

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems



牟田 修 (Osamu MUTA, Dr. Eng.)

九州大学 日本エジプト科学技術連携センター 准教授
(Associate Professor, Kyushu University, Center for Japan-Egypt
Cooperation in Science and Technology)

電子情報通信学会 IEEE

受賞：電子情報通信学会通信方式研究会委員長賞 (2014, 2015, 2017 年)

研究専門分野：移動無線通信

あらまし 無線通信システムにおいて周波数利用効率 (bit/秒/Hz) を改善する手法として、送受信局で複数のアンテナ素子を用いる MIMO (Multi-Input Multi-Output) 技術と OFDM に代表されるマルチキャリア変調を併用する MIMO-OFDM 方式が広く検討されている。しかしながら、MIMO-OFDM システムでは信号の瞬時電力のピーク値がシングルキャリア信号に比べて非常に高いため、送信電力増幅器において非線形歪みによる帯域外輻射や電力効率の大幅な低下を引き起こす。さらに、複数の情報ストリームを空間多重伝送する MIMO 技術と併用する場合、非線形歪みがストリーム間の直交性を崩すため、ストリーム間干渉による通信品質の劣化が生じる。この問題を解決するには、所望の通信品質を維持しながら送信信号の瞬時電力のピーク値 (ピーク電力) を抑制することが必要となる。

本稿では、OFDM 伝送を用いる MIMO 無線通信基地局の低消費電力化を目的として、新たに提案したピーク電力制御技術である適応ピークキャンセラの概要を説明する。提案方式では、ピーク抑圧用パルス (ピーク抑圧信号) を用いて閾値を超える送信信号振幅を打ち消すと同時に、それにより発生する歪み電力の上昇量を一定値以下に抑えるように制御することで所要の受信品質を維持する。その結果、提案方式では、帯域内歪み電力 (EVM) と帯域外輻射電力 (ACLR) をシステムで定義される許容値以下に自動的に制限することができ、従来方式における歪み問題の解決と大幅な計算量の低減を達成した。

1. 研究の背景・目的

スマートフォン等の移動通信サービスの普及に伴い、無線通信のトラフィックは急激に増大している。その一方で、利用可能な周波数帯域は限られているため、周波数帯域の利用効率 (bit/秒/Hz) の向上が無線通信システムにおける重要な課題となる。それを実現する有望な方策は、送受信局で複数のアンテナ素子を用いる MIMO (Multi-Input Multi-Output) 通信技術の導入である [1]。MIMO 通信とは、複数のアンテナ素子を利用することで同一周波数・同一時間で空間的に複数の信号を多重伝送するものであり、周波数帯域あたりの情報伝送速度 (周波数利用効率) を改善できる。

ところで、移動無線通信では帯域外輻射電力に対する要求が厳しく、送信電力増幅器に対して高い線形性が求められる。例えば、現在のセルラー無線では基地局から送信される信号電力に対して、帯域外への輻射電力を $-40 \sim -50$ dB 程度に抑える必要がある。そのため、電力増幅器の入出力特性の線形性を高める研究が以前から行われてきた。他方、高速無線伝送方式としてマルチキャリア変調あるいは直交周波数分割多重 (OFDM) と呼ばれる手法が知られている [1]。マルチキャリア変調とは、送信すべき情報を複数の狭帯域サブキャリアに分配して伝送する方式であり、周波数選択性伝搬路における歪みの影響を軽減できるため、セルラー無線の下り回線や無線 LAN、地上波デジタル等に広く採用されている [2]。送受信局で複数のアンテナ素子を用いて情報の空間多重伝送を実現する MIMO 技術は、OFDM との親和性が高く、それらを併用することで伝送速度の更なる高速化が可能となる。しかしながら、多数の信号を多重するマルチキャリア (OFDM) 方式では信号のピーク対平均電力比 (PAPR : Peak to Average Power Ratio) がシングルキャリア方式に比べて上昇するため、送信電力増幅器において非線形歪みを生じやすい [3]-[5]。非線形歪みを受けた信号には帯域外へのスペクトル放射が発生し、隣接システムへの干渉を引き起こすため、その対策が必須となる。電力増幅器におけるバックオフ量を増やし、線形領域で動作させることで非線形歪みを軽減できるものの、入力信号の PAPR が高い場合、電力増幅器の電力利用効率が大きく低下する。また、複数の情

