

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32678

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656256

研究課題名(和文) パーシャルレスポンスを用いる高効率無線パケットアクセスの研究

研究課題名(英文) Study on High Efficiency Radio Packet Multi-access Schemes Using Partial Response

研究代表者

佐和橋 衛 (Sawahashi, Mamoru)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：50449287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、Beyond Long Term Evolution (LTE)-Advancedの移動通信方式への適用を目指したFaster-than-Nyquist (FTN)を用いる非直交マルチアクセスの送信機・受信機構成の検討、及び周波数利用効率の改善効果の評価を行った。具体的には、直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)、及びシングルキャリアFDMAにFTNを適用した場合の送受信ダイバーシチを用いた送受信機構成を検討し、同一の周波数利用効率を実現する多値変調方式とブロック誤り率特性を比較評価した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated transmitter and receiver structures using Faster-than-Nyquist (FTN) and evaluated the improvement in the frequency efficiency of FTN aiming at the application for the systems beyond Long Term Evolution (LTE)-Advanced. More specifically, we investigated transmitter and receiver structures using FTN for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)/Offset Quadrature Amplitude Modulation (OQAM) and single-carrier FDMA with transmit and receiver antenna diversity schemes. We also compared the average block error rate of FTN with a multi-level modulation scheme which achieved the same frequency efficiency.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：移動通信 マルチアクセス パーシャルレスポンス Faster-than-Nyquist ターボ干渉キャンセラ OFDMA 受信ダイバーシチ 参照信号

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンの急速な普及に伴い、本格的なモバイルパーソナルインターネット時代が到来している。また、HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) や 1 x EVDO (Evolutional Data Only) などの高速パケットアクセスが第3世代(3G)移動通信方式のユーザ端末に標準機能として搭載され、また、Long Term Evolution (LTE) の商用サービスが開始され、本格的なモバイルブロードバンドサービスの提供が可能になっている。一方、移動通信ネットワークにおいて、特に下りリンクのデータトラフィックが飛躍的に増大しており、ITU (International Telecommunication Union) では、2010年から2020年の10年間にデータトラフィック量は1,000倍以上になると予想されている。近年ではビデオトラフィックなどの増大に伴い、ユーザー人当たりの通信情報量も飛躍的に増大している。移動通信に適用可能な有限の周波数スペクトルに対して、飛躍的に増大するトラフィックを低コストで提供するためには、1ビット当たりのビットコストを、一層低減する高効率なブロードバンド無線アクセス方式の確立が必要である。

2. 研究の目的

第3世代移動通信方式である W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 以降の無線方式では、システム容量の増大を実現するために、1セル周波数繰返しを用いられる。しかし、1セル周波数繰返しを用いるとセル端に位置するユーザは同一周波数帯域の大きな周辺セル干渉を受けるため、スループットが基地局近傍のユーザに比較して著しく劣化する。そこで、セル端ユーザのスループットを向上させるために、LTE-Advanced では、基地局間協調送受信 (CoMP: Coordinated Multi-Point Transmission/Reception)、中継伝送 (Relay) 伝送が検討されている。CoMP 送受信は、受信希望波信号電力対干渉及び雑音電力比 (SINR: Signal-to-Interference plus Noise power Ratio) の低いセル端ユーザのスループットを向上できるものの、セル端ユーザに複数セルの無線リソースを費やすため、周波数利用率、キャパシティの減少を招く。従って、周波数利用率、キャパシティの減少を招くことなく、セル端ユーザスループットを向上させるためには、ピークデータレート(周波数利用率)をさらに向上させ、受信チャンネル状態の良好なユーザに最小限の周波数・時間の無線リソースを割り当て、できるだけ多くの余剰の周波数・時間のリソースをセル端ユーザに割り当てる方法が有効である。これを実現するためには、ピークデータレートを LTE-Advanced で実現できる数ギガビット毎秒 (Gbps) 以上よりさらに超高速・大容量化する必要がある。そこで、本研究では、Beyond

LTE-Advanced への適用を目指して、ピークデータレートが数 10 Gbps 以上、ピーク周波数利用率が 100 bits/second/Hz 以上を目指す。ピークデータレートを向上するためには、システム周波数帯域をさらに広帯域化する方法がある。しかし、100MHz 程度以上の連続した超広帯域スペクトルを確保するのは容易ではなく、異なる周波数帯のスペクトルを合成して 1 つの無線リンクを生成する Spectrum aggregation が必要である。一方、Spectrum aggregation を用いる広帯域化はピークのデータレートの向上には有効であるものの、周波数利用率の向上は見込めない。

