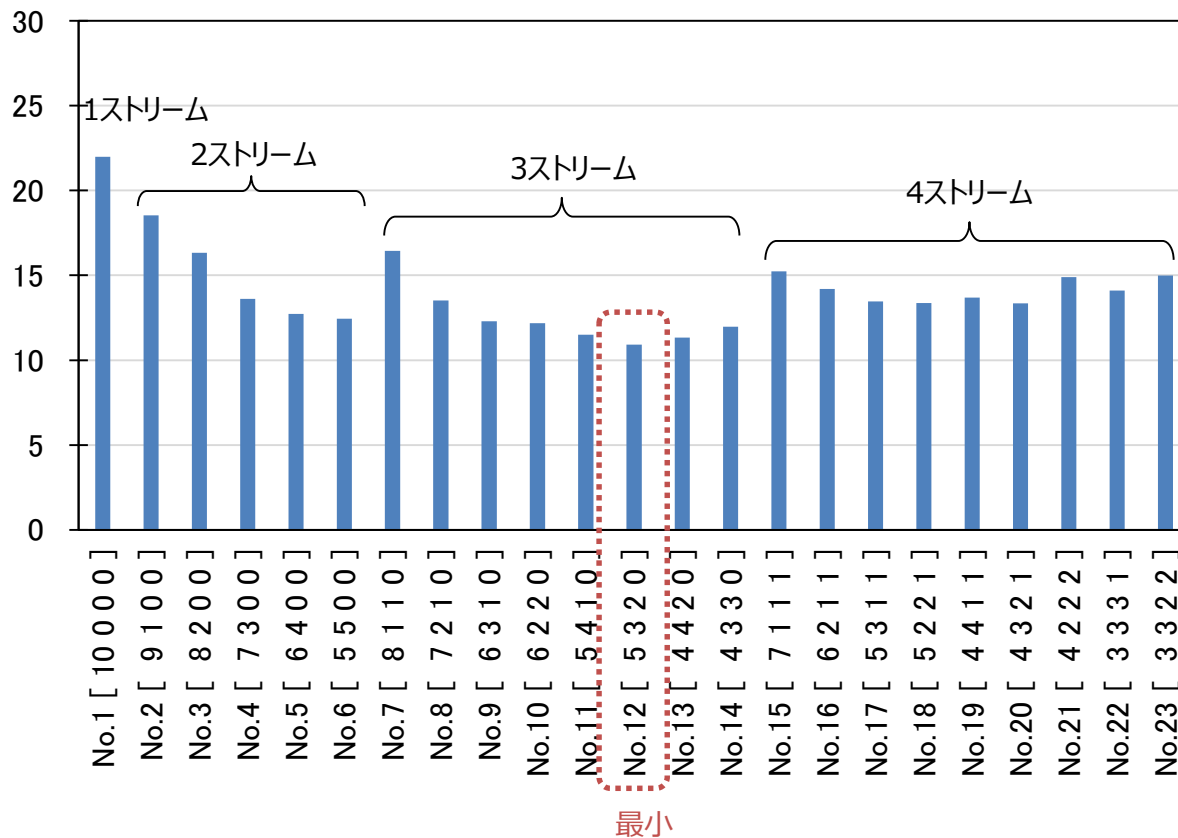


i.i.d. 固有値モデルにおける合計10bit変調の所要C/Nの結果

パターンNo	ストリーム数	ビット配分	ビット・電力配分後の 所要C/N[dB]
1	1	[10 0 0 0]	21.99
2	2	[9 1 0 0]	18.53
3	2	[8 2 0 0]	16.33
4	2	[7 3 0 0]	13.61
5	2	[6 4 0 0]	12.73
6	2	[5 5 0 0]	12.45
7	3	[8 1 1 0]	16.43
8	3	[7 2 1 0]	13.53
9	3	[6 3 1 0]	12.30
10	3	[6 2 2 0]	12.19
11	3	[5 4 1 0]	11.50
12	3	[5 3 2 0]	10.92
13	3	[4 4 2 0]	11.33
14	3	[4 3 3 0]	11.98
15	4	[7 1 1 1]	15.24
16	4	[6 2 1 1]	14.21
17	4	[5 3 1 1]	13.46
18	4	[5 2 2 1]	13.37
19	4	[4 4 1 1]	13.69
20	4	[4 3 2 1]	13.35
21	4	[4 2 2 2]	14.90
22	4	[3 3 3 1]	14.11
23	4	[3 3 2 2]	14.99

最小値	10.92
最小パターン No.	No.12 [5 3 2 0]

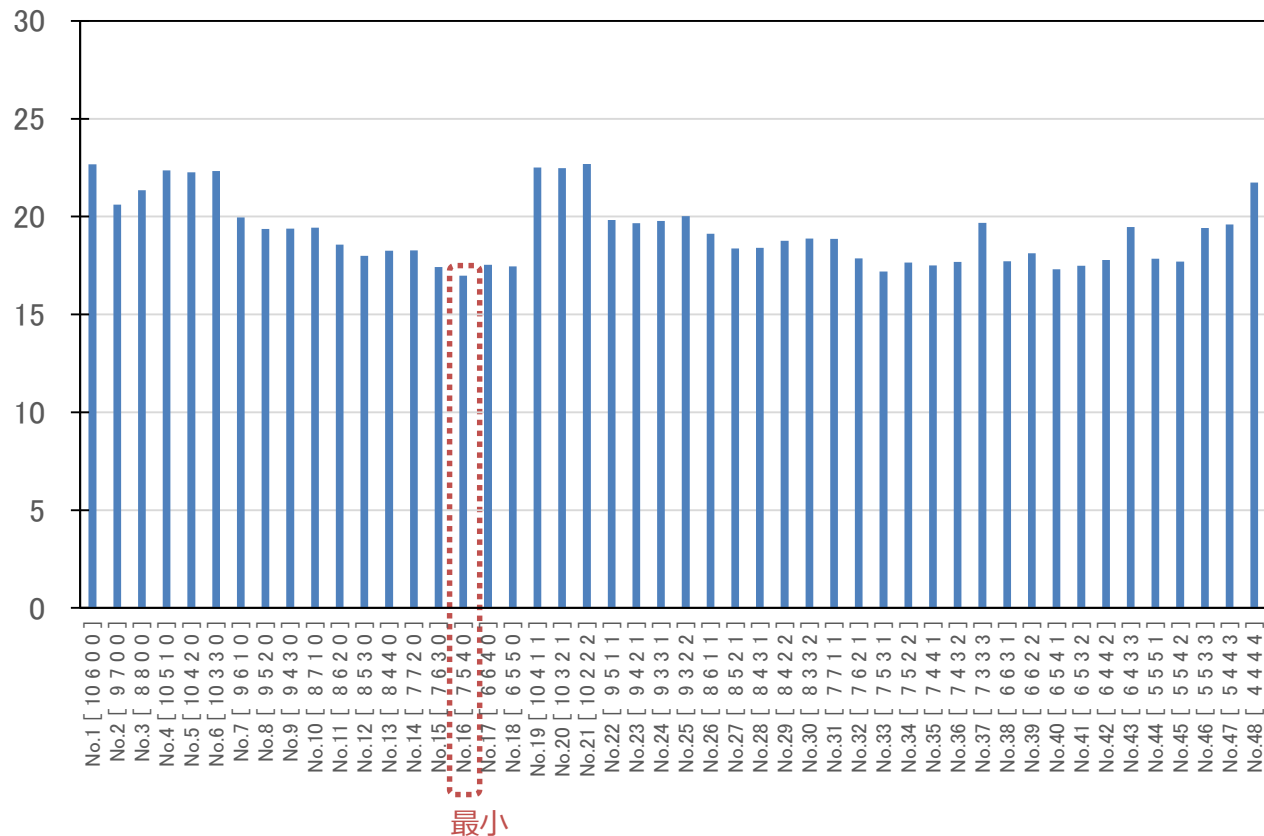
ビット・電力配分後の所要C/N [dB]



所要C/N=10.92 dB (10ビット@i.i.d.固有値モデル)

