

# 電流方式人体通信のスループットとリンクバジエットの特性評価

## —誤り訂正符号と適応符号化の検討—

### Bit Error Rate and Link Budget Evaluation for Galvanic Coupling Intra-body Communication

## —Examination of Error Correction Code and Adaptive Coding—

伊藤建一

新潟工科大学工学部工学科, 945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719 番地, itoh@iee.niit.ac.jp

**あらまし:** 本研究では, 接触及び非接触人体通信方式の通信特性について検討した. 人体通信の通信機を設計するためには, 人体通信路モデルが必要になるとともにそれに基づいた通信特性評価が重要となる. 本研究では, これまでに開発した人体通信路モデルを用いて, 以下の 3 項目について検討した: 1) 誤り訂正符号 LDPC(Low Density Parity Check) の適用による BER(Bit Error Rate)と PER(Packet Error Rate)の改善, 2) ブラインド推定法を用いた $E_b/N_0$ (ratio of Energy per Bit to the Spectral Noise Density)の推定と適応符号化によるスループットの最適化, 3) 上記を組み合わせた必要送信電力の低減. 各検討項目において以下の結果が得られた: 1) 符号化率 $3/4$ から $1/4$ の LDPC 符号を適用すると,  $BER = 10^{-4}$ 及び $PER = 10^{-2}$ において, 必要 $E_b/N_0$ は約 9~16dB 改善できる, 2) ブラインド推定法は良好に $E_b/N_0$ を推定可能であり, 適切なスループットで通信が実現できる, 3) 符号化率 $1/4$ の LDPC 符号を適用すると, 通信距離 100cm で必要とされる平均送信電力は, 接触方式で $-61\text{dBm}$  から $-76\text{dBm}$  まで, 非接触方式で $-47\text{dBm}$  から $-63\text{dBm}$  まで低減できる.

## 1. まえがき

日本国内の少子高齢化の状況を考慮すると, 「日常生活における我々の健康状態を常時モニタリングすることにより健康を管理し, 病院に行く前に病気を予防し, また万が一それが発病した場合には適切に指導や治療する」ことが重要であると考えられる. 生体情報の常時モニタリングでは, 体温, 心電図等の生体情報を各種センサで計測し, その計測した情報をボディエリアネットワーク等を介してリアルタイムで収集する必要がある. 著者らは人体通信を応用しケーブルレスで生体情報を伝送する方法を提供したいと考えている. 特に, 服の上からなど, 直接皮膚上に電極を貼付しないで済む方式(非接触方式)を開発することを目標にしている.

人体通信は伝送媒体として人体を用いる新しい信号技術であり[1], ボディエリアネットワークを構成する有望な方式の一つと考えられている. 一般的に, 人体通信は電界方式と電流方式の 2 種類に分類される[2]. この中の電流方式人体通信は, 人体表面に配置された小型生体センサ端末だけでなく人体内に埋め込まれたセンサや装置間でもネットワークを形成可能であり, 医療やヘルスケア用途に向いている方式である.

著者らは, これまで前腕の 4 端子回路モデルと有限要素モデルを用いたシミュレーションと実際に人

体の前腕を用いた測定によって、接触及び非接触方式人体通信の信号損失特性と Okamoto らによって提案された最適インターフェース回路[3]の効果を調査してきた[4]-[8]。その結果、接触及び非接触方式の信号損失量が最小となる最適な送受信周波数は、接触方式では 2~5MHz、非接触方式では 10MHz より高いが 10MHz に比較的近い周波数帯にあることを示した。最適インターフェース回路である LC 直並列共振回路を用いれば、共通の送受信周波数を用いて両方式で同等な信号損失で通信できる可能性を示した。

さらに、接触及び非接触電流方式通信システムの通信特性を評価するために、両方式のシャドウイングを含む通信路モデルを作成した[9]。また、通信路モデルに基づいた計算機シミュレーションにより OOK 変調方式を用いた場合のビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) 特性とリンクバジェット特性を定量的に評価した[9]。

