

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏名	山田 大開	学籍番号	1631155
論文題目	WBANに適した誤り訂正符号の考察		
要旨			
<p>近年,WBAN(Wireless Body Area Network)と呼ばれる主に医療関係やヘルスケアに向けた人体近傍の無線通信システムが注目されている. WBAN用のデバイスは人体の装着を想定しているため, 必然的に小さいものになり, バッテリーもその分小さいものを使用しなければならない. しかしながら健康に関する情報は正確に伝達されなければならない, どれだけバッテリーの消費を抑えて, 高精度の伝達を行えるかが大切になってくる.</p> <p>そこで本研究では, WBANに適した誤り訂正符号を考えることで, 省電力で高性能な通信を実現することを目指す.</p> <p>WBANの通信方式としてはIEEE802.15.6という規格が用いられている. その中では通信誤りを訂正するためにBCH符号が採用されているが, その訂正能力に関しては十分に検討し尽くされていない.</p> <p>本研究では, WBANに適した新たな符号の考察を行った. 今回用いた符号は2重誤り訂正可能な負巡回符号と呼ばれる符号で, 符号長や変調方式を変えての実験を行った. 負巡回符号はE.R.Berlekampによって提案された符号である. 訂正できる誤りは(± 1)であり, 単純化された復号アルゴリズムが知られている. また, 負巡回符号の符号間距離はリー距離を用いて測られ, リー距離の意味で誤りを訂正することができる.</p> <p>まずは関連研究の同符号化率の整数符号と比較して16QAM変調におけるWBANに用いる負巡回符号の有用性を考察した. その後, 8PSK, 16PSK, 16QAM変調方式でBCH符号との比較実験を行った. 8PSKにおいてはSNRが小さいところでは負巡回符号の訂正能力が勝っていたが, BERが大きくなると利得差が2dBと広がり, 誤り訂正能力で上回ることができなかった. しかしながら16PSKにおいては約1dBの利得が得られ, 16QAMにおいては約0.2dBの利得を得ることができた.</p> <p>また, 歩行時の動作を想定した電波伝搬解析を行った関連研究を参考に, 誤り訂正符号の考察を行った. 変調方式は利得差が大きかった16QAMを用いて誤り率の変動を見ると, 負巡回符号が高精度な通信の観点から, WBANに適しているのではないかと考えられる.</p> <p>また, 歩行・走行の動作およびアンテナの形状を考慮し電波伝搬解析を行った関連研究を参考に変動を確認するとWBANに負巡回符号を適用するのが効果的であると考えられた.</p>			

平成 29 年度 修士論文

WBAN に適した
誤り訂正符号の考察

電気通信大学大学院 情報理工学研究科
情報・ネットワーク工学専攻
電子情報学プログラム

学籍番号 : 1631155

山田 大開

指導教員

森田 啓義 教授

笠井 裕之 准教授

平成 30 年 1 月 29 日

目次

第1章	序論	3
1.1	研究背景と目的	3
1.2	Wireless Body Area Network	3
1.3	研究の成果	4
1.4	本論文の構成	4
第2章	デジタル通信の概念	6
2.1	デジタル通信システム	6
2.2	デジタル変調	7
2.3	白色ガウス雑音 (AWGN) 通信路	11
第3章	誤り訂正符号	12
3.1	線形符号	12
3.2	シンドローム復号	13
3.3	符号の誤り訂正能力	14
3.4	グレイ符号化	16
3.5	硬判定復号	17
第4章	負巡回符号	18
4.1	定義	18
4.2	訂正能力	19
4.3	負巡回符号を符号化変調方式に用いる理由	21
第5章	実験結果および考察	23
5.1	関連研究との比較 16QAM	23
5.2	8PSKにおける BCH 符号と負巡回符号の比較	26
5.3	16PSKにおける BCH 符号と負巡回符号の比較	30
5.4	16QAMにおける BCH 符号と負巡回符号の比較	33

第6章	WBANに適した符号の考察	34
6.1	半波長ダイポールアンテナを用いて歩行動作を想定した電 波伝搬モデル	34
6.2	BERの定め方	36
6.3	半波長ダイポールアンテナ・歩行動作を想定した誤り率の変動	37
6.4	パッチアンテナ・歩行動作を想定した誤り率の変動	39
6.5	パッチアンテナ・走行動作を想定した誤り率の変動	40
第7章	まとめと今後の課題	43
7.1	まとめ	43
7.2	今後の課題	44
	謝辞	45
	参考文献	46

第1章 序論

1.1 研究背景と目的

近年，WBAN(Wireless Body Area Network)と呼ばれる主に医療関係やヘルスケアに向けた人体近傍の無線通信システムが注目されている。

WBAN用のデバイスは人体の装着を想定しているため，必然的に小さいものになり，バッテリーもその分小さいものを使用しなければならない。しかしながら健康に関する情報は正確に伝達されなければならない。どれだけバッテリーの消費を抑えて，高精度の伝達を行えるかが大切になってくる。そこで本研究ではWBANに適した誤り訂正符号を考えることで，省電力で高性能な通信を実現することを目標とする。

WBANの通信方式としてはすでにIEEE802.15.6において標準規格[1]が定められている。その中では，誤り訂正符号としてBCH符号[2][3]の使用が奨励されている。しかし，さまざまな変調方式と組み合わせた場合におけるBCH符号の訂正能力に関しては十分に検討し尽くされていない点があることに気づき，本研究を着想した。

1.2 Wireless Body Area Network

WBANは，人体を中心として3m以内の距離で通信を行う，近距離無線通信システムである。WBAN用のデバイスは人体の装着を想定しているため，必然的に小さいものになり，バッテリーもその分小さいものを使用しなければならない。しかしながら健康に関する情報は正確に伝達されなければならない。どれだけバッテリーの消費を抑えて，高精度の伝達を行えるかが大切になってくる。現在高精度な情報伝達を行うために用いられている符号としてBCH符号があげられる。BCH符号の利点として，構成が容易であり，シフト回路を用いたハードウェア化に適していることがあげられる。

しかし、後述するようにBCH符号を各種の変調方式と組み合わせた場合、誤り訂正能力を十分に発揮できない場合が起こりうる。

表1.1にWBAN標準規格のIEEE802.15.6で使用されている誤り訂正符号の表[4]を示す。

Frequency Band	Packet Component	Modulation	Symbol Rate (Kbps)	Code Rate BCH (n,k)	Information Data Rate (Kbps)
402 - 405 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	187.5	(31,19)	57.5
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	187.5	(63,51)	75.9
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	187.5	(63,51)	303.6
420 - 450 MHz	PLCP Header	GMSK	187.5	(31,19)	57.5
	PSDU	GMSK	187.5	(63,51)	75.9
	PSDU	GMSK	187.5	(63,51)	151.8
863 - 870 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	250	(31,19)	76.6
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	250	(63,51)	101.2
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	250	(63,51)	404.8
902 - 928 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	300	(31,19)	91.9
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	300	(63,51)	121.4
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	300	(63,51)	485.7
950 - 956 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	250	(31,19)	76.6
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	250	(63,51)	101.2
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	250	(63,51)	404.8
2360-2400 MHz 2400-2483.5 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	600	(31,19)	91.9
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	600	(63,51)	121.4
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	600	(63,51)	485.7

図 1.1: WBAN に用いられている誤り訂正符号

1.3 研究の成果

本研究では、WBANに適した新たな符号の考察を行った。まず関連研究[5][6]と比較して16QAM変調におけるWBANに用いる負巡回符号の有効性を考察した。また従来WBANに用いられていたBCH符号とPSK変調方式の元で比較を行った。また、腕を振る動作を考慮し、歩行時の伝達係数を評価した関連研究[7]を参考に負巡回符号の性能を評価し、考察した。

1.4 本論文の構成

本論文の構成について述べる。まず2章では、デジタル無線通信の概要に関して述べる。3章では、本研究にとって必要最低限の誤り訂正符号に関する基礎的な知識に関して述べる。4章では、実験に使用する負巡回

符号に関して述べる. 5章では, 関連研究 [5] と比較して負巡回符号の有用性を考察し, 現在の WBAN で推奨されている BCH 符号との比較実験結果を示す. 6章では, 関連研究 [7] を参考に WBAN における負巡回符号の有用性を考察した. 最後に, 7章でまとめと今後の課題について述べる.

第2章 デジタル通信の概念

本章では，デジタル変調の基礎やガウス雑音について簡単に述べる．

2.1 デジタル通信システム

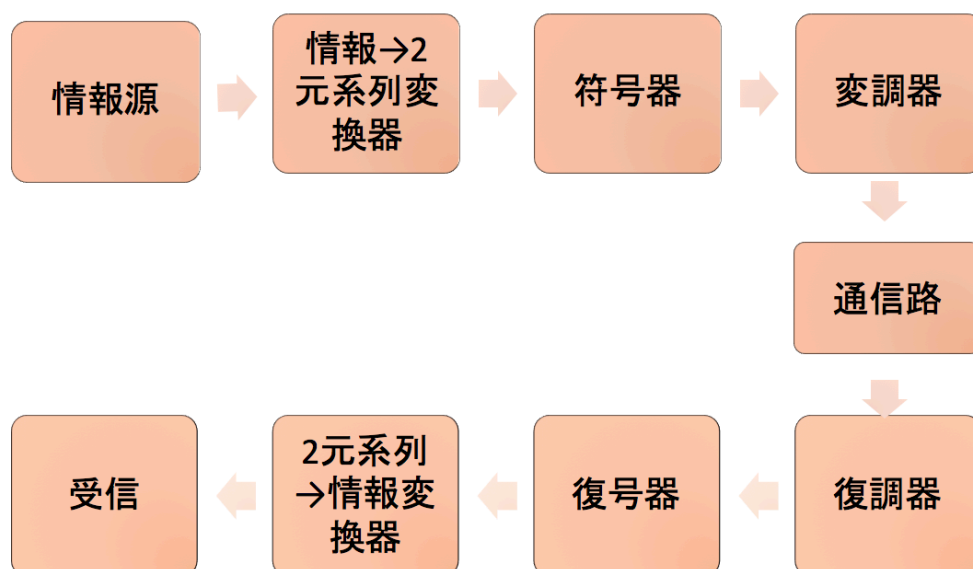


図 2.1: 通信システムモデル

図 2.1 にデジタル通信システムのモデルを示す．

情報源は情報の発生源を示し，アナログ情報及び，デジタル情報を発生する．

次に 2 元系列変換器ではアナログ情報のデジタル情報への変換，デジタル情報の 2 進数への変換などを行う．

符号器では通信路で起こった誤りの検出及び，訂正が可能になるように，符号語に変換する．

変調器では入力されたシンボル系列より情報信号を生成し，情報信号を伝送路に整合した形態に変換する。

変調の仕方は複数存在し，2.2節で詳しく述べる。

通信路では，周波数帯域の制限,雑音などが存在し，変調信号に影響を与える。雑音に関しては2.3節で述べる。

次に復調器では変調信号から情報信号を復元する。

復号器では誤り検出，訂正を行い送信された符号語を予測して出力する。

最後に情報変換器において元の2元情報を復元する。

2.2 デジタル変調

変調とは，情報信号を伝送路に整合した形態に変換し，変調信号を生成することで，変調信号より情報信号を復元することを復調という。また変調信号には大きく分けてアナログ変調と，デジタル変調の2種類が存在し，アナログ変調には振幅変調 (Amplitude Modulation:AM)，周波数変調 (Frequency Modulation:FM)，位相変調 (Phase Modulation:PM) などがある。デジタル変調には，位相偏移変調 (Phase Shift Keying:PSK)，周波数偏移変調 (Frequency Shift Keying:FSK)，直角位相振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation:QAM) などがある。ここでは代表的かつ本研究で対象とする，PSK，QAMについて簡単に説明する。

Phase Shift Keying

位相偏移変調は，情報により搬送波の位相を変化させる変調方式であり，デジタル位相変調とも呼ばれる．符号誤り率や帯域幅の面から優れた変調方式であり，衛星回線や地上デジタル回線，無線LANなどにも用いられている．図2.2に8PSKの信号点配置を示す．

