

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760278

研究課題名（和文） サイクリック・プレフィックス転送方式での無線周波数利用効率向上手法の開発

研究課題名（英文） Development of the increasing method of wireless frequency usage efficiency in cyclic prefix transmission scheme

研究代表者

韓 承鎬 (HAN CHENGGAO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：10400714

研究成果の概要（和文）：

三年間の研究を通じて、低速移動、高速移動および誤り訂正符号を適応するすべての場合において、研究代表者らが提唱する CRV-OFDM 無線通信方式が無線 LAN やデジタル放送などで使われている無線通信方式に比べて優れていることを理論解析と計算機シミュレーションにより検証した。また、誤り訂正符号の適応時に必要な高性能インターリーバを設計し、高速移動時に起こる干渉対策と高性能通信システムのための信号設計手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

Through 3-years research, we have shown that both at low- and high-speed movement scenarios, with and without error correcting code, CRV-OFDM wireless communication system, we proposed, always outperforms the system adopted by wireless LAN and digital terrestrial television by theoretical analyses and commuter simulations. We also designed the high-performance interleaver which is necessary for a wireless communication system with error correcting code, and proposed the mitigation scheme of inter-channel interference, caused by a high-speed movement, and the signal design method for high-performance communication system.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,600,000 | 540,000 | 2,140,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2011年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 1,020,000 | 4,220,000 |

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：通信方式（無線、有線、衛星、光、移動）

1. 研究開始当初の背景

21世紀の基幹産業となっている情報通信は、有線通信技術、無線通信技術および装置化技術の三つの基幹技術から支えられている。その中で装置化技術の中心となる LSI 技術および有線通信技術の中心となる光ネ

ットワーク技術の開発は比較的順調であるが、無線通信技術の開発においては、携帯電話利用者数の急速な増加、無線 LAN の普及等に伴い無線通信の需要が爆発的に増加し、無線周波数資源が不足しているという重大な問題を抱えている。そのため、無線周波

数資源は現在最も緊迫な資源の一つとなっており、無線周波数資源の有効利用技術の確立は世界中から求められている。

無線周波数利用効率を向上するために、研究代表者らは以前 V-OFDM と呼ばれる DFT (離散フーリエ変換) 行列を利用した無線通信方式を提案し、日本国内の特許を取得した上、更に海外 12ヶ国へ出願したが、V-OFDM 方式は現在無線 LAN や地上デジタル放送などで使われている OFDM(直交周波数分割多重)方式の数倍高い無線周波数利用効率を実現できる。また、V-OFDM は OFDM 方式で問題となっている高いピーク対平均電力比(PAPR)なども緩和できるので、世界中から注目されており、実用の気運が高まっている。しかし、日本国内特許は我々によって取得しているが、米国特許はほぼ同時期に Xia らが取得している。

この領域での日本の優位性を保つために、我々は V-OFDM 方式の性能について理論解析を行い、V-OFDM 方式の通信性能が副チャンネルに強く依存するという改善点を見つけ、この弱点を改良した信号配置点回転 (Constellation Rotation) を加えた CRV-OFDM を提案し、V-OFDM 方式では実現できなかった完全なパスダイバーシチ効果を実現し、国内特許を出願している。

2. 研究の目的

本研究課題申請時の第一の目標は、各パスのエネルギーを高効率に利用する CRV-OFDM 方式を複数のアンテナを用いて、通信パスの数を増やすことで周波数利用効率の向上を図る MIMO システムへ拡張することで、更に無線周波数利用効率が高い通信システムを開発することである。

また、サイクリック・プレフィックス伝送方式ではシステムの設計効率上常に短いサイクリック・プレフィックスが求められており、部分的なシフトでの相関特性のみがシステム性能に影響する。そのため、すべてのシフト区間で周期無相関な系列を用いた上記のシステムは信号設計上の無駄を含んでいるが、サイクリック・プレフィックスの長さに相当するシフト区間のみで周期無相関となる (Zero Correlation Zone-ZCZ) 系列を用いることでこの無駄をなくすことが可能である。本研究では、このような無線周波数利用効率が高く、完全な知的所有権を持つ次世代移動通信に適した系列および通信システムを設計するのを第二の目標としている。