本研究では、接触及び非接触電流方式通信システムの開発指針を得るために、まず誤り訂正符号の適用による BER と PER(Packet Error Rate)の低減とシャドウイングの影響抑制を検討する。なお、変調方式は BPSK(Binary Phase-Shift Keying)、誤り訂正技術は LDPC(Low Density Parity Check)を用いる。次に、 $E_b/N_0$ の推定にモーメントを用いたブラインド推定法を採用し、推定した $E_b/N_0$ (ratio of Energy per Bit to the Spectral Noise Density)に基づいて適応符号化によるスループットの最適化が可能かどうか検討する。最後に誤り訂正符号の適用によるリンクバジェットへの効果を確認する。

第 2 章では接触・非接触電流方式通信システムの概略について説明する。第 3 章では伝搬損距離特性とシャドウイング特性を考慮した通信路モデルについて述べる。第 4 章では AWGN 環境下及び AWGN 環境下に人体通信路のシャドウイング成分が重畳した環境下での BER 特性と PER 特性を評価する。第 5 章では同様な環境下で適応符号化によるスループットの最適化について検討する。第 6 章ではリンクバジェット特性評価に基づいて必要送信電力を明らかにする。最後に第 7 章にて本論文をまとめる。

## 2. 接触・非接触電流方式通信システム

図 1 に電流方式人体通信の模式図を示す。電流方式では、送受信機の両方の電極が人体に貼付される。電気信号は送信機の二つの電極間に差動的に加えられ、人体内を直接通過して減衰した信号を受信機の二つの電極で検出する[2]。この方式の信号伝送品質は人体組織の誘電特性の影響が大きく、個人の周囲環境の影響をあまり受けないといわれているが、容量性リターンパスを考慮する必要性が指摘されている[4]-[7]。なお、小型の電極も使用可能であるため、人体内に埋め込まれた装置間のデータ通信への適用も可能である[2]。本研究の接触方式とは、送受信機の電極に導電性の電極を使用し、皮膚上に直接貼付した方式を指している。また、非接触方式とは、送信機の電極に絶縁電極を使用し、服の上から等、皮膚上に直接電極を貼付しない方式を指している。一般的な使用を考慮すると、皮膚上に直接貼付しないで通信できる方が応用上好ましくなる。

本研究では、図 1 に示すように、送受信機が 1 台ずつ人体表面に配置された通信システムを考える。前述のように、送信機に導電性電極を用いた接触方式と絶縁電極を用いた非接触方式の両方について検討する。想定するシステムは、ヘルスケアを目的としたボディエリアネットワークである。例えば、送信機には心電図等の生体信号の測定機能が付いており、その測定した生体信号を変調して送信し、受信機でその変調信号を復調して受信し、生体信号を表示・解析あるいはサーバ等へ転送する。生体信号の通信は、低データレートで十分なものが多く、また送受信機は携帯されるので、通信速度よりも消費電

力が重要となる.