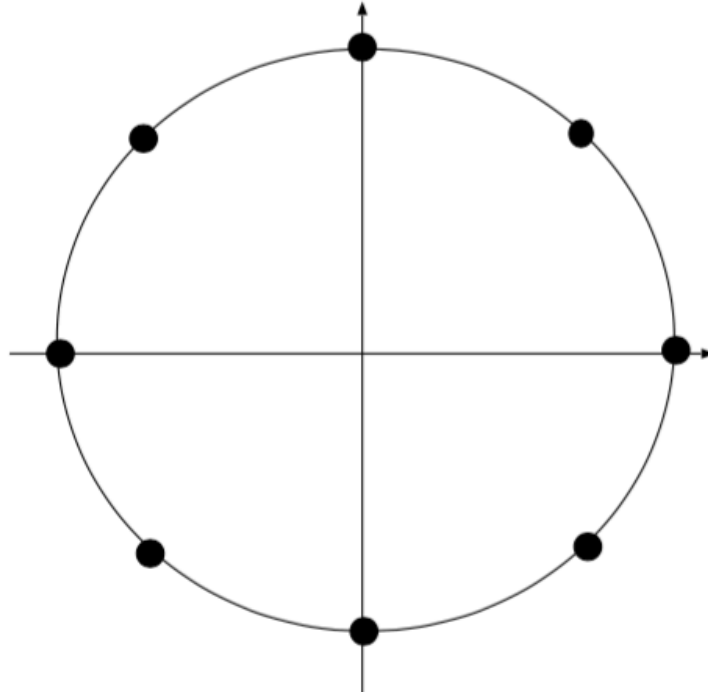


図 2.2: 8PSK の信号点配置

E_b をビットエネルギー， N_0 を雑音の密度， $k = \log_2 M$ とすると， M -PSK のビット誤り確率 $P_{psk}(M)$ は以下の式で与えられる (導出は文献 [8] 参照)．

$$P_{psk}(M) \approx \frac{2Q \left[\sqrt{\frac{2kE_b}{N_0}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right]}{k}, \quad (2.1)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.2)$$

以下に $P(M)$ の一例を図2.3に示す．横軸はSN比 (dB) で，縦軸は $P(M)$ の対数表示を表す．さらに曲線は $M = 2, 4, 8, 16, 32$ に対する (2.1) の近似式であり，丸点は伝達シミュレーションから求めたSN比とシンボル誤りの関係を示す．

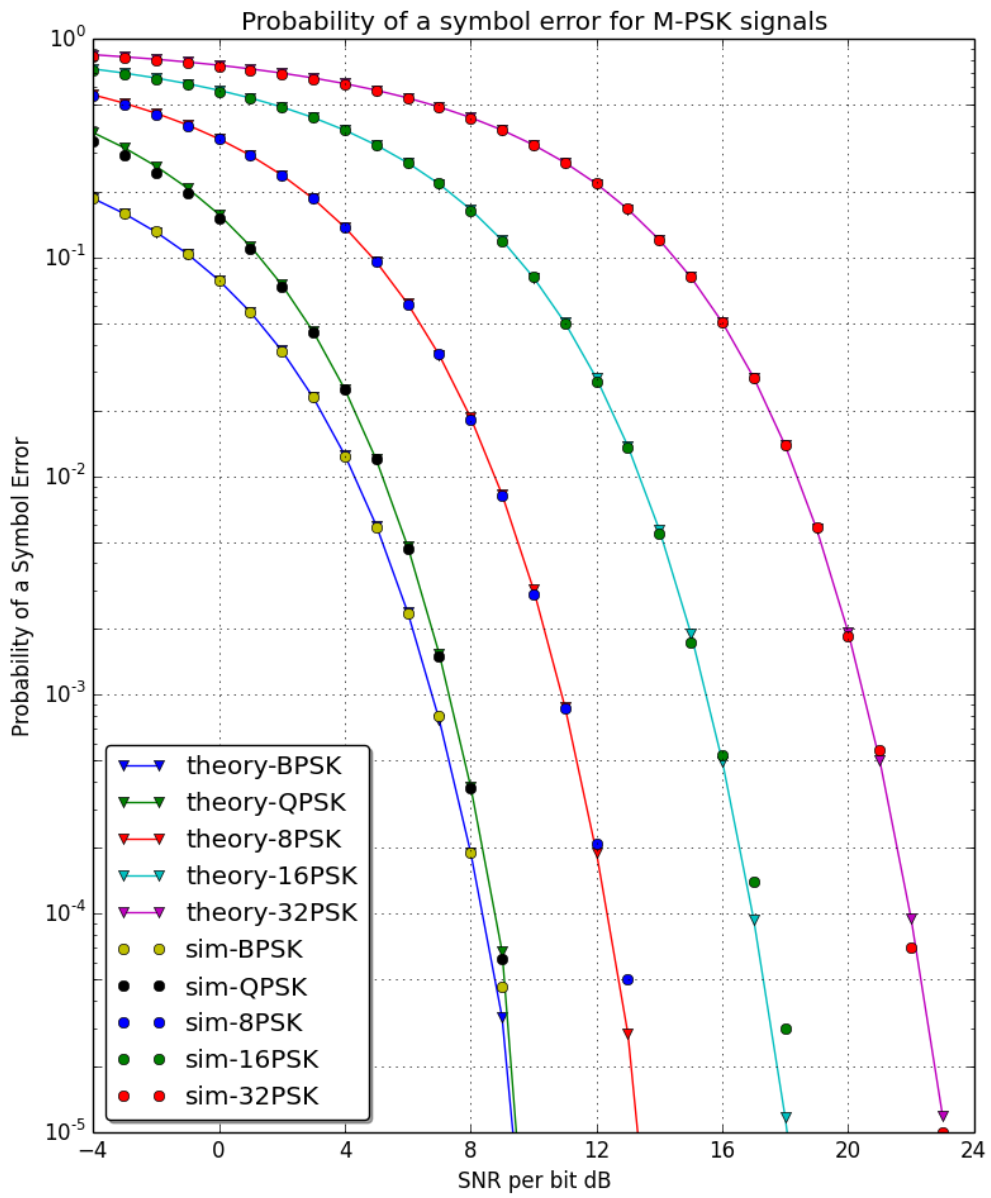


Fig 2.3: Probability of symbol error for M-PSK

Quadrature Amplitude Modulation

直交振幅変調は，同相軸と直交軸の両方にASKを適用した変調方式である．PSKと比較すると変調方式が複雑ではあるものの，伝送効率が優れているために地上デジタル放送や，WiMAXなどの最先端のワイヤレス技術に用いられている．

図2.4に16QAMの信号点配置を示す．

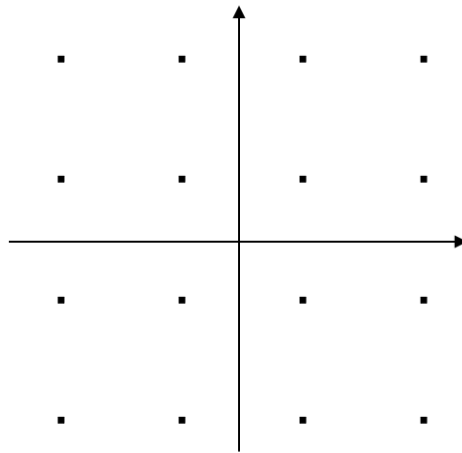


図 2.4: 16QAM の信号点配置

E_b をビットエネルギー， N_0 を雑音の密度， $k = \log_2 M$ とすると， M -QAM のビット誤り確率 $P_{qam}(M)$ は以下の式で与えられる (導出は文献 [8] 参照)．

$$P_{qam}(M) \approx \frac{4Q \left[\sqrt{\frac{3kE_b}{(M-1)N_0}} \right]}{k}. \quad (2.3)$$

2.3 白色ガウス雑音 (AWGN) 通信路

通信システムに加わる雑音の代表例として白色ガウス雑音 (AWGN) と呼ばれる雑音がある. 図 2.5 に AWGN 通信路モデルを示す. 送信機から送信される信号 $s(t)$ は, 受信機で雑音 $n(t)$ が加わった $r(t) = s(t) + n(t)$ として受信される.

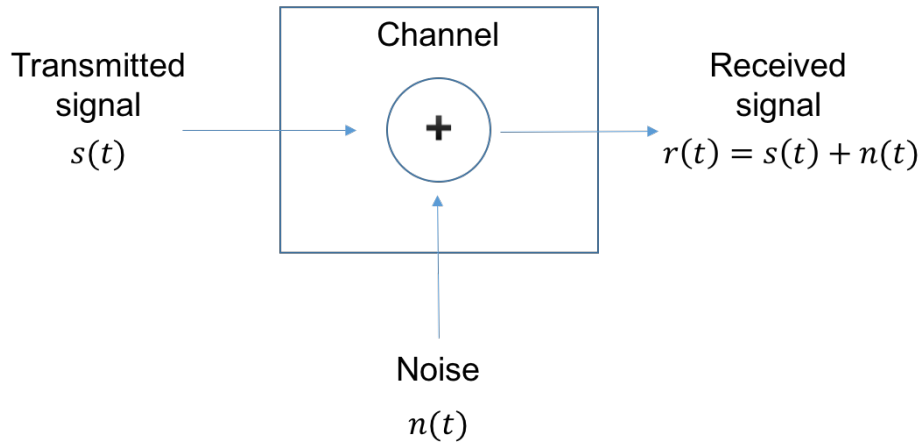


図 2.5: AWGN 通信路

白色ガウス雑音は平均が 0 で分散が σ^2 の定常独立ガウス確率過程 $X(t)$ ($-\infty < t < \infty$) であり, 各 $X(t)$ の確率密度関数は次式で与えられる.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

図 2.6 に 16QAM の信号点にノイズが加わった時の振る舞いを示す.

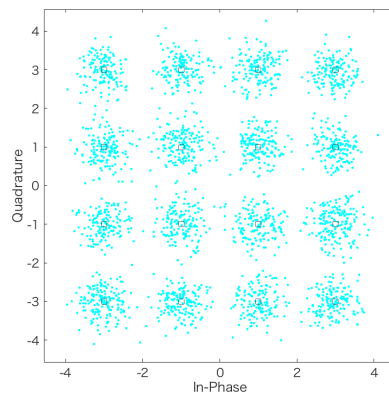


図 2.6: 16QAM における信号点の配置及びノイズの振る舞い

第3章 誤り訂正符号

本章では，本研究にとって必要となる誤り訂正符号の基礎的な知識，実験前の必要知識に関して述べる．

3.1 線形符号

ある素数 q を位数とする有限体 \mathbb{F}_q の n 次元線形空間内 \mathbb{F}_q^n の部分集合を \mathcal{C} とおき， \mathcal{C} を符号と呼ぶ．また， \mathcal{C} の要素 \mathbf{r} を符号語といい， n を符号語の符号長と呼ぶ．符号 \mathcal{C} が \mathbb{F}_q^n の線形部分空間であるとき， \mathcal{C} を \mathbb{F}_q^n の線形符号という．以下では説明の簡単化のため， $q=2$ の場合，すなわち2元線形符号について説明する．

線形符号 \mathcal{C} の次元を k とする．このとき， \mathbb{F}_2^n における k 個の1次独立なベクトルの組 $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k)$ つまり，基底を一つ定めると，それらの線形結合

$$a_1\mathbf{v}_1 + a_2\mathbf{v}_2 + \dots + a_k\mathbf{v}_k \quad (a_i \in \mathbb{F}_2, i = 1, 2, \dots, k) \quad (3.1)$$

の全体が2元線形符号に他ならない．すなわち

$$\mathcal{C} = \{\mathbf{w} \in \mathbb{F}_2^n : a_i \in \mathbb{F}_2 \text{ for } i \in [1, k], \mathbf{w} = a_1\mathbf{v}_1 + a_2\mathbf{v}_2 + \dots + a_k\mathbf{v}_k\}. \quad (3.2)$$

また \mathcal{C} の次元 k を符号長 n で割った値 $R = k/n$ を符号化率という．

ここで， k は情報2元系列の長さであり，メッセージ長と呼ばれる．また，線形符号 \mathcal{C} の符号長 n と次元 k を明示して， (n, k) 線形符号 \mathcal{C} と表す場合もある．

次元が k である線形符号 \mathcal{C} の一つの基底を $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k)$ ($\mathbf{v}_i \in \mathbb{F}_2^n$)とおく．また，これらのベクトルを行とする $k \times n$ 行列を \mathbf{G} とする．

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_k \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

行列 \mathbf{G} を符号 \mathcal{C} の生成行列といい、 \mathcal{C} の一つの符号語 \mathbf{r} はメッセージベクトル $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_k) \in \mathbb{F}_2^k$ を用いて、 $\mathbf{r} = \mathbf{m}\mathbf{G}$ と表される。

また、2元線形符号 \mathcal{C} の生成行列 \mathbf{G} が与えられたとき、 $\mathbf{G}\mathbf{H}^t = \mathbf{0}$ となる2元 $k \times n$ 行列 \mathbf{H} が考えられる。 $(\mathbf{H}^t$ は \mathbf{H} の転置) つまり、2元線形符号 \mathcal{C} は行列 \mathbf{H} を用いて以下のようにも定義できる。

$$\mathcal{C} = \{\mathbf{r} \in \mathbb{F}_2^n : \mathbf{r}\mathbf{H}^t = \mathbf{0}\} \quad (3.4)$$

この行列 \mathbf{H} を \mathcal{C} の(パリティ)検査行列という。

符号長が n である符号 \mathcal{C} のある符号語 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が2元対称通信路に送信され、受信器において受信語 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ が受信されたとする。このとき、通信路により生じた誤りを $\mathbf{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ とすると、受信語は