3. 研究の方法

本研究を進めるにあたって、研究代表者は理論主導型の方法で提案課題の研究を進めてきた。

- (1) 低速移動および高速移動時の

CRV-OFDM の性能評価の時には、CRV-OFDM のダイバーシチ利得と符号化利得に関して、理論解析に行った上に、計算機シミュレーションによりその結果を検証した。

- (2) 誤り訂正符号の適応研究においても理論分析を先行して行い、その結果と計算機シミュレーション結果と比較しながら研究を進めたことで、高性能インターリーバ設計の長年の未解決問題を解決に導いた。
- (3) 高速移動時による干渉抑制技術の開発においては、干渉の量を Gaussian 近似することで、エラーフロアのレベルを理論的に判定し、その結果に基づいて最適な窓関数を設計した。
- (4) サイクリック・プレフィックス転送方式での高性能通信システムの開発においては、信号の満たすべき条件を求めた上に具体的な信号を設計し、システムを構築した。

研究の進行において、他の研究者の意見を取り入れるために、研究代表者は筑波大学の末広直樹教授と電気通信大学の橋本猛教授と頻りにディスカッションを行うほか、研究会や学会などへ積極的に参加した。アメリカの AT&T 研究所とマサチューセッツ工科大学訪問時には、他の専門家に CRV-OFDM を紹介し、意見を伺いながら、研究を進めてきた。

4. 研究成果

三年間の提案課題の研究を経て、研究代表者は CRV-OFDM およびその関連技術の開発において、IEEE Information Theory Society と IEEE Communication Society の旗艦学会などで計 9 件の研究成果を発表し、情報理論、通信分野の世界トップレベルの学術誌などに計 6 件の論文掲載が決定した。

以下、具体的な研究成果をテーマごとに述べる。

- (1) 低速移動時の CRV-OFDM の性能検証

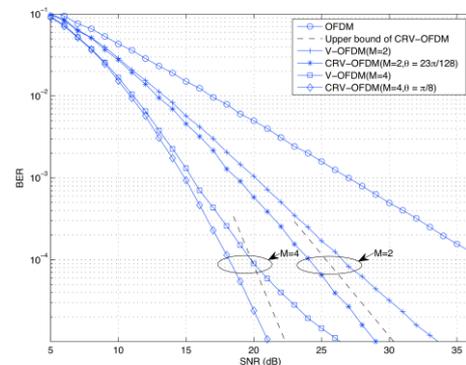


図 1) QPSK 変調での OFDM と CRV-OFDM の性能比較

低速移動時の CRV-OFDM の性能評価を行うために、本研究では CRV-OFDM 通信システムの Rayleigh フェージング通信路での Pair-wise Error Probability (PEP) の上限について理論解析を行い、それに基づいて Bit Error Rate (BER) の上限の理論式を導いて、OFDM および V-OFDM と比較して、CRV-OFDM の優位性を理論的に示した。図 1) では、QPSK 変調方式を仮定し、OFDM 転送方式と比較して、計算機シミュレーションで理論的結果の優位性を検証した。

(2) 高速移動時の性能評価

高速移動環境における CRV-OFDM の性能を評価するために、本研究では高速移動によるドップラー周波数シフトと送受信機の周波数偏差によるオフセットが起因で発生する干渉を Gaussian 近似し、エラーフロアのレベルを判定する方法を考案した。そして、図 2) で示すように、計算機シミュレーションで開発手法の有効性と高速移動通信での CRV-OFDM の優位性を検証した。

