

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 30 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686058

研究課題名(和文)大容量かつ省エネルギーを実現する先進的通信システムの創出

研究課題名(英文) Toward Advanced Communications Systems with High Bandwidth Efficiency and High Energy Efficiency

研究代表者

落合 秀樹(OCHIAI, HIDEKI)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20334576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,900,000円

研究成果の概要(和文)：周波数資源が枯渇する環境において、より低い消費電力で高い伝送レートを達成できる、大容量かつ省エネルギーを実現する先進的通信システムを創出することを目的して研究を遂行した。主要成果としては、(1)送信回路の消費電力の大部分を占めるパワーアンプに着目し、周波数効率を犠牲にすることなくその電力効率を高めるための基礎理論の構築(2)電力効率と周波数効率において優れたトレードオフを達成するための無線通信システムの考案およびその評価、が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In view of growing interest toward high speed yet green information and communication technology (ICT), this research has targeted realization of advanced communications systems that can simultaneously achieve high energy efficiency and high bandwidth efficiency. Our major contributions include: 1) foundation of theory that reveals trade-off between power efficiency, and bandwidth efficiency for given acceptable nonlinear distortion considering power amplifier efficiency of transmitter circuit; and 2) development and evaluation of wireless communications systems that can achieve better trade-off in terms of power and bandwidth efficiency.

研究分野：通信工学

キーワード：通信システム 変調方式 電力効率 OFDM パワーアンプ

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット端末などに代表されるデジタル無線通信機器の爆発的な普及および情報の大容量化に伴い、今後も限られた周波数資源下でより高い伝送速度を達成し得る大容量通信技術の創出が求められている。その一方で、省エネルギーや地球温暖化への高い関心から、これらの通信機器における消費電力の抑制も重要な課題である。

パワーアンプは送信回路の消費電力の大部分を占めるが、その電力効率は送信信号の包絡線変動に依存し、一般に信号のピーク電力が低いほどその効率は高くなる。そこでピーク電力低減手法が広く研究されており、これまでに様々な方式が考案されてきた。なかでも本研究代表者らは、多値位相シフトキーイング (PSK: Phase Shift Keying) 変調信号について、帯域制限が極めて厳しい環境においても、送信系列を制御するシェイピング技術を用いることにより、定包絡線に近い信号波形が生成できることを実証した。しかしながら、これらの技術が実際の通信システムにおいてどれだけの電力改善効果をもたらすかは不明であった。さらにより周波数利用効率に優れた変調方式である直交振幅変調 (QAM: Quadrature Amplitude Modulation) やその直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) との組み合わせに対してもより効果的なピーク電力低減手法を導入することで、大容量かつグリーンな ICT の実現に資することが重要である。

2. 研究の目的

本研究は、厳しい帯域制限と多値化がもたらすデジタル変調信号の包絡線変動に起因するパワーアンプの効率低下、非線形歪みおよび伝送レートとの関係を明らかにすることを第一の目的とする。さらには、様々な変調方式に対してそれを改善するための通信方式の設計手法を考案し、厳しい周波数帯域制限下においても大容量かつ省エネルギーを実現する先進的通信システムを創出することで、パワーアンプによる発熱を最小化するグリーン ICT の新たなパラダイムを生み出すことを最終目標とする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、主として以下の方法により研究を行った。

- (1) 理想的なパワーアンプの数式モデルに基づく、様々な変調方式により達成可能な電力効率の理論解析
- (2) OFDM およびシングルキャリア方式のピーク電力分布の理論解析とそれらに対するピーク電力低減手法の考案、および計算機シミュレーションによる評価
- (3) 簡易なピーク低減手法の FPGA による実装および実際のパワーアンプにより増幅された OFDM 信号の非線形歪みの影響

の実験による測定と理論解析

4. 研究成果

本研究期間内に得られた主要な成果を以下に列挙する。

(1) 変調方式に依存したパワーアンプの歪みと電力効率のトレードオフの定式化 [Ochiai, IEEE Trans. Commun. 2013]