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (3.5)$$

と表せる。受信語 \mathbf{y} に検査行列 \mathbf{H} を乗じて得られる長さ m のベクトル \mathbf{s} 、つまり

$$\mathbf{s} = \mathbf{y}\mathbf{H}^t \quad (3.6)$$

をシンδροームと呼ぶ。このシンδροームを計算することで、誤りベクトル \mathbf{e} を推定する手がかりとなる。

3.2 シンδροーム復号

まずシンδροーム復号に必要なコセットに関して説明する。 (n, k) 2元線形符号 $\mathcal{C} = \{\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_{2^k}\}$ が与えられているものとする。任意の $\mathbf{u} \in \mathbb{F}_2^n$ に対し、 \mathcal{C} のコセット $\mathcal{C}[\mathbf{u}]$ を以下の式で定義する。

$$\mathcal{C}[\mathbf{u}] = \{\mathbf{w} \in \mathbb{F}_2^n : \mathbf{c} \in \mathcal{C}, \mathbf{w} = \mathbf{c} + \mathbf{u}\} = \{\mathbf{c}_1 + \mathbf{u}, \mathbf{c}_2 + \mathbf{u}, \dots, \mathbf{c}_{2^k} + \mathbf{u}\} \quad (3.7)$$

すなわち、 \mathcal{C} の各符号語にある(固定された)ベクトル \mathbf{u} を加算して得られるベクトルの集合がコセットとなる。コセットが与えられたとき、それに含まれるベクトルは、すべて同じシンδροームを持つ。つまりシンδροームとコセットは一対一対応をする。一つのコセットの中には、 2^k 個のベクトルが含まれる。よって、コセットは $2^n/2^k = 2^{n-k}$ 個ある。その中からどのベクトルを誤りベクトル \mathbf{e} の推定値とするのが妥当かを考える。

今, 2^{n-k} 個のコセットを $U_1, U_2, \dots, U_{2^{n-k}}$ とする. それぞれのコセットで最も生起確率の高い誤りベクトルを t_i とする. つまり, $P(\mathbf{u})$ を誤りベクトル \mathbf{u} の生起確率とすると,

$$t_i = \arg \max \{P(\mathbf{u}), \mathbf{u} \in U_i\} \quad i \in [1, 2^m]. \quad (3.8)$$

となる. このベクトル t_i をコセットリーダーと呼ぶ.

このようにして得られたシンδροームとコセットリーダーを対応させた表を参照することでシンδροーム復号を実現することができる.

以下では, 送信符号語を \mathbf{x} , 受信語を $\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{e}$ において, シンδροーム復号の手順を示す.

Step 1. シンδροーム \mathbf{s} を $\mathbf{s} = \mathbf{y}H^t$ で求める.

Step 2. シンδροーム表より \mathbf{s} に対応するコセットリーダー \mathbf{t} を選ぶ.

Step 3. 推定符号語 $\hat{\mathbf{x}}$ を $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{y} - \mathbf{t}$ として求める.

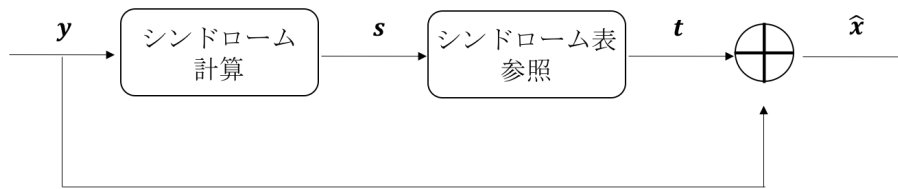


図 3.1: シンδροーム復号の流れ

3.3 符号の誤り訂正能力

まずハミング距離に関して説明する.

\mathbb{F}_2^n 上の長さ n の系列

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \in \mathbb{F}_2^n \quad (3.9)$$

$$\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in \mathbb{F}_2^n \quad (3.10)$$

の間のハミング距離 $d_h(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ を以下の式で定義する.

$$d_h(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = |\{i \in [1, n] : a_i \neq b_i\}| \quad (3.11)$$

このとき、 \mathbf{a} における、非ゼロ元の個数を表すハミング重み $w_h(\mathbf{a})$ は

$$w_h(\mathbf{a}) = d_h(\mathbf{a}, \mathbf{0}) \quad (3.12)$$

と表すことができる。

また、符号の最小距離 d_{min} とは、相異なる二つの符号語のハミング距離の最小値である。したがって、最小距離はすべての符号語の対を比較することで求められる。しかしながら (n, k) 線形符号において最小距離 d_{min} は、非ゼロの符号語の最小重み w_{min} に等しいことが知られている。

またこの事実より以下の定理が成り立つ。

定理 (n, k) 線形符号が t 個の誤りを訂正するための必要十分条件は、
 $t < d_{min}/2$ である。

3.4 グレイ符号化

本実験においては信号点の割り当てにグレイ符号を用いた。

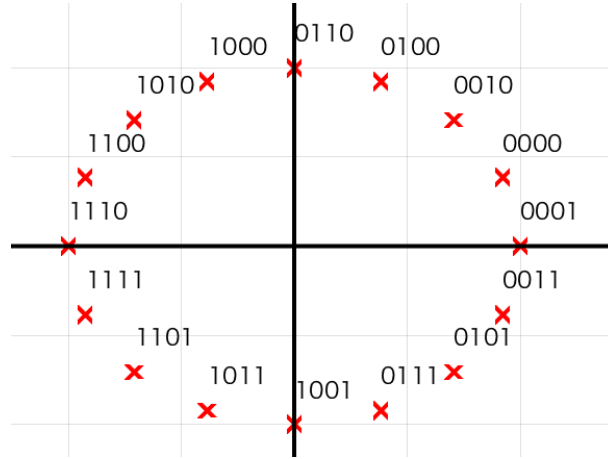


図 3.2: グレイ符号化 16PSK のビット割り当て

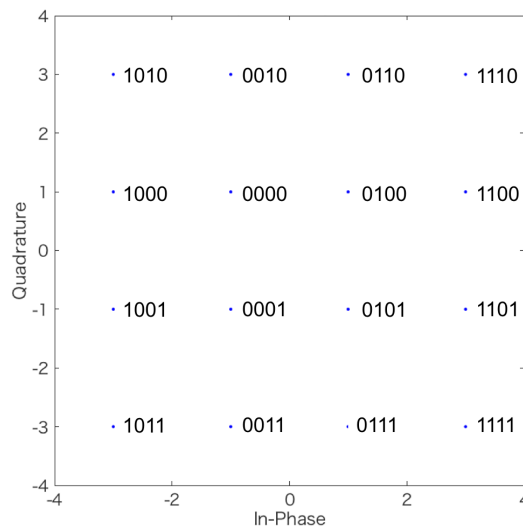


図 3.3: グレイ符号化 16QAM のビット割り当て

グレイ符号は隣接した符号のハミング距離が常に1になる特徴がある。AWGN 通信路においては、受信器の出力では実際に送信した信号点との座標上におけるユークリッド距離に依存するため、送信した座標点から近い位置で受信点が判定される可能性が大きい。そのため、グレイ符号化を用いることで、より低いビット誤り率を得ることができる。

3.5 硬判定復号

検出器より推定された信号点は，硬判定復号器により，その信号点に最も近い円周上の点出力される．この出力された値を用いて復号を行う手順を硬判定復号という．硬判定復号では，円周上の信号点にもとづき判定領域を設定する．判定領域内に信号点が観測された場合，その判定領域に対応する円周上の点出力する．例として，8PSKにおける硬判定領域を図3.4に示す．

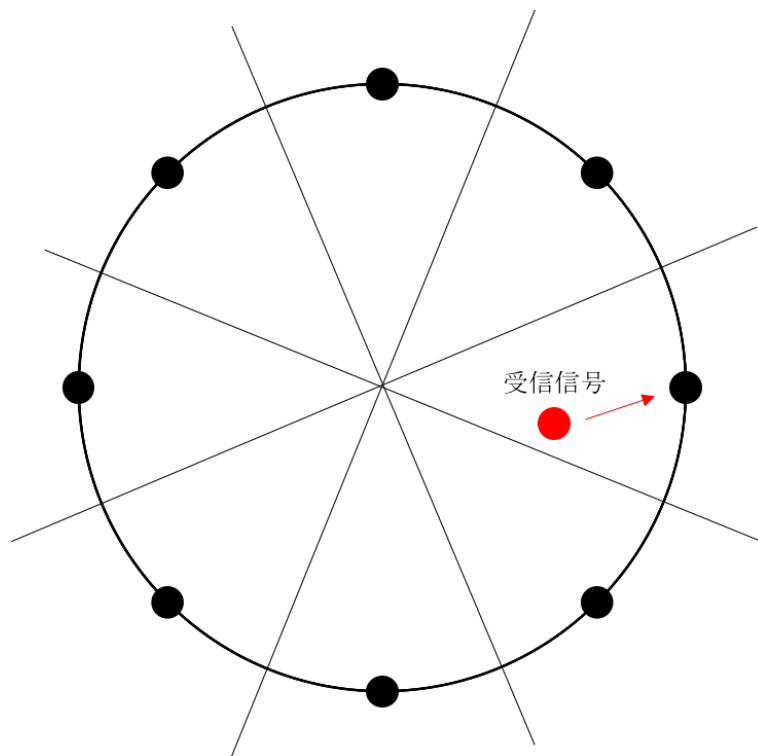


図 3.4: 8PSK における硬判定領域

第4章 負巡回符号

4.1 定義

負巡回符号 [9] は E.R.Berlekamp によって提案された符号である. 訂正できる誤りは (± 1) であり, 一般に $t(t \geq 1)$ 訂正可能な符号の構成法が与えられており, 簡単化された復号アルゴリズム [10] が知られている.

また, 負巡回符号の符号間距離はリー距離を用いて測られ, $t \geq 2$ の場合は, リー距離の意味で t までの誤りを訂正することができる.

リー距離は $\mathbb{F}_q(q \geq 2)$ 上の長さ n のベクトルを $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ とすると, 以下の式で定義される.

$$\sum_{i=1}^n \min(|x_i - y_i|, q - |x_i - y_i|). \quad (4.1)$$

(素数: q , 符号語長: n , 元の情報データの長さ: k , 最小リー距離: d_{Lee}) とすると, \mathbb{F}_q 上で定義される負巡回符号の生成多項式と最小リー距離は以下の式で表される.

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^3)(x - \alpha^5) \dots (x - \alpha^{2t-1}) \quad (4.2)$$

$$d_{Lee} = 2t + 1, \quad 2t - 1 < q \quad (4.3)$$

ここで α は原始元である. また符号多項式を $c(x)$, 誤り多項式を $e(x)$ とすると受信多項式 $r(x)$ との関係は以下の式になる.

$$r(x) = c(x) + e(x) \quad (4.4)$$

シンδροーム多項式 $S(z)$ は通常

$$S(z) = S_1 z + S_2 z^2 + S_3 z^3 \dots, \quad S_j = r(x)|_{x=\alpha^j} \quad (4.5)$$

を用いるが, 負巡回符号の復号では, シンδροーム多項式は, 指数部が奇数の z のべき乗のみからなる.

$$\tilde{S}(z) \pmod{z^{2t+1}} = S_1 z + S_3 z^3 + \dots S_{2t-1} z^{2t-1} \quad (4.6)$$

また (± 1) のみの誤りを考慮している符号であるため、通常誤り位置のみを求める多項式である

$$\sigma(z) = \prod (1 - \alpha^j z) \quad (4.7)$$

で誤り値と誤り位置の両方を導出することができる。

誤り値が1の場合、誤り位置 l は $\sigma(z)$ の根 α^{-l} として求められ、誤り値が -1 の場合、誤り位置 l は

$$\alpha^{-(n+l)} = -\alpha^{-l}, \quad 0 \leq l \leq n-1 \quad (4.8)$$

を求めることで誤り値を計算することなく誤りの訂正が可能である。

4.2 訂正能力

負巡回符号は4.1節で述べたように (± 1) の t 重誤り訂正可能な符号である。このときの t は最小リー距離 d_{Lee} を用いて以下の式で表される。

$$t = \frac{d_{Lee} - 1}{2} \quad (4.9)$$

例えば符号長 $n=3$ の負巡回符号を考えたとき、 $t=2,3$ のときの訂正可能なエラーベクトル値、および位置は次項の表4.1, 4.2で示す。

表 4.2: $t = 3$ のとき訂正可能なエラーベクトル

(1,0,0)	(-1,0,2)
(0,1,0)	(0,-1,2)
(0,0,1)	(2,-1,0)
(-1,0,0)	(0,2,-1)
(0,-1,0)	(1,-2,0)
(0,0,-1)	(1,0,-2)
(2,0,0)	(0,1,-2)
(0,2,0)	(-2,1,0)
(0,0,2)	(-2,0,1)
(-2,0,0)	(0,-2,1)
(0,-2,0)	(-1,-2,0)
(0,0,-2)	(-1,0,-2)
(1,1,0)	(0,-1,-2)
(1,0,1)	(-2,-1,0)
(0,1,1)	(-2,0,-1)
(-1,-1,0)	(0,-2,-1)
(-1,0,-1)	(2,0,-1)
(0,-1,-1)	(1,1,1)
(1,-1,0)	(-1,1,1)
(1,0,-1)	(1,-1,1)
(0,1,-1)	(1,1,-1)
(-1,1,0)	(-1,-1,1)
(-1,0,1)	(-1,1,-1)
(0,-1,1)	(1,-1,-1)
(1,2,0)	(-1,-1,-1)
(1,0,2)	(3,0,0)
(0,1,2)	(0,3,0)
(2,1,0)	(0,0,3)
(2,0,1)	(-3,0,0)
(0,2,1)	(0,-3,0)
(-1,2,0)	(0,0,-3)