パターンNo	ストリーム数	ビット配分	ビット・電力配分後の 所要C/N[dB]
1	2	[10 6 0 0]	22.67
2	2	[9 7 0 0]	20.60
3	2	[8 8 0 0]	21.35
4	3	[10 5 1 0]	22.36
5	3	[10 4 2 0]	22.27
6	3	[10 3 3 0]	22.32
7	3	[9 6 1 0]	19.96
8	3	[9 5 2 0]	19.36
9	3	[9 4 3 0]	19.38
10	3	[8 7 1 0]	19.43
11	3	[8 6 2 0]	18.56
12	3	[8 5 3 0]	17.99
13	3	[8 4 4 0]	18.25
14	3	[7 7 2 0]	18.28
15	3	[7 6 3 0]	17.43
16	3	[7 5 4 0]	16.99
17	3	[6 6 4 0]	17.54
18	3	[6 5 5 0]	17.46
19	4	[10 4 1 1]	22.51
20	4	[10 3 2 1]	22.47
21	4	[10 2 2 2]	22.69
22	4	[9 5 1 1]	19.83
23	4	[9 4 2 1]	19.67
24	4	[9 3 3 1]	19.77
25	4	[9 3 2 2]	20.03
26	4	[8 6 1 1]	19.11
27	4	[8 5 2 1]	18.38
28	4	[8 4 3 1]	18.41
29	4	[8 4 2 2]	18.76
30	4	[8 3 3 2]	18.88
31	4	[7 7 1 1]	18.87
32	4	[7 6 2 1]	17.87
33	4	[7 5 3 1]	17.19
34	4	[7 5 2 2]	17.65
35	4	[7 4 4 1]	17.51
36	4	[7 4 3 2]	17.68
37	4	[7 3 3 3]	19.67
38	4	[6 6 3 1]	17.72
39	4	[6 6 2 2]	18.12
40	4	[6 5 4 1]	17.30
41	4	[6 5 3 2]	17.49
42	4	[6 4 4 2]	17.79
43	4	[6 4 3 3]	19.47
44	4	[5 5 5 1]	17.85
45	4	[5 5 4 2]	17.70
46	4	[5 5 3 3]	19.41
47	4	[5 4 4 3]	19.60
48	4	[4 4 4 4]	21.74

ビット・電力配分後の所要C/N [dB]



所要C/N=16.99 dB (16ビット@i.i.d.固有値モデル)

最小値	16.99
最小パターンNo.	No.16 [7 5 4 0]

ビット数・固有値モデルにおける結果比較

所要C/N: ターボ復号後のBER=2 × 10⁻⁴を満す正規化C/N
 ターボ符号の符号化率R=0.92

		合計変調ビット		
		10bit	差	16bit
チャンネル	【i.i.d.チャンネル】 レイリー 相関0.0	10.9	(+6.1) →	17.0
		(基準)		(基準)
	レイリー 相関0.9	13.4	(+7.7) →	21.0
		(+2.4)		(+4.0)
	ライス(郊外A) 相関(0.0/0.0)	12.0	(+6.2) →	18.2
		(+1.1)		(+1.2)
	ライス(郊外A) 相関(0.7/0.3)	14.6	(+6.3) →	20.9
		(+3.7)		(+3.9)
	2波ライス 相関0.9	18.2	(+8.8) →	27.0
		(+7.3)		(+10.0)

回線設計の
所要C/Nとして使用

相関マージン等
として積算

単位 [dB]
 ()...基準との差

補足資料

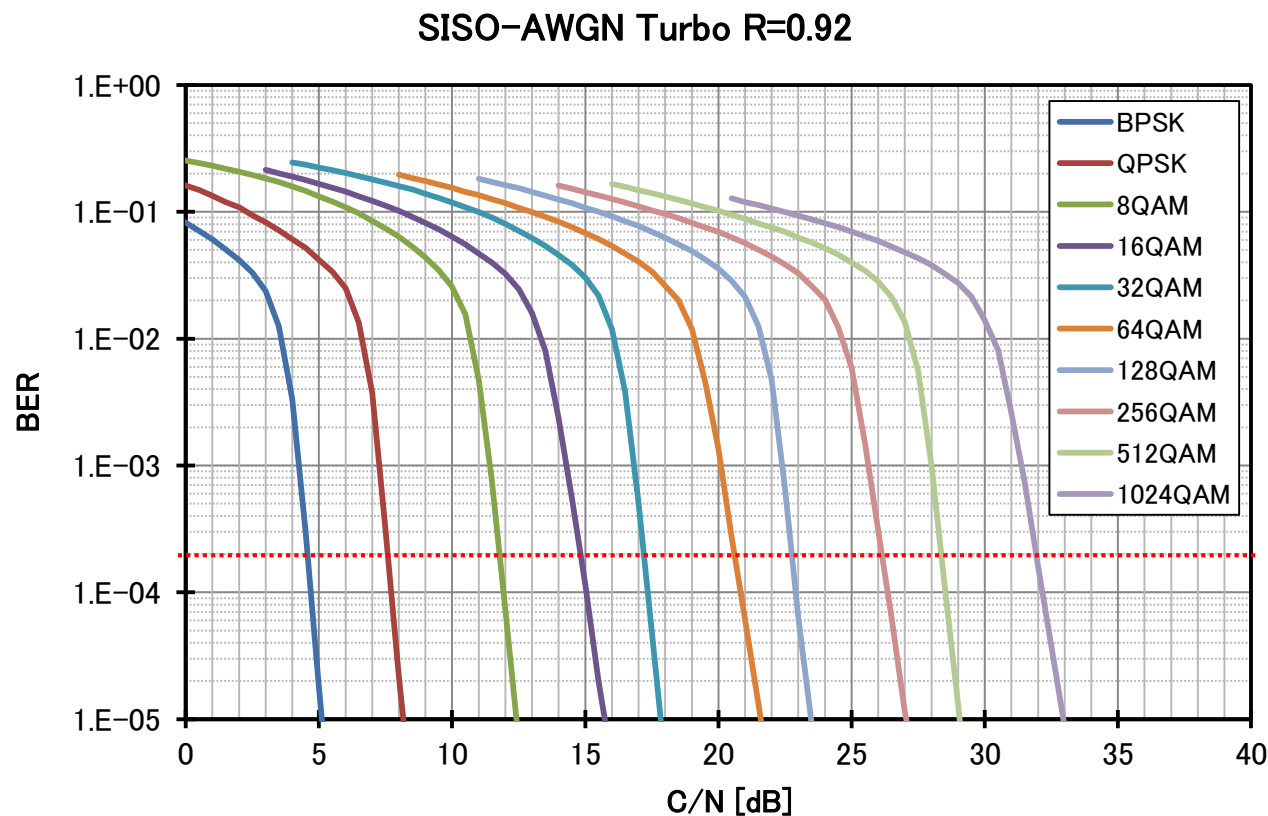
事前準備：単体所要C/Nの定義

- SISO-AWGNにおける各変調方式の所要C/Nを、「単体所要C/N」として計算機シミュレーションにより取得。
- 所要C/Nは、ターボ復号後のBERが 2×10^{-4} となるC/Nとする。

各変調方式の所要C/N

- ・ターボ符号 R=0.92
- ・インタリーブサイズ1632bit

ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]
1	BPSK	4.6
2	QPSK	7.6
3	8QAM	11.8
4	16QAM	14.8
5	32QAM	17.2
6	64QAM	20.6
7	128QAM	22.8
8	256QAM	26.1
9	512QAM	28.4
10	1024QAM	31.9



事前準備：単体所要C/N一覽

ビット配分	変調方式	R=0.33 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.44 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.49 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.54 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.60 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.65 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.71 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.76 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.81 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.87 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.89 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	R=0.92 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]	Turbo無し 2x10 ⁻⁴ 単体所要 C/N[dB]
1	BPSK	-3.8	-2.2	-1.5	-0.8	-0.2	0.6	1.2	1.9	2.6	3.5	4.0	4.6	8.0
2	QPSK	-0.8	0.8	1.5	2.2	2.8	3.6	4.2	4.9	5.6	6.5	7.0	7.6	11.0
3	8QAM	2.6	4.6	5.4	6.2	6.9	7.7	8.4	9.1	9.8	10.7	11.2	11.8	14.9
4	16QAM	4.2	6.2	7.1	7.9	8.8	9.7	10.6	11.4	12.3	13.5	14.0	14.8	17.8
5	32QAM	6.5	8.6	9.6	10.5	11.4	12.3	13.2	14.0	15.0	16.5	16.5	17.2	20.8
6	64QAM	8.0	11.6	12.3	13.2	14.2	15.3	16.2	17.1	18.1	19.2	19.8	20.6	23.8
7	128QAM	10.2	12.7	13.8	14.4	16.0	17.1	18.1	19.1	20.2	21.4	22.1	22.8	26.7
8	256QAM	11.7	15.5	16.5	17.6	18.7	19.9	21.0	22.1	23.2	24.5	25.2	26.1	29.7
9	512QAM	13.3	16.5	18.0	19.2	20.8	21.8	23.1	24.3	25.6	26.8	27.6	28.4	32.6
10	1024QAM	15.2	18.2	19.7	21.2	23.1	24.2	25.8	27.1	28.6	30.1	30.4	31.9	35.6