各種変調信号に対する A 級および B 級動作の理想パワーアンプの平均電力効率の理論解析を行うことにより、ピーク電力低減を行わない場合の非線形歪みと電力効率のトレードオフについてその定量的関係を明らかにした。一例として、各種変調信号に対し、SSPA (Solid-State Power Amplifier) の典型的な非線形モデルを仮定した場合の電力効率と非線形歪みの関係を図 1 に示す。同図は、非線形歪みを抑える (右方向に進む) には電力効率を犠牲にする (下方向に進む) 必要があることを示している。なお、ここで例えば電力効率が 10% の場合、パワーアンプに供給される電力の残り 90% は発熱として浪費されることを表す。同図より、一定の非線形歪み量と比較すると、ピーク電力の大きい信号ほど電力効率が低くなるのがわかる。特に A 級動作のパワーアンプでは、OFDM 方式で信号に対する歪み量を -40dB 程度に抑えるためには、電力効率を 5% 以下まで低下させる必要があるのがわかる。これよりピーク電力低減の重要性を定量的に明らかとした。

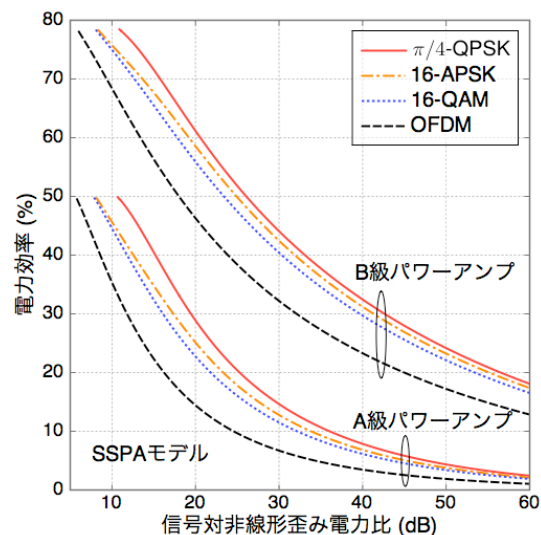


図 1: 各種変調信号に対する電力効率と信号対非線形歪み電力比のトレードオフ関係

(2) SC-FDMA 信号の瞬時電力分布の理論解析 [Ochiai, IEEE Wireless Commun. Lett. 2012] [Ochiai, Physical Commun., 2013]

第 4 世代の携帯通信規格の上り回線における通信方式には、シングルキャリア FDMA (SC-FDMA) 方式が採用されている。これは、OFDM 方式と同様にマルチパスに対する耐性が高く、また OFDM に比べてピーク電力が低いといった利点を有する。本研究では、

SC-FDMA 方式が OFDM 方式に対してどれだけピーク電力の観点から有利であるかを示すため、SC-FDMA の瞬時電力およびピーク対平均電力比 (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) の確率的振る舞いを理論解析により明らかにした。ここで導出した SC-FDMA 信号の瞬時電力分布の CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) 特性 (瞬時電力が横軸の値を超える確率) の理論値およびシミュレーション値を図 2 に示す。同図より、シングルキャリアであっても高いピーク電力が生成されるため、さらなるピーク電力低減が必要であることを理論的に明らかにした。