表 4.1: $t = 2$ のとき訂正可能なエラーベクトル

(1,0,0)
(0,1,0)
(0,0,1)
(-1,0,0)
(0,-1,0)
(0,0,-1)
(2,0,0)
(0,2,0)
(0,0,2)
(-2,0,0)
(0,-2,0)
(0,0,-2)
(1,1,0)
(1,0,1)
(0,1,1)
(-1,-1,0)
(-1,0,-1)
(0,-1,-1)
(1,-1,0)
(1,0,-1)
(0,1,-1)
(-1,1,0)
(-1,0,1)
(0,-1,1)

4.3 負巡回符号を符号化変調方式に用いる理由

8PSKや16QAMなどの多値変調方式では，とくに高SN比な通信環境において受信した信号点は送信した信号点の近傍に分布する傾向にある(図4.1). この場合，誤って復調されるシンボルも送信シンボルの最近傍であることが多く，必ずしもランダム誤り訂正を想定したBCH符号が有効に働くとは限らない.

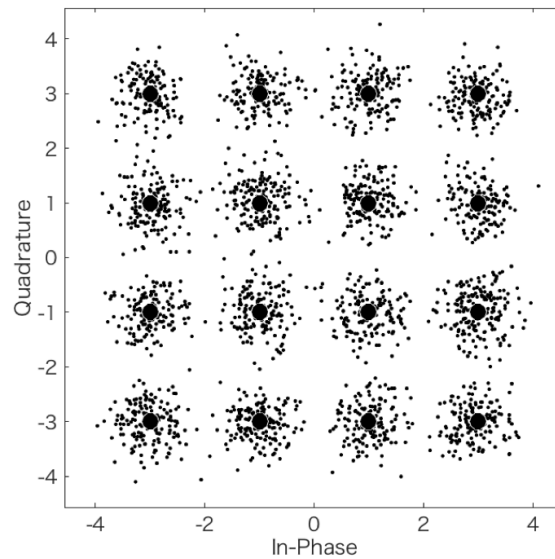


図 4.1: 16QAM変調方式における受信信号点分布

\mathbb{F}_{2^m} 上で定義された2元BCH符号の符号長は

$$n = 2^m - 1 \quad (4.10)$$

で与えられ， t 重ビット誤りを訂正するのに必要な検査ビット数は高々 mt である.

一方， \mathbb{F}_q (q : 奇素数)上の負巡回符号の符号長は

$$n = (q - 1)/2 \quad (4.11)$$

で与えられ， t 重(± 1)誤りを訂正するのに必要な検査シンボル数は t である.

よってBCH符号と負巡回符号の符号化率はそれぞれ

$$\frac{2^m - 1 - mt}{2^m - 1}, \quad \frac{q - 1 - 2t}{q - 1} \quad (4.12)$$

と評価される。ここで $2^m \sim q$ の場合は、 $m > 2$ ならば符号化率の点で負巡回符号はBCH符号より優れている可能性が高い。

したがって、最近傍シンボル誤りに対しては、 (± 1) の値しか訂正できない負巡回符号の方が、符号化率の点で、有利に働くことが期待される。

以下の章では、符号長や変調方式を変えた計算機実験を行い、両符号の誤り特性について詳しく調べることにする。

第5章 実験結果および考察

5.1 関連研究との比較16QAM

下図は関連研究 [5] における 16QAM での整数符号のシンボル誤り確率である。本研究ではまず、比較実験として同じ変調方式、符号化率を用いている関連研究 [5] との比較を行った。

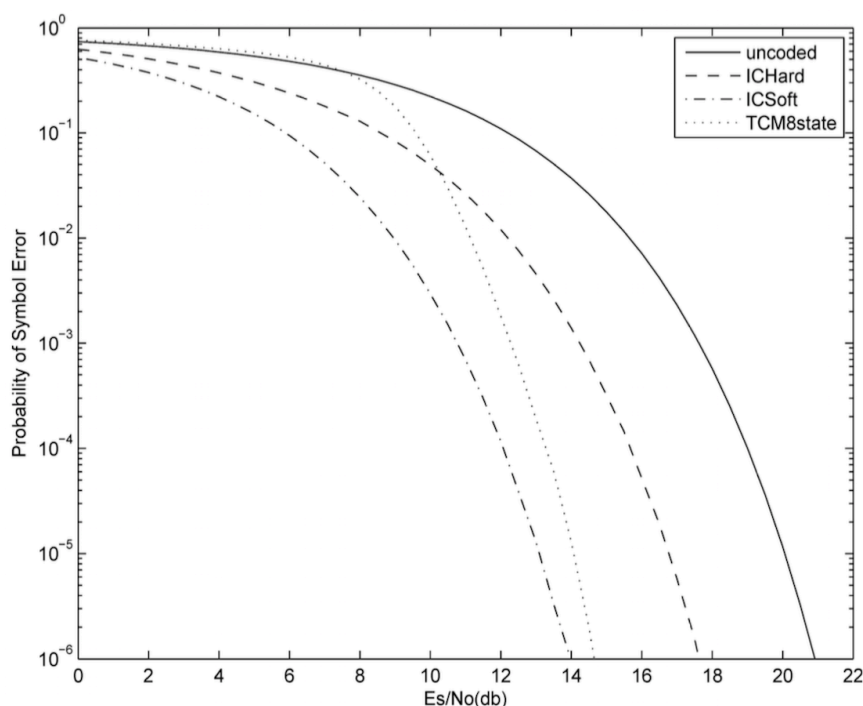


図 5.1: 関連研究 [5] における 16QAM での単一誤り訂正可能な整数符号化 16QAM の硬判定、軟判定及びトレリス符号化変調のシンボル誤り確率

用いる整数符号は \mathbb{F}_{17} 上で定義された符号長 2 の整数符号を振幅軸方向と位相軸方向それぞれに、 $(\pm 1, \pm 3, \pm 4, \pm 5)$ の単一誤りを訂正することができる [5]. 16QAM 変調においては Square 型と呼ばれ、縦横斜め方向に一つ誤り訂正が可能になる [6]. パリティ検査行列 $H = (1, 2)$ であり符号化率は $1/2$ である。

今回の実験では図2において最も結果の良い軟判定でのシミュレーション結果との比較を行った。用いた符号は \mathbb{F}_{17} 上で定義された符号長4の負巡回符号であり、 (± 1) の2重誤り訂正が可能である。パリティ検査行列は以下の式で表される。

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 9 & 10 \\ 1 & 10 & 15 & 14 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

符号化率は $1/2$ 、シンボル数は10万でシミュレーションを行った。図5.2に比較結果、表5.3にシンドローム表を示す。

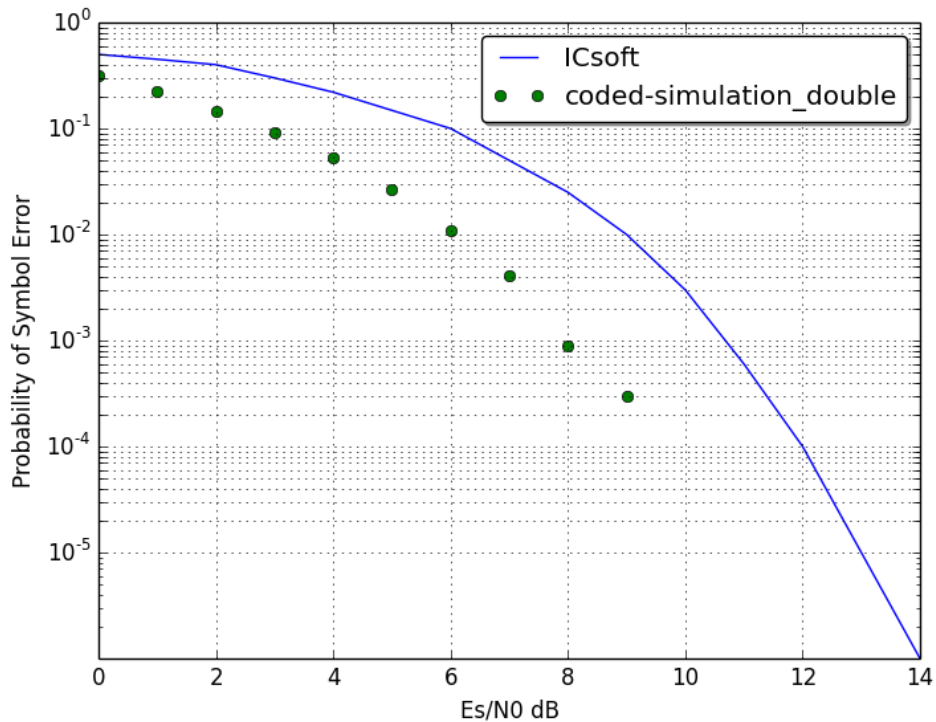


図 5.2: 図 5.1 の ICSoft と比較した負巡回符号のシンボル誤り確率

図5.2を見ると関連研究[5]の同じ符号化率の整数符号と比較して、負巡回符号は整数符号に比べシミュレーション実験したSN比の範囲において、およそ3dBの符号化利得があることがわかる。

また、横軸である1シンボルあたりの信号対雑音比(E_s/N_0 , SNR)が大きくなるほどに、シンボル誤り率の差が大きくなっていることがわかる。

表 5.1: エラーベクトルとシンδροーム値の対応-16QAM

エラーベクトル	(S_1, S_2)	エラーベクトル	(S_1, S_2)
(1, 0, 0, 0)	(1, 1)	(0, 1, 0, 1)	(13, 7)
(0, 1, 0, 0)	(3, 10)	(0, 0, 1, 1)	(2, 12)
(0, 0, 1, 0)	(9, 15)	(-1, -1, 0, 0)	(13, 16)
(0, 0, 0, 1)	(10, 14)	(-1, 0, -1, 0)	(7, 1)
(-1, 0, 0, 0)	(16, 16)	(-1, 0, 0, -1)	(6, 2)
(0, -1, 0, 0)	(14, 7)	(0, -1, -1, 0)	(5, 9)
(0, 0, -1, 0)	(8, 2)	(0, -1, 0, -1)	(4, 10)
(0, 0, 0, -1)	(7, 3)	(0, 0, -1, -1)	(15, 5)
(2, 0, 0, 0)	(2, 2)	(1, -1, 0, 0)	(15, 8)
(0, 2, 0, 0)	(6, 3)	(1, 0, -1, 0)	(9, 3)
(0, 0, 2, 0)	(1, 13)	(1, 0, 0, -1)	(8, 4)
(0, 0, 0, 2)	(3, 11)	(0, 1, -1, 0)	(11, 12)
(-2, 0, 0, 0)	(15, 15)	(0, 1, 0, -1)	(10, 13)
(0, -2, 0, 0)	(11, 14)	(0, 0, 1, -1)	(16, 1)
(0, 0, -2, 0)	(16, 4)	(-1, 1, 0, 0)	(2, 9)
(0, 0, 0, -2)	(14, 6)	(-1, 0, 1, 0)	(8, 14)
(1, 1, 0, 0)	(4, 11)	(-1, 0, 0, 1)	(9, 13)
(1, 0, 1, 0)	(10, 16)	(0, -1, 1, 0)	(6, 5)
(1, 0, 0, 1)	(11, 15)	(0, -1, 0, 1)	(7, 4)
(0, 1, 1, 0)	(12, 8)	(0, 0, -1, 1)	(1, 16)

5.2 8PSKにおけるBCH符号と負巡回符号の比較

次に従来WBANに用いられているBCH(63,51)との比較を行った。

用いた符号は \mathbb{F}_{11} 上で定義された符号長5の負巡回符号であり、 (± 1) の2重誤り訂正が可能である。パリティ検査行列は以下の式で表される。

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 8 & 5 \\ 1 & 8 & 9 & 6 & 4 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

符号化率は3/5, シンボル数は50万でシミュレーションを行った。

またこのときの復号手順を以下に示す。

IN. 復調器からの出力 $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$.