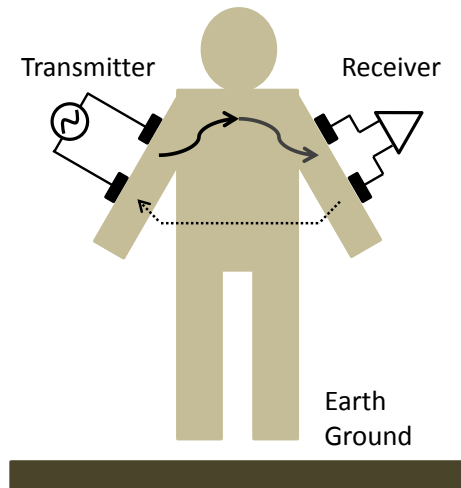


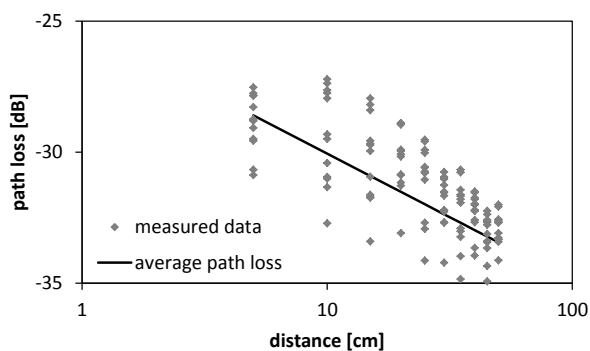
図1 電流方式人体通信方式

### 3. 人体通信路モデル

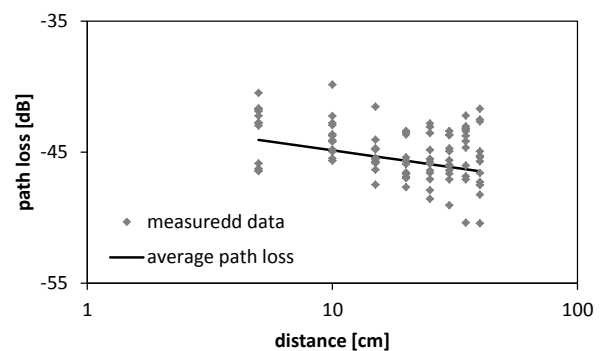
接触及び非接触電流方式通信システムの通信特性を評価するための通信路モデルは先行研究で作成している[9]. 伝搬損失の距離変動特性は下記の簡易モデル式を用いている.

$$PL_{dB} = PL_{0,dB} + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + S_{dB} \quad (1)$$

ここで,  $PL_{0,dB}$ は送受信参照距離 $d_0$ での伝搬損失,  $n$ は伝搬損失係数,  $S_{dB}$ は対数正規分布シャドウイングを表している. 図2に信号損失と式(1)のシャドウイング成分 $S_{dB}$ を除いた式に当てはめた平均信号損失直線を示す. また, 表1に推定された式(1)のパラメータと信号損失の測定値と平均信号損失直線との差の標準偏差 $\sigma_s$ を示す. この標準偏差 $\sigma_s$ はシャドウイング成分 $S_{dB}$ のばらつきを示している.



(a) 接触方式



(b) 非接触方式

図2 信号損失特性

表 1 伝搬特性のパラメータ

	Contact	Non-contact
$PL_0$	28.6 dB	44.1 dB
$n$	0.49	0.27
$d_0$	5 cm	5 cm
$\sigma_s$	1.2 dB	2.0 dB

#### 4. BER 特性及び PER 特性評価

本研究では変調方式に BPSK 変調方式を、誤り訂正符号に LDPC 符号を採用した。表 2 に計算機シミュレーションパラメータを示す。シミュレーションでは、AWGN 環境下及び AWGN 環境下に人体通信路のシャドウイング成分が重畳した環境下についての BER 特性及び PER 特性を評価した。PER はパケットの中に 1bit でも誤りを含んでいるものはエラーとみなし、以下の式(2)を用いて算出した[10]。

$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (2)$$

ここで、 $L$ はパケット長を表す。

図 3 に異なる符号化率の LDPC 符号を適用した場合の BPSK 変調方式の BER 特性を示す。AWGN 通信路において符号化を実施しなかった場合、 $BER = 10^{-4}$ の時の必要 $E_b/N_0$ は 8.5dB であった。AWGN 通信路と比較して接触及び非接触方式のシャドウイング通信路の特性は悪くなっており、 $BER = 10^{-4}$ のときの $E_b/N_0$ の悪化量はそれぞれ約 1.0dB と 2.5dB であった。LDPC 符号を適用すると、必要 $E_b/N_0$ は、符号化率3/4で約 9dB、符号化率1/2で約 12dB、符号化率1/4で約 15dB 改善可能であった。さらに、シャドウイングの影響による悪化量は小さくなるという結果が得られた。

図 4 に式(2)を用いて算出した PER 特性を示す。 $PER = 10^{-2}$ の時の必要 $E_b/N_0$ を $BER = 10^{-4}$ の時の必要 $E_b/N_0$ と比較すると、符号化を実施しなかった場合に 1dB 悪化する程度で、ほぼ $BER = 10^{-4}$ の時の結果と同じになった。シャドウイングの影響による悪化量は小さくなるという傾向も同じであった。

