

氏名	おおしま しょう いち 大 嶋 尚 一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成20年9月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻
学位論文題目	超高速無線通信用マルチキャリア MSK システムの研究
指導教員	東北大学教授 高木 直
論文審査委員	主査 東北大学教授 高木 直 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学教授 安達 文幸

論文内容要旨

1 序論

近年の情報化社会の拡大に伴い、高速・大容量コンテンツを扱う機器が増加している。このような機器同士は、相互接続時の利便性や携帯機器による屋外利用などの観点から、無線による伝送が求められている。本研究は、特に通信エリアが 10m 以内という近距離において、2Gbps を超えるような超高速の無線通信を実現することを目的としている。使用する帯域は、1チャンネルあたり 2.5GHz もの広い帯域が使用可能である 60GHz 帯である。このような無線通信システムを実現するには、特に2つの問題がある。1つ目は、高速なデータ信号を扱う必要性からであり、高速な信号を処理するため AD 変換器・DA 変換器の高速化やアナログ回路の広帯域化が必要となる。2つ目の問題は、ミリ波帯を用いることに起因する。ミリ波帯におけるアナログ素子は現在研究途上であり、特に増幅器の出力に制限があるため、PAPR の大きい通信方式を使用する際には出力電力を規定値よりも下げなければならぬ可能性がある。これら問題を解決するため、本論文ではマルチキャリア MSK システムを提案している。このシステムの特徴は、一次変調に PAPR が 0dB の MSK 変調を採用し、サブキャリアの信号を個別にアナログ変換し増幅することにある。全体としてデバイス数は増加するものの、サンプリング速度や信号処理帯域は使用するサブキャリアの本数に応じて低減可能であり、また、PAPR は増幅器において問題とならなくなる。本論文では、マルチキャリア MSK システムを用いて高速な無線通信を実現する。まず、汎用部品を用いて実際にシステムを試作する。次に、RF 帯域の低減手法を提案する。続いて、広帯域な信号処理を行うための直交変復調器の提案を行う。以上の成果により、超高速無線通信はマルチキャリア MSK システムを用いて実現可能であることを示す。

2 マルチキャリア MSK システムの設計・試作・評価

本章では、マルチキャリア MSK システムを、汎用部品を用いて設計・試作・評価した結果について述べた。

システム全体の設計では、まず MSK の変復調ブロックを決定し、オフセット QPSK に正弦波重み付けを行うこと

でMSK変調信号を生成することとした。サブキャリア数は4本とし、1本あたり125Mbps、全体で500Mbpsの通信が可能となるよう設計し、各サブキャリアの中心周波数は2~3.5GHzとした。

システムの試作では、設計した値に基づき、送信側のデジタル部・直交変調器・直交復調器・受信側のデジタル部を、汎用部品を用いて実現した。送信側・受信側のデジタル部にはそれぞれFPGAと4台のAD変換器・DA変換器を搭載しており、サブキャリアごと個別に処理を行うことでサンプリング速度を低減した。送信側では、データの直並列変換、データ列のフレーム化、MSK変調、DA変換を行うブロックをそれぞれ設け、受信側では、その逆処理を、シンボル同期・フレーム同期処理を加えて行っている。直交変調器・復調器は、サブキャリア信号を個別に処理するため、4組の試作を行った。合波器・位相器は分布定数型のものをプリント基板上のパターンにより実現し、増幅器やミキサはHittite社ICをプリント基板上に実装し使用した。

試作したシステムの評価では、500Mbpsで 10^{10} ビットのデータを3回送受信した結果、PAPRが1.4dBで誤りビット数が0での通信を確認した。これは現状の無線LANであるIEEE802.11a規格と比較して、PAPRが約10%に、通信速度が約10倍となっており、本システムを用いることで低いPAPRでの高速無線通信が実現可能であることを実証した。

3 マルチキャリアMSKシステムの帯域低減手法

本章では、マルチキャリアMSKシステムにおける帯域低減手法について述べた。

マルチキャリアMSKシステムを用いて2Gbpsの速度を有する通信を行う際には、スペクトラムのメインローブの帯域が3GHzとなってしまう、60GHz帯の規格値である2.5GHzを超過してしまう。この解決策として、サブキャリア同士のスペクトラムを重ね合わせ送信する手法を用いる。その際に問題となるのが重なり合ったスペクトラムにより発生する干渉波であるが、この干渉波除去として、2つの方法を提案した。

1つ目は、サブキャリアの信号同士を直交化させる方法である。この方法の特徴は、理想状態では誤り率特性が理論値と同等の値が得られ、帯域幅が従来の75%、2250MHzまでの低減が可能となった。しかしながら、サブキャリア間でのキャリア信号の周波数・位相同期を行う手法が別途必要となり、現時点のミリ波におけるPLL素子の性能を考慮すると特性劣化が大きくなるという問題が発生する。

2つ目は、受信側に狭帯域フィルタを用いる事で、重なり合ったスペクトルを除去する手法である。この場合の特徴は、サブキャリア間でのキャリア信号の周波数・位相同期が不要であるため、現時点での実現が容易である。受信フィルタとして125MHzのガウスフィルタを使用した場合、帯域幅が従来の75%、2250MHzへと低減でき、誤り率 10^{-3} を得るのに必要となる E_b/N_0 の値は、理論値から0.3dBの劣化量に収まっていることが分かった。更に2章で試作したシステムを用いて測定を行った結果、十分に復調が可能である事を示した。