OUT. 復元された符号語 $\hat{\mathbf{c}} = (\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_n)$.

Step 1. シンドローム値 $\mathbf{s} = \mathbf{r}H^t$ を計算する

Step 2. シンドローム表を参照し、重みが最小のエラーパターン $\mathbf{e}(e_1, e_2, \dots, e_n)$ を見つける。

Step 3. $\mathbf{r} - \mathbf{e} = \mathbf{a}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ とする。

Step 4. ある i に対して、 $a_i \notin \{0, 1, \dots, 7\}$ のとき、 $\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{r}$ を出力。

Step 5. それ以外の場合は $\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{r} - \mathbf{e}$ を出力。

この復号手順によりシンドローム復号において、誤った符号語への復号が少なくなることが期待される。以下にその例を示す。

1. 符号語 $(0, 0, 0, 0, 0)$ を送る。

2. 変調器 (8PSK) によって、座標変換される $([1, 0], [1, 0], [1, 0], [1, 0], [1, 0])$ 。

3. 通信路において信号にノイズが加わる。

$$\begin{aligned} & ([0.6408, -0.003], [0.9958, -0.6552], [1.7036, 0.4391], [1.3355, -0.8073], [0.873, 0.1005]) \\ & = (n_1, n_2, n_3, n_4, n_5) \end{aligned}$$

4. ユークリッド距離を用いて復調器で復調される $(0, 0, 7, 0, 7)$ 。このときの各受信点の復調結果を図5.3に示す。

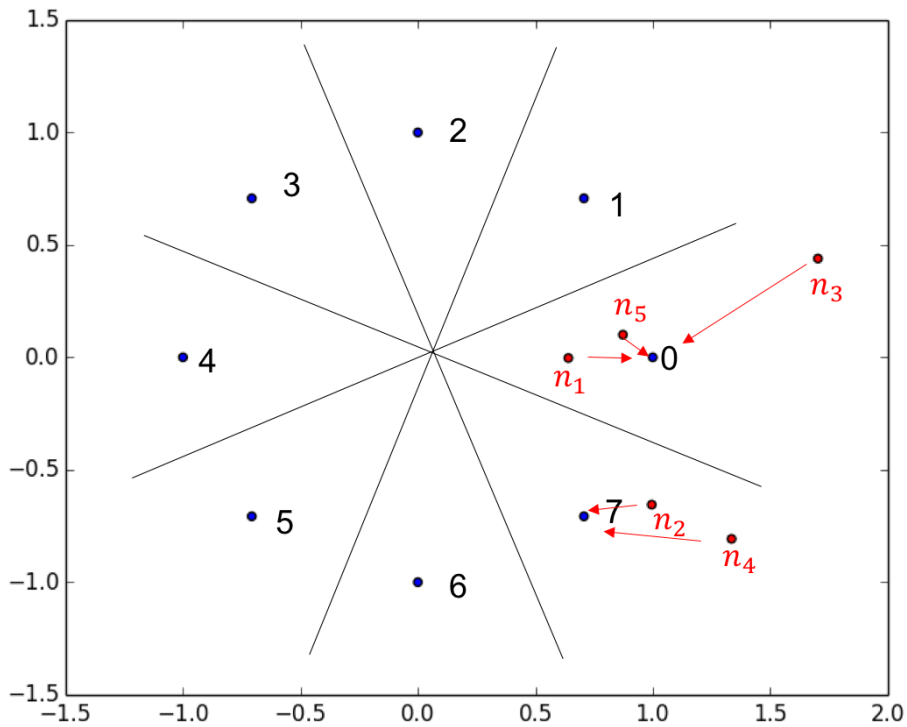


図 5.3: 各受信点と硬判定結果

5. シンドローム値 $(3, 8)$ より表 5.2 を参照すると, $e = (-1, 0, 1, 0, 0)$ となる.

6. 復号器において復号される $(10, 0, 8, 0, 7)$

このとき既存の方法では実際送った符号語 $(0, 0, 0, 0, 0)$ でなく, $(10, 0, 8, 0, 7)$ という別の符号語に復号されている. そのため 3 シンボルの誤りが起きているが, 上記の復号手順に従うと 1 シンボル分誤りを起こさないようにすることができ, BER を小さくすることができる.

図 5.4 に比較結果, 表 5.2 にシンドローム表を示す.

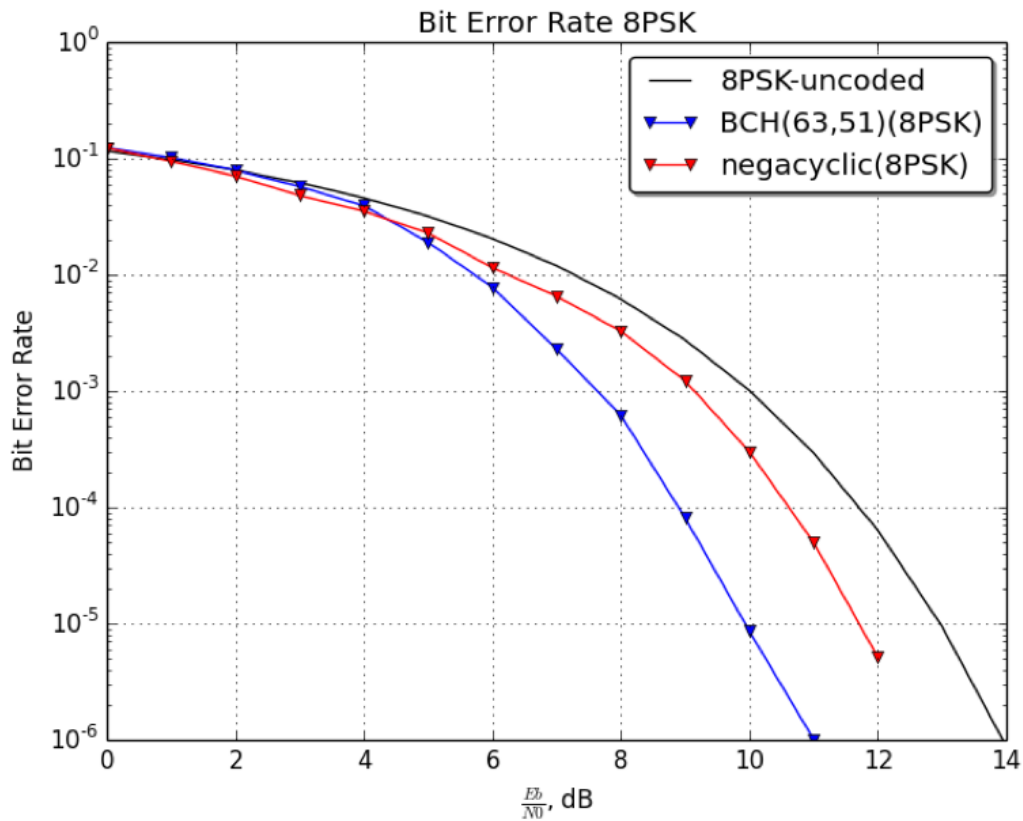


図 5.4: 8PSK におけるシミュレーション結果

図 5.4を見ると、SNRが4dBまでのときは、負巡回符号がわずかに訂正能力が高い。しかしながら、BERが 10^{-6} 付近では、BCHと比べるとおよそ2dBの利得差があることがわかり、BCH符号の性能を上回ることができなかつた。これは符号化率の差が大きかったものと考えられる。

表 5.2: エラーベクトルとシンδροーム値の対応-8PSK

エラーベクトル	(S_1, S_2)
(1, 0, 0, 0, 0)	(1, 1)
(0, 1, 0, 0, 0)	(2, 8)
(0, 0, 1, 0, 0)	(4, 9)
(0, 0, 0, 1, 0)	(8, 6)
(0, 0, 0, 0, 1)	(5, 4)
(-1, 0, 0, 0, 0)	(10, 10)
(0, -1, 0, 0, 0)	(9, 3)
(0, 0, -1, 0, 0)	(7, 2)
(0, 0, 0, -1, 0)	(3, 5)
(0, 0, 0, 0, -1)	(6, 7)
(2, 0, 0, 0, 0)	(2, 2)
(0, 2, 0, 0, 0)	(4, 5)
(0, 0, 2, 0, 0)	(8, 7)
(0, 0, 0, 2, 0)	(5, 1)
(0, 0, 0, 0, 2)	(10, 8)
(-2, 0, 0, 0, 0)	(9, 9)
(0, -2, 0, 0, 0)	(7, 6)
(0, 0, -2, 0, 0)	(3, 4)
(0, 0, 0, -2, 0)	(6, 10)
(0, 0, 0, 0, -2)	(1, 3)
(1, 1, 0, 0, 0)	(3, 9)
(1, 0, 1, 0, 0)	(5, 10)
(1, 0, 0, 1, 0)	(9, 7)
(1, 0, 0, 0, 1)	(6, 5)
(0, 1, 1, 0, 0)	(6, 6)
(0, 1, 0, 1, 0)	(10, 3)
(0, 1, 0, 0, 1)	(7, 1)
(0, 0, 1, 1, 0)	(1, 4)
(0, 0, 1, 0, 1)	(9, 2)
(0, 0, 0, 1, 1)	(2, 10)

エラーベクトル	(S_1, S_2)
(-1, -1, 0, 0, 0)	(8, 2)
(-1, 0, -1, 0, 0)	(6, 1)
(-1, 0, 0, -1, 0)	(2, 4)
(-1, 0, 0, 0, -1)	(5, 6)
(0, -1, -1, 0, 0)	(5, 5)
(0, -1, 0, -1, 0)	(1, 8)
(0, -1, 0, 0, -1)	(4, 10)
(0, 0, -1, -1, 0)	(10, 7)
(0, 0, -1, 0, -1)	(2, 9)
(0, 0, 0, -1, -1)	(9, 1)
(1, -1, 0, 0, 0)	(10, 4)
(1, 0, -1, 0, 0)	(8, 3)
(1, 0, 0, -1, 0)	(4, 6)
(1, 0, 0, 0, -1)	(7, 8)
(0, 1, -1, 0, 0)	(9, 10)
(0, 1, 0, -1, 0)	(5, 2)
(0, 1, 0, 0, -1)	(8, 4)
(0, 0, 1, -1, 0)	(7, 3)
(0, 0, 1, 0, -1)	(10, 5)
(0, 0, 0, 1, -1)	(3, 2)
(-1, 1, 0, 0, 0)	(1, 7)
(-1, 0, 1, 0, 0)	(3, 8)
(-1, 0, 0, 1, 0)	(7, 5)
(-1, 0, 0, 0, 1)	(4, 3)
(0, -1, 1, 0, 0)	(2, 1)
(0, -1, 0, 1, 0)	(6, 9)
(0, -1, 0, 0, 1)	(3, 7)
(0, 0, -1, 1, 0)	(4, 8)
(0, 0, -1, 0, 1)	(1, 6)
(0, 0, 0, -1, 1)	(8, 9)

5.3 16PSKにおけるBCH符号と負巡回符号の比較

用いた符号は \mathbb{F}_{17} 上で定義された符号長8の負巡回符号であり、 (± 1) の2重誤り訂正が可能である。パリティ検査行列は以下の式で表される。

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 9 & 10 & 13 & 5 & 15 & 11 \\ 1 & 10 & 15 & 14 & 4 & 6 & 9 & 5 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

