

令和元年6月19日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06074

研究課題名(和文)コグニティブ無線に用いるOFDM信号の帯域外漏洩電力抑圧に関する研究

研究課題名(英文) A Study of Out-of-Band Emission Reduction of OFDM Signals for Cognitive Radio Systems

研究代表者

太田 正哉 (Ohta, Masaya)

大阪府立大学・人間社会システム科学研究科・教授

研究者番号：70288786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はOFDM信号の隣接帯域への漏洩電力抑圧法として優れているN-continuous OFDM, その改良法であるNCSP-OFDM, N-continuous OFDMとOrthogonal Precoding(OP)のハイブリッド法について、回路実装を考慮した計算量削減法を提案し、計算機実験およびソフトウェア無線機での実機実験によりその有効性を確認した。

また狭間帯域の漏洩電力抑圧に優れたSpectrum Sculpting PrecoderとOPのハイブリッド法において、計算量削減が難しかったプレコード行列を変形し、その計算量を大幅に削減できる行列分解法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、無線通信システムの広帯域化に伴い周波数資源の枯渇が懸念されており、その対策として考えられているコグニティブ無線において、OFDM信号の高い帯域外漏洩電力が実用化上の課題となっている。従来から提案されていたものの、実装上の問題があった帯域外漏洩電力技術を、本研究の成果は改善するもので、従来法の膨大な計算量を大幅に削減できる。これにより周波数資源が有効に活用できる高速大容量な無線通信システムの実装が容易となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have proposed methods to improve complexity of N-continuous OFDM, which is excellent as a method of suppressing leakage power to adjacent bands of OFDM signals, and its improved methods NCSP-OFDM, hybrid methods of N-continuous OFDM and Orthogonal Precoding (OP). Our proposed methods have reduced a computational complexity of them and confirmed its effectiveness by computer simulations and experiments with software defined radios. In addition, in the hybrid method of Spectrum Sculpting Precoder and OP, which is excellent as a method for creating deep in-band notches for cognitive radio systems, we have proposed a matrix decomposition method that can significantly reduce the amount of calculation by transforming the precoding matrix, which has been difficult to reduce the amount of calculation.

研究分野：情報通信システム

キーワード：OFDM 帯域外漏洩電力 プレコーディング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### - コグニティブ無線への期待と問題 -

近年、無線通信システムの広帯域化に伴い周波数資源の枯渇が懸念されており、その対策として OFDM ベースの Dynamic Spectrum Access 型コグニティブ無線が検討されている。OFDM は周波数利用効率の高い通信方式である一方、シンボル間の接続が不連続なため高い帯域外漏洩電力 (サイドローブ) が生じる問題がある。コグニティブ無線では既存利用者 (プライマリユーザ) が未使用の複数の帯域を、二次利用者 (セカンダリユーザ) が束ねて使用することが想定されており、二次利用者の送信信号スペクトルは、既存利用者の帯域 (峡間帯域) で急峻なノッチを形成する必要がある。

#### - 従来の漏洩電力抑圧法の課題 -

OFDM 信号の帯域外漏洩電力抑圧法にはさまざまな手法が提案されている。一般的な漏洩電力抑圧法として、接続前の各 OFDM シンボルの両端を延伸し緩やかに減衰させる窓関数をかけ、この部分を重ねて接続することで接続部分を滑らかにする手法がある。この手法は実装が容易であるが、延伸した減衰部がデータ送信にかかわらないため伝送効率が低下する。

これに対して窓関数を用いず、接続部を  $N$  次微分まで連続にするようデータシンボルをプレコーディングする  $N$ -continuous OFDM と呼ばれる手法が提案されている。本手法はシンボルを延伸しないため伝送効率が低下せず、帯域外の漏洩電力を大幅に抑圧できる。ただしこのプレコーディングにより OFDM シンボル全体に不要な信号が付加されるため、受信機でこれを除去する必要があるが、漏洩電力を強く抑圧する条件では付加信号の電力が大きく、これを十分除去できずに誤り率が劣化する。また、コグニティブ無線で必要となる急峻なスペクトルノッチの形成が難しいという問題がわかっている。