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems

報ストリームを空間多重伝送する MIMO-OFDM システムでは、非線形歪みが MIMO 伝送におけるストリーム間の直交性を崩すため通信品質を劣化させる。この問題を解決するには、電力増幅器の非線形歪みの補償技術に加えて、増幅器に入力される信号の PAPR を低減することが重要となる。

OFDM 信号のピーク電力 (PAPR) 抑圧に関する研究は従来から行われている [3][4]。それらの技術は大別して、(1) ピーク値が出現する確率を減らす方法と、(2) 種々のリミタにより振幅制限を行う方法に分類できる。(1) の方法は、各キャリアに適切な位相回転を加える等の方法により、各キャリアの位相が同位相となる確率 (つまりピーク値の出現確率) を下げるものである。誤り率特性を劣化させることなくピーク電力値を低減できるものの、位相制御量を受信側に通知し元の情報を正確に復元するための制御 (冗長) ビットがシンボル毎に必要となるため、伝送効率が低下する。一方、(2) の手法は信号処理により振幅制限を行うものであり、冗長性を導入することなく PAPR を低減できる。また、受信機において特別な信号処理を必要としないため、セルラー無線のような多数の端末が多元接続するシステムに適した手法である。しかしながら、この方式では PAPR の抑圧量に応じて信号品質 (誤り率特性) が劣化する。特に、複数の情報ストリームを空間多重伝送する MIMO システムでは、リミタにより生じる非線形歪みが MIMO 伝送における信号間の直交性を崩すため、ストリーム間の干渉により通信品質が更に大きく劣化する。本研究では、MIMO システムにおける上記の課題を解決する新しいピーク電力制御技術を開発することを目的とする。

2. マルチキャリア方式における PAPR 問題

図 1 に、マルチキャリア方式とシングルキャリア方式における受信信号の周波数スペクトルの概念図を示す。周波数選択性を有する伝搬路をシングルキャリア信号が通過した場合、受信信号スペクトルが大きく歪む (図 1 左)。一方、マルチキャリア方式では複数の狭帯域キャリアを用いて情報を並列伝送するため、キャリアあたりの帯域幅が狭く周波数選択性伝搬路における波形歪みの影響を軽減できる (図 1 右)。伝搬路

の周波数選択性の影響は、情報伝送速度が高速化するほど (信号の帯域幅が広いほど) 大きくなるため、広帯域伝送に適した手法としてマルチキャリア伝送は広く用いられている。

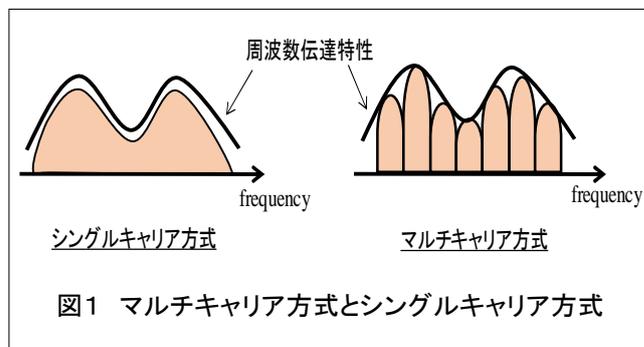


図 2 に、一般的なマルチキャリア変調器の構成とその PAPR が上昇する仕組みを示す。マルチキャリア変調器では伝送すべき情報を複数のキャリアに分配し、それらのキャリアを合成したものを伝送する (図 2(a))。このとき、各キャリアが互いに弱め合う位相関係となる時刻 (図 2(b)) では合成振幅値は低くなり、各キャリアが互いに強め合う位相関係となる時刻では逆に合成振幅値が上昇する (図 2(c))。そのため、マルチキャリア信号の PAPR はシングルキャリア信号に比べて高くなる。このような PAPR が高い信号を電力増幅器に入力する場合、非線形歪みによる帯域外スペクトル放射を生じる (図 3)。