表 2 計算機シミュレーションパラメータ

parameter	value
Carrier frequency	2 MHz
Bit rate	100 kbps
Packet length	400 bits
LDPC code rate	1/4, 1/2, 3/4

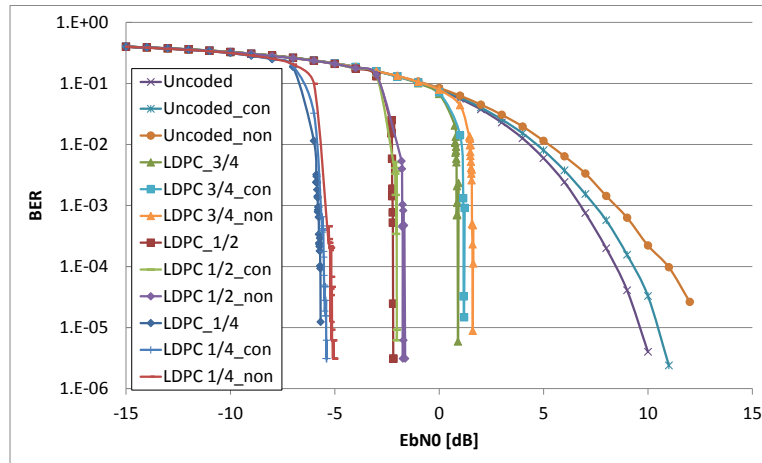


図 3 BPSK 変調方式の BER 特性. con 及び non はそれぞれ接触及び非接触方式のシャドウイング通信路の結果を意味する.

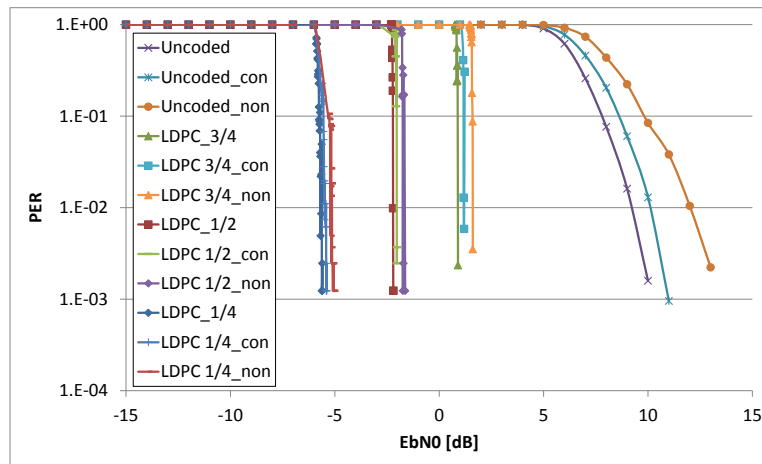


図 4 BPSK 変調方式の PER 特性

## 5. スループット特性評価と SN 比推定

4 節で得られた PER 特性を基に次式(3)を用いてスループット特性を算出した.

$$Throughput = (1 - PER) \times 100 \times code\_rate \text{ [kbps]} \quad (3)$$

図 5 にスループット特性を示す. 図 5 より各  $E_b/N_0$  においてスループットが最適となる符号化率が異なることがわかる.  $E_b/N_0$  が 9dB 以上の場合, 一番条件が悪い非接触方式のシャドウイング通信路でも符号化を実施しなかった場合が最適スループットとなり, それ以下の場合  $E_b/N_0$  に応じて LDPC 符号を適用し符号化率を変化させた方がよいことがわかる. LDPC 符号を使用するとシャドウイングの影響が小さくなることもあり,  $E_b/N_0$  を推定することによる適応符号化がスループット向上に有効であると考えられる.