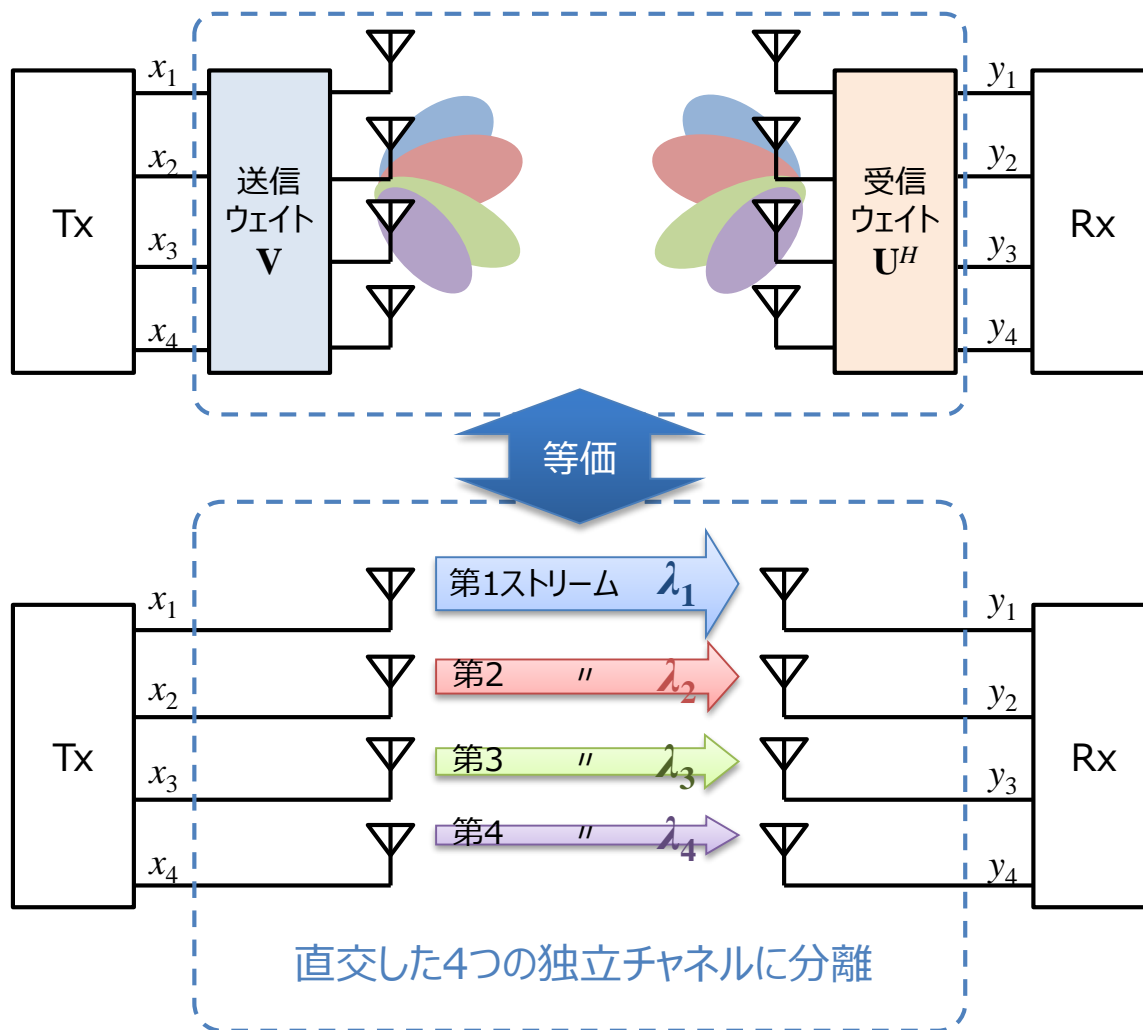
ストリーム数と変調方式の組み合わせ①

ストリーム数	合計10bit変調 (23通り)	合計12bit変調 (32通り)	合計14bit変調 (40通り)	合計16bit変調 (48通り)
1ストリーム (ランク1伝送)	[10 0 0 0] 第2 第3 第4 第1ストリームに割り当てたビット数	(無し)	(無し)	(無し)
2ストリーム (ランク2伝送)	[9100] [8200] [7300] [6400] [5500]	[10200] [9300] [8400] [7500] [6600]	[10400] [9500] [8600] [7700]	[10600] [9700] [8800]
3ストリーム (ランク3伝送)	[8110] [7210] [6310] [6220] [5410] [5320] [4420] [4330]	[10110] [9210] [8310] [8220] [7410] [7320] [6510] [6420] [6330] [5520] [5430] [4440]	[10310] [10220] [9410] [9320] [8510] [8420] [8330] [7610] [7520] [7430] [6620] [6530] [6440] [5540]	[10510] [10420] [10330] [9610] [9520] [9430] [8710] [8620] [8530] [8440] [7720] [7630] [7540] [6640] [6550]
4ストリーム (ランク4伝送)	[7111] [6211] [5311] [5221] [4411] [4321] [4222] [3331] [3322]	[9111] [8211] [7311] [7221] [6411] [6321] [6222] [5511] [5421] [5331] [5322] [4431] [4422] [4332] [3333]	[10211] [9311] [9221] [8411] [8321] [8222] [7511] [7421] [7331] [7322] [6611] [6521] [6431] [6422] [6332] [5531] [5522] [5441] [5432] [5333] [4442] [4433]	[10411] [10321] [10222] [9511] [9421] [9331] [9322] [8611] [8521] [8431] [8422] [8332] [7711] [7621] [7531] [7522] [7441] [7432] [7333] [6631] [6622] [6541] [6532] [6442] [6433] [5551] [5542] [5533] [5443] [4444]

ストリーム数と変調方式の組み合わせ②

ストリーム数	合計18bit変調 (53通り)	合計20bit変調 (55通り)
1ストリーム (ランク1伝送)	(無し)	(無し)
2ストリーム (ランク2伝送)	[10 8 0 0] [9 9 0 0]	[10 10 0 0]
3ストリーム (ランク3伝送)	[10 7 1 0] [10 6 2 0] [10 5 3 0] [10 4 4 0] [9 8 1 0] [9 7 2 0] [9 6 3 0] [9 5 4 0] [8 8 2 0] [8 7 3 0] [8 6 4 0] [8 5 5 0] [7 7 4 0] [7 6 5 0] [6 6 6 0]	[10 9 1 0] [10 8 2 0] [10 7 3 0] [10 6 4 0] [10 5 5 0] [9 9 2 0] [9 8 3 0] [9 7 4 0] [9 6 5 0] [8 8 4 0] [8 7 5 0] [8 6 6 0] [7 7 6 0]
4ストリーム (ランク4伝送)	[10 6 1 1] [10 5 2 1] [10 4 3 1] [10 4 2 2] [10 3 3 2] [9 7 1 1] [9 6 2 1] [9 5 3 1] [9 5 2 2] [9 4 4 1] [9 4 3 2] [9 3 3 3] [8 8 1 1] [8 7 2 1] [8 6 3 1] [8 6 2 2] [8 5 4 1] [8 5 3 2] [8 4 4 2] [8 4 3 3] [7 7 3 1] [7 7 2 2] [7 6 4 1] [7 6 3 2] [7 5 5 1] [7 5 4 2] [7 5 3 3] [7 4 4 3] [6 6 5 1] [6 6 4 2] [6 6 3 3] [6 5 5 2] [6 5 4 3] [6 4 4 4] [5 5 5 3] [5 5 4 4]	[10 8 1 1] [10 7 2 1] [10 6 3 1] [10 6 2 2] [10 5 4 1] [10 5 3 2] [10 4 4 2] [10 4 3 3] [9 9 1 1] [9 8 2 1] [9 7 3 1] [9 7 2 2] [9 6 4 1] [9 6 3 2] [9 5 5 1] [9 5 4 2] [9 5 3 3] [9 4 4 3] [8 8 3 1] [8 8 2 2] [8 7 4 1] [8 7 3 2] [8 6 5 1] [8 6 4 2] [8 6 3 3] [8 5 5 2] [8 5 4 3] [8 4 4 4] [7 7 5 1] [7 7 4 2] [7 7 3 3] [7 6 6 1] [7 6 5 2] [7 6 4 3] [7 5 5 3] [7 5 4 4] [6 6 6 2] [6 6 5 3] [6 6 4 4] [6 5 5 4] [5 5 5 5]