符号化率は $3/4$ 、シンボル数は100万でシミュレーションを行った。復号手順は5.2節と同様にして行った。

図 5.5 に比較結果、表 5.3 にシンドローム表を示す。

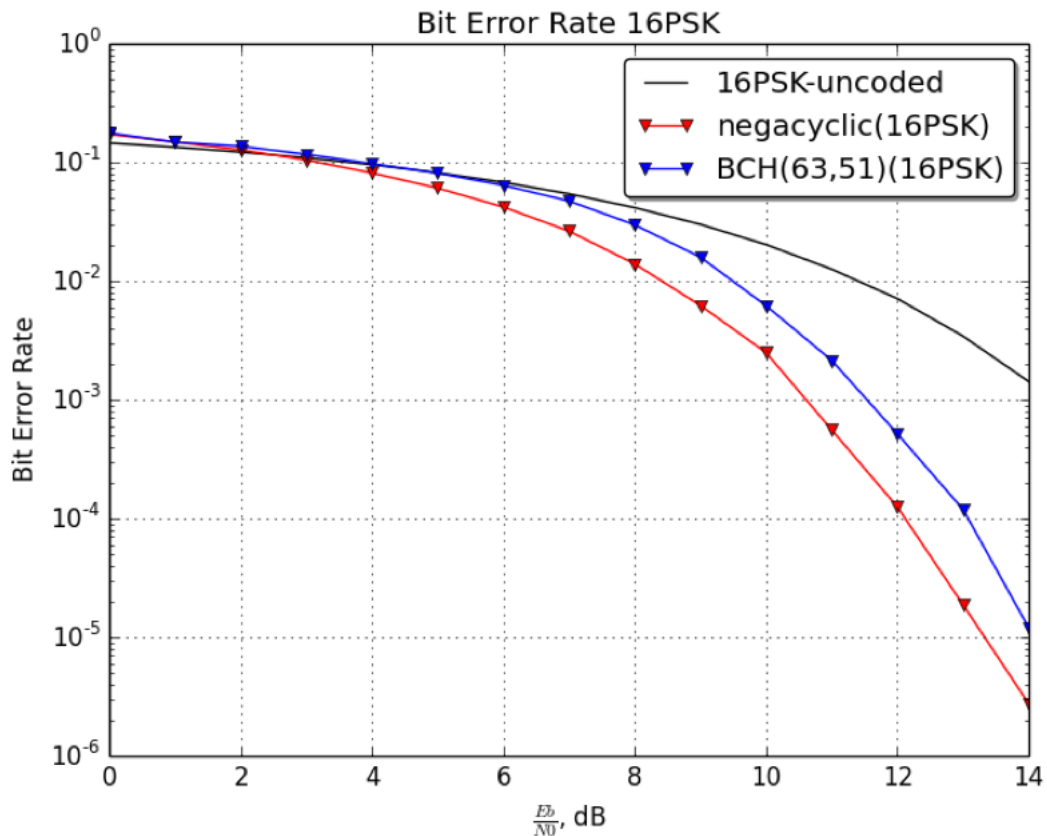


図 5.5: 16PSKにおけるシミュレーション結果

図 5.5 より、負巡回符号の符号化利得はおよそ3dBである。BCH符号と比較してみても、およそ1dBの利得差があることがわかる。要因としては、符号化率の改善、およびBCH(63,51)符号が16PSKでは適切ではなかったなどが考えられる。

表 5.3: エラーベクトルとシンδροーム値の対応-16PSK

エラーベクトル	(S_1, S_2)	エラーベクトル	(S_1, S_2)
(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(1, 1)	(1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	(6, 7)
(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(3, 10)	(1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)	(16, 10)
(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)	(9, 15)	(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)	(12, 6)
(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)	(10, 14)	(0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0)	(12, 8)
(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)	(13, 4)	(0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)	(13, 7)
(0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	(5, 6)	(0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)	(16, 14)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)	(15, 9)	(0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0)	(8, 16)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)	(11, 5)	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)	(1, 2)
(-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(16, 16)	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1)	(14, 5)
(0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(14, 7)	(0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0)	(2, 12)
(0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0)	(8, 2)	(0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0)	(5, 2)
(0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0)	(7, 3)	(0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0)	(14, 4)
(0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0)	(4, 13)	(0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)	(7, 7)
(0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0)	(12, 11)	(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1)	(3, 3)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0)	(2, 8)	(0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0)	(6, 1)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1)	(6, 12)	(0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0)	(15, 3)
(2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(2, 2)	(0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0)	(8, 6)
(0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(6, 3)	(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1)	(4, 2)
(0, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0)	(1, 13)	(0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0)	(1, 10)
(0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0)	(3, 11)	(0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0)	(11, 13)
(0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0)	(9, 8)	(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1)	(7, 9)
(0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0)	(10, 12)	(0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0)	(3, 15)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0)	(13, 1)	(0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1)	(16, 11)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2)	(5, 10)	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1)	(9, 14)
(-2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(15, 15)	(-1, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(13, 6)
(0, -2, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(11, 14)	(-1, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0)	(7, 1)
(0, 0, -2, 0, 0, 0, 0, 0)	(16, 4)	(-1, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0)	(6, 2)
(0, 0, 0, -2, 0, 0, 0, 0)	(14, 6)	(-1, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0)	(3, 12)
(0, 0, 0, 0, -2, 0, 0, 0)	(8, 9)	(-1, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0)	(11, 10)
(0, 0, 0, 0, 0, -2, 0, 0)	(7, 5)	(-1, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0)	(1, 7)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, -2, 0)	(4, 16)	(-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1)	(5, 11)
(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -2)	(12, 7)	(0, -1, -1, 0, 0, 0, 0, 0)	(5, 9)
(1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	(4, 11)	(0, -1, 0, -1, 0, 0, 0, 0)	(4, 10)
(1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)	(10, 16)	(0, -1, 0, 0, -1, 0, 0, 0)	(1, 3)
(1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)	(11, 15)	(0, -1, 0, 0, 0, -1, 0, 0)	(9, 1)
(1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)	(14, 5)	(0, -1, 0, 0, 0, 0, -1, 0)	(16, 15)

エラーベクトル	(S_1, S_2)
$(0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, -1)$	$(3, 2)$
$(0, 0, -1, -1, 0, 0, 0, 0)$	$(15, 5)$
$(0, 0, -1, 0, -1, 0, 0, 0)$	$(12, 15)$
$(0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, 0)$	$(3, 13)$
$(0, 0, -1, 0, 0, 0, -1, 0)$	$(10, 10)$
$(0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, -1)$	$(14, 14)$
$(0, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 0)$	$(11, 16)$
$(0, 0, 0, -1, 0, -1, 0, 0)$	$(2, 14)$
$(0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0)$	$(9, 11)$
$(0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, -1)$	$(13, 15)$
$(0, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 0)$	$(16, 7)$
$(0, 0, 0, 0, -1, 0, -1, 0)$	$(6, 4)$
$(0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, -1)$	$(10, 8)$
$(0, 0, 0, 0, 0, -1, -1, 0)$	$(14, 2)$
$(0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, -1)$	$(1, 6)$
$(0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, -1)$	$(8, 3)$
$(1, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$	$(15, 8)$
$(1, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0)$	$(9, 3)$
$(1, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0)$	$(8, 4)$
$(1, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0)$	$(5, 14)$
$(1, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0)$	$(13, 12)$
$(1, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0)$	$(3, 9)$
$(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1)$	$(7, 13)$
$(0, 1, -1, 0, 0, 0, 0, 0)$	$(11, 12)$
$(0, 1, 0, -1, 0, 0, 0, 0)$	$(10, 13)$
$(0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 0)$	$(7, 6)$
$(0, 1, 0, 0, 0, -1, 0, 0)$	$(15, 4)$
$(0, 1, 0, 0, 0, 0, -1, 0)$	$(5, 1)$
$(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, -1)$	$(9, 5)$
$(0, 0, 1, -1, 0, 0, 0, 0)$	$(16, 1)$
$(0, 0, 1, 0, -1, 0, 0, 0)$	$(13, 11)$
$(0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0)$	$(4, 9)$
$(0, 0, 1, 0, 0, 0, -1, 0)$	$(11, 6)$
$(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1)$	$(15, 10)$
$(0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0)$	$(14, 10)$
$(0, 0, 0, 1, 0, -1, 0, 0)$	$(5, 8)$

エラーベクトル	(S_1, S_2)
$(0, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0)$	$(12, 15)$
$(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, -1)$	$(16, 9)$
$(0, 0, 0, 0, 1, -1, 0, 0)$	$(8, 15)$
$(0, 0, 0, 0, 1, 0, -1, 0)$	$(15, 12)$
$(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, -1)$	$(2, 16)$
$(0, 0, 0, 0, 0, 1, -1, 0)$	$(7, 14)$
$(0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, -1)$	$(11, 1)$
$(0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, -1)$	$(4, 4)$
$(-1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$	$(2, 9)$
$(-1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$	$(8, 14)$
$(-1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$	$(9, 13)$
$(-1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)$	$(12, 3)$
$(-1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$	$(4, 5)$
$(-1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$	$(14, 8)$
$(-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$	$(10, 4)$
$(0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$	$(6, 5)$
$(0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$	$(7, 4)$
$(0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)$	$(10, 11)$
$(0, -1, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$	$(2, 13)$
$(0, -1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$	$(12, 16)$
$(0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$	$(8, 12)$
$(0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0)$	$(1, 16)$
$(0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0)$	$(4, 6)$
$(0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0)$	$(13, 8)$
$(0, 0, -1, 0, 0, 0, 1, 0)$	$(6, 11)$
$(0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 1)$	$(2, 7)$
$(0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0)$	$(3, 7)$
$(0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0)$	$(12, 9)$
$(0, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0)$	$(5, 12)$
$(0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 1)$	$(1, 8)$
$(0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0)$	$(9, 2)$
$(0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0)$	$(2, 5)$
$(0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 1)$	$(15, 1)$
$(0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0)$	$(10, 3)$
$(0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1)$	$(6, 16)$
$(0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1)$	$(13, 13)$

5.4 16QAMにおけるBCH符号と負巡回符号の比較

用いた符号は \mathbb{F}_{17} 上で定義された符号長8の負巡回符号であり、5.3節と同じ符号である。パリティ検査行列およびシンドローム表は5.3節の表5.3参照。

図5.6に比較結果を示す。

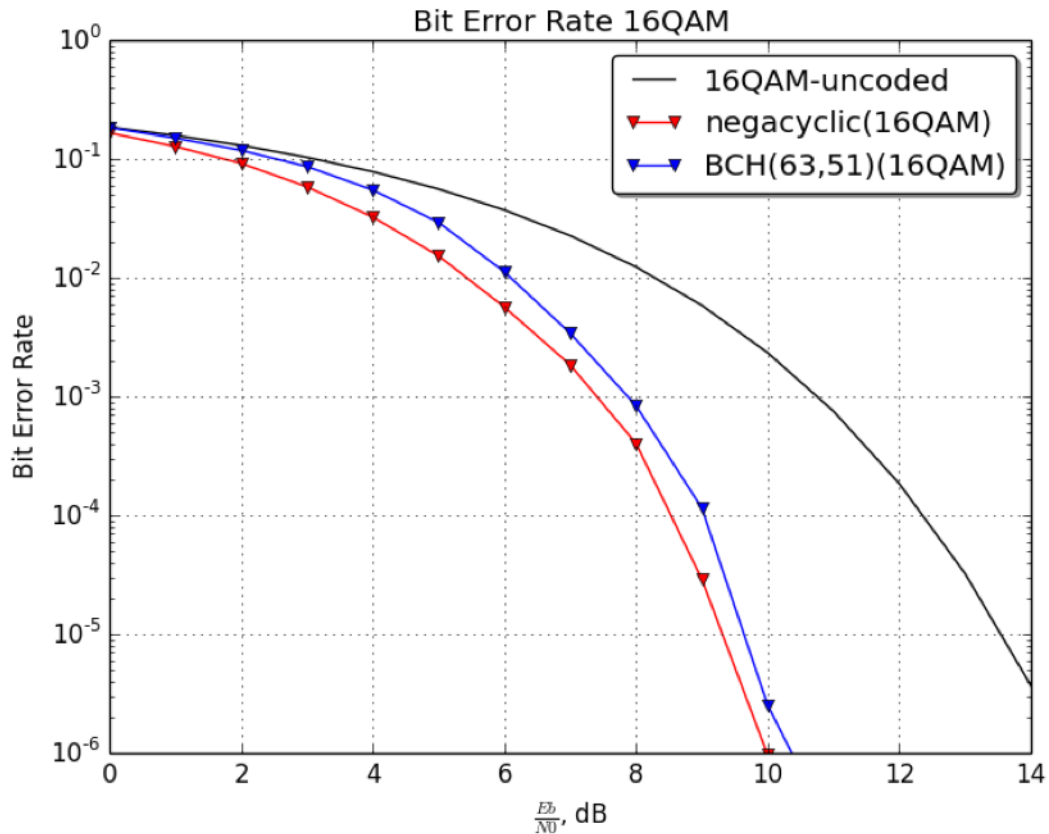


図5.6: 16QAMにおけるシミュレーション結果

図5.6より、負巡回符号の符号化利得はおよそ4dBである。BCH符号と比較してみても、0.2dBほど利得が大きく、負巡回符号がBCH符号の誤り訂正能力を上回っている。これは負巡回符号が、QAM変調方式においてX軸、Y軸それぞれに2重の(± 1)訂正可能であること、さらに5.2節と比較して符号化率が高いことが要因として考えられる。

第6章 WBANに適した符号の考察

本章では関連研究 [7] の歩行時における電波伝搬解析の結果をもとに、WBANに適した誤り訂正符号を考察した。

6.1 半波長ダイポールアンテナを用いて歩行動作を想定した電波伝搬モデル

関連研究 [7] では、人体の動作について十分に考慮した人体近傍での電波伝搬解析を行い、人の動きが電波伝搬に与える影響を明らかにしている。また、右手首に取り付けたセンサーから情報をスマートフォンなどに送信するシステムを想定し、腕の振りを考慮したモデルを用いた解析を行っている。さらにWBANに誤り訂正符号を適用した際の性能評価も行っている。本実験は、上記既存方法での解析と、符号化方式の検討を参考に行った。以下に、関連研究 [7] に示されている解析モデルおよび伝達係数のグラフを示す。

