

論文の内容の要旨

論文題目	六角形格子上の積符号を用いた符号化変調方式の提案と Wireless Body Area Networkへの応用
学 位 申 請 者	北原 裕久

近年、情報通信機器の小型化が進み、様々な分野への応用が図られている。そのうちの一つに、医療やヘルスケアへの応用技術として、Wireless Body Area Network (WBAN)がある。WBANにおいては人体の内外に取り付けたセンサで測定される体温等の生体情報を近接機器へ高信頼度でかつ長期間伝送し続けることが求められるため、センサ自身を小型化し、駆動力として、ボタン電池などの小規模な電源を用いて、システム全体の省電力化を図る必要がある。

信号送信において、消費電力や効率が特に問題となるのは電力増幅器である。一般に、電力増幅器は飽和出力レベルに近い方が電力効率は高くなるが、飽和出力レベル近傍では出力に歪みが生じる。そのため、信号にレベル変動が存在する場合には、飽和出力レベルよりも変動分だけ出力を抑える必要があり、この差をバックオフと呼ぶ。この信号変動レベルの指標には、ピーク対平均電力比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) が用いられる。PAPRが高い信号では、電力増幅器のバックオフを大きくとる必要があり、電力効率は低下する。

信号の電力効率を追求する従来の研究としては、振幅位相変調 (Amplitude Phase Shift Keying, APSK) をベースにしたものと六角形格子をベースにしたものが多くみられる。APSKをベースにした方式では、リング比や位相の設計が課題となり、六角形格子をベースにした方式では信号点配置の形が必ずしも等方性を満たさず歪 (いびつ) になるため PAPR の点で不利となる。

本研究では、変調方式と符号化方式に着目し、電力効率の向上を目指した六角形格子上の符号化変調方式を提案する。本来、等方性を有する六角形格子の信号点数は19点、37点や61点であり、基本的に2のべき乗とはならず、ビット単位で表された情報データを伝送する場合には未使用の点が存在するため等方性が崩れてしまう。

従来研究における2のべき乗個を用いた六角形格子の研究例では、矩形直交振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) よりも PAPR が高いという報告があり、等方性を崩さない方式が必要となる。そこで、提案符号化変調方式では、19のようにその数で六角形格子が等方性になるような値を法とする剰余類環で定義される整数符号を利用した積符号を用いる。整数符号は、最近傍誤り

を訂正可能な符号であり、遠方より近接誤りの方が確率的に高いと言う現実的通信路に適した特徴がある。また、一般的に複数の誤り訂正符号を組み合わせると誤り訂正能力を向上できることが知られている。

本論文においては、誤り訂正能力の向上のため、負巡回符号又はリード・ソロモン符号との積符号を構成した。そして、19点、37点及び61点において非符号化時、整数符号使用時及び積符号使用時の比較を行った。

シミュレーションの結果、整数符号とリード・ソロモン符号の積符号が、他の符号の結果と比べ最も高い符号化利得を得ることができた。また、QAM上で同様の符号化変調方式を行った結果との比較を行い、Bit Error Rate (BER) が10⁻⁵において、0.8から1 dBの符号化利得が得られた。また、提案符号化変調方式を六角形格子とQAMに適用した場合のPAPRを比較すると、信号点数の増加に対して、六角形格子のPAPRの増加はQAMのPAPRよりも緩やかであり、電力増幅器のバックオフが小さくて済み、電力効率の改善が可能であることを確認した。したがって、提案符号化変調方式は、QAMと比較して電力効率、誤り率の両方の観点から有利性を確認できた。そこで、19点六角形格子における整数符号とリード・ソロモン符号の積符号を提案方式としてWBANへ応用することとした。

WBANへの提案方式の適用を行うにあたり、人体の歩行動作を測定するためにマーカ一等の不要な画像キャプチャ方式のモーションキャプチャであるKinect2を用いる簡易的な手法を用い、その結果から歩行動作を行う人体の電磁界シミュレーション用モデルを作成した。そして、人体モデル上の送信点(胸部)にパッチアンテナを設置するとともに、受信点(左手首、左ひざ、左肩)を設定し、有限差分時間領域(Finite Difference Time-Domain)法により、各タイミングでの受信電界強度を求めた。そして、受信点に無指向性アンテナを仮定して時系列的な伝搬特性の変動を算出した。

その上で、WBANの規格であるIEEE802.15.6で定義された方式と提案方式のBER特性を比較し、提案方式はBER=10⁻⁵において7.1dBの符号化利得が得られることを確認した。この符号化利得を実際の2.4GHz帯のチップ状送受信機の消費電力に換算すると、送信可能時間が約1.5倍に増加することに対応している。この値には、送信回路自身の消費電流も加味されているため、さらにその削減が可能ならば、より一層の送信可能時間の増加が期待される。

さらに、提案方式及びWBANの規格方式のBERと、時系列的な伝搬特性の変動を基とし、受信点ごとに雑音強度と増幅器の利得の仮定を行うことで、歩行時のBERの変動特性を求めた。そして、測定期間中のBERを一定以下とするために必要な受信側の利得を比較し、提案方式により必要利得を削減可能であることを確認した。

本研究から、六角形格子を用いた提案符号化変調方式が、電力効率と誤り率の両方を追求できることが分かった。また、提案符号化変調方式は、WBANにおいても従来規格と比較して電力の削減に寄与できることを確認した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名	北原 裕久
審査委員主査	森田 啓義
委員	李 還幫
委員	小川 朋宏
委員	大坐 晶 智
委員	安藤 芳晃