LTE 及び LTE-Advanced において、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 多重は、ピークデータレートおよび周波数利用率の向上に最も貢献した技術である。LTE-Advanced の下りリンクでは、最大 8 アンテナの MIMO 多重が規定されている。周波数利用率をさらに増大させる技術として MIMO 多重は非常に有効であるものの、アンテナ間のフェージング相関を考慮すると、8 程度以上を超えるアンテナの実装は特にユーザ端末では容易ではない。従って、MIMO 多重あるいは信号空間の多値などに加えて、周波数利用率を向上できる技術が必要である。

高効率な無線リソース割り当てと組み合わせる物理チャンネルの高密度化を行う非直交マルチアクセスは、周波数利用率をさらに増大させる有望なアプローチである。非直交アクセスでは、受信において干渉キャンセラの実装が必須になる。非直交マルチアクセスを実現する方法として、周波数および時間の 2 次元の無線リソースの割り当て単位であるリソースエレメント (RE: Resource Element) に他ユーザの情報シンボルを多重する重畳符号化 (Superposition coding) がある。しかし、重畳符号化では、同一 RE 内のシンボル間干渉 (ISI: Inter-Symbol Interference) が生じるため、所要の受信 SINR を満たすためには、拡散が必要であり、広帯域信号に拡散した場合の高速スケジューリングとの適用性の組み合わせ方法が課題である。一方、パーシャルレスポンス (PR: Partial Response) は、シンボル間の位相・振幅遷移に相関を与えることにより、送信帯域幅を狭帯域化する方法である。一定の送信信号帯域幅を仮定した場合に ISI 及びサブキャリア間干渉 (ICI: Inter-subcarrier Interference) を許容して送信シンボル数を増大する方法は、Faster-than-Nyquist (FTN) と呼ばれている。FTN 信号の生成法及び受信機での干渉キャンセラを用いる復調及び復号法は既に提案されている。FTN は、従来の直交マルチアクセスに比較して周波数利用率、ピークデータレートを向上することができる。

本研究課題では、直交周波数分割多重アク

セス(OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access), 及びシングルキャリア周波数分割多重アクセス(FDMA: Frequency Division Multiple Access)にFTNを用いた場合の送信部及び受信部構成を検討する。また, 信号空間の多値数を増大させた多値変調方式を比較対象として, 所要のブロック誤り率(BLER: Block Error Rate)の観点から周波数利用効率の改善効果を評価する。さらに, FTNを用いたときの受信アンテナダイバーシチの効果を明らかにする。

3. 研究の方法

FTNの理論解析, ビット誤り率の基本特性の評価は既に報告されているが, 陸上移動通信環境である時変のマルチパスフェージングチャンネルにおけるターボソフト干渉キャンセラ(SIC: Soft Interference Canceller)を用いた場合のFTNの誤り率, スループット特性の改善効果は明らかにされていない。特に, 従来の直交マルチアクセスにおいて信号空間の多値数を増大した多値変調方式との同一の周波数利用効率を仮定した場合の特性比較が必要である。そこで, FTNの周波数利用効率の改善を無線伝搬路を模擬したリンクレベルの計算機シミュレーションにより評価した。リンクレベルシミュレーションでは, 一对の送信機と受信機をマルチパスフェージングチャンネルの無線伝搬路を介して接続し, 受信機で測定した平均BLER特性を評価した。さらに, W-CDMA, HSDPA, 及びLTEで必須技術であった送信及び受信ダイバーシチ, MIMO多重を適用した場合のFTNの送信機及び受信機構成を検討し, 新規性を有する技術の特許化を行った。

4. 研究成果

(1) ターボ周波数領域等化の特性評価

本研究では, FTNにより生じたISI及びICIを受信機で除去するターボSICがキーデバイスである。ターボSICは, 誤り訂正復号器出力の対数尤度比(LLR: Log-Likelihood Ratio)から軟判定シンボル推定値を生成し, 各情報シンボルに与えるISI及びICIを生成する。まず, シングルキャリアFDMAにおいて, マルチパス干渉をターボSICと同様な原理・構成で除去するターボ周波数周波数領域等化(FDE: Frequency Domain Equalizer)の計算機シミュレーションプログラムを実装し, BLER特性を評価した。誤り訂正符号化(チャンネル符号化)にターボ符号および低密度パリティチェック(LDPC: Low-Density Parity Check)符号を用いた場合のマルチパス干渉の抑圧効果を検証した。さらに, ターボFDEにおけるチャンネル推定誤差の影響を示し, チャンネル推定精度を向上する繰り返しチャンネル推定を