本研究ではこの  $E_b/N_0$  の推定法に M 相 PSK 変調信号に対するモーメントを用いたブラインド推定法を採用した[10][11]. このブラインド推定法では, M 相 PSK 変調信号は変調データに関わらず M 乗すると一定の複素数値となることを利用する. ベースバンド送信信号  $s(t)$  は通信路で雑音  $n(t)$  が付加されると, この一定の複素数値からのゆらぎが受信側で観測される. このゆらぎが小さいほど信号対雑音比が高い

ということになる．ある標本化時刻 $t = t_s$ で観測された受信信号 $y(t_s) = s(t_s) + n(t_s)$ を確率変数とみなして，その $M$ 乗値のゆらぎの目安として，一定の複素数 $C$ と相互相関関数の絶対値自乗をとった汎関数

$$J_m\{y(t_s)\} = |\rho\{y(t_s)^m, C\}|^2 = \frac{|E[y(t_s)^m]|^2}{E[|y(t_s)^m|^2]} \quad (4)$$

を定義する．ここで， $\rho$ は相互相関係数， $E[X]$ は確率変数 $X$ の1次モーメントを計算する演算子を表す．この汎関数は受信信号の $M$ 乗値と任意定数 $C$ との類似性，すなわち受信信号の $M$ 乗値の一定性を示す指標となる．本研究では一定の複素数値を $C = 1$ とした． $M$ 相PSK変調信号に対する具体的な汎関数は次式となることが知られている[11]．

$$J_m\{y(t)\} = \frac{|E[y(t_s)^m]|^2}{E[|y(t_s)^m|^2]} = \frac{1}{\sum_{k=0}^m \frac{m!^2}{(m-k)!^2} \left(\frac{N_0}{E_b}\right)^k} \quad (5)$$

信号の変調方式がBPSKの場合の汎関数は，式(5)において $m = 2$ とにおいて

$$J_2\{y\} = \frac{E_b^2}{E_b^2 + 4E_bN_0 + 2N_0^2} \quad (6)$$

となる．図6に汎関数の理論曲線と計算機シミュレーション結果を示す．これは $E_b/N_0$ によって決定される関数であり，かつ単調増加関数である．この関数を用いることで信号と雑音を分離することなく $E_b/N_0$ を推定できる．

図5に示すように，適切なスループットを実現するためには， $E_b/N_0$ を $-10\text{dB} \sim 15\text{dB}$ の範囲で比較的高い精度で推定する必要がある．図6に示すように，汎関数 $J_2$ は概ね上記範囲において傾きが大きく，良好に $E_b/N_0$ を推定可能であることがわかる．この汎関数の情報を送信側にフィードバックし適応的に符号化率を変更することで，適切なスループットで通信が実現できるものと考えられる．