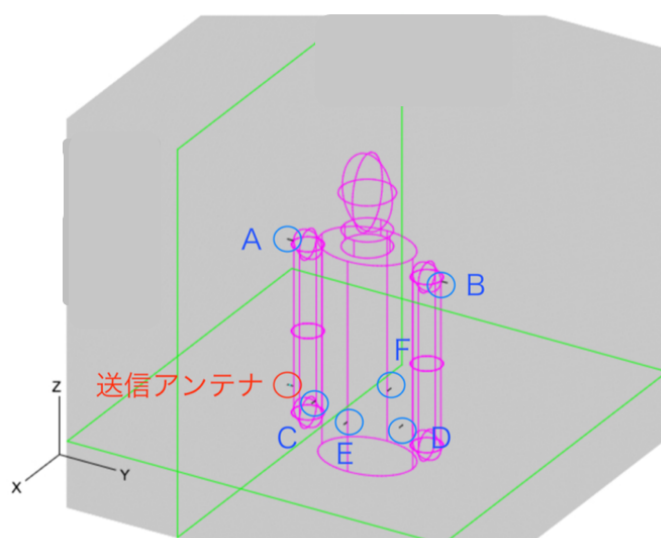


図 6.1: 解析モデル

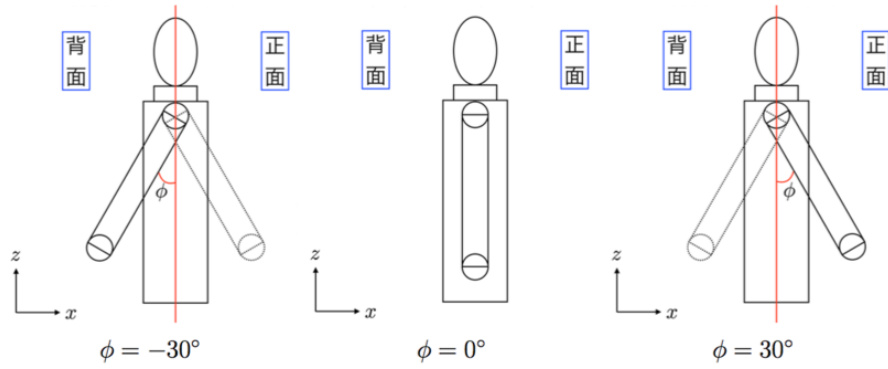


図 6.2: 歩行動作を模擬した解析モデル

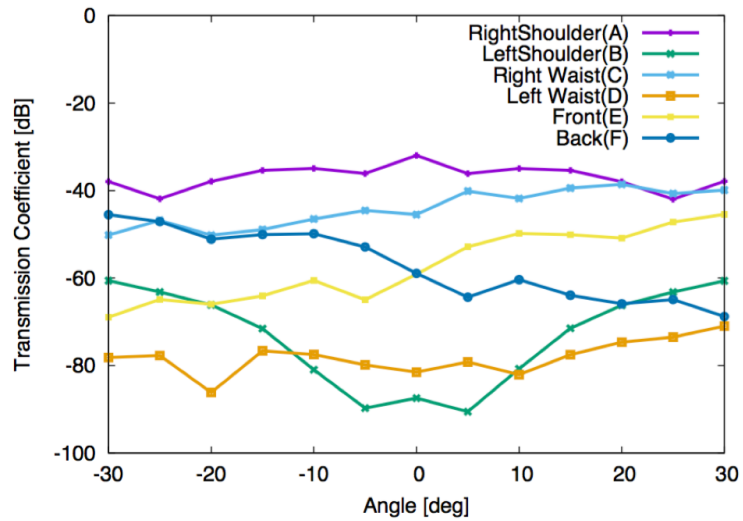


図 6.3: 半波長ダイポールアンテナ・歩行動作を想定した腕振り角度による伝達係数の変動

6.2 BERの定め方

関連研究 [7] より，歩行動作を想定した腕振り角度による伝達係数の変動値をもとに，各腕振り角度におけるBERを求める．受信デバイスの増幅器利得は40dBとする．符号化なしの場合を例として，関連研究 [7] を参考にした各腕振り角度における誤り率の求め方について述べる．図6.4に符号化なしの場合の，SNRに対するBERを示す．伝達係数の変動に伴うSNRの変動を求めるため，雑音電力 N_0 は一定とし，信号電力 E_b が腕の動きに応じて変化すると考える．例えば歩行動作を考えた腕の振り角度が -30° のとき，伝達係数は図6.3より-37.9dBである．受信デバイスの増幅器利得を40dBと仮定しているのので，伝達係数は2.1dB変動する．よって E_b が2.1dB増加するので，SNRが2.1dBとなる．したがって，腕振り角度が -30° のときの誤り率は，SNRが2.1dBでの誤り率と等しい．

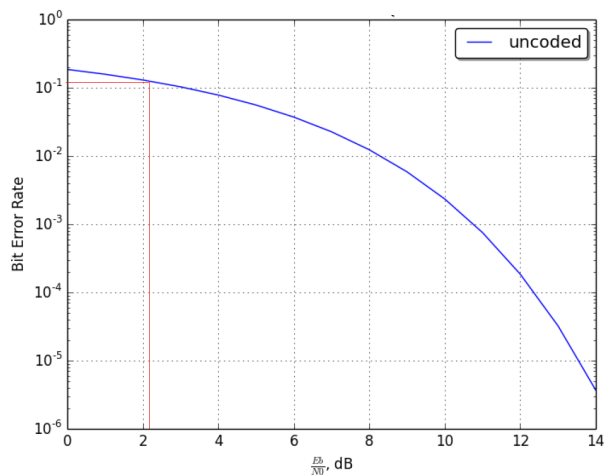


図 6.4: 符号化なしの場合の BER と SNR の関係

6.3 半波長ダイポールアンテナ・歩行動作を想定した誤り率の変動

今回の実験では符号化利得の大きかった16QAM変調方式で評価を行った。6.1節で示したSNRを他の角度でも同様に求め、誤り訂正符号の性能比較を行った。図6.5に結果を示す。

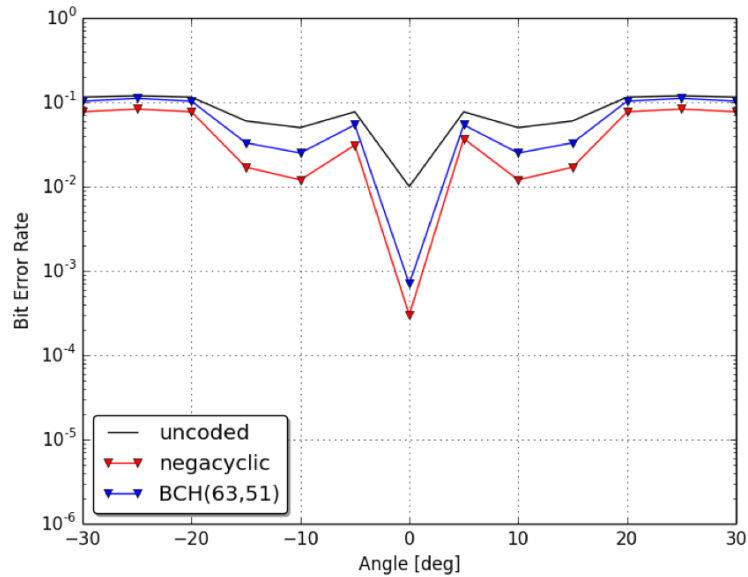


図6.5: 半波長ダイポールアンテナ・歩行動作を想定した時の腕振り角度毎の誤り率の変動

図6.5から誤り訂正符号による性能の向上が見られる。負巡回符号の結果と符号化なしの場合を比較すると大きなところでおよそ70%のBERの改善が見られる。しかしながらBERが大きく改善しているとは言えない。そのため増幅器の利得を変更して結果を確認した。

以下、図6.6に増幅器の利得を41dBに変更した結果、図6.7に増幅器の利得を42dBに変更した結果を示す。

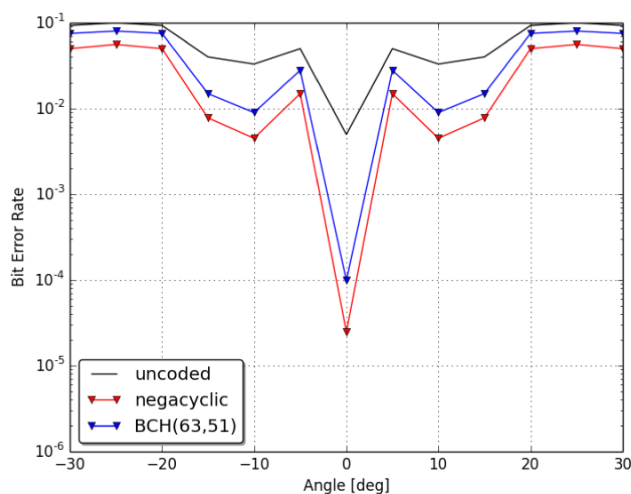


図 6.6: 半波長ダイポールアンテナ・歩行動作を想定した時の腕振り角度毎の誤り率の変動(増幅器利得:41dB)

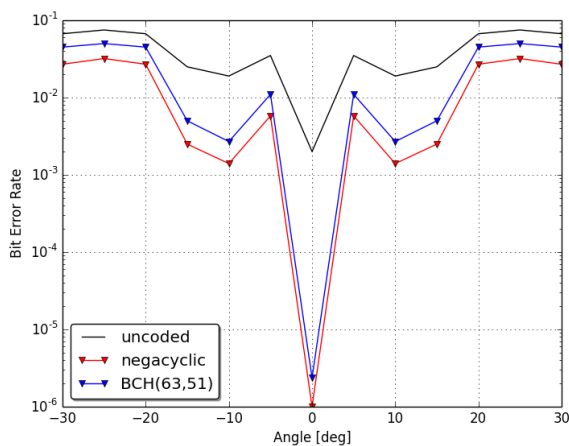


図 6.7: 半波長ダイポールアンテナ・歩行動作を想定した時の腕振り角度毎の誤り率の変動(増幅器利得:42dB)

増幅器の利得を変更することで40dBの時よりもBERが改善されていることがわかる。これより増幅器の利得をどのように選択するかも重要になってくると考えられる。

6.4 パッチアンテナ・歩行動作を想定した誤り率の変動

関連研究 [7] では半波長ダイポールアンテナを用いていたが、関連研究 [11] では、より人体の動きを想定したパッチアンテナを用いている。電波伝搬モデルは図 6.1, 図 6.2 であり、伝達係数は以下に示す。

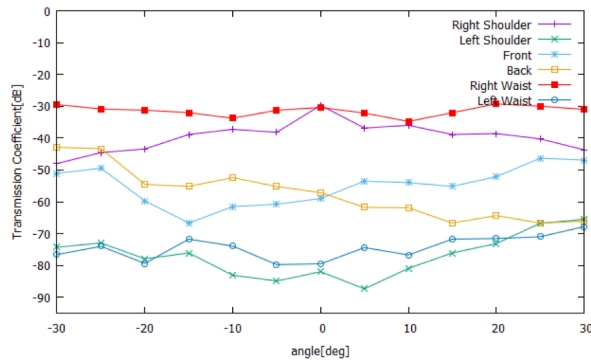


図 6.8: パッチアンテナ・歩行動作を想定した腕振り角度による伝達係数の変動

6.1 節で示した定め方を用いて比較を行った結果を図 6.9 に示す。

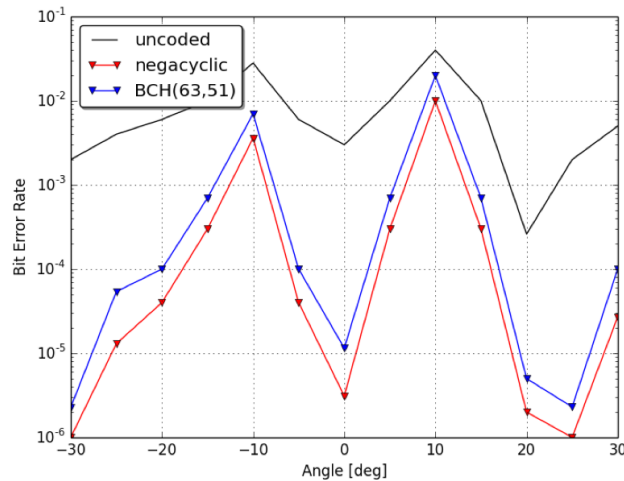


図 6.9: パッチアンテナ・歩行動作を想定した時の腕振り角度毎の誤り率の変動

アンテナの形状を考慮した結果、より大きな BER の改善が見られる。およそ 50% が 10^{-4} 以下になっており、このことからより人体の動きを考慮したアンテナでも負巡回符号が適していることがわかる。