ストリーム数	合計22bit変調 (53通り)	合計24bit変調 (48通り)
1ストリーム (ランク1伝送)	(無し)	(無し)
2ストリーム (ランク2伝送)	(無し)	(無し)
3ストリーム (ランク3伝送)	[10 10 2 0] [10 9 3 0] [10 8 4 0] [10 7 5 0] [10 6 6 0] [9 9 4 0] [9 8 5 0] [9 7 6 0] [8 8 6 0] [8 7 7 0]	[10 10 4 0] [10 9 5 0] [10 8 6 0] [10 7 7 0] [9 9 6 0] [9 8 7 0] [8 8 8 0]
4ストリーム (ランク4伝送)	[10 10 1 1] [10 9 2 1] [10 8 3 1] [10 8 2 2] [10 7 4 1] [10 7 3 2] [10 6 5 1] [10 6 4 2] [10 6 3 3] [10 5 5 2] [10 5 4 3] [10 4 4 4] [9 9 3 1] [9 9 2 2] [9 8 4 1] [9 8 3 2] [9 7 5 1] [9 7 4 2] [9 7 3 3] [9 6 6 1] [9 6 5 2] [9 6 4 3] [9 5 5 3] [9 5 4 4] [8 8 5 1] [8 8 4 2] [8 8 3 3] [8 7 6 1] [8 7 5 2] [8 7 4 3] [8 6 6 2] [8 6 5 3] [8 6 4 4] [8 5 5 4] [7 7 7 1] [7 7 6 2] [7 7 5 3] [7 7 4 4] [7 6 6 3] [7 6 5 4] [7 5 5 5] [6 6 6 4] [6 6 5 5]	[10 10 3 1] [10 10 2 2] [10 9 4 1] [10 9 3 2] [10 8 5 1] [10 8 4 2] [10 8 3 3] [10 7 6 1] [10 7 5 2] [10 7 4 3] [10 6 6 2] [10 6 5 3] [10 6 4 4] [10 5 5 4] [9 9 5 1] [9 9 4 2] [9 9 3 3] [9 8 6 1] [9 8 5 2] [9 8 4 3] [9 7 7 1] [9 7 6 2] [9 7 5 3] [9 7 4 4] [9 6 6 3] [9 6 5 4] [9 5 5 5] [8 8 7 1] [8 8 6 2] [8 8 5 3] [8 8 4 4] [8 7 7 2] [8 7 6 3] [8 7 5 4] [8 6 6 4] [8 6 5 5] [7 7 7 3] [7 7 6 4] [7 7 5 5] [7 6 6 5] [6 6 6 6]



SVD-MIMOシステムでは、送受信双方のビームフォーミングにより、 4×4 MIMOチャンネルが4つの独立チャンネル（ストリーム）に変換される

各チャンネルの品質は固有値 λ に比例



SVD-MIMOシステムの所要C/N（理論値）を、以下の2つの基本固有値モデルで規定する

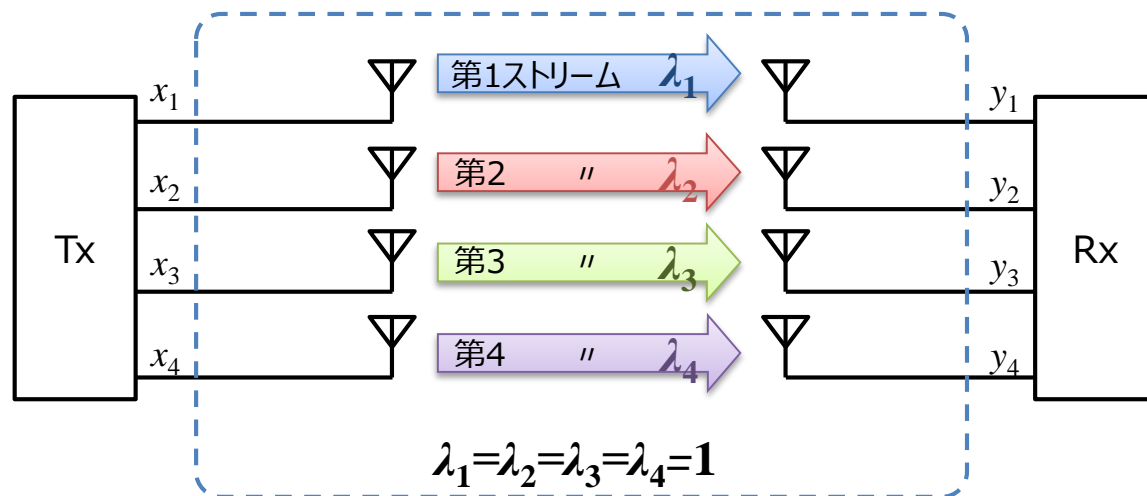
- 等固有値モデル
- i.i.d. 固有値モデル

基本固有値モデル

等固有値モデル

ケーブルを直結したときのように、各ストリームの固有値が1で等しいモデル

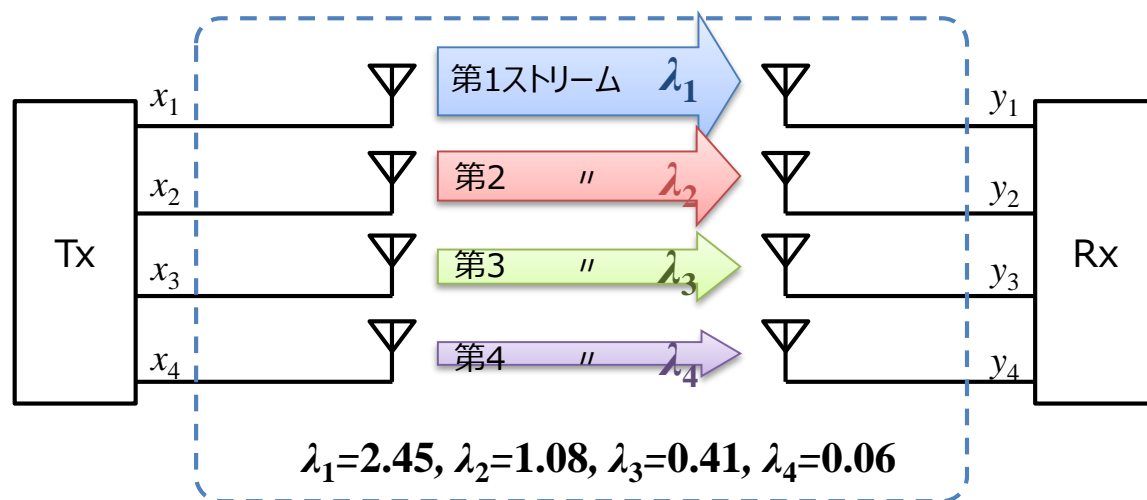
$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4 \end{cases}$$



i.i.d.固有値モデル

4×4の i.i.d. MIMOチャネル※1で無相関（送信相関・受信相関とも0）とした場合の固有値の平均値※2で各ストリームの品質に差があるモデル

$$\begin{cases} \lambda_1 = 2.45, \lambda_2 = 1.08, \lambda_3 = 0.41, \lambda_4 = 0.06 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4 \end{cases}$$

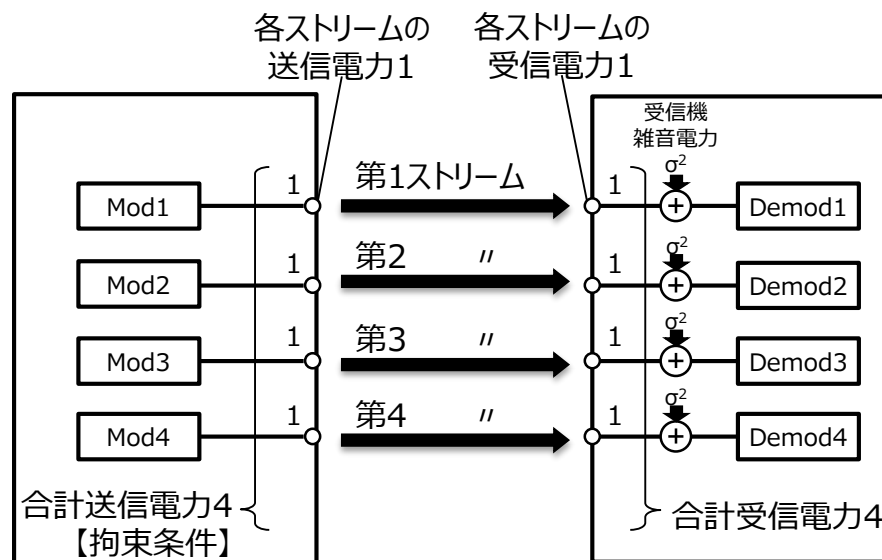


※1 MIMOにとって理想的なチャネルモデル。チャネル行列の各要素が独立かつ同一の分布（レイリー分布）に従う。

i.i.d. : independent and identically distribution 独立同一分布

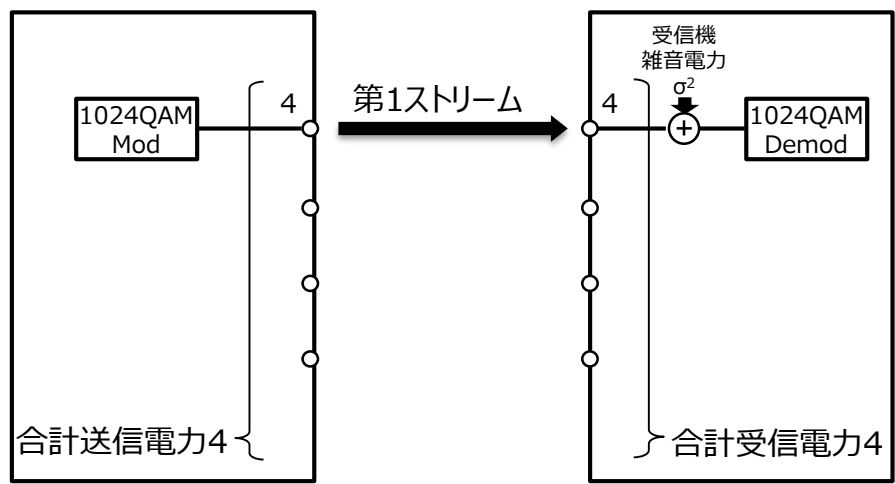
※2 [参考文献] Y. Karasawa, "MIMO Propagation Channel Modeling," IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No.5, pp.1829-1842, 2005.

