

400MHz 帯カプセル内視鏡における高速・高信頼無線伝送方式の開発

研究代表者 安 在 大 祐 名古屋工業大学 工学研究科 助教

1 序論

近年、人体無線網(BAN: Body Area Network) の医療・ヘルスケア分野への応用が期待されており、生体情報の取得に適した無線通信技術として盛んに研究が行われている。BAN は、人体の内外、及びその周辺に配置した端末同士を、無線通信で接続することで構築され、BAN を構成する通信端末に各種生体センサを組み込むことで、生体情報をワイヤレスでリアルタイムに取得することが可能となり、医療・ヘルスケアの分野での応用が大きく期待されている。BAN には身に付ける機器を中心に構成されるウェアラブル BAN と、体内埋め込み機器も構成端末に含めるインプラント BAN の 2 つに大別されるが[1]、インプラント BAN の応用アプリケーションとしては、心臓ペースメーカーやカプセル型内視鏡など、ウェアラブル BAN では代用出来ない重要性の高い医療機器があり、従来の機器に比べ効果的な検査や治療を行うことが出来ると考えられる[2, 3]。インプラント BAN を応用した医療機器の開発により、患者への身体的負担が軽減され、高齢者に対して安全に処置を施せるといった利点がある。その一方で、インプラント BAN 通信では、例えばカプセル型内視鏡のようにリアルタイムの画像伝送のための伝送速度の高速化が要求され、それに加えて人体による電波伝搬損と人体器官によるシャドウイングの影響を受け通信品質が劣化するため、伝送速度の向上に加えて信頼性の高い通信の確立も要求されている。現在、カプセル型内視鏡は主に MICS (Medical Implant Communication Services) 帯で運用されているが、許容周波数帯域幅が 300kHz と狭帯域となっている。また、製品化されたカプセル型内視鏡の伝送速度は数百 kbps 程度となっており、変調方式も FSK(Frequency Shift Keying) 方式や BPSK(Binary Phase Shift Keying) 方式が主流となっている。従って、現在のカプセル型内視鏡は胃カメラに代わる医療診断機器としては、実用性の面で課題が残っている状況である。以上のことから、インプラント BAN において、リアルタイム画像伝送を実現可能な伝送速度の高速化を達成するとともに、人体から生じる信号減衰に耐えうる通信の信頼性向上が求められている。

インプラント BAN の主な利用周波数帯としては、MICS 400MHz 帯、Industry Science Medical (ISM) 2.4GHz 帯や UWB low-band (2.4-4.8 GHz) が主に検討されている[4]。高速化に有利となる UWB 伝送方式として、UWB-Impulse Radio (UWB-IR) 方式や Direct Spreading-UWB (DS-UWB) 方式、Multiband-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiband-OFDM) 方式などが提案されており[5]、複数の文献においてインプラント BAN での検討が行われている。しかしながら、インプラント BAN では利用周波数帯の増加に対して人体から生じる減衰は急激に増大することから、高い周波数帯の利用は信頼性の高い通信を確立することが困難である問題が指摘されている。

上述した通り、カプセル型内視鏡は主に MICS 帯で運用されているが、許容周波数帯域幅が 300kHz と狭帯域となっており、変調方式も FSK 方式や BPSK 方式が主流となっていることから、伝送速度も数百 kbps 程度が現状となっている。そこで、多値変調方式(Differential star Quadrature Amplitude Modulation (QAM) など)を採用することで、利用周波数帯域幅 300kHz の制限下においても伝送速度の高速化が可能となることに本研究は着目する。その一方で、多値変調方式での課題として通信の信頼性(例:ビット誤り率(BER: Bit Error Rate))の低下がある。そこで、本研究は多値変調方式の導入に加えて受信ダイバーシティの導入も検討する。受信ダイバーシティの代表的な方法の一つに等利得合成(EGC: Equal Gain Combining)方式があるが、等利得合成方式ではアンテナで受信した信号を合成する際に、各ブランチの信号の位相整合を行う必要があり、受信機構成が複雑となる問題がある。カプセル型内視鏡に用いられる通信機には、身体周辺に配置することから、小型化と低消費電力化が求められるため、回路構成が比較的簡素で済むダイバーシティ方式の採用が求められる。本研究は受信ダイバーシティの方式の 1 つとして周波数オフセット受信ダイバーシティを適用することで、これらの要求を満たし、かつ通信特性を改善することを試みた。周波数オフセット受信ダイバーシティは、スーパーヘテロダイン受信機の局発周波数をシンボルレートと一定の関係を持つオフセット周波数でオフセットすることで、信号の合成に位相整合の必要が無く、等利得合成ダイバーシティと同等なダイバーシティ効果が得られる技術である。本研究では、送信アンテナは人体の小腸内にあり、ダイバーシティブランチの受信アンテナは腹部周辺に配置している。本論文では、400MHz 帯カプセル型内視鏡を対象