本稿では、MIMO とマルチキャリア (OFDM) を併用する方式を MIMO-OFDM と呼ぶ。図 4 に、アンテナ毎にピーク電力 (PAPR) 抑圧技術を適用した MIMO-OFDM システムの構成図を示す。MIMO-OFDM システムでは、同一時刻・同一周波数で伝送した複数の情報ストリームを空間分離するために、送受信機においてプリコーディングおよびポストコーディングと呼ばれる信号処理技術をサブキャリア毎に施す必要がある。ここで、図 4 に示すように、アンテナ毎の送信信号には高いピーク振幅が発生する。そのため、MIMO-OFDM ではアンテナ毎のピーク電力の抑圧が必要となる。

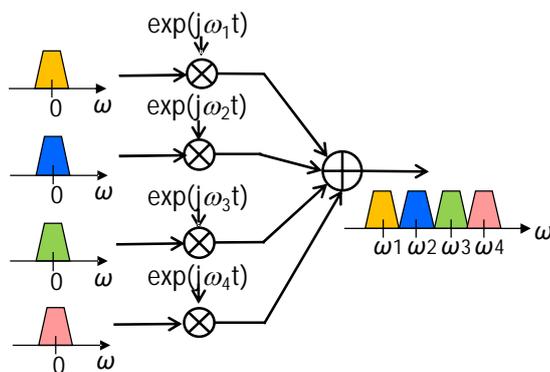
ところで、無線通信システムでは一般的に帯域外輻射電力は隣接チャネル漏洩電力比 (ACLR : Adjacent Channel Leakage power Ratio) として規定される。

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

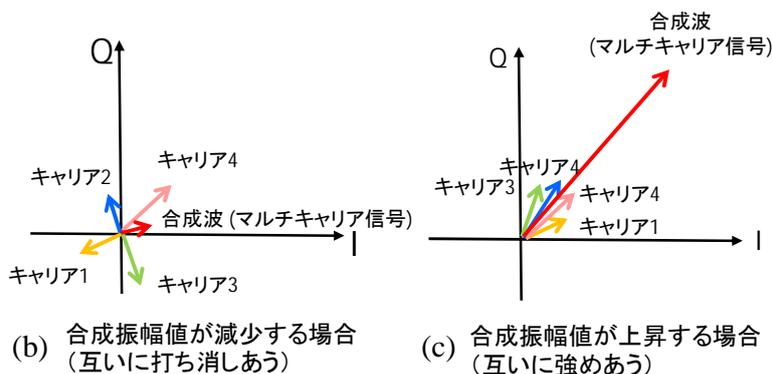
Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems

また、ピークリミタにより信号帯域内に生じる歪み電力量は、EVM (Error Vector Magnitude) と呼ばれる変調精度を表す指標により与えられる。したがって、無線

局では ACLR (帯域外輻射電力) と EVM (歪み電力量) をシステムで定義される許容値以下に抑えながら、PAPR を低減可能なピーク電力抑圧技術が求められる。



(a) マルチキャリア変調器の構成



(b) 合成振幅値が減少する場合 (互いに打ち消しあう)

(c) 合成振幅値が上昇する場合 (互いに強めあう)