伝送効率が低下しない他の手法として Spectrum Sculpting Precoder (SSP) が提案されている。SSP は急峻なノッチの形成が容易であるが、 $N$ -continuous OFDM と同様シンボル全体に不要な信号が付加され、これを除去できないと誤り率が劣化するという問題がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、OFDM ベースの Dynamic Spectrum Access 型コグニティブ無線において、二次利用者の送信信号の隣接帯域 (二次利用者が使用する帯域の左右に隣接する帯域) および峡間帯域 (既存利用者が使用する二次利用者に挟まれた帯域) への漏洩電力を抑圧する手法について、実用化に向けた性能改善を行うことを目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 隣接帯域への漏洩電力抑圧

$N$ -continuous OFDM は隣接帯域への漏洩電力抑圧に優れた手法であるが、送信機におけるプレコード行列の要素のダイナミックレンジが広く、回路化する際に大きなビット幅を消費する問題がある。また誤り率の劣化が避けられないという問題もある。本研究ではまずプレコード行列に特異値分解 (SVD) を導入することでダイナミックレンジを削減する手法 (手法 A) を提案する。誤り率劣化の改善については、 $N$ -continuous Symbol Padding (NCSP)-OFDM や、Orthogonal Precoding と呼ばれる手法とのハイブリッド法により解決できる。ただし NCSP-OFDM には  $N$ -continuous OFDM と同様のダイナミックレンジの問題と計算量の問題が、ハイブリッド法には計算量の問題が残っていた。そこで NCSP-OFDM に対しては、SVD を用いてダイナミックレンジを削減する手法 (手法 B)、送信機で必要になる 2 つの IFFT を 1 つに縮約して計算量を削減する手法 (手法 C)、プレコード対象のサブキャリアを間引くことで計算量を削減する手法 (手法 D)、受信機で必要になっていた逆行列の計算を単純化する手法 (手法 E) を提案する。Orthogonal Precoding とのハイブリッド法の計算量については、理論上 SVD による計算量削減が難しいことがわかっていたため、これを回避して SVD により計算量を削減する手法を提案する (手法 F)。

また NCSP-OFDM は通常の OFDM と同様に送信信号内に高いピーク電力が頻繁に出現する問題がある。この緩和策として DFT コーディングを導入する手法 (手法 G) を提案する。

#### (2) 峡間帯域への漏洩電力抑圧

SSP は急峻なノッチ形成が容易で峡間帯域への漏洩電力抑圧に適しているが、誤り率劣化の問題があった。これに対して Orthogonal Precoding とハイブリッド化する手法が提案されているが、プレコード行列が大きく計算量大きい問題がある。理論上 SVD による計算量削減が難しいこともわかっている。そこで本研究ではこれを回避して SVD や QR 分解により計算量を大幅に削減する手法 (手法 H) を提案する。またプレコード対象のサブキャリアを間引くことで計算量を削減する手法 (手法 I) を提案する。加えて窓関数法とのハイブリッド法を提案し (手法 J)、漏洩電力抑圧性能を大幅に改善する。

### 4. 研究成果

手法 A の成果 (関連する発表論文: 雑誌, 発表)

図 1 に従来法と提案法の比較を示す。図は各手法で実際に回路化した場合の漏洩電力性能で、D1 が従来法、D2 が提案法である。図より例えば 16bit 固定小数点で実装したとき D2-fix16 は D1-fix16 に比べて大幅に漏洩電力を抑圧できることがわかる。

手法 B の成果 ( 関連する発表論文: 雑誌 , 発表 , , , )

手法 A と同様の実験を行い, NCSP-OFDM に対しても SVD による行列分解が従来の行列分解よりもダイナミックレンジを削減でき, ビット幅を小さくできることを確認した.