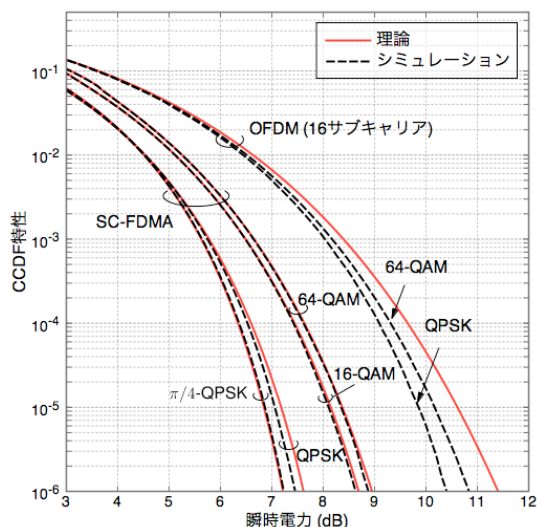


図 2: 各種変調を施した SC-FDMA 信号と OFDM 信号の瞬時電力の CCDF 特性の比較

(3) SC-FDMA 方式へのトレリスシェイピングの適用 [Lee and Ochiai, IEEE GLOBECOM, 2012]

先に述べた SC-FDMA 方式に対して、本研究代表者らが提案しているトレリスシェイピングを適用することで、その電力効率が大幅に改善できることを計算機シミュレーションにより明らかにした。

(4) トレリスシェイピングを適用した符号化 OFDM システムの提案およびその計算機シミュレーションによる有効性の評価 [Yoshizawa and Ochiai, IEEE Trans. Wireless Commun., 2015]

本研究代表者が 2004 年に提案したトレリスシェイピングに基づく OFDM 信号のピーク電力低減手法に対して簡易かつ効果的な符号化変調方式であるビットインタリーブ符号化変調 (BICM) を組み合わせることで、より現実的な周波数選択性フェージング環境下での提案システムの伝送特性を示し、実用環境での有効性を明らかにした。また用いる多値 QAM 信号点の領域を拡張して選択できる信号点により高い自由度を導入することで、低演算量で効果的に OFDM 信号のピーク電力低減を実現する手法を明らかにした。

(5) 簡易なトレリス構造に基づく OFDM 信号のピーク電力低減手法の提案 [Yoshizawa and Ochiai, IEEE ISIT 2014]

先のトレリスシェイピング手法の欠点として、符号化変調と組み合わせる際に受信側での軟判定の計算量が膨大となることが挙げられる。そこでさらにトレリス構造を利用した新たなピーク電力低減手法を考案した。これは従来手法の欠点である受信側での計算量の増大を回避できるため、今後の実用化が期待できる (特許出願済み)。

(6) 実際のパワーアンプで非線形増幅された OFDM 信号のパワースペクトルの実験による評価と簡易な理論式の導出 [Lee and Ochiai, EURASIP J. Wireless Commun., 2014]

一般に非線形増幅された信号の特徴を簡易な数式により表現することは困難であると考えられてきた。これを解決するため、非線形増幅された OFDM 変調信号の自己相関特性に着目し、非線形歪みの影響を簡易に表現できる電力スペクトルの理論式を導出した。また、導出式と計算機シミュレーションおよび実際のパワーアンプを用いた測定実験により得られた結果とを比較することにより、その有効性を明らかにした。

(7) 衛星通信システムにおける非線形歪みを考慮した符号化変調方式の提案 [Yoda and Ochiai, IEEE GLOBECOM, 2014]

送信電力効率が致命的である衛星通信システムにおいては、パワーアンプの高効率化とともに非線形歪みによる特性劣化の影響を受信側で軽減することが重要である。そこで、非線形増幅された振幅位相シフトキーイング (APSK) 方式に対する簡易な誤り率改善手法を新たに提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより明らかにした。

(8) ピークキャンセルによるピーク電力低減手法の FPGA 基板による実装および特性評価 [Song and Ochiai, EURASIP J. Wireless Commun., 2015]

ピーク電力低減技術の有効性を検証するためには、ハードウェア実装によりフィージビリティ評価が重要である。そこで、簡易なピーク電力低減手法として実用化が広く検討されているピークキャンセル法を FPGA 基板上に実装することでそのリアルタイム性を評価するとともに、ハードウェア実装の観点からその効果的な設計手法を明らかにした。

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 10 件)