図2 マルチキャリア変調信号における PAPR 上昇の原理

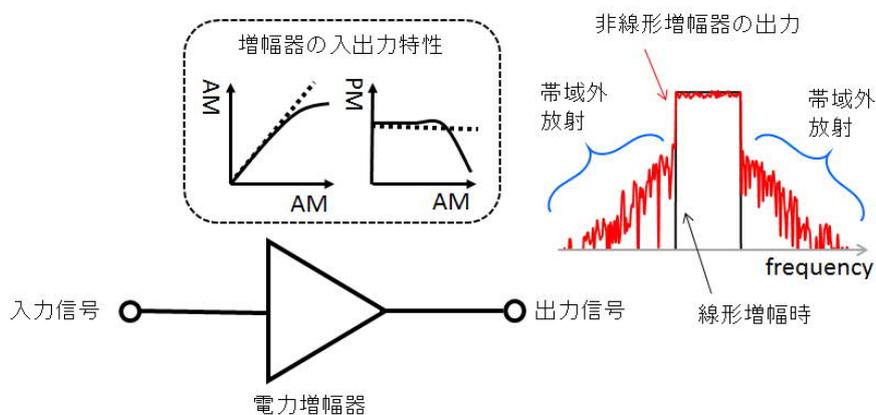


図3 電力増幅器の入出力特性と非線形歪

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems

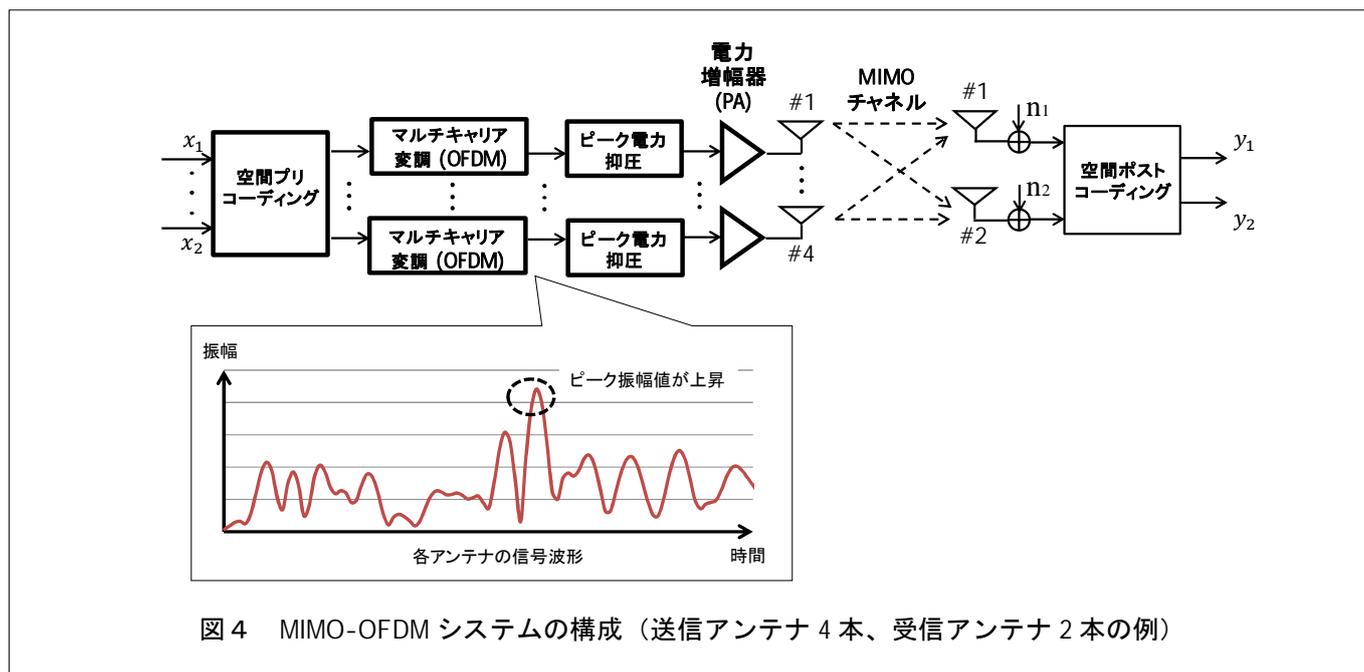


図4 MIMO-OFDM システムの構成 (送信アンテナ 4 本、受信アンテナ 2 本の例)

3. MIMO-OFDM システムの送信ピーク電力制御のための適応ピークキャンセラ方式

本研究では、MIMO-OFDM システムにおいて、帯域外歪み電力 (ACLR) と帯域内歪み電力 (EVM) をシステムで定義される許容値以内に抑えながら、アンテナ素子毎のピーク電力を抑圧するための適応ピークキャンセラを提案した。提案方式について以下で説明する。

提案方式では、送信信号の瞬時電力値がある閾値を超えた場合、パルス波形 (ピーク抑圧信号) を逆位相で加算することで送信信号のピーク振幅を打ち消す。ピーク抑圧信号 (PC : Peak Cancellation 信号) の時間波形と周波数スペクトルを図 5 に示す。PC 信号とはある時刻 (図 5 ではシンボル中央) で全サブキャリアが同位相となる OFDM シンボルのことである。図 5 の左図では、PC 信号波形の中央時刻において鋭いピーク振幅が出現していることがわかる。また、本検討では時間窓を乗算することで PC 信号を時間制限する。このとき、PC 信号のスペクトルには非線形歪みによる帯域外スペクトルを生じる (図 5 右)。