とし、多値変調方式の QPSK や star QAM 変調方式と周波数オフセット受信ダイバーシティを組み合わせ、計算機シミュレーションにより BER 特性を導出することでその有効性を示す。

さらには、多値変調方式の変調多値数や誤り訂正符号の符号化率を通信路状況に応じてアダプティブに調整する適用変調符号化方式を検討することでさらなる伝送特性の向上を検討した。具体的には、多値変調方式の採用により MICS 帯における周波数帯域幅を広げることなく伝送速度の高速化を図るとともに、人体器官のシャドウイングの影響を抑制するために前方誤り訂正符号の適用することで、高信頼性と高速性の双方を有する伝送方式の開発を目的としている。この多値変調方式による適応符号化変調方式において、通信路の SN 比に応じた変調多値数や符号化率を適応的に割り当てることが重要であるが、本研究はこの SN 比推定部の高精度化として、送信機としてカプセル型内視鏡を想定しているためフェージング周波数は十分に遅いことに着目し、位相変調だけでなく振幅変調も行う Star AQM 方式にも適用可能な M 相モーメントを用いたブラインド推定法を提案する。そして、推定された SN 比に基いて制御される変調多値数を適用した提案方式に対して人体器官によるシャドウイング条件下におけるスループット特性とスループットの距離特性の算出による定量的評価を行った。

2 インプラント通信における受信ダイバーシティと適応変調符号による高速・高信頼性化の検討

2-1 インプラント通信への空間ダイバーシティの導入の検討

空間ダイバーシティでは、独立なフェージングを受けた複数の信号を、空間的に離れたアンテナによって得る。これらの信号をダイバーシティ合成した合成信号の SNR は、単一の受信アンテナのみで得られる SNR に比べ増加する。この SNR の増加はアレー利得と呼ばれる。また、空間ダイバーシティを行うことで、ダイバーシティ利得も得ることが可能である。この場合、各ブランチの受信アンテナが半波長以上離れていれば、ブランチ間の相関が低くなり、十分なダイバーシティ利得を得ることができる。ダイバーシティ合成法の多くは線形合成で、各ダイバーシティブランチで得られる独立な複数のフェージングを受けた信号に、重み付けを行い加算されるものである。図 1 に L ブランチダイバーシティを示す。例として、複素数 w_k の 1 つを除いた残りすべてが 0 のとき、1 ブランチのみが合成信号として出力される。また、0 でない w_k が 2 つ以上あれば、合成信号は複数ブランチの加算として出力される。このとき、各ブランチの受信信号に対して、異なる値で重み付けを行うことも可能である。フェージングを受けた受信信号は経路差により位相が異なるため、複数のブランチ信号を合成するためには位相整合が必要となる。ここで、k 番目のブランチの位相 θ_k は、適切な重みをかけ合わせることで 0 となり除去される。ここで位相整合を行わない場合、同相加算できないため、ブランチ信号が逆相的に加算される可能性が十分大きく、合成後の出力信号はフェージングの影響によりダイバーシティ合成を行わない場合より小さくなってしまふことが懸念される。また、 w_k の乗算は検波前または検波後のどちらでも行えるが、合成信号の SNR を最大にする適切な w_k を決定するためには、各ダイバーシティブランチの受信信号電力と位相が必要であるため、合成は一般に検波後に行われる。ダイバーシティは独立な複数のフェージングを受けた信号を同相合成することで、フェージングによる受信レベルの低下を抑えることができるが、合成後の出力信号は送信信号 $s(t)$ にランダムな複素振幅項を乗算したものに等しく、これが結果的に合成後の出力信号におけるランダムな瞬時 SNR となる。この瞬時 SNR の確率密度関数はダイバーシティブランチ数、信号が受けるフェージングに対する確率密度関数、そして合成方式によって決定される関数となる。一方で、受信空間ダイバーシティのアレー利得は、複数信号の同相合成によって得られる。しかし通信路でフェージングの影響を受けないときでも、ダイバーシティにより平均受信 SNR を増加させることが十分に期待できる。例として、送信信号のシンボルあたりのエネルギー E_s をもつ信号振幅 r_k 、各ブランチで同じ雑音電力スペクトル密度 (PSD: Power Spectral Density) $N_0/2$ 、 $B \cdot T_s = 1$ のパルス整形を仮定する。ここで、B は周波数帯域幅、 T_s は、シンボル周期である。このとき、各ブランチは同じ $SNR = E_s/N_0$ をもつ。このときの合成信号に対する SNR は結果的に LE_s/N_0 と求めることができ、適切な重み付けにより L 本のアンテナそれぞれの受信信号の同相合成によって、SNR は E_s/N_0 から LE_s/N_0 へ L 倍に増加することが分かる。フェージングが無い場合のこのような SNR の増加をアレー利得と呼ぶ。より詳細には、アレー利得 A_g は平均ブランチ SNR に対する平均合成 SNR の増加比として定義される。アレー利得は様々なダイバーシティ合成法で得られるが、もっとも効果が大きいのが最大比合成方式である。しかしながら、最大比合成方式はフェージングチャネルの位相特性に加えて、振幅特性も最適合成重み算出のために必要となり、これはインプラント BAN システム全体での回路の複雑性や消費電力増加の懸念が大きい。そこで、