- ① J. Song and H. Ochiai, "A low-complexity peak cancellation scheme and its FPGA implementation for peak-to-average power ratio reduction," EURASIP Journal on

- Wireless Communications and Networking, vol.2015, no.85, pp.1-14, March 2015. (査読有) DOI: 10.1186/s13638-015-0319-0
- ② R. Yoshizawa and H. Ochiai, “A trellis shaping for peak and average power reduction of BICM-OFDM signals,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 2, pp. 1143-1154, February 2015. (査読有)
- ③ M. Matsuoka, R. Yoshizawa, and H. Ochiai, “Peak and average power reduction of OFDM signals based on trellis shaping with controllable region expansion,” Wireless Personal Communications, Springer, pp. 1-18, December 2014. (査読有) DOI: 10.1007/s11277-014-2225-x
- ④ T. Lee and H. Ochiai, “Characterization of power spectral density for nonlinearly amplified OFDM signals based on cross-correlation coefficient,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2014, no. 199, pp. 1-15, November 2014. (査読有) DOI: 10.1186/1687-1499-2014-199
- ⑤ H. Ochiai, “Statistical distributions of instantaneous power and peak-to-average power ratio for single-carrier FDMA systems,” (invited paper), Physical Communication, Elsevier, vol. 8, pp. 47-55, September 2013. (査読有) DOI: 10.1016/j.phycom.2012.10.003
- ⑥ H. Ochiai, “An analysis of band-limited communication systems from amplifier efficiency and distortion perspective,” IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 4, pp. 1460-1472, April 2013. (査読有)
- ⑦ M. Tanahashi and H. Ochiai, “Power-reductive precoding for the transmission of correlated information sequences,” IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 4, pp. 1393-1403, April 2013. (査読有)
- ⑧ R. Yoshizawa and H. Ochiai, “Performance comparison of uncoded OFDM systems with trellis shaping over nonlinear channels,” Wireless Personal Communications, Springer, vol. 72, no. 3, pp. 1603-1617, October 2013. (査読有) DOI: 10.1007/s11277-013-1123-y
- ⑨ H. Ochiai, “On instantaneous power distributions of single-carrier FDMA signals,” IEEE Wireless Communications Letters, vol. 1, no. 2, pp. 73-76, April 2012. (査読有)
- ⑩ M. Tanahashi and H. Ochiai, “A new reduced-complexity conditional-mean based MIMO signal detection using symbol distribution approximation technique,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, no. 11, pp. 5644-5651, November 2011. (査読有)
- 〔学会発表〕 (計 50 件)
- ① D. Yoda and H. Ochiai, “Distortion modeling and analysis for multilevel coded APSK with memoryless nonlinearity”, in Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2014), pp. 2874-2879, Austin, TX, December 8-12, 2014. (査読有)
- ② J. Song and H. Ochiai, “FPGA implementation of peak cancellation for PAPR reduction of OFDM signals,” in Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS 2014), Macau, November 19-21, 2014. (査読有)
- ③ R. Yoshizawa and H. Ochiai, “A novel trellis-based PAPR reduction technique for OFDM signals,” in Proceedings of The 2014 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2014), pp. 1563-1567, Honolulu, HI, June 29-July 4, 2014. (査読有)
- ④ J. Song and H. Ochiai, “Amplifier efficiency and distortion trade-off of OFDM system with iterative clipping and filtering,” in Proceedings of The 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2014), Istanbul, Turkey, April 6-9, 2014. (査読有)
- ⑤ T. Lee and H. Ochiai, “A simple characterization of power spectral density for nonlinearly amplified OFDM signals,” in Proceedings of Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR) Conference, 2014 Radio and Wireless Week (RWW 2014), Newport Beach, CA, January 19-22, 2014. (査読有)
- ⑥ R. Yoshizawa and H. Ochiai, “Analysis and optimization of trellis shaping concatenated with bit-interleaved coded modulation,” in Proceedings of 2013 IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2013-Fall), Las Vegas, NV, September 2-5, 2013. (査読有)
- ⑦ H. Ochiai, “On modulation selection for energy-efficient band-limited communication systems,” in Proceedings of The 10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Ilmenau, Germany, August 27-30, 2013. (査読有)
- ⑧ D. Yoda and H. Ochiai, “A reduced-complexity multilevel coded modulation for APSK signaling,” in Proceedings of The 2013 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2013), pp. 1994-1998, Istanbul, Turkey, July 7-12, 2013. (査読有)
- ⑨ M. Matsuoka, R. Yoshizawa, and H. Ochiai,