手法 C の成果 ( 関連する発表論文: 発表 ) 提案法を FPGA に実装した場合, 従来法に比べて占有 slice が約 30%, Block RAM が 44% 削減できることを確認した.

手法 D の成果 ( 関連する発表論文: 発表 ) LTE 規格 ( サブキャリア数 300 ) の OFDM 信号を提案法により生成した場合, 計算量を 41% 削減できることを確認した.

手法 E の成果 ( 関連する発表論文: 雑誌 , 発表 , , , , )

受信機に必要な逆行列の計算をノイマン展開し, 高次項を打ち切ることにより近似値を計算する手法を提案した. 提案法により LTE 規格 ( サブキャリア数 300 ) の OFDM 信号を生成した場合, 計算量を 1~2% まで削減しても, 受信性能は従来法と同等程度に維持できることを確認した.

手法 F の成果 ( 関連する発表論文: 雑誌 , 発表 , , , )

後述の手法 H によりプレコード行列を行列分解し, 計算量を削減する手法を提案した. LTE 規格 ( サブキャリア数 600 ) の OFDM 信号を提案法により生成した場合, 乗算回数は従来法の 5.4% にまで削減できることを確認した.

手法 G の成果 ( 関連する発表論文: 発表 )

DFT プレコーディングを導入した提案法により漏洩電力抑圧性能, 誤り率性能を共に劣化させずにピーク電力を抑圧することに成功した. また提案法を SDR ( Software Defined Radio ) に実装し, 漏洩電力抑圧性能を検証した. その結果シミュレーションと同等の性能が得られることを確認した.

手法 H の成果 ( 関連する発表論文: 雑誌 , 発表 , , , , )

プレコード行列はフルランクであるためこれを SVD により分解してもランクが下がらない. そこで単位行列を差し引いた後の行列に対して SVD を行う手法を考案した. これにより行列サイズが制約条件数に比例するオーダーにまで削減され, 大幅な計算量削減が可能となった. また当初は実験による検証のみであったが, その後に数理的な証明が可能であることを発見し, これにより漏洩電力抑圧性能を一切低下させることなくプレコード行列の分解により必ず計算量が削減できることを保証した. 表 1 は LTE 規格 ( サブキャリア数 600 ) の OFDM 信号を提案法により生成する場合の乗算回数の比較である. 制約条件数が 8 の場合, 乗算は高々 2.7% まで削減できることを確認した.

手法 I の成果 ( 関連する発表論文: 雑誌 )

プレコーディング対象のサブキャリアを 1/10 にし, これを均等に配置することで, 漏洩電力抑圧性能や誤り率性能を劣化させずに, 計算量を約 6 割まで削減できることを確認した.

手法 J の成果 ( 関連する発表論文: 発表 )

SSP は急峻なノッチ形成に適しているが, バンドエッジから離れた帯域で漏洩電力の減衰が緩慢である問題があった. これに対して窓関数法を考慮したプレコーディング行列を設計し, これにより問題の改善を試みた. 図 2 に示すように従来法 ( Conventional OP ) と同等の深いノッチをバンドエッジに形成しながら, Windowing のような漏洩電力の速やかな減衰を実現できることを確認した.

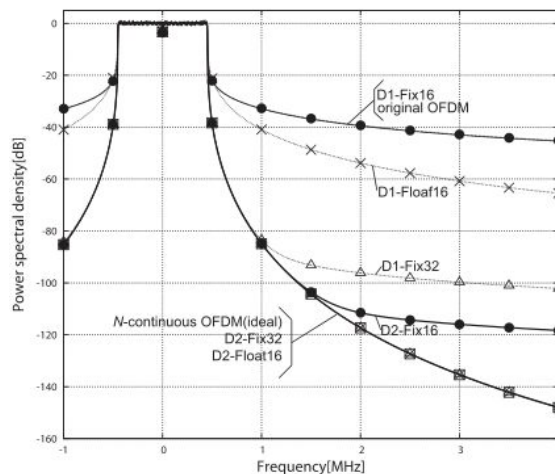


図 1

表 1

Condition ( $K, M$ )	Fig. 2 (600, 8)	Fig. 3 (600, 16)
Conventional [7] ( $K(K - M)$ )	355, 200 (100%)	350, 400 (100%)
Proposed ( $M(2K - M)$ )	9, 536 (2.7%)	18, 944 (5.4%)