本研究は比較的良好な通信特性向上が見込める等利得合成方式を採用し、インプラント BAN を考慮したダイバーシティ受信方式を開発する。図 2 は本研究で検討を行った等利得合成ダイバーシティを実現可能な周波数オフセットダイバーシティ受信機の構成例（2 ブランチ）を示す。

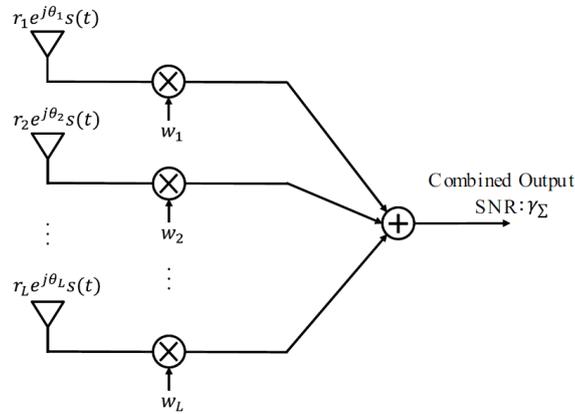


図 1. L ブランチによる受信ダイバーシティシステム

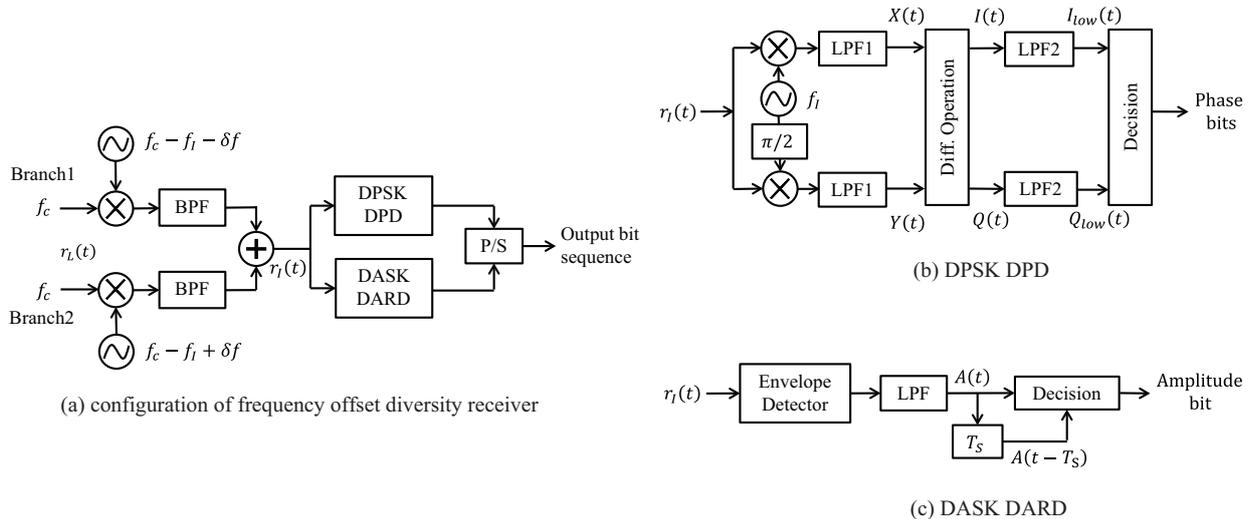


図 2. 等利得合成ダイバーシティシステムの構成例

2-2 最適な変調多値数決定のための SN 比推定法

一般的に、最適な変調多値数や符号化率を決定するためには、通信リンクにおける SN 比を精度よく推定することが不可欠である。本研究では、送信機としてカプセル型内視鏡を想定しているためフェージング周波数は十分に遅いため、推定に用いることができるデータ数を十分に確保することに着目し、SN 比推定法にモーメントを用いたブラインド推定法を採用した。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は先行研究により提案されているが[7]、本研究では更なる高速化を実現するため、位相変調成分を多値化するだけでなく振幅変調成分も多値化を行う M 相 Star QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 変調信号の採用も行う。この場合、文献[7]で提案されている PSK 変調に対するモーメント法は直接適用できないため、本論文は新たに M 相 Star QAM 信号に対する M 次モーメントを導出した。本研究では、SN 比は人体によるシャドウイングによって変動し、瞬時の振幅変動した受信信号に対し受信機のフロントエンド部において AWGN (Additive White Gaussian Noise) が重畳されるモデルを仮定し、M 相 Star QAM 信号のモーメントの定式化を行い、そして、これらを用いて定義した関数が SN 比の推定指標になることを解析的に示した (定式化の詳細について文献[8]を参照されたい)。