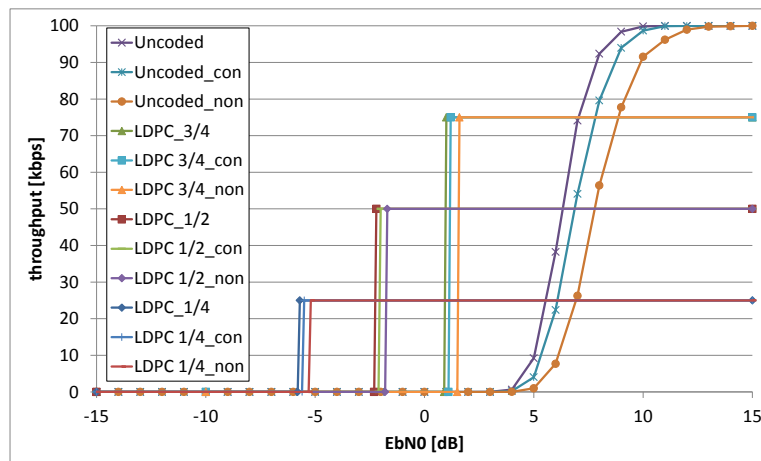


図5 BPSK変調方式のスループット特性

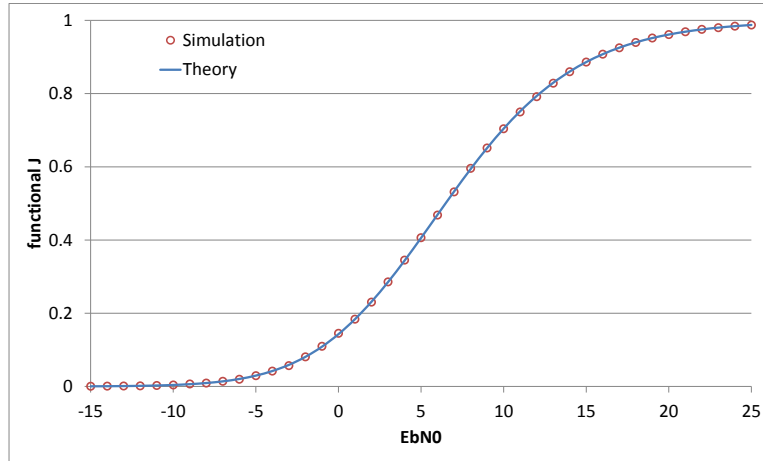


図 6  $E_b/N_0$ 推定のための BPSK 変調方式の汎関数

## 6. リンクバジェット特性評価

BER =  $10^{-4}$ を達成するために必要な送信電力の距離特性（リンクバジェット特性）を計算した． 所望 BER を得るために必要な送信電力 $P_{tx}$ は次式で計算できる [9]．

$$P_{tx} = N + NF + E_b/N_0 + PL_{dB} \quad (7)$$

ここで、 $N$ はノイズ電力， $NF$ は雑音指数を表す． 本研究では， 雑音指数 $NF$ は一般的な低価格受信機の性能である 15dB とした． ノイズ電力 $N$ は次式で計算できる．

$$N = kTB \quad (8)$$

ここで、 $k$ はボルツマン定数 $1.38 \times 10^{-23}$ J/K，  $T$ はシステム温度であり本研究では290Kとした．  $B$ はチャンネル幅を表す．

BER =  $10^{-4}$ の時の必要 $E_b/N_0$ を図 3 から求めた． 表 3 に各数値を示す． なお， PER =  $10^{-2}$ の時の $E_b/N_0$ は符号化を実施しなかった場合において 1dB 悪化する程度で， LDPC 符号化ではほぼ同じであった (図 4)． 図 7 にリンクバジェット特性を示す． 必要とされる平均送信電力は， 通信距離 100cm において， 接触方式では $-61$ dBm， 非接触方式でも $-47$ dBm であった． 符号化率 1/4 の LDPC 符号を適用すると， それぞれ $-76$ dBm と $-63$ dBm まで改善できる． 通信距離 100cm 以内では， 同じ符号化率のデータ同士を比較すると接触方式の方が， 非接触方式より必要平均送信電力が小さく 15dB~20dB 程度良好な結果となった． 非接触方式の符号化率を 1/2 もしくは 1/4 に設定すれば， 接触方式の符号化を実施しなかった場合と同程度の送信電力まで低減することが可能である．

表 3 BER =  $10^{-4}$ の時の必要 $E_b/N_0$

	contact [dB]	noncontact [dB]
Uncoded	9.4	11
LDPC3/4	1.2	1.6
LDPC1/2	-2	-1.7
LDPC1/4	-5.5	-5.2