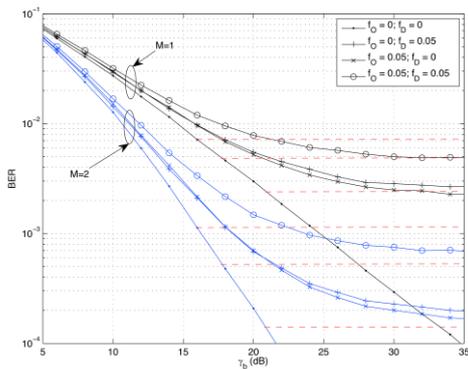


図 2) 高速移動通信環境での性能評価

(3) 高性能インターリーバの開発

通信システムに誤り訂正符号を適用する場合、システムの性能は用いるインターリーバに強く依存する。しかし、Rayleigh フェージング通信路でのインターリーバの設計は具体的な通信シ

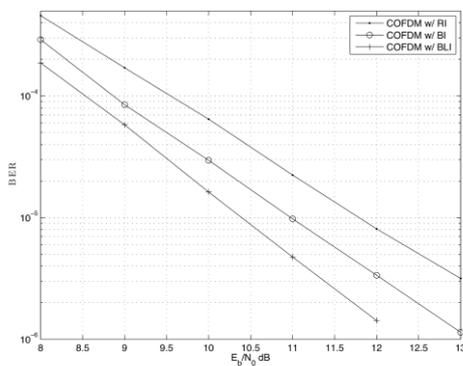


図 3) インターリーバの性能比較

ステム、変調方式、信号対雑音比など様々な仕様に依存するため、高性能インターリーバの設計は未解決のままであった。それで、本研究では代数構造を用いて高性能インターリーバを設計し、計算機シミュレーションによる性能評価を行った。図 3) で示しているように、本研究で提案した Block Linear Interleaver (BLI) は、無線 LAN の通信規格に採用されている Block Interleaver (BI) や Random Interleaver (RI) より優れていることを確認した。

(4) 誤り訂正符号を用いた CRV-OFDM

本研究では、誤り訂正符号を適応した CRV-OFDM (CCRV-OFDM) について研究し、開発した高性能インターリーバとの併用で、CCRV-OFDM は誤り訂正符号と CRV-OFDM の相乗効果が得られることを理論的に示し、それを図 4) で示したシミュレーション結果により確認した。

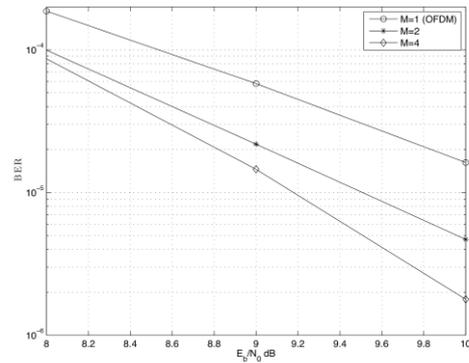


図 4) CCRV-OFDM の性能評価 (拘束長 3 の畳み込み符号を適応)

(5) 高性能通信システムの開発

研究代表者はまた、他の信号形式を用いた高性能通信システムの開発にも取り組んだ。そして、図 5) で示したように、OFDM の離散高速フーリエ変換 (DFT) の両方にシフトレジスタと遅延装置を加えることで、完全な周波数ダイバーシチを得られる Convolutional Spreading CDMA (CS-CDMA) を提案し、クリッピング雑音環境での性能を評価し、高速フェージングの対策を提案した。

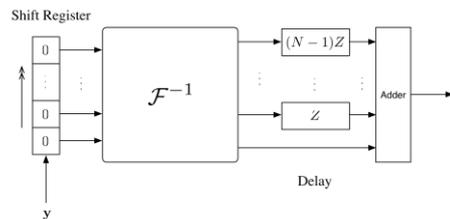


図 5) DFT に基づいた CS-CDMA の送信機構造

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6件)