提案方式の特長は、ピーク振幅を故意に発生させた OFDM シンボル (PC 信号) を用いて送信信号のピーク値を打ち消すと同時に、それにより生じる歪み電力

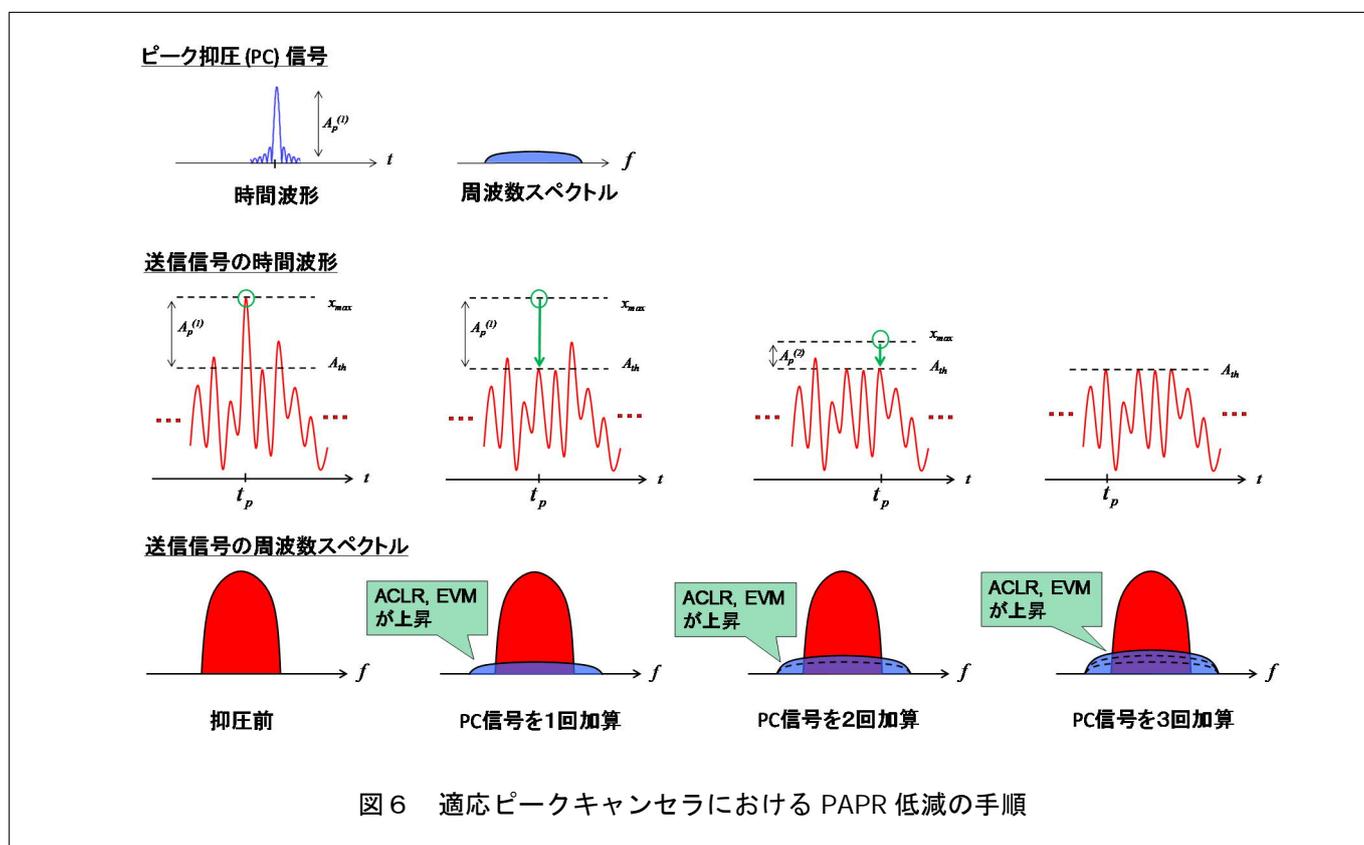