以上より、マルチキャリアMSKシステムはサブキャリアのスペクトルを重ね合わせて送信することにより、帯域

の低減が可能である事を実証した。

4 広帯域直交変復調器の設計

本章では、広帯域な直交変復調器の設計について述べた。

2Gbps もの高速通信を行うには、アナログ信号を広帯域に処理する回路が必要となる。このため、直交変復調器に着目しその広帯域化を図ることとした。特に問題となるのは、直交変復調器内で用いる位相器の広帯域化・高性能化である。4~6.5GHz を IF 帯とし直交変復調器を実現する際に、従来の位相器である 2 段の PPF を用いた場合に関して TSMC 社 0.18um Si-CMOS プロセスのデータを用いて設計を行った。その結果、製造プロセスのばらつきがある場合は帯域内で 15 度程度の位相誤差が発生する事がわかった。これは送受信で最悪 30 度の位相誤差が発生する可能性があり、従来の位相器を用いた直交変復調器の広帯域化は困難であった。

そこで、従来の位相器の後段に加算回路・減算回路を付加することで、従来位相器に位相誤差があっても出力の位相誤差は理論的に 0 度となる新しい位相回路を提案した。この回路では、位相誤差が振幅誤差へと変換される。TSMC 社 0.18um Si-CMOS プロセスを用いて提案位相回路を設計した結果、プロセスばらつきがあっても帯域内で位相誤差が 0.2 度未満になっていることが判った。そこで直交復調器を設計し 500Mbps の速度を有する MSK 信号を復調する場合のシミュレーションを行った。その結果、従来の PPF を位相器として用いる直交復調器の場合では、位相誤差が 30 度ある場合、誤り率の劣化量が 1.3dB 程度となったが、提案位相回路を用いる場合では、従来の位相器部分に位相誤差が 30 度あっても誤り率の劣化量は 0.3dB 程度となることがわかった。

以上より、直交変復調器の広帯域化は提案する位相回路を用いることで実現可能であることを示した。

5 結論

本研究の成果により、低 PAPR で高速無線通信を実現するには、マルチキャリア MSK システムを用いることにより可能であることを示した。その際に、サブキャリアのスペクトルを重ね合わせて送信することで帯域が低減可能となる。また、高速通信に伴うアナログ回路の広帯域化には、提案する直交変復調器を用いることで十分高性能化が図れることを示した。

論文審査結果の要旨

情報化社会の拡大により、更なる高速無線通信の実現が求められているが、高速化に伴うサンプリング速度、信号帯域幅の増加が無線通信端末の小型化・低消費電力化の大きな課題となっている。さらに高速化のために多値変調や OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 変調を用いることにより、無線信号のピーク対平均電力比 (PAPR: Peak to Average Power Ratio) が増加することで送信電力増幅器の高効率動作が阻害されることも深刻な問題である。本論文は、PAPR が最小となる MSK (Minimum Shift Keying) 変調信号をマルチキャリア伝送し、サブキャリアの信号を個別に信号処理することでサンプリング速度や信号帯域幅の抑制、さらには PAPR の低減が可能となるマルチキャリア MSK システムに関する研究をまとめたものであり、全文 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、マルチキャリア MSK システムの提案を行い、その設計・試作・評価を行っている。通信速度 500Mbit/s を実現可能とするデジタル信号処理部と直交変復調器を設計・試作した結果、PAPR 1.3dB、誤り率 10^{-10} 以下での通信を実現している。これは、IEEE802.11a 規格の無線 LAN と比較して、通信速度が 10 倍に高速化され、かつ PAPR が約 9dB 低減される結果であり、無線通信の高速化・高効率化実現の上で非常に重要な成果である。

第 3 章では、マルチキャリア MSK システムの帯域幅抑制法について述べている。サブキャリアスペクトラムの重ね合わせで生じる隣接チャネルからの干渉を除去するため、(1) MSK 信号を直交配置する手法と (2) 受信フィルタを用いる手法を提案している。両提案方式とも、シングルキャリア MSK 変調信号に比べ、帯域を 75% に低減できることを示した。また、(2) の提案方式について実測評価を行い、帯域を 75% に低減した時の誤り率の劣化量を 0.3dB に抑え、かつ実装が容易であることを示し、本提案方式を実現する上で非常に有益な結果を得ている。

第 4 章では、高速無線通信に不可欠な広帯域・高精度な直交変復調器について述べている。従来の 90 度移相器の後段に加算・減算器を付加することにより、広帯域にわたり位相誤差が小さな移相回路を提案し、これを用いることで直交変復調器の広帯域・高精度化を実現している。従来の 90 度移相器に位相誤差が 15 度ある場合でも、提案回路を用いることにより位相誤差を 0.2 度以下にすることができ、その結果、500Mbit/s の速度を有する MSK 変調信号を復調する際の所要 E_b/N_0 劣化量を 0.3dB にできることを示している。広帯域化が必要となる高速通信では、その成果はきわめて重要である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、高速・高効率な無線通信を実現するため、サンプリング速度や信号帯域幅の抑制、PAPR の低減を可能とするマルチキャリア MSK システムを提案し、システムの試作、帯域幅抑制法と広帯域直交変復調器の提案を行い、その有効性を示したもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。