- ① T. Hashimoto, A. S. Alaraimi, and C. Han, “ICI mitigation schemes for uncoded OFDM over channels with Doppler spreads and frequency offsets – Part I: Review,” *Academy Publisher Journal of Communications*, 査読あり, accepted for publication, 2012.
- ② T. Hashimoto, A. S. Alaraimi, and C. Han, “ICI mitigation schemes for uncoded OFDM over channels with Doppler spreads and frequency offsets – Part II: Asymptotic analysis,” *Academy Publisher Journal of Communications*, 査読あり, accepted for publication, 2012.
- ③ C. Han, N. Suehiro, and T. Hashimoto, “A systematic framework for the construction of optimal complete complementary codes,” *IEEE Trans. Information Theory*, 査読あり, vol. 57, no. 9, Sept. 2012, pp. 6033-6042.
- ④ L. Yue, N. S. Weerasinghe, C. Han, and T. Hashimoto, “Performance of coded CS-CDMA/CP with M-ZCZ code over a fast fading channel,” *IEICE Trans. Fundamentals*, 査読あり, vol. E93-B, no. 9, Sept. 2010, pp. 2381-2388.
- ⑤ L. Yue, N. S. Weerasinghe, C. Han, and T. Hashimoto, “Partial multiuser detection for CS-CDMA/CP over multipath channels,” *IEEE Trans. Commun.*, 査読あり, vol. 58, no. 8, Aug. 2010, pp. 2305-2313.
- ⑥ C. Han, T. Hashimoto, and N. Suehiro, “Constellation-rotated vector OFDM and its performance analysis over Rayleigh fading channels,” *IEEE Trans. Commun.*, 査読あり, vol. 58, no. 3, Mar. 2010, pp. 828-838.

[学会発表] (計9件)

- ① C. Han and T. Hashimoto, “Performance analysis of constellation rotated vector OFDM over fast fading channel,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC 2012)*, Paris, France, 査読あり, Apr. 2012, pp. 97-102.
- ② C. Han, L. Yue, and T. Hashimoto, “FFT implementable CS-CDMA and its performance under polar clipping noise,” in *Proc. Int. Workshop Signal Design and its Applications in*

Commun. (IWSDA 2011), Guilin, China, 査読あり, Oct. 2011, pp. 165-168.

- ③ L. Yue, C. Han, and T. Hashimoto, “CS-CDMA/CP with the Chu sequence: a bandwidth-efficient multi-access scheme for fast fading multipath channels,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC 2011)*, Kyoto, Japan, 査読あり, June 2011, CD-ROM.
- ④ C. Han and T. Hashimoto, “Interleaver design for coded OFDM,” in *Proc. 13th Int. Workshop Multimedia Signal Processing & Transmission (MSPT 2010)*, Chonbuk National Univ. Korea, 査読あり, Feb. 2010, pp. 1-5.
- ⑤ L. Yue, N. S. Weerasinghe, C. Han, and T. Hashimoto, “Performance of coded CS-CDMA/CP with iterative detection over multipath fast fading channels and its comparison with W-CDMA,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC 2009)*, Tokyo, Japan, 査読あり, Sept. 2009, pp. 13-16.
- ⑥ L. Yue, C. Han, N. S. Weerasinghe, and T. Hashimoto, “Performance of pilot-aided CS-CDMA/CP with perfect spreading sequences over a fast fading channel,” in *Proc. Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Commun. (WPMC 2009)*, Sendai, Japan, 査読あり, Sept. 2009, pp. 7-10. (Student Best Papers Award paper)
- ⑦ C. Han and T. Hashimoto, “Z-connectable complete complementary code and its application in CDMA,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory (ISIT2009)*, Seoul Korea, 査読あり, June 2009, pp. 438-422.
- ⑧ C. Han, T. Hashimoto, and N. Suehiro, “Constellation-rotated vector OFDM and its performance over Rayleigh fading channels,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC 2009)*, Dresden, Germany, 査読あり, June 2009, pp. 1-5.
- ⑨ L. Yue, N. S. Weerasinghe, C. Han, and T. Hashimoto, “Partial multiuser detection for CS-CDMA/CP over multipath channels and its comparison with DS-CDMA,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC 2009)*, Dresden, Germany, 査読あり, June 2009, pp. 1-5.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

韓 承鎬 (HAN CHENGGAO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
助教

研究者番号：10400714

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし