

氏名（本籍） 白 戸 裕 史（神奈川県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 乙第 979 号
学位授与の日付 2018 年 3 月 19 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 OFDM 送信機の低消費電力化技術ならびに
システム性能向上技術の研究

論文審査委員 (主査) 教授 村口 正弘
教授 岩村 恵市 教授 長谷川幹雄
教授 浜本 隆之 教授 半谷精一郎
教授 八嶋 弘幸

論文内容の要旨

ブロードバンド無線通信システムにおいて幅広く使用される OFDM 信号は、周波数利用効率が高いことに加え、信号伝送の際の伝送路での反射波・散乱波等との干渉による波形歪（いわゆる周波数選択性フェージング）対策としてガードインターバル(GI)の導入により GI 時間以下の遅延波による品質劣化を防ぐことができることを特徴とする信号形式である。一方、OFDM は複数のサブキャリアによりそれぞれ独立した信号を並列伝送するため、平均電力対ピーク電力比 (Peak to Average Power Ratio; PAPR) が大きいことが広く知られている。このために、OFDM 送信機に配置される電力増幅器 (Power Amplifier; PA) は、バックオフを大きく設定することで平均電力と比べて大きなピーク振幅を歪なく線形増幅する必要がある。このことは、送信増幅器の電力付加効率(Power Added Efficiency; PAE)を低下させる要因となり、消費電力の著しい増大を招く。このためバッテリー駆動のため消費電力の制約が厳しい端末においては OFDM の導入は難しく、例えば LTE アップリンクにはシングルキャリアと同等の低 PAPR 特性を持つ SC-FDMA 方式が採用されている。

本論文では、OFDM 信号の PAPR を低減し PAE を改善することで OFDM 送信機の消費電力低減を図り、OFDM 方式を端末送信時に使用可能とすることを目的として、「標準規格を変更しない」既存システムに適用可能な技術と、「標準規格の変更が必要」な将来システム向け技術の大きく 2 つのアプローチから検討を行った。具体的には、①分離送信技術、②TDSS-SLM 信号の低演算量生成・復調技術、③CAZAC イコライザの 3 つの技術について提案を行ない、それぞれの提案技術について PAE の改善効果、伝送品質を確認するため

の Bit Error Rate 特性について評価した他、所要の演算量や不要な帯域外放射がないか確認するための帯域外特性について評価を行った。

論文審査の結果の要旨

本審査では、研究の目的、背景、社会的貢献性、技術の新規性、信頼性、将来性および申請者の研究者としての創造力、専門知識、外国語を含む語学力に関して審査を行った。先ず研究の目的、背景に関しては、我々の社会生活において欠くことのできない必需品となっているスマートフォンを支える移動体通信システムの高性能化を大幅に加速する技術の提案と実証であり、社会的貢献性が十分にあるものと判断する。具体的には、超高速無線通信の主流となる OFDM 方式（直交周波数分割多重方式）を上り回線（電池駆動端末から基地局への送信）でも使用可能とする画期的な技術の提案と実証である。

OFDM 方式は伝送路での反射波や散乱波に起因する所謂「周波数選択性フェージング」環境下において伝送品質の劣化を抑圧可能な変調方式であり、デジタル TV や無線 LAN、移動体通信下り回線等々に幅広く使用されている。反面、OFDM の信号波形は振幅の変動幅が大きくなることが知られており、送信増幅器においては広い線形ダイナミックレンジを実現するために、バックオフを大きく取ることが必要となる。このため送信増幅器の電力付加効率（PAE: Power Added Efficiency）は低くなり消費電力が増大するという問題があった。本論文では、OFDM 信号のピーク電力対平均電力比（PAPR: Peak to Average Power Ratio）を低減し PAE を向上することで「低消費電力化」を図る一方、単に信号波形の PAPR を下げればよいのではなく、同時に「誤り率特性」を従来 OFDM と同等以上にできるよう「システム性能向上」との両立を図るため、伝送品質改善技術についても検討している。

本論文は、OFDM 信号の PAPR を低減するための技術として、(1) キャリア方式などを変更せずに既存システムに適用可能な技術と、(2) キャリア方式などの変更を伴う将来システムへの適用を想定した技術についてそれぞれ技術提案を行い、シミュレーションによる性能評価により、以下のような成果を得ている。

① 予め設定した閾値を基に、OFDM 信号を閾値に相当する振幅の“定振幅信号”と、元 OFDM 信号から定振幅信号を減算した“残差信号”に分解し別々に伝送する「分離送信技術」を提案し、送信増幅器全体での消費電力低減効果を定量的に示すと共に、静的なチャネルにおける MIMO (Multi Input Multi Output) 動作を確認し、提案法に MIMO を適用できることを示している。さらに、受信側での簡易な雑音除去処理を行うことで受信品質向上が可能で、従来 OFDM と同等以上の誤り率特性を実現できることを示している。

② 比較的大きな PAPR 改善効果を有する SLM (Selected Mapping) 技術のうち、送信

側での所要演算量が小さい方式として知られる TDSS-SLM (Time Domain Sequence Superposition-SLM) に対して、サブバンド分割の適用により所要の IFFT のポイント数を削減することで所要演算量をさらに削減した「低演算量信号生成技術」と、パイロット信号を利用して提案送信機に係るサイド情報を受信側で推定する「低演算量復調技術」を提案し、大幅な演算量の削減効果に加え、受信品質として従来 OFDM と同等の誤り率特性を実現できることを明らかにしている。

③シングルキャリアと同等の PAPR 特性を実現することが可能な CAZAC (Constant Amplitude Zero Auto-Correlation)イコライザの無線システムへの適用を検討するため、一例として無線 LAN への適用システムを提案して、スペクトル設計や無線フレーム設計について考察した結果、現行の無線 LAN 規格を一部変更するだけで信号伝送速度を維持しつつ CAZAC イコライザの適用が可能であることを述べている。加えて、提案システムにおける消費電力削減効果や伝送品質をシミュレーションにより評価することで CAZAC イコライザの有効性を確認している。即ち、送信増幅器の消費電力削減効果に加え、周波数選択性チャネルにおけるダイバーシチ利得が得られる伝送特性としても有利な方式であることも示している。

論文では、上記の提案技術はいずれも PAE を 1.5 倍から 2 倍程度改善できることを明らかにした。これは送信増幅器の消費電力を半減できることを意味しており、高い有効性を有することが確認できている。前述のように、消費電力低減の要請はバッテリー駆動が前提となる端末においてより顕在化する。また、いずれの提案方式においても適切なフィルタを適用することで、高い PAPR 低減効果を毀損することなく、周波数利用効率を低下させるような帯域外への不要放射が抑えられることも確認している。さらに、受信品質の観点からも、提案法はチャネルモデルにかかわらず従来 OFDM と比較して同等以上の受信品質が実現できることを確認している。

以上、審査の結果、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。