- 最大4つのストリームを用いてビット・電力配分を行ったときの所要C/Nを全パターン算出する。
- 送信電力、受信電力、雑音電力を下図のように規定する。
 - 電力配分を行わないときの各ストリームの送信電力を1とし、合計送信電力は4とする
 - 電力配分を行った後も、合計送信電力は4で変わらないものとする（拘束条件）



- 電力配分を行わないとき、各ストリームの受信C/Nは $1/\sigma^2$

例) ビット配分[10 0 0 0]

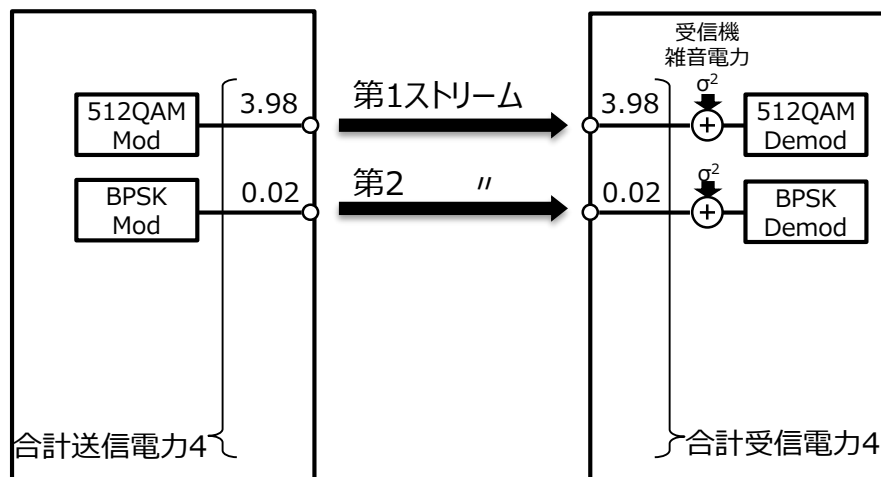


- 電力配分 : 第1ストリームに全電力を配分
- 電力配分後の受信C/Nは $4/\sigma^2$ となり4倍(6dB)アップ
⇒ 電力配分によって6dBのゲインが得られる
- 電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに減算して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。
- 1024QAMの単体所要C/Nを31.9dBとすると、
 $31.9 - 6.02 = 25.88 \text{ dB}$
- 【考え方】電力配分無しの際の受信C/N (正規化C/N※)が25.88 dBあれば、電力配分によって受信C/Nが31.9 dBとなり、単体所要C/Nを満たす。

ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	10	1024QAM	31.9	4	6.02	25.88
2						
3						
4						

※ 正規化C/N : 送信ビーム制御無しの状態、つまり各アンテナから等しい電力で信号が送信されたときの受信C/N。

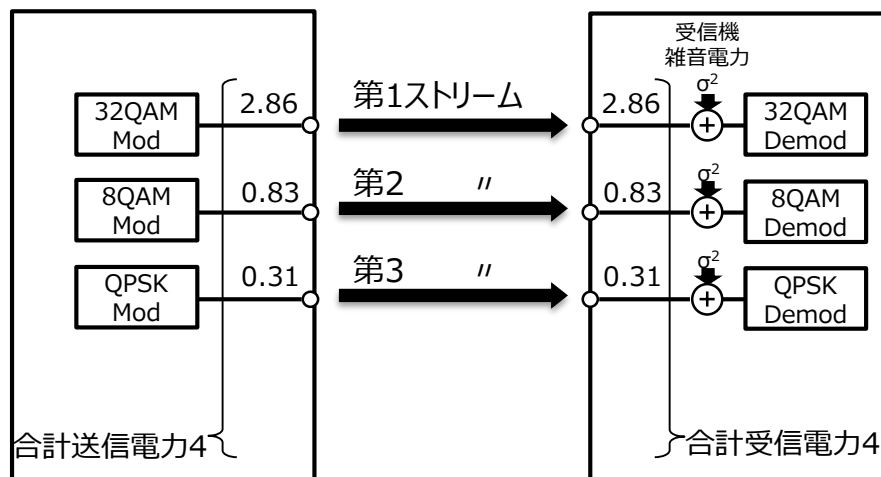
例) ビット配分[9 1 0 0]



- 電力配分：各ストリームのBERが等しくなるよう電力配分する。
- 電力配分後のC/Nと、単体所要C/Nまでのマージンが等しくなるよう配分する。
- その場合、単体所要C/Nの比(真値)で合計電力を分けた結果に等しい。
- 電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに減算して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。

ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	9	512QAM	28.4	3.98	6.00	22.40
2	1	BPSK	4.6	0.02	-17.80	
3						
4						

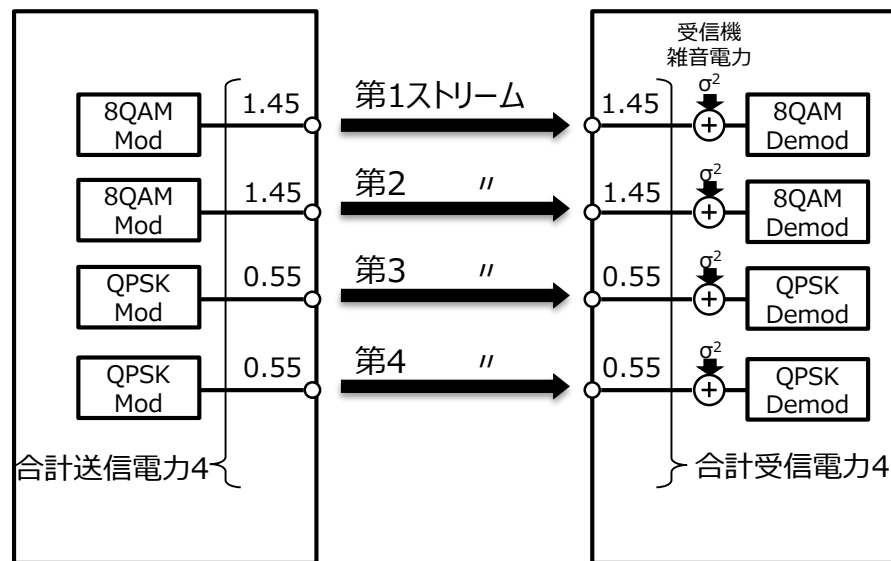
例) ビット配分[5 3 2 0]



- 電力配分：
各ストリームのBERが等しくなるよう電力配分する。
- 電力配分後のC/Nと、単体所要C/Nまでのマージンが等しくなるよう配分する。
- その場合、単体所要C/Nの比(真値)で合計電力を分けた結果に等しい。
- 電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに減算して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。

ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	5	32QAM	17.2	2.86	4.57	12.63
2	3	8QAM	11.8	0.83	-0.83	
3	2	QPSK	7.6	0.31	-5.03	
4						

例) ビット配分[3 3 2 2]



- 電力配分：
各ストリームのBERが等しくなるよう電力配分する。
- 電力配分後のC/Nと、単体所要C/Nまでのマージンが等しくなるよう配分する。
- その場合、単体所要C/Nの比(真値)で合計電力を分けた結果に等しい。
- 電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに減算して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。