用いた場合の平均BLERの改善効果を示した。

(2) FTNのマルチパスレイリーフェージングチャンネルにおける平均BLER特性評価及びアンテナダイバーシチ受信の効果の検証

直交周波数分割多重(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)/オフセット直交振幅変調(OQAM: Offset Quadrature Amplitude Modulation)を用いるFTNのマルチパスレイリーフェージングチャンネルにおける平均BLER特性を計算機シミュレーションにより評価した。FTN信号の生成法として, FTNシンボルを直交基底関数であるOFDM信号に射影するFTNマッピング処理を行うことによりOFDMと同じ逆高速フーリエ変換(IFFT: Inverse Fast Fourier Transform)を用いて生成する方法を用いた。各サブキャリア位置の情報シンボルの多重効率(FTN多重効率と称する)をパラメータにして特性を評価した。受信機では, ターボ符号のMax-Log-MAP(maximum a posteriori probability)復号器出力の事後LLR(a posteriori LLR)から軟判定シンボル推定値を生成し, 各シンボルに対するISI及びICIを生成した。

図1にQPSK(Quaternary Phase Shift Keying)変調のFTN多重効率 γ に対するターボSICを用いた場合の平均BLERが 10^{-2} を満たすための所要平均受信信号電力対雑音電力比(SNR: Signal-to-Noise power Ratio)特性を示す。受信アンテナダイバーシチのブランチ数が $N_{Rx} = 2, 4, 及び8$ の場合の特性を示す。ターボ符号の符号化率は $R = 1/2$ とし, ターボSICの繰り返し回数は $N_{TSIC} = 5$ とした。伝搬チャンネルモデルには, 6パスのTypical Urban(TU)モデルを用い, 最大ドップラ周波数は $f_D = 5.55$ Hzとした。比較のため, QPSKの2倍の周波数利用効率を有するCyclic prefix(CP)を用いる16QAM変調のOFDMの特性も示す。図1より, $N_{Rx} = 4$ 及び8のとき, $\gamma = 22/14$ の場合の $\gamma = 16/14$ のときからの所要平均受信SNRの増大は, それぞれ3.5及び2.5 dB程度の低い値に抑えられている。従って, 受信アンテナダイバーシチが, ターボSICを用いるFTNにおいて目標BLERを満たすための所要平均受信SNRの増大の抑圧に有効であることを示した。しかしながら, CPを用いる16QAMを用いた場合のOFDMは, QPSKを用いる $\gamma = 22/14$ のFTNに比較して, 目標BLERが 10^{-2} を満たすための所要平均受信SNRを低減できている。QPSKにFTNを適用した場合には, 2倍の周波数利用効率を実現できる16QAMに比較して, 同一の周波数利用効率の改善を満たすための所要平均受信SNRの低減効果は殆どないことがわかる。FTNで2倍の周波数利用効率の改善を実現すると, FTNを適用した16QAMは256QAM, FTN

を適用した32QAMは1024QAM, FTNを適用した64QAMは2048QAM相当になる。特に1024QAM以上の変調多値数の場合には, ユークリッド距離が非常に短くなるためマルチパスフェージングチャンネルでは, BLERが大きく劣化すると考えられ, FTNの適用性が期待できる。また, FTNを用いた場合, 同一のピーク周波数利用効率を実現する多値数の高い多値変調方式に比較して, 信号点間のユークリッド距離が長いため, Error Vector Magnitude (EVM)などの無線(RF)回路に対する要求性能を緩和できるメリットがある。

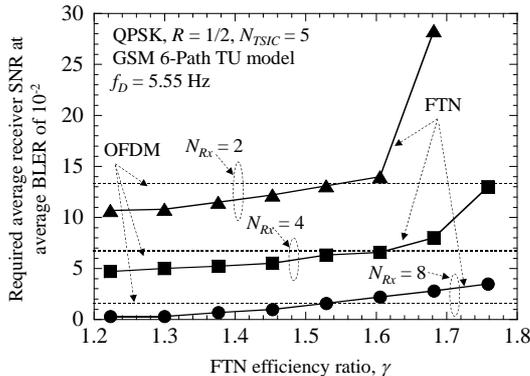


図1. FTNの多重効率に対する目標平均BLERが 10^{-2} を満たすための所要平均受信SNR特性

(3) 高精度チャンネル推定を行うためのFTNに適した参照信号多重の提案

OFDMAを用いるLTEなどで採用されているStaggered型参照信号(RS: Reference Signal)多重は, 時変の周波数選択性フェージングチャンネルにおいて高精度なチャンネル推定を実現できる。しかし, Staggered型RS多重のOFDMA/OQAMにFTNを適用した場合, RSは隣接するサブキャリアから大きなレベルのISI及びICIを受けてしまい, チャンネル推定精度の劣化を招く。そこで, 情報シンボルにFTNを適用して高密度多重を行う非直交多重REの領域とRSを多重する直交多重REの領域を時間分割多重(TDM: Time Division Multiplexing)する構成を提案した。RSは直交多重REの領域に多重されるため, ISI及びICIを受けることなく高精度にチャンネル応答を推定することができる。直交多重REの領域には, RSに加えて制御情報を多重することができる。計算機シミュレーション評価により, OFDM/OQAMを用いるFTNにおいて, 提案のTDMベースのRS多重を用いた場合の目標平均BLERが 10^{-2} を満たすための所要平均受信SNRは, 理想チャンネル推定の場合に比較して約1.5 dB程度の劣化に抑えることができることを示した。