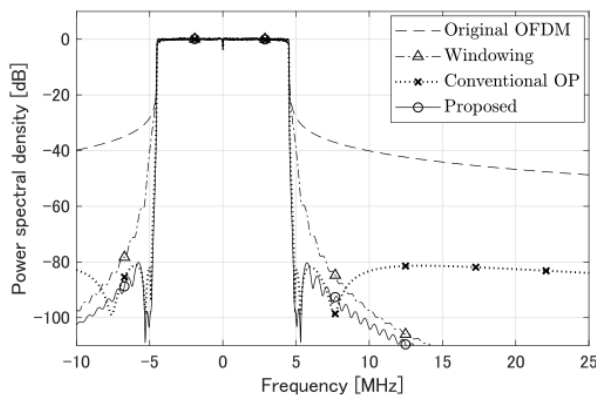


図 2

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 7 件)

松井貴洋, 太田正哉, OFDM 信号の帯域外輻射電力抑圧に適した Orthogonal Precoding の計算量削減, 査読有, 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J101-B, no.9, pp.828-832, 2018.

DOI: 10.14923/transcomj.2018JBL4002

H.Kawasaki, M.Ohta, K.Yamashita, Matrix Decomposition of Precoder Matrix in Orthogonal Precoding for Sidelobe Suppression of OFDM Signals, 査読有, IEICE Transaction B, vol.E101-B, no.7, pp.1716-1722, 2018.

DOI: 10.1587/transcom.2017EBP3329

H.Kawasaki, T.Matsui, M.Ohta, K.Yamashita, Matrix Decomposition for Low Computational Complexity in Orthogonal Precoding of N-continuous Schemes for Sidelobe Suppression of OFDM Signals, 査読有, IEIE Transactions on Smart Processing and Computing, vol.6, no.2, pp.117-123, 2017.

DOI: 10.5573/IEIESPC.2017.6.2.117

H.Kawasaki, Z.Zhou, M.Ohta, K.Yamashita, Matrix Decomposition Suitable for FPGA Implementation of NCSP-OFDM for Sidelobe Suppression of OFDM Signals, 査読有, IEIE Transactions on Smart Processing and Computing, vol.6, no.5, pp.372-377, 2017.

DOI: 10.5573/IEIESPC.2017.6.5.372

H.Kawasaki, J.Sasaki, M.Ohta, K.Yamashita, Computational complexity reduction of NCSP-OFDM receiver for sidelobe suppression, 査読有, IEICE Communications Express, vol.5, no.9 pp.316-321, 2016.

DOI: 10.1587/comex2016XBL0118

H.Kawasaki, M.Ohta, K.Torigoe, and K.Yamashita, Matrix Decomposition of N-continuous OFDM suitable for FPGA Implementation, 査読有, IEICE Communications Express, vol.5, no.1, pp.1-6, 2016.

DOI: 10.1587/comex.2015XBL0160

太田正哉, 鳥越薫平, 川崎耀, 山下勝己, 基地局停止時のスマートフォンを用いた近距離通信システムに関する基礎的検討, 査読有, 電気学会論文誌 C, no.11, pp.1345-1346, 2015.

DOI: 10.1541/ieejciss.135.1345

### 〔学会発表〕(計 20 件)

太田正哉, 低帯域外漏洩電力特性を有する NCSP-OFDM の PAPR 抑圧法, 電子情報通信学会技術研究報告, 2019.