図3にインプラント通信における本提案システムを組み込んだブロック図を示す。ここで、MICS帯の狭帯域制限下での伝送速度の高速化のため、本論文では従来のBPSKに加えて、多値変調方式であるQPSK, 64 Star QAM, 128 Star QAMを採用し、誤り訂正符号についてはLDPC符号を採用した。次に、チャンネル推定部における回路構成を図3に示す。本論文で採用したモーメントを用いたブラインド推定法では、多相PSK, Star QAMに適用でき、かつ、プリアンブル信号を必要とせずブラインド的にSN比を推定することが可能である。また、本論文では、送信機としてカプセル型内視鏡を想定しているため、フェージング周波数は十分遅いことに着目し、推定に用いることができるデータ数を十分に確保できるため、高精度にSN比を推定することが可能である。

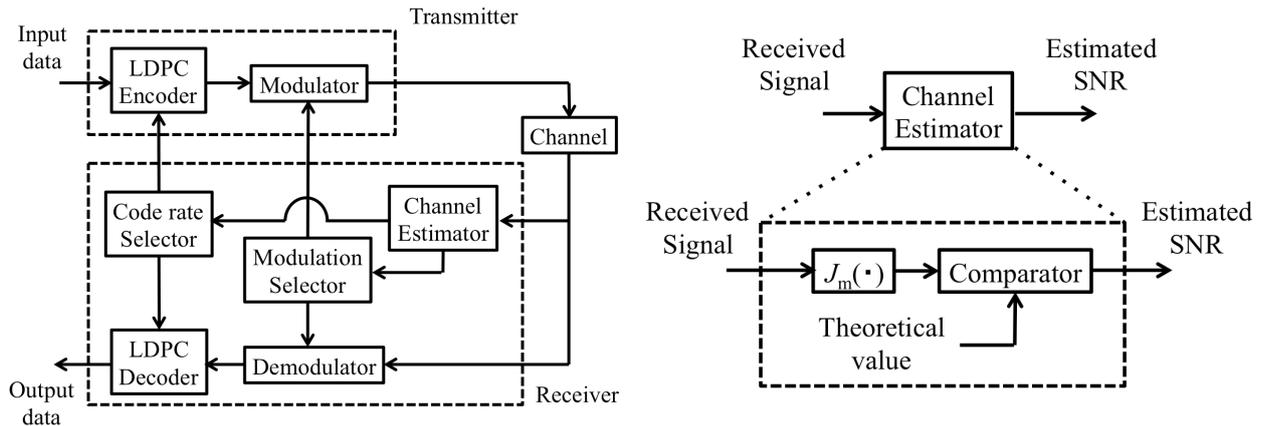


図3. 適応変調符号化システムの構成（左図）とチャンネル推定部のブロック図（右図）

本研究によるM相Star QAMの定式化により、送信された信号系列を推定することなく受信信号からM次モーメントを計算することでSN比の推定が可能となった。本研究で提案するM次モーメントによる瞬時SN比推定可能性を示すために、図4にSN比に対するM相モーメントの計算結果の1例を示す。本結果より、QPSKと64 Star QAM方式において理論値のカーブとシミュレーション結果が一致しており、M相モーメント値であるJの逆関数を解くことでSN比を精度良く推定できることが示された。さらに、本研究は比較手法として既知系列を用いたプリアンブル信号を用いた推定法を検討した。プリアンブルを用いた方法は、送受信器間で既知である信号を用いてSN比を推定する方法であり、既知信号としてはランダムな信号系列を用いた。受信信号から既知の信号系列を復調する過程で、SN比を推定するのが一般的であり、本研究では、プリアンブル長としてBANの通信規格であるIEEE802.15.6で規定されている64bitsを用いた[9]。

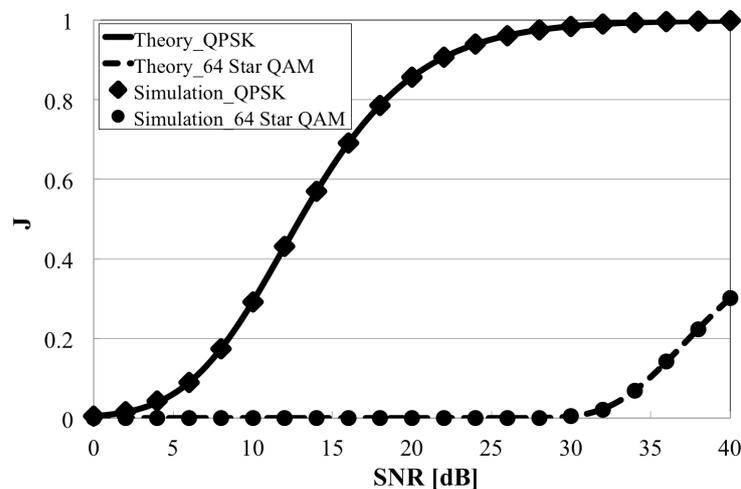


図 4. SN 比推定のためのモーメント関数

3 インプラント通信路モデルの導出と検証

400MHz MICS 帯の伝送特性を評価するために、まずインプラント BAN における無線伝搬特性を FDTD シミュレーションに基いて導出を行った。人体モデルとして、情報通信機構開発の数値モデルを用い、この数値モデルは身長 173cm、体重 65kg であり、55 種類の生体組織から構成されている。また、FDTD 法で用いるセルは 4mm の立方体セルとした。送信信号の周波数帯を 400MHz 帯とし、送信アンテナは長さ 4mm のダイポールアンテナを用いた。一方、受信機は長さ 20mm のダイポールアンテナを身長方向に腹部周り 5 箇所を設置した。カプセル内視鏡位置を食道、胃、小腸や大腸など 30 点に設置し、それぞれの設置箇所から送信された信号に対する各受信機での受信電力を算出した。図 4 は受信機の配置を示す。上記のシミュレーションモデルにおいて、まず 5 つの受信アンテナにおける平均パスロスの距離特性について導出し、その結果の一例を図 4 に示す。また、平均パスロス特性からの変動については本研究に対数正規分布としてよく近似できることが本研究により明らかとなった。FDTD シミュレーションにより得られた伝搬損モデルのパラメータを表 1 に示す。ここで、 d_0 は参照距離、 $PL_{0,dB}$ は参照距離における伝搬損、 n は伝搬損べき指数、 d は通信距離である。また伝搬損の瞬時変動は対数正規分布で与えられ、対数正規分布の確率密度関数のパラメータ σ も表 1 に示す。

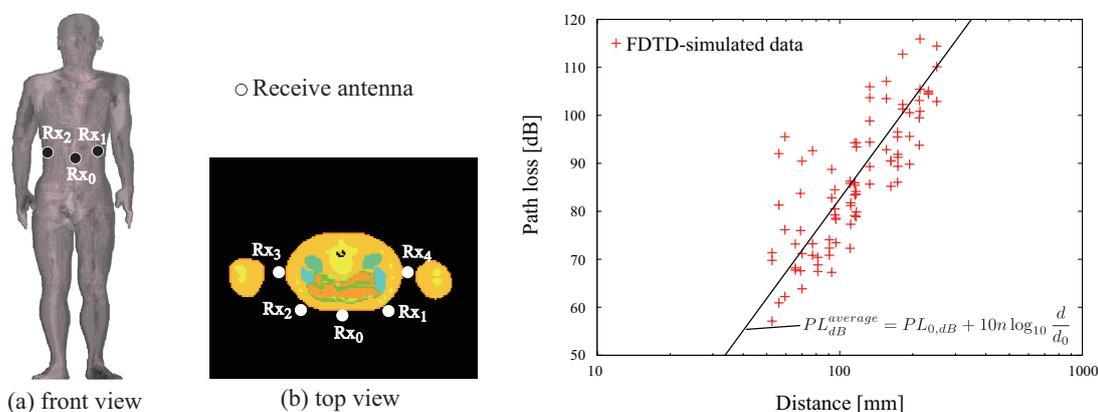


図 4. インプラント伝搬特性解析モデル (左図) と伝搬損の解析結果例 (右図)

表 1. 電磁界解析によって得られたインプラント伝搬モデルパラメータ

	d_0 [m]	$PL_{0,dB}$	n	σ
Rx ₀	0.05	49.67	5.533	2.04
Rx ₁	0.05	37.81	5.997	2.20
Rx ₂	0.05	37.99	6.663	1.80
Rx ₃	0.1	59.74	6.421	2.17
Rx ₄	0.1	58.62	5.793	2.17

4 インプラント BAN 環境下における 400MHz 伝送の基礎特性評価

スループット特性の解析に際して、基本的な指標となる BER 特性やシステムマージンの評価を実施した。本計算機シミュレーションにおいて、受信アンテナは 1 例として Rx₀ と Rx₂ を選択した。送信機であるカプセル内視鏡は非常に低速で移動しているためフェージング周波数は十分遅く、また符号間干渉は無いものと仮定する。計算機シミュレーションにより得られた周波数オフセットダイバーシティ受信を行った際の BER 特性を図 5 に示す。なお、ダイバーシティ受信の理論解析はシャドウフェージングにより瞬時 E_b/N_0 が対数正規分布で変動している場合の等利得合成ダイバーシティ受信を仮定し、合成信号の E_b/N_0 の確率密度関数は MGF (Moment Generating Function) 法により近似的に導出している。図 5 より、計算機シミュレーションの結果

と理論解析が一致していることが分かり、インプラント BAN 環境下においてもダイバーシティ利得 2 をおおよそ達成できていることが示されている。また、ダイバーシティ受信でブランチ間に相関がある場合においても、 $BER=10^{-3}$ においてシングルブランチに比べ E_b/N_0 約 12dB の向上効果が得られていることも確認した。

次に、システムマージンの導出を実施する。通信路の伝搬損と雑音特性、許容送信電力が必要である。通信路の伝搬損としては、FDTD シミュレーションによって導出された無線伝搬特性のパラメータを用いる。受信機における雑音特性においては、熱雑音として AWGN(Additive White Gaussian Noise) を仮定した。許容送信電力は ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) の一般環境における局所 SAR(Specific Absorption Rate) である $2W/kg$ を超えない値として $20mW (=13 dBm=-17dBW)$ とした。受信側の $[E_b/N_0]_{dB}$ の導出で必要となる雑音の電力スペクトル密度 $N_0[W/Hz]$ は、受信アンテナや環境の温度 (受信アンテナは体表上に設定されるため、受信アンテナ温度と環境温度はともに $300 K$ を仮定)、ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} J/K$)、受信機の雑音指数(ここで $6dB$ と仮定)により算出した。また、各受信アンテナでの E_b/N_0 は $P_{t,dBW} - PL - 10\log_{10}f_b - N_{0,dB}$ で与えられる。ここで、 $P_{t,dBW}$ は許容送信電力であり $20mW$ 、 PL はインプラント BAN 環境下での伝搬損、 f_b は周波数帯域幅であり、周波数帯域幅はデータレートに等しいものとした。以上から、システムマージン M_s は $[E_b/N_0]_{dB} - [E_b/N_0]_{spec,dB}$ で求められる。 $[E_b/N_0]_{spec,dB}$ は計算機シミュレーションにより得られた $BER = 10^{-3}$ を満たす最小の E_b/N_0 である。上記により導出させたシステムマージンの距離特性を図 5 に示す。図 5 においてダイバーシティ受信でブランチ間に相関がある場合においても、システムマージン $20dB$ での通信距離はシングルブランチに比べ $8cm$ の向上効果が得られた。

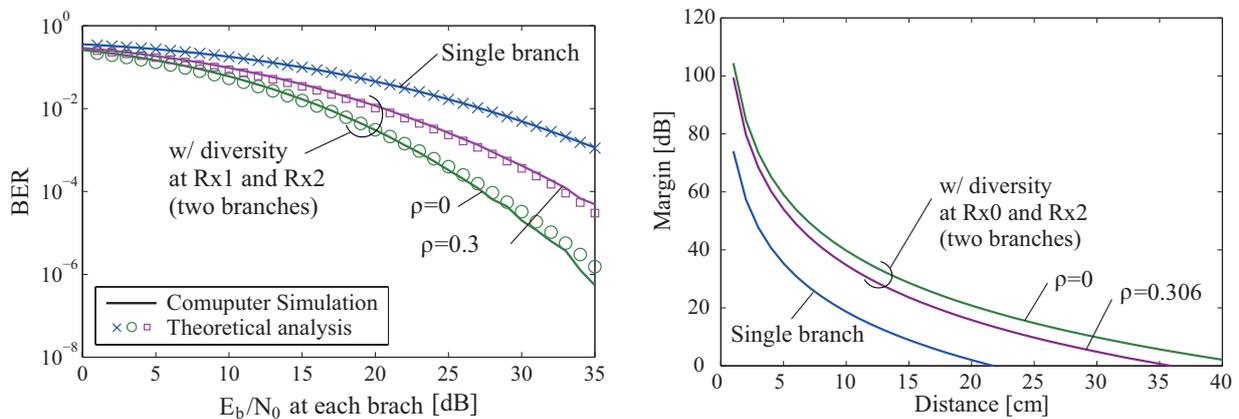


図 5. インプラント BAN 環境下における BER 特性 (左図) とシステムマージン (右図)

5 インプラント BAN 環境下におけるスループット特性評価

最後に、提案法によるスループット特性を導出するために計算機シミュレーションによる評価を行った。本評価においても、インプラント通信信号は人体によるシャドウイングの影響を受け、受信機のフロントエンドにおいて AWGN が重畳される環境を想定する。ここで、各変調方式のシンボルレート f_s は MICS 帯の許容周波数帯域幅である $300kHz$ としている [9]。また画像伝送を想定し、パケット長を MPEG2-ts を考慮して $1020bit$ とし、通信規格 IEEE802.15.6 準拠の MAC (Medium Access Control) 層における再送制御を考慮して瞬時スループットを算出した。なお、本節では適応変調符号化方式の評価を目的とするためにダイバーシティブランチ数 1 とした。図 6 に算出した瞬時スループット特性の一部を示す。この結果より各 SN 比に対しスループット特性を最適化する符号化率や変調方式が異なることが分かる。表 2 に本研究で評価した各 SN 比区分における最適な変調方式と符号化率を示す。

AWGN 環境下での瞬時スループット特性と人体器官によるシャドウイング条件下で通信を行った場合の伝搬損の距離特性を基に適応変調を適用した人体通信路におけるスループット特性を導出した。本解析において、通信距離 d と SN 比の関係を定義する必要がある。送信電力 $P_{t,dBW}$ として MICS 帯で定められる $25\mu W$ すなわち $-46dBW$ とした。以上により算出されたブライント推定法による適応変調とプリアンブル信号を用いた適

応変調, 適応変調を用いない従来法における平均スループットと最大スループット特性を図7に示す. ここでプリアンブル信号は, 現状のカプセル型内視鏡の通信で規定されている 64bit 長のランダムな信号系列を用い, 従来法の変調方式は QPSK とした. また平均スループットの算出は, 各観測点での瞬時 SN 比におけるスループットの平均とした. 図8よりブラインド推定法において平均スループット特性は 0.5Mbps を達成し, 従来法と比較し約 2.5 倍の改善効果が得られた. また, プリアンブル信号を用いた適応変調方式と比較しても平均スループット特性は約 0.1Mbps の向上効果, 最大スループット特性は約 0.3Mbps の向上効果を得られた. 本論文では, スループット特性評価においてはパケット送信に用いるヘッダによるスループット低下を考慮しており, 本研究における推定法を用いることによるスループット特性の向上効果を得られることが分かる.

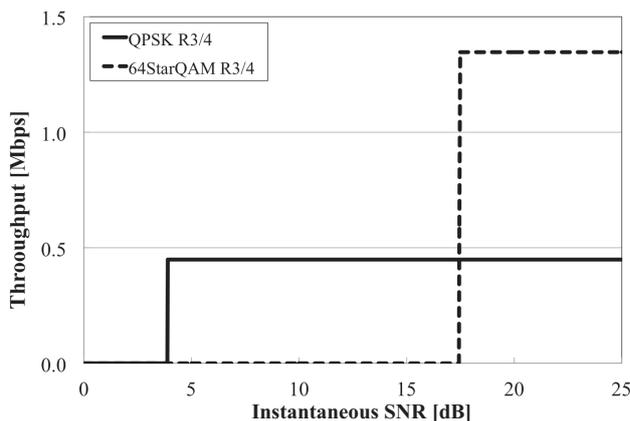


図6. 瞬時スループット特性の解析例

表2. SNR比に対する変調多値数と符号化率

SN 比 [dB]	Modulation scheme	Code rate
~-2	BPSK	1/4
-2~-1	QPSK	1/4
1~4	QPSK	1/2
4~11	QPSK	3/4
11~18	64 Star QAM	1/2
18~23	64 Star QAM	3/4
23~33	128 Star QAM	3/4
33~39	64 Star QAM	Uncoded
39~	128 Star QAM	Uncoded

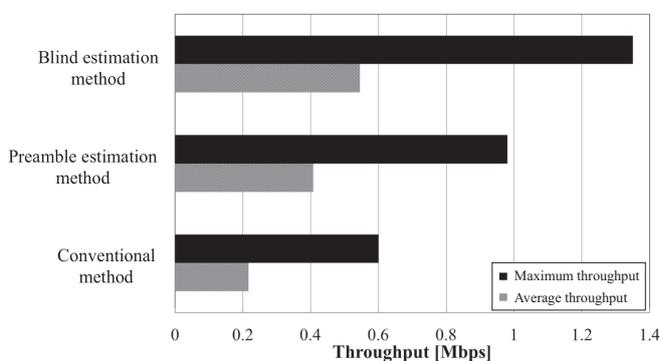


図7. インプラント BAN におけるスループット特性

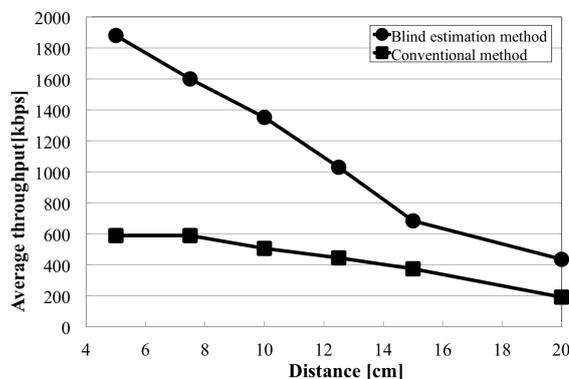


図8. スループットの距離特性

5 結論

本研究は, MICS 帯カプセル型内視鏡の伝送速度が数百 kbps 程度と低速に留まっている問題に対して, 多値変調方式(Differential star QAM など)を採用することで, 利用周波数帯域幅 300KHz の制限下においても伝送速度の高速化が可能であることに着目した. また, 多値変調方式での課題である通信の信頼性の低下に対しては受信ダイバーシティを導入することでたち変調方式の高速性の利点を損なうことなく, 信頼性の観点からも特性向上の可能性について検討した. さらに, 多値変調方式の変調多値数や誤り訂正符号の符号化率を通信路の状況に応じて適応的に変化させる適用変調符号化を取り入れることでさらなる伝送特性の向上を検討した. 適応符号化変調において変調多値数や符号化率を効果的に割り当てることを目指し, M 相モーメントを用いたブラインド推定法によりインプラント BAN 環境下で SN 比を精度よく推定する方式を開発し

た。これらの提案伝送方式に対して人体器官によるシャドウイング条件下におけるスループット特性とスループットの距離特性の算出による定量的評価を行った。

受信ダイバーシティ方式による多値変調伝送では、インプラント BAN 環境下においてもダイバーシティ利得 2 をおおよそ達成できていることが確認でき、ダイバーシティ受信でブランチ間に相関がある場合においても、 $BER=10^{-3}$ においてシングルブランチに比べ E_b/N_0 約 12dB の向上効果が得られていることも確認した。モーメント法によるブラインド推定に基づいた適応符号化変調方式の有効性においてもインプラント BAN 環境下での定量的なスループット特性を評価し、多相 Star QAM 変調方式まで拡張したブラインド推定法のスループットの距離特性を導出した。その結果、適応変調の適用によるスループット特性の大幅な向上が確認でき、平均スループット特性評価では、本提案方式は従来方式と比較し大幅な改善効果が得られた。例えば、スループットの距離特性評価において、適応符号化変調を導入することで通信距離 10cm では従来のスループット特性の約 2.7 倍に相当する 1.4Mbps を達成することができた。以上により、本研究開発を通して研究目標であるインプラント BAN 環境下での高速・高信頼伝送方式の開発を達成でき、その有効性についても検証が行われた。

【参考文献】

- [1] J. Wang and Q. wang, *Body Area Communications*, Wiley, 2013.
- [2] H.B. Li and R. Kohno, "Body Area Network and Its Standardization at IEEE 802.15. BAN," *Advances in Mobile and Wireless Communications*, pp. 223-238, Springer, 2008.
- [3] E. Monton, J.F. Hernandez, J.M. Blasco, T. Herve, J. Micallef, I. Grech, A. Brincat, and V. Traver, "Body area network for wireless patient monitoring," *IET Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 215-222, Feb. 2008.
- [4] M. R. Yuce and T. Dissanayake "Easy-to-Swallow wireless telemetry," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 13, no. 6, pp. 90-101, Sept.-Oct., 2012.
- [5] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time-hopping spread spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, pp. 679-691, Apr. 2000.
- [6] IEEE Standard for local and metropolitan area networks Part 15.6: Wireless Body Area Networks, Feb. 2012.
- [7] 太平 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.
- [8] 小野坂直城, 安在大祐, 王 建青, "400MHz 帯インプラント通信における SN 比ブラインド推定と適応変調を用いたスループット特性向上の検討," 信学技法, vol. 115, no. 438, pp. 57-62, 2016.
- [9] D. Anzai, S. Aoyama, M. Yamanaka, and J. Wang, "Impact of spatial diversity reception on SAR reduction in implant body area networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95-B, no.12, pp. 3822-3829, Dec., 2012.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Throughput Evaluation on Multilevel Modulation with Local Frequency Offset Spatial Diversity for 400MHz Band Implant Communications	IET Microwaves, Antennas & Propagation.	2016 年 2 月 (査読中)
400MHz 帯インプラント通信における SN 比ブラインド推定と適応変調を用いたスループット特性向上の検討	電子情報通信学会 2016 年度第 4 回ヘルスケア・医療情報通信技術研究会	2016 年 1 月
Simultaneous estimation of WCE moving distance and heading direction based on RSSI-based localization	10th EAI International Conference on Body Area Networks	2015 年 9 月

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	電子情報通信学会 2016 年度第 2 回ヘルスケア・医療情報通信技術研究会	2015 年 7 月
--	--	------------