(4) FTNに送信ダイバーシチを適用した場合の送受信部構成の検討

前述のように, FTNでは受信機でISI及びICIを推定して受信信号から差し引く繰り返し処理を行うターボSICが必須である。ISI及びICIは復号器出力のLLRから生成するため, ISI及びICIを高精度に推定するためには, アンテナダイバーシチが有効である。OFDM/OQAMを用いるFTNに空間・周波数ブロック符号(SFBC: Space-Frequency Block Code), 及び空間・時間ブロック符号(STBC: Space-Time Block Code)を適用した場合の, 送信機及び受信機構成を検討し, 特許出願を行った。

(5) シングルキャリアFDMAにFTNを用いた場合の送受信部構成の検討

LTEでは, シングルキャリアFDMA信号を周波数領域で生成する離散フーリエ変換(DFT: Discrete Fourier Transform)-precoded OFDMが採用されている。本研究では, DFT-precoded OFDMにFTNを適用した場合の送信部及び受信部構成を検討した。具体的には, チャンネル符号化及び変調マッピングを行った情報シンボルにFTNマッピングを行い, DFTにより周波数領域信号に変換し, 帯域制限, 周波数マッピング後, IFFTにより時間領域信号に変換し, FTN信号を生成する送信部構成, 及び対応する受信部構成の特許出願を行った。

(6) MIMO多重におけるFTNを適用した送受信部構成

10 Gbps以上のピークデータレートを実現するためには, FTNなどの非直交マルチアクセスとMIMO多重を併用する必要があると考えられる。そこで, FTNに適応変調チャンネル符号化(AMC: Adaptive Modulation and Coding)を用いるMIMO多重を適用した場合の送信機及び受信機構成を検討した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 6件)

- 1) 保志場 修平, 川村輝雄, 佐和橋 衛, “OFDM/OQAMを用いるFaster-than-Nyquistのマルチパスフェージングチャンネルにおけるブロック誤り率の基本検討,” 電子情報通信学会 信学技報 RCS2013-281, pp.151-156, 2014年1月。
- 2) 田中 良和, 川村 輝雄, 三木 信彦, 佐和橋 衛, “DFT-Precoded OFDMAを用いるターボ周波数領域等化における繰り返し判定帰還チャンネル推定のブロック誤り率特性,” 電子情報通信学会2013年総合大会 B-5-133, 2013年3月。
- 3) 田中 良和, 佐和橋 衛, “DFT-Precoded

OFDMAを用いるターボ周波数領域等化のブロック誤り率特性，”電子情報通信学会東京支部学生会 研究発表会B5, 2013年3月.

- 4) 田中 良和, 川村 輝雄, 三木 信彦, 佐和橋 衛, “DFT-Precoded OFDMAを用いるターボ周波数領域等化における繰り返し判定帰還チャネル推定のブロック誤り率特性，” 信学技報RCS2012-315, 2013年2月.
- 5) 田中 良和, 川村 輝雄, 三木 信彦, 佐和橋 衛, “DFT-Precoded OFDMAにおける繰り返し判定帰還チャネル推定を用いたときのターボ周波数領域等化のブロック誤り率特性，” 信学技報RCS2012-228, pp. 269-274, 2012年12月.
- 6) 佐和橋 衛, 樋口 健一, “干渉キャンセル技術を用いる超高速ブロードバンドマルチアクセス技術，” 電子情報通信学会2012年総合大会BP-2-1, 2012年3月.

〔産業財産権〕

出願状況（計3件）

名称：無線基地局、ユーザ端末、無線通信方法及び無線通信システム

発明者：佐和橋衛，川村輝雄，岸山祥久

権利者：NTT ドコモ

種類：特許

番号：特願 2014-41753

出願年月日：2014年3月4日

国内外の別：国内

名称：無線基地局、ユーザ端末、無線通信方法及び無線通信システム

発明者：佐和橋衛，川村輝雄，岸山祥久

権利者：NTT ドコモ

種類：特許

番号：特願 2014-39562

出願年月日：2014年2月28日

国内外の別：国内

名称：ユーザ端末、無線基地局、無線通信方法及び無線通信システム

発明者：佐和橋衛，川村輝雄，岸山祥久

権利者：NTT ドコモ

種類：特許

番号：特願 2014-39578

出願年月日：2014年2月28日

国内外の別：国内

取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐和橋 衛 (SAWAHASHI MAMORU)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：50449287