田中智規, 萩原望, 太田正哉, 窓関数を考慮した Orthogonal Precoding 法による OFDM 信号の帯域外漏洩電力抑圧, 第 24 回電子情報通信学会関西支部学生会学生研究発表講演会, 2019.

周志恒, 川崎耀, 太田正哉, FPGA 実装を考慮した NCSP-OFDM 送信機のための行列分解法, 平成 29 年電気関係学会関西連合大会, 2017.

松井貴洋, 川崎耀, 太田正哉, OFDM 信号のサイドローブ抑圧に適した Orthogonal Precoding の行列分解法, 平成 29 年電気関係学会関西連合大会, 2017.

土井英夫, 川崎耀, 太田正哉, サイドローブ抑圧に適した NCSP-OFDM の部分プレコーディングによる計算量削減, 平成 29 年電気関係学会関西連合大会, 2017.

川崎耀, 松井貴洋, 太田正哉, 山下勝己, OFDM 信号の Sidelobe 抑圧に適した Orthogonal Precoding の計算量削減に関する研究, 電子情報通信学会通信方式研究会, 2017.

H.Kawasaki, H.Doi, M.Ohta, K.Yamashita, A Study on Low-Complexity Receiver of NCSP-OFDM for Sidelobe Suppression, IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2016), 2016.

H.Kawasaki, Z.Zhou, M.Ohta, K.Yamashita, Matrix Decomposition Suitable for FPGA Implementation of NCSP-OFDM, The 31th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2016), 2016.

H.Kawasaki, T.Matsui, M.Ohta, K.Yamashita, Computational Complexity Reduction of Orthogonal Precoding of N-Continuous OFDM, The 31th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2016), 2016.

土井英夫, 川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, 低 Sidelobe を有する NCSP-OFDM 受信機における逆行列近似, 第 21 回電子情報通信学会関西支部学生会学生研究発表講演会, 2016.

周志恒, 川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, 低 Sidelobe を有する NCSP-OFDM 送信機の FPGA 実装, 第 21 回電子情報通信学会関西支部学生会学生研究発表講演会, 2016.

松井貴洋, 川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, OFDM 信号の Sidelobe 抑圧に適した Orthogonal Precoding の行列分解法, 第 21 回電子情報通信学会関西支部学生会学生研究発表講演会, 2016.

川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, コグニティブ無線に向けた Orthogonal Precoding の計算量削減に関する研究, 電子情報通信学会通信方式研究会, 2016.

H.Kawasaki, M.Ohta, K.Yamashita, Computational Complexity Reduction of Orthogonal Precoding for Sidelobe Suppression of OFDM Signal, The 21th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2015), 2015.

H.Kawasaki, J.Sasaki, M.Ohta, K.Yamashita, Computational Complexity Reduction of NCSP-OFDM Demodulation for Sidelobe Suppression, The 30th International Technical Conference of Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2015), 2015.

川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, OFDM 信号の Sidelobe 抑圧のための Orthogonal Precoding に関する研究, IEEE COMS 関西支部学生研究会, 2015.

川崎耀, 佐々木純, 太田正哉, 山下勝己, Sidelobe 抑圧に適した NCSP-OFDM 受信機の計算量に関する研究, IEEE COMS 関西支部学生研究会, 2015.

川崎耀, 鳥越薫平, 太田正哉, 山下勝己, 安否確認システムのための スマートフォンを用いた音響通信, 平成 27 年電気関係学会関西連合大会, 2015.

鳥越薫平, 川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, FPGA 実装を考慮した N-continuous OFDM の改良法, 平成 27 年電気関係学会関西連合大会, 2015.

川崎耀, 太田正哉, 山下勝己, 帯域外漏洩電力抑圧に適した NCSP-OFDM の FPGA 実装に関する研究, 電子情報通信学会通信方式研究会, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。