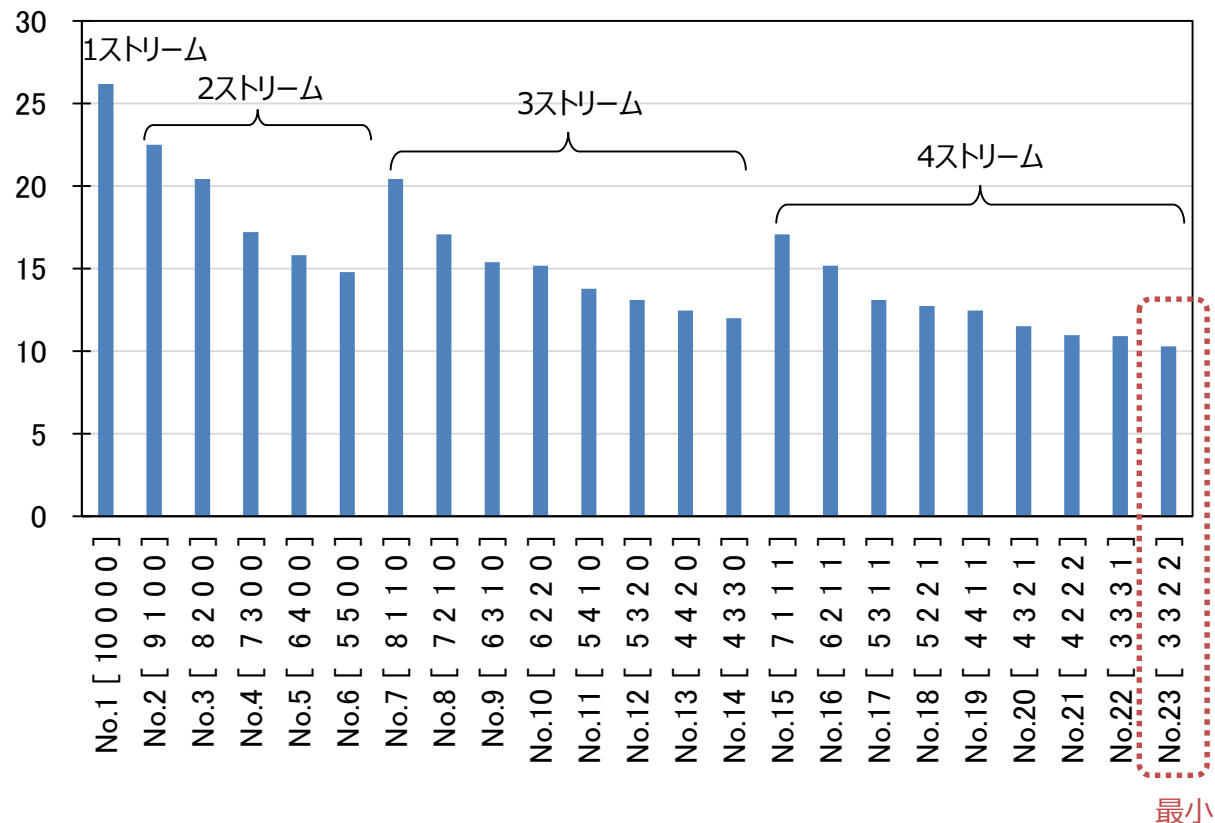
ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	3	8QAM	11.8	1.45	1.61	10.19
2	3	8QAM	11.8	1.45	1.61	
3	2	QPSK	7.6	0.55	-2.59	
4	2	QPSK	7.6	0.55	-2.59	

等固有値モデルで求めた10ビット伝送時の所要C/N

パターンNo	ストリーム数	ビット配分	ビット・電力配分後の 所要C/N[dB]
1	1	[10 0 0 0]	25.88
2	2	[9 1 0 0]	22.40
3	2	[8 2 0 0]	20.14
4	2	[7 3 0 0]	17.11
5	2	[6 4 0 0]	15.59
6	2	[5 5 0 0]	14.19
7	3	[8 1 1 0]	20.14
8	3	[7 2 1 0]	16.97
9	3	[6 3 1 0]	15.21
10	3	[6 2 2 0]	14.99
11	3	[5 4 1 0]	13.30
12	3	[5 3 2 0]	12.63
13	3	[4 4 2 0]	12.18
14	3	[4 3 3 0]	11.79
15	4	[7 1 1 1]	16.97
16	4	[6 2 1 1]	14.99
17	4	[5 3 1 1]	12.64
18	4	[5 2 2 1]	12.23
19	4	[4 4 1 1]	12.19
20	4	[4 3 2 1]	11.30
21	4	[4 2 2 2]	10.74
22	4	[3 3 3 1]	10.82
23	4	[3 3 2 2]	10.19

最小値	10.19
最小パターンNo.	No.23 [3 3 2 2]

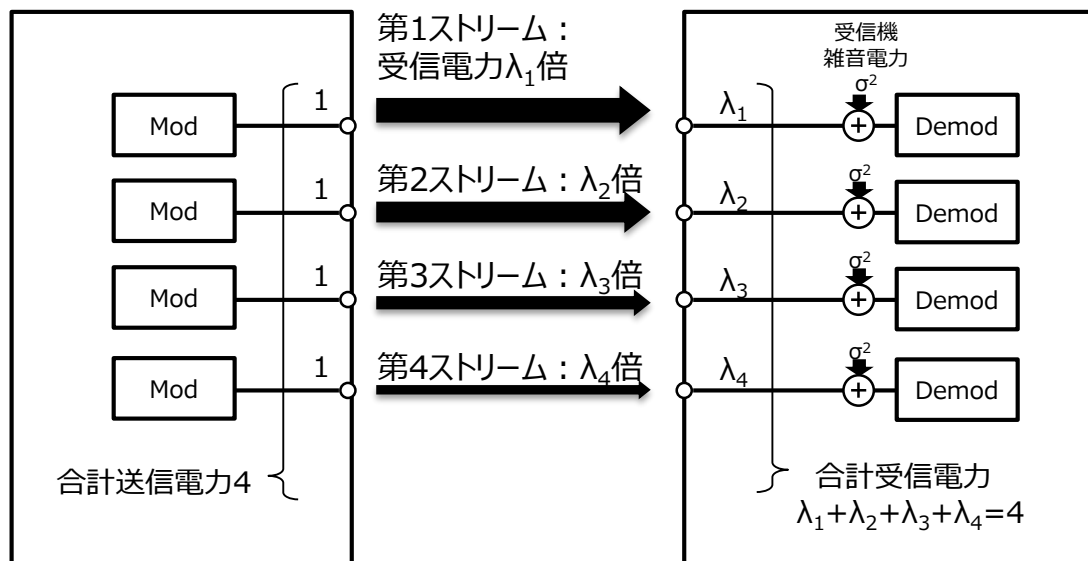
ビット・電力配分後の所要C/N [dB]



所要C/N=10.19 dB (10ビット@等固有値モデル)

i.i.d. 固有値モデルにおける所要C/Nの算出

- 最大4つのストリームを用いてビット・電力配分を行ったときの所要C/Nを全パターン算出する。
- 送信電力、受信電力、雑音電力を下図のように規定する。
 - 電力配分を行わないときの各ストリームの送信電力を1とし、合計送信電力は4とする
 - 電力配分を行った後も、合計送信電力は4で変わらないものとする（拘束条件）



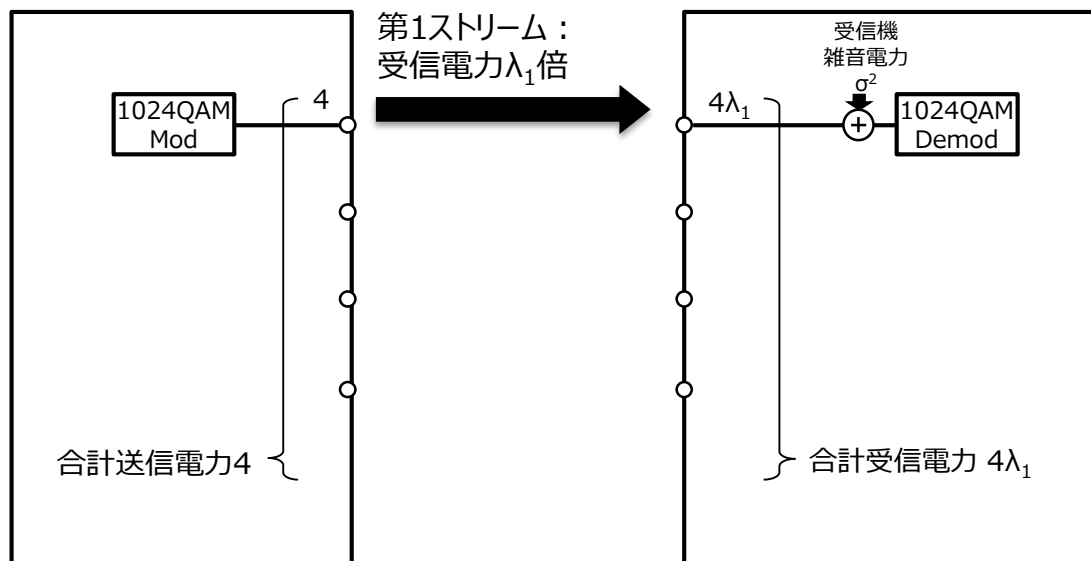
- 第1ストリームのC/Nは λ_1/σ^2 となり、等固有値モデルの $C/N=1/\sigma^2$ に比べて λ_1 倍となる。
- ⇒ 第1ストリームを通ることによって固有値によるゲイン λ_1 が得られると解釈できる
- 他のストリームも同様。

$$\lambda_1=2.45, \lambda_2=1.08, \lambda_3=0.41, \lambda_4=0.06$$

$$(3.89\text{dB}) \quad (0.31\text{dB}) \quad (-3.85\text{dB}) \quad (-12.04\text{dB})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4$$

例) ビット配分[10 0 0 0]



$$\lambda_1=2.45, \lambda_2=1.08, \lambda_3=0.41, \lambda_4=0.06$$

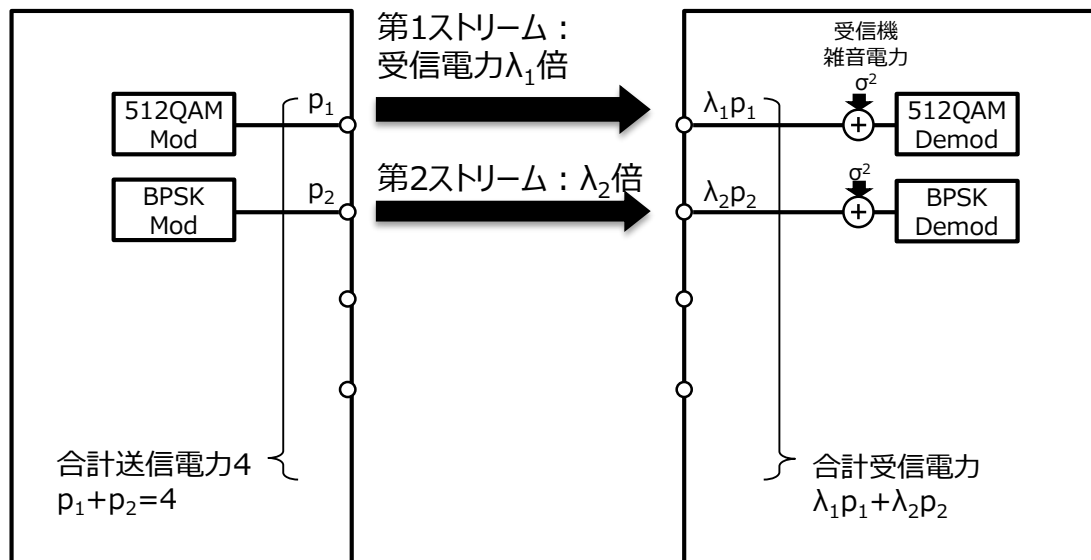
$$(3.89\text{dB}) \quad (0.31\text{dB}) \quad (-3.85\text{dB}) \quad (-12.04\text{dB})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4$$

- 電力配分 : 第1ストリームに全電力を配分
- 電力配分後の受信C/Nは $4\lambda_1/\sigma^2$ となり $4\lambda_1$ 倍アップ
 ⇒ 第1ストリームを通ることによって λ_1 、電力配分によって4倍 (6dB) のゲインが得られる。
- 各ストリームの固有値によるゲインと、電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに減算して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。
- 1024QAMの単体所要C/Nを31.9dBとすると、
 $31.9 - 3.89 - 6.02 = 21.99\text{dB}$

ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	固有値によるゲイン[dB]	固有値によるゲインを考慮した単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	10	1024QAM	31.9	3.89	28.01	4	6.02	21.99
2	-	-	-	0.31	-	-	-	-
3	-	-	-	-3.85	-	-	-	-
4	-	-	-	-12.04	-	-	-	-

例) ビット配分[9 1 0 0]



$$\lambda_1 = 2.45, \lambda_2 = 1.08, \lambda_3 = 0.41, \lambda_4 = 0.06$$

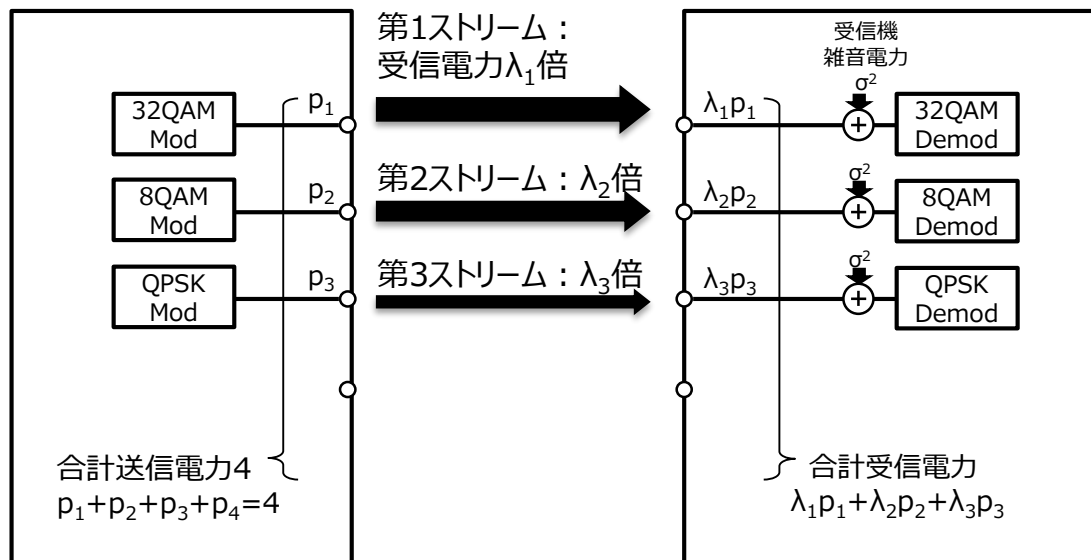
$$(3.89\text{dB}) \quad (0.31\text{dB}) \quad (-3.85\text{dB}) \quad (-12.04\text{dB})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4$$

- 電力配分：各ストリームのBERが等しくなるよう電力配分する。
- 各ストリームの固有値によって得られるゲインを単体所要C/Nに反映させておく。
- 電力配分後のC/Nと、固有値ゲイン反映後の単体所要C/Nまでのマージンが等しくなるよう電力配分する。
- 各ストリームの固有値によるゲインと、電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに反映して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。

ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	固有値によるゲイン[dB]	固有値によるゲインを考慮した単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	9	512QAM	28.4	3.89	24.51	3.96	5.98	18.53
2	1	BPSK	4.6	0.31	4.29	0.04	-14.24	
3	-	-	-	-3.85	-	-	-	-
4	-	-	-	-12.04	-	-	-	-

例) ビット配分[5 3 2 0]



$$\lambda_1=2.45, \lambda_2=1.08, \lambda_3=0.41, \lambda_4=0.06$$

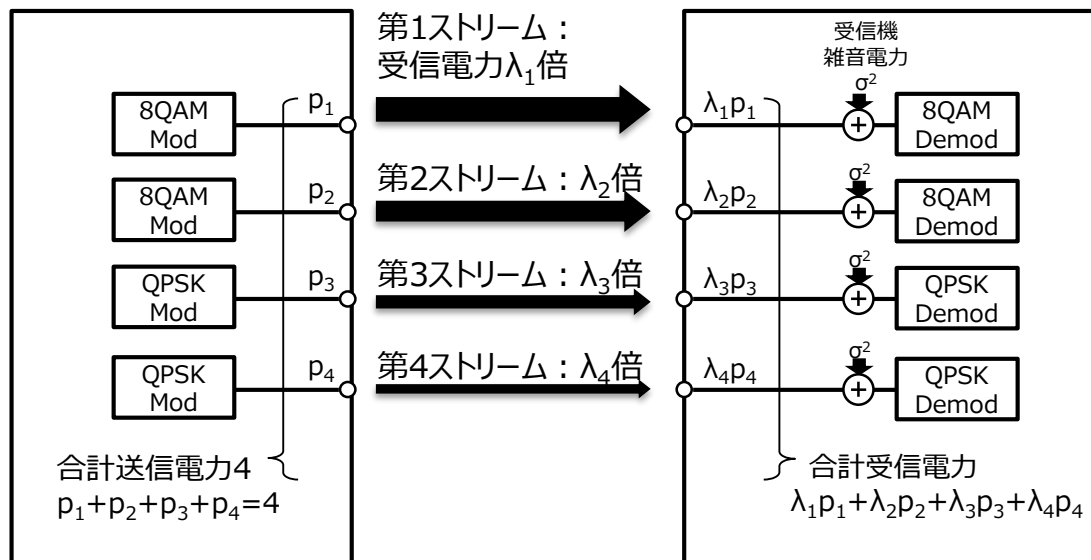
$$(3.89\text{dB}) \quad (0.31\text{dB}) \quad (-3.85\text{dB}) \quad (-12.04\text{dB})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4$$