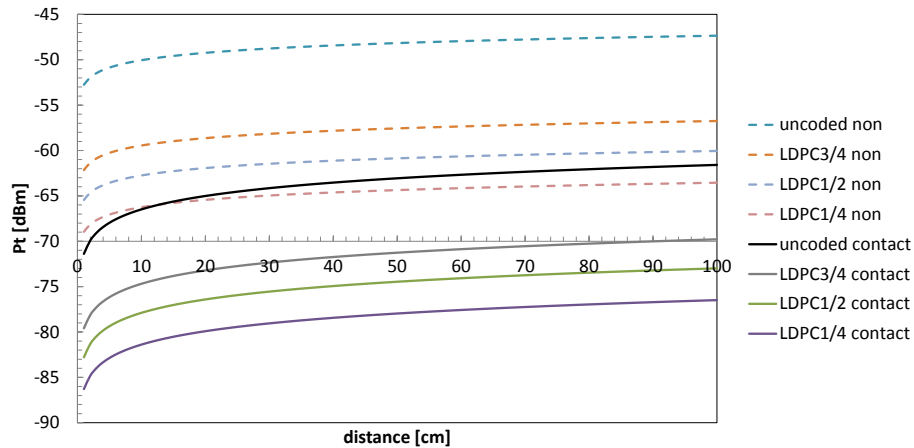


図 7 BPSK 変調方式のリンクバジェット特性

## 7. あとがき

本研究では、接触及び非接触電流方式通信システムの開発指針を得るために、まず LDPC 符号の適用による BER と PER の低減とシャドウイングの影響抑制を検討した。LDPC 符号を適用すると、 $BER = 10^{-4}$ 及び $PER = 10^{-2}$ において、必要 $E_b/N_0$ は、符号化率3/4で約 9~10dB, 符号化率1/2で約 12~13dB, 符号化率1/4で約 15~16dB 改善可能であった。さらに、シャドウイングの影響による悪化量は小さくなるという結果が得られた。次に、 $E_b/N_0$ の推定にモーメントを用いたブラインド推定法を採用し、推定した $E_b/N_0$ に基づいて適応符号化によるスループットの最適化が可能かどうか検討した。ブラインド推定法は良好に $E_b/N_0$ を推定可能であり、この情報を送信側にフィードバックし適応的に符号化率を変更することで、適切なスループットで通信が実現できるものと考えられた。最後に誤り訂正符号の適用によるリンクバジェットへの効果を確認した。通信距離 100cm において、符号化率 1/4 の LDPC 符号を適用すると、必要送信電力は、接触方式で-76dBm, 非接触方式でも-63dBm まで改善できた。また、非接触方式の符号化率を 1/2 もしくは 1/4 に設定すれば、接触方式の符号化を実施しなかった場合と同程度の送信電力まで低減することが可能であることが示された。今後は送受信ダイバーシチと MIMO 伝送を検討したいと考えている。

## 参考文献

- [1] T. G. Zimmerman, "Personal area networks: Near-field intrabody communication," IBM Syst. J., vol. 35, no. 3-4, pp.609-617. 1996.
- [2] M. Seyedi, B. Kibret, D. T. H. Lai and M. Faulkner, "A survey on intrabody communications for body area network applications," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 60, no. 8, pp.2067-2079, 2013.
- [3] E. Okamoto, Y. Kato, K. Seino and Y. Mitamura: Interface of data transmission for a transcutaneous communication system using the human body as transmission medium, J. Srtif. Organs, 15:1(2012), 99-103.
- [4] 伊藤建一: 電流方式人体通信の信号伝送損失シミュレーション, シミュレーション, 33(1), pp. 11-15, 2014年3月.
- [5] K. Ito and Y. Hotta: Signal Path Loss in Human Arm during Galvanic-Coupling Intra-body Communication, JSST2014, pp. 10-11, October 2014.
- [6] K. Ito and Y. Hotta: Signal Path Loss Simulation of Human Arm for Galvanic Coupling Intra-body Communication



Using Circuit and Finite Element Method Models, ISADS2015, pp. 230-235, March 2015.

[7] K. Ito and Y. Hotta: Signal Path Loss through the Human Arm by Galvanic Coupling Intra-body Communication Using Non-Contact Electrodes on the Transmission Side, JSST2015, pp. 84-87, October 2015.

[8] 伊藤建一, 広川智基, 電流方式人体通信の信号伝送損失のシミュレーションと実験的検証, 日本シミュレーション学会多次元移動通信網研究会講演論文集 JSST-MDMC2015-1, 20-28, October 2016, 3.

[9] K. Ito: Bit Error Rate and Link Budget Evaluation for Galvanic Coupling Intra-body Communication, JSST2016, pp. 404-407, 2016.

[10] 小野坂直城, 安住大祐, 王建青, 400MHz 帯インプラント通信における誤り訂正符号適用によるスループット特性向上の検討, 信学技報, vol. 115, no. 152, pp. 7-12, 2015.

[11] 大平孝, 高次モーメントを用いた位相シフトキーイング信号対雑音比のブラインド推定, 信学技報, vol. 102, no. 201, pp. 43-46, 2002.