6.5 パッチアンテナ・走行動作を想定した誤り率の変動

続いて走行動作を考慮した電波伝搬モデルの伝達係数の結果をもとに誤り率の変動を確認した。関連研究 [7], [11] に示されている解析モデルおよび伝達係数のグラフを以下に示す。

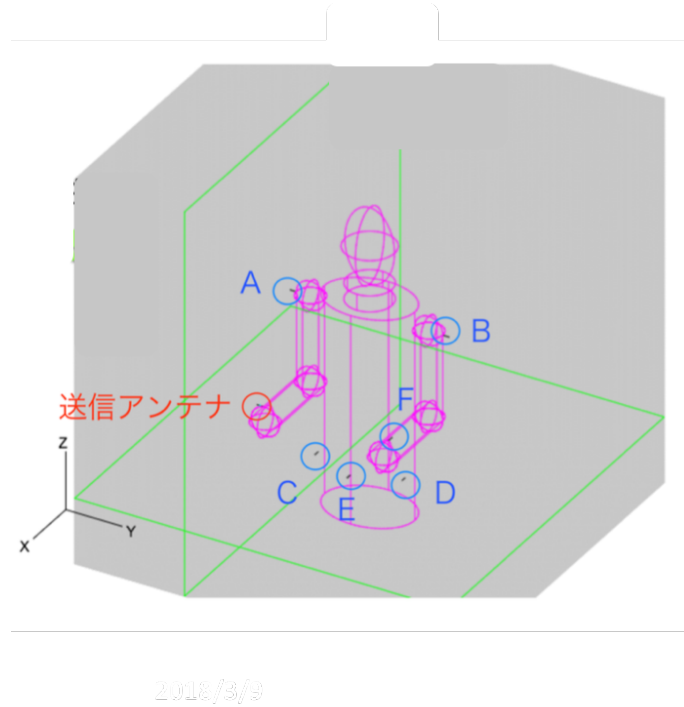


図 6.10: 解析モデル

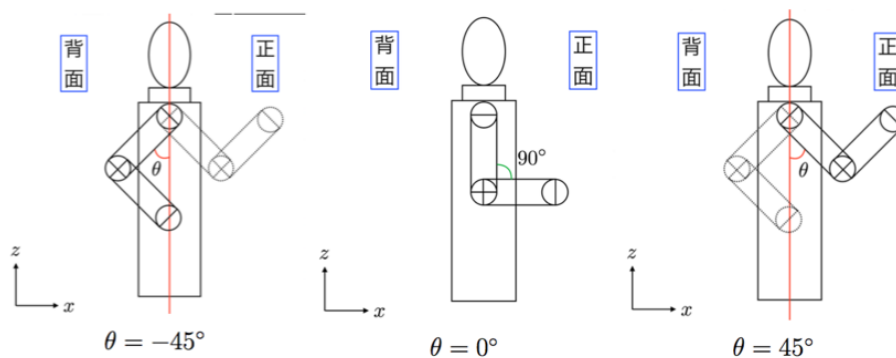


図 6.11: 走行動作を模擬した解析モデル

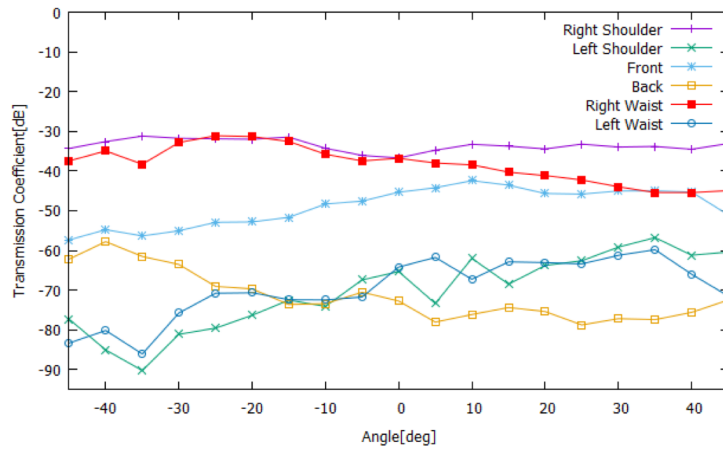


図 6.12: パッチアンテナ・走行動作を想定した腕振り角度による伝達係数の変動

図6.12の結果を参考に誤り率の変動を確認した。以下に結果を示す。

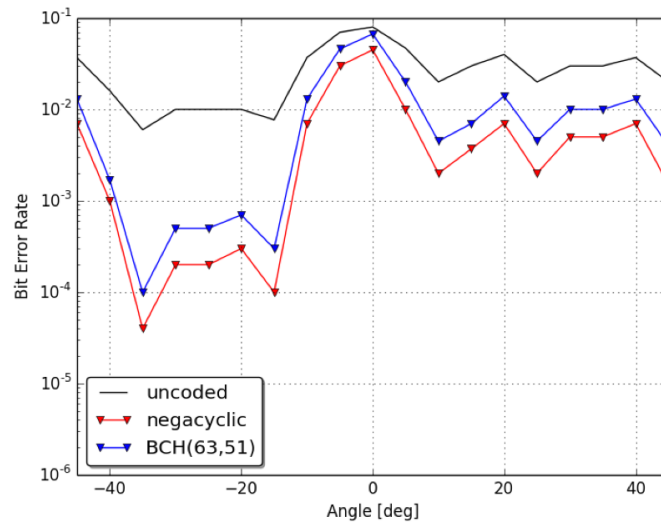


図 6.13: パッチアンテナ・走行動作を想定した時の腕振り角度毎の誤り率の変動

歩行動作と比較した場合に変動幅が滑らかになっていることがわかる。しかし比較的BERの大きな改善は見られず増幅器の利得を変更し、再度結果の確認を行った。以下に増幅器の利得を41dBに変更した時の結果を示す。

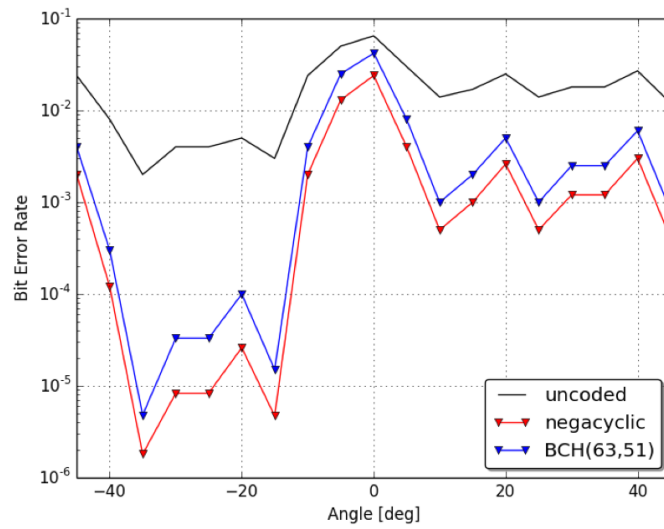


図 6.14: パッチアンテナ・走行動作を想定した時の腕振り角度毎の誤り率の変動(増幅器利得:41dB)

先ほどの結果と比較して，BERの改善が見られる．80%が 10^{-3} 以下になっており，走行動作でもWBANに負巡回符号を適用するのが効果的であると考えられる．さらに増幅器の利得をどのように選択するのも非常に重要な課題となっていることがわかる．

第7章 まとめと今後の課題

7.1 まとめ

本論文では、WBANに適した誤り訂正符号に関して考察を行った。主にIEEE802.15.6にて推奨されているBCH(63,51)符号とのBERでの性能比較を行い、情報の正確な伝達に重きを置いて研究を行った。

今回用いた符号は2重誤り訂正可能な負巡回符号で、符号長や変調方式を変えての実験を行った。まず単一の($\pm 1, \pm 3, \pm 4, \pm 5$)誤り訂正可能な整数符号と同符号化率、同変調方式で実験を行うことで、負巡回符号の有用性を考察した。しかしながら、関連研究の[5]における全ての提案を検証したわけではないため、追加実験を行う必要がある。

その後、8PSK, 16PSK, 16QAM変調方式でBCH符号との比較実験を行った。8PSKにおいてはSNRが小さいところでは負巡回符号の訂正能力が勝っていたが、BERが 10^{-6} 付近では利得差が2dBと広がり、誤り訂正能力で上回ることができなかった。しかしながら16PSKにおいては約1dBの利得が得られ、16QAMにおいては約0.2dBの利得を得ることができた。

また、歩行時の動作を想定した電波伝搬解析を行った関連研究[7]を参考に、誤り訂正符号の考察を行った。負巡回符号を用いたときとBCH符号を用いたときとを比較すると、およそ20%のBER改善が見られた。符号化なしと比べたときに大きなところでおよそ70%のBER改善が見られた。次に、より人体の動きを考慮してアンテナの形状をパッチアンテナに変更して実験を行った関連研究[11]を参考に考察を行った。歩行・走行を想定した電波伝搬解析の結果を参考に比較を行った結果、WBANにはBCH符号が推奨されているが必ずしも適しているとは限らない結果が得られた。

今回の実験で伝搬モデルと変調方式を考慮すると、WBANに負巡回符号を適用するのが効果的であると考えられた。

7.2 今後の課題

今後の課題としては

1. 3重以上の誤り訂正可能な負巡回符号を用いたシミュレーション
2. 64QAM変調方式や256QAM変調方式での評価
3. BCH符号だけでなくLDPC符号などとの比較
4. BERだけの評価だけでなく、省電力化における性能の評価

などが挙げられる。

謝辞

本研究を進め、本論文を作成するにあたり、2年間丁寧かつ熱心な研究の指導や基礎知識を始め、実験の進め方や発表の仕方、質問への対応など様々なことを御指導、御助言を下さった森田啓義教授に心より感謝いたします。また、ゼミなどで御助言頂いた笠井裕之准教授に深く御礼申し上げます。また、毎週のゼミで丁寧な御指導を下さった眞田亜紀子助教に心より感謝いたします。そして、本論文を作成するにあたり、実験結果や検討方法を参考にさせていただき、実験を進める際に親身に相談に乗っていただいた青木健吾氏、実験結果を参考にさせていただいた渡辺蒼生氏に御礼申し上げます。最後に、たくさんのアドバイスをいただきました森田・笠井・眞田研究室の学生の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] IEEE standard 802.15.6, 2012
- [2] A. Hocquenghem, “Codes correcteurs d’erreurs,” *Chiffres*, vol. 2, pp. 147-156, September 1959.
- [3] R. C. Bose, and D. K. Ray-Chaudhuri, “On a class of error-correcting binary group codes,” *Inform. and Contr.*, vol. 3, pp. 68-79, March 1960.
- [4] Kyung Sup Kwak, Sana Ullah, and Niamat Ullah, An Overview of IEEE 802.15.6 Standard (Invited Paper)
- [5] H. Kostadinov, H. Morita, N. Iijima, et al. “Soft decoding of integer codes and their application to coded modulation,” *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E93-A, no.7 July 2010.
- [6] 飯島昇, “整数符号を用いた符号化変調のビット誤り率の評価について,” 修士学位論文, 電気通信大学, 2008.
- [7] 青木健吾, “WBANにおける腕の動きを考慮した人体近傍の電波伝搬解析に基づく符号化方式の検討,” 修士学位論文, 電気通信大学, 2017.
- [8] J. G. Proakis, M. Salehi, G. Bauch, *Contemporary Communication Systems using MATLAB and Simulink*, 2nd ed., Brooks/Cole, 2004.
- [9] E.R. Berlekamp, “Negacyclic codes for the Lee metric,” *Proceedings of the Conference on Combinatorial Mathematics and Its Applications*, April 10-14, 1967, University of North Carolina Press, 1969.
- [10] R.N. Roth, “Introduction to coding theory,” Cambridge University Press, 2006.
- [11] 渡辺蒼生, “WBANにおける腕の動きとアンテナ形状を考慮した電波伝搬解析,” 卒業論文, 電気通信大学, 2018.

- [12] Huan-Bang Li, Kamyar Yazdandost and Bin Zhen, *Wireless Body Area Network*, River Publishers, 2011.
- [13] Jianqing Wang and Qiong Wang, *Body Area Communications*, WILEY, 2013.
- [14] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamental and Applications*, Prentice-Hall International, Inc., 1988.
- [15] 和田山正, 誤り訂正技術の基礎, 森北出版株式会社, 2010.
- [16] R.G.Gallager, "Low-density parity-check codes," in Research Monograph series. Cambridge, MIT Press, 1963.
- [17] K. Nakamura, "Some results on efficient multi-dimensional codes over Z_q based on the Lee metric," *Proc. Workshop on Concepts in Information Theory*, Jeju, South Korea, pp. 44-45, Oct. 2006.