- 電力配分：各ストリームのBERが等しくなるよう電力配分する。
- 各ストリームの固有値によって得られるゲインを単体所要C/Nに反映させておく。
- 電力配分後のC/Nと、固有値ゲイン反映後の単体所要C/Nまでのマージンが等しくなるよう電力配分する。
- 各ストリームの固有値によるゲインと、電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに反映して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。

ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	固有値によるゲイン[dB]	固有値によるゲインを考慮した単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	5	32QAM	17.2	3.89	13.31	1.73	2.39	10.92
2	3	8QAM	11.8	0.31	11.49	1.14	0.56	
3	2	QPSK	7.6	-3.85	11.45	1.13	0.52	
4	-	-	-	-12.04	-	-	-	-

例) ビット配分 [3 3 2 2]



$$\lambda_1=2.45, \lambda_2=1.08, \lambda_3=0.41, \lambda_4=0.06$$

$$(3.89\text{dB}) \quad (0.31\text{dB}) \quad (-3.85\text{dB}) \quad (-12.04\text{dB})$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 4$$

- 電力配分：各ストリームのBERが等しくなるよう電力配分する。
- 各ストリームの固有値によって得られるゲインを単体所要C/Nに反映させておく。
- 電力配分後のC/Nと、固有値ゲイン反映後の単体所要C/Nまでのマージンが等しくなるよう電力配分する。
- 各ストリームの固有値によるゲインと、電力配分によって得られるゲインを、単体所要C/Nに反映して「ビット・電力配分後の所要C/N」とする。

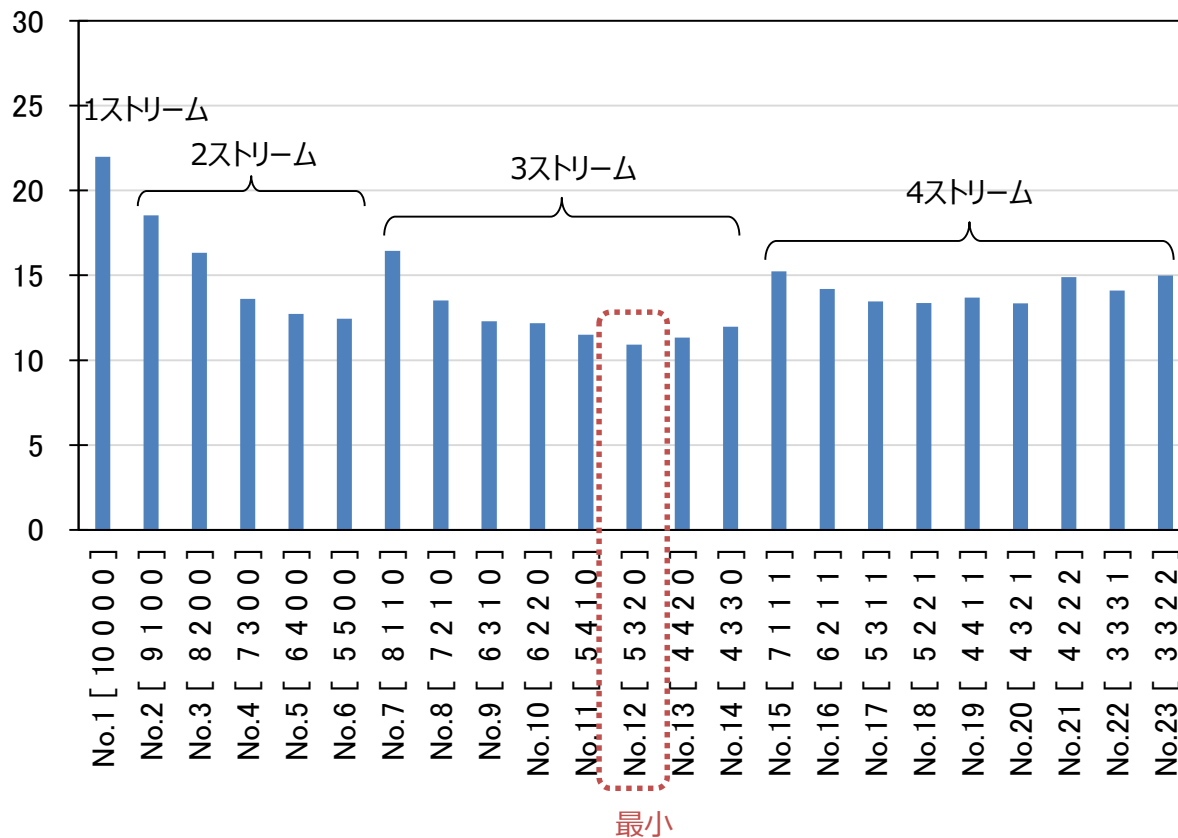
ストリーム	ビット配分	変調方式	単体所要C/N[dB]	固有値によるゲイン[dB]	固有値によるゲインを考慮した単体所要C/N[dB]	電力配分ゲイン[真値]	電力配分ゲイン[dB]	ビット・電力配分後の所要C/N[dB]
1	3	8QAM	11.8	3.89	7.91	0.20	-7.08	14.99
2	3	8QAM	11.8	0.31	11.49	0.45	-3.51	
3	2	QPSK	7.6	-3.85	11.45	0.44	-3.55	
4	2	QPSK	7.6	-12.04	19.64	2.92	4.65	

i.i.d. 固有値モデルにおける合計10bit変調の所要C/Nの結果

パターンNo	ストリーム数	ビット配分	ビット・電力配分後の 所要C/N[dB]
1	1	[10 0 0 0]	21.99
2	2	[9 1 0 0]	18.53
3	2	[8 2 0 0]	16.33
4	2	[7 3 0 0]	13.61
5	2	[6 4 0 0]	12.73
6	2	[5 5 0 0]	12.45
7	3	[8 1 1 0]	16.43
8	3	[7 2 1 0]	13.53
9	3	[6 3 1 0]	12.30
10	3	[6 2 2 0]	12.19
11	3	[5 4 1 0]	11.50
12	3	[5 3 2 0]	10.92
13	3	[4 4 2 0]	11.33
14	3	[4 3 3 0]	11.98
15	4	[7 1 1 1]	15.24
16	4	[6 2 1 1]	14.21
17	4	[5 3 1 1]	13.46
18	4	[5 2 2 1]	13.37
19	4	[4 4 1 1]	13.69
20	4	[4 3 2 1]	13.35
21	4	[4 2 2 2]	14.90
22	4	[3 3 3 1]	14.11
23	4	[3 3 2 2]	14.99

最小値	10.92
最小パターン No.	No.12 [5 3 2 0]

ビット・電力配分後の所要C/N [dB]



所要C/N=10.92 dB (10ビット@i.i.d.固有値モデル)

[参考] 電力配分の比と単体所要C/Nの比(真値)の関係

基本モデルである1対1接続（等固有値モデル）における各ストリームのC/Nを基本C/Nとし、 γ と置く。
 2ストリーム伝送のビット配分[9 1 0 0]を例に考える。
 9bit(512QAM)の単体所要C/Nを28.4dB、1bit(BPSK)の単体所要C/Nを4.6dBとする。
 また、第1ストリームに割り当てる電力配分を p_1 、第2ストリームの電力配分を p_2 とすると、 $p_1 + p_2 = 4$ である。
 第1ストリームにおいて、電力配分後のC/Nと、単体所要C/Nとの差であるマージン M_1 は次式となる。

$$\underbrace{\gamma + 10 \log \frac{p_1}{1}}_{\substack{\text{電力配分によるゲイン} \\ \text{電力配分後のC/N}}} - 28.4 = M_1$$

同様に第2ストリームにおけるマージン M_2 は次式となる。

$$\gamma + 10 \log \frac{p_2}{1} - 4.6 = M_2$$

各ストリームのマージンを等しくするよう電力配分するので、 $M_1 = M_2$ であることから次式を得る。

$$\begin{aligned} \gamma + 10 \log p_1 - 28.4 &= \gamma + 10 \log p_2 - 4.6 \\ 10 \log p_1 - 10 \log p_2 &= 28.4 - 4.6 \\ 10 \log \frac{p_1}{p_2} &= 28.4 - 4.6 \\ \frac{p_1}{p_2} &= 10^{\frac{28.4-4.6}{10}} = \frac{10^{\frac{28.4}{10}}}{10^{\frac{4.6}{10}}} \end{aligned}$$

$\left. \begin{array}{l} \text{512QAMの所要C/N(真値)} \\ \text{BPSKの所要C/N(真値)} \end{array} \right\}$

よって、電力配分の比は単体所要C/Nの比(真値) に等しい。2ストリーム以上の場合も同様に導出可能。