- “Improvement of peak and average power reduction of trellis shaped OFDM signals by controllable region expansion,” in Proceedings of The 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2013), Atlantic City, NJ, June 24-27, 2013. (査読有)
- ⑩ T. Lee and H. Ochiai, “Peak power reduction of SC-FDMA signals based on trellis shaping,” in Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2012), Anaheim, CA, December 3-7, 2012. (査読有)
- ⑪ R. Yoshizawa and H. Ochiai, “A serial concatenation of coding and trellis shaping for OFDM systems with peak power reduction,” in Proceedings of The 2012 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2012), MIT, MA, July 1-6, 2012. (査読有)
- ⑫ Y. Nishino and H. Ochiai, “Comparison of coded modulations for trellis-shaped single-carrier PSK with PAPR reduction,” in Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2012-Fall), Quebec City, Canada, September 3-6, 2012. (査読有)
- ⑬ S. Tanaka and H. Ochiai, “Further complexity reduction of MIMO PSK signal detection based on symbol distribution approximation,” in Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC 2012), Ottawa, June 10-15, 2012. (査読有)
- ⑭ H. Ochiai, “Peak-to-average power ratio distribution analysis of single-carrier FDMA signals,” invited session presentation, in Proceedings of 18th European Wireless Conference (EW 2012), Poznan, Poland, April 18-20, 2012. (査読有)
- ⑮ H. Ochiai, “On power amplifier efficiencies of linearly modulated signals with nonlinear distortion,” in Proceedings of The 8th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2011), pp. 397-401, Aachen, Germany, November 6-9, 2011. (査読有)
- ⑯ 落合秀樹, 「グリーンワイヤレスのための符号化・変復調設計」(招待講演), 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, 新潟大学, 2011年10月20日.
- ⑰ R. Yoshizawa and H. Ochiai, “Performance comparison of trellis-shaped OFDM systems over nonlinear channels,” in Proceedings of The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2011), Brest, France, October 3-6, 2011. (査読有)
- ⑱ 落合秀樹, 「ピーク電力制限下での APSK

符号化変調の特性について」(依頼講演), 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 新潟大学, 2011年8月25日.

- ⑲ R. Yoshizawa and H. Ochiai, “Peak power reduction of OFDM signals using trellis shaping with M-algorithm,” in Proceedings of The 20th IEEE International Conference on Computer Communications Networks (ICCCN 2011), Maui, HI, July 31-August 4, 2011. (査読有)
- ⑳ F. M. Costa and H. Ochiai, “Energy-efficient physical layer design for wireless sensor network links,” in Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), Kyoto, Japan, June 5-9, 2011. (査読有)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: トレリス構造に基づく信号制御のための方法およびその方法を使った無線装置

発明者: 落合秀樹、吉沢竜太

権利者: 横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-022556 号

出願年月日: 平成 26 年 2 月 7 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ochiailab.dnj.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

落合 秀樹 (OCHIAI, Hideki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 20334576

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

宋 家佳 (SONG, Jiajia)

棚橋 誠 (TANAHASHI, Makoto)

吉沢 竜太 (YOSHIZAWA, Ryota)

依田 大輝 (YODA, Daiki)

李 泰雨 (LEE, Taewoo)