近年、情報通信機器の小型化とワイヤレス化が盛んに進められており、様々な分野への応用が検討されている。その一つに、ヘルスケアや医療分野への応用技術であるWireless Body Area Network(WBAN)がある。これは、人体の内外に取り付けられたセンサで測定される体温、血圧や心拍数といった生体情報を近接する機器へ伝送する技術である。そこではセンサの小型化や高信頼度な情報伝送のみならず徹底した省電力化が必要条件となる。

本論文は、送信信号のピーク対平均電力比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)と高信頼度性の両面から上記の条件を満たす優れた符号化変調方式を提案し、シミュレーションによって提案符号をWBANに適用し従来法に比べて高信頼度で省電力化が達成できることを確認し、その有効性を実証した。本論文は以下の7章による構成である。

第1章では、本論文の研究背景、目的、本論文の構成が述べられており、通信機器の小型化に伴う電力効率の必要性を明らかにし、それらを解決する提案方式の概要が述べられている。

第2章では、従来研究事例から電力効率改善の課題を探求し、課題点を明らかにしている。六角形格子を用いた従来研究においては、平均エネルギーでは有利であるが、PAPRに関してはQAMと比べ不利である点が指摘されている。さらに、六角形格子のPAPRを低減させるために、対称性・等方性のある六角形格子上における符号化変調方式に整数符号を応用することで課題を解決するという研究指針が掲げられている。

第3章では、前章で提案する符号化変調方式で用いられる誤り訂正符号について説明されている。本研究で用いる符号は、すべて線形符号や組織符号である。リード・ソロモン符号は、代表的な非2元BCH符号の一種である巡回符号であり、負巡回符号はLee距離誤りを行う符号、整数符号は一般化Lee距離誤り訂正を行う符号であり、六角形格子上で定義されることが述べられている。

第4章では、提案符号化変調方式の構成法が説明されている。対称で等方性の

ある六角形格子の信号点数は2のべき乗個とはならない。一方、情報シンボルに対応させる信号点の数は処理の容易さを考慮すると2のべき乗個となるため、ビット列の割り当てが生じない信号点が発生する。そのため、非ビット割り当て信号点を指定した上で、ビットレベルでの誤り低減のために、隣接信号点間のハミング距離を抑えるビット割り当てアルゴリズムが提案されている。また、本研究では、シンボルレベルでの誤り低減のために、水平方向に負巡回符号又はリード・ソロモン符号、垂直方向に整数符号を用いる積符号を提案している。この積符号によって、整数符号に訂正能力を超える誤りが加わった場合、誤ったシンボルが出力されるが、その数がリード・ソロモン符号の訂正可能範囲であれば誤り訂正が可能となる。

第5章では、前章までで説明がなされた提案符号化変調方式についての評価が示されている。信号点数の増加に対して、QAMと比べ六角形格子のPAPRの増加は低く抑えられており、電力効率の改善が可能であることを確認している。次に、BERの比較においては、整数符号とリード・ソロモン符号の積符号が最もBERを改善したことが示された。また、整数符号とリード・ソロモン符号の積符号では、同一BERを達成する E_b/N_0 が19点格子上の積符号で最も抑えられ有利であることが確認された。以上より、19点格子上の符号化変調方式が次章におけるWBANへの適用方式として用いられている。

第6章では、Kinect 2を用いた歩行動作の簡易測定、歩行を模した時系列的な伝搬路モデルの作成とその電磁界解析結果、提案符号化変調方式とWBANの規格方式の比較結果が示されている。Kinect2による測定結果を基に時系列モデルを作成し、胸部の送信アンテナと左肩、左手首、左ひざとの間の減衰比として伝達係数の時系列的な変動が求められている。一方、提案方式と規格上のD8PSK上のBCH符号を用いる方式とのBERを比較し、7.1 dBの符号化利得を確認している。これは、TI社のトランシーバーモジュールCC2500を例にすると送信可能時間を最大1.5倍にする利得に相当する。以上の結果からさらに歩行時のBERの変動特性を求め、提案方式により受信端でBERを一定レベル以下まで低減させるために必要な利得を削減可能であることを確認できた。

第7章では、本論文のまとめが述べられる。本論文では、省電力な符号化変調方式の提案として、等方性のある六角形格子上の整数符号を用いた積符号について検討を行った。各格子点数やQAM上の積符号の比較から、19点格子上の整数符号とリード・ソロモン符号の積符号がBER及びPAPRの点から有利であることを確認しWBANへの適用に用いることとした。次に、提案符号化変調方式のWBANへの応用を検討した。まずKinect2により、歩行動作を測定した。次に測定結果を基に胸部等に送受信点を設定した歩行モデルを作成し、伝達係数の変化を算出した。また、規格方式と比較し提案方式の符号化利得7.1 dBを確認し送信可能時間の増加可能を確認した。また、歩行時のBER変動特性の比較から、受信利得の削減可能を確認した。最後に、今後の課題として、ビット割り当てなどのマッピングについての検討、さらなる大きな信号点数での符号化変調の検討、変調波でのフィルタやフェージング等の検討等を示した。

以上、本論文は、六角格子上で定義された整数符号とリード・ソロモン符号の積符号を用いることによって高い信頼度と省電力な符号化変調方式が構成できること、ならびに、シミュレーションからWBANへ応用した場合の符号化利得をIEEE規格方式と比較し、提案方式の有効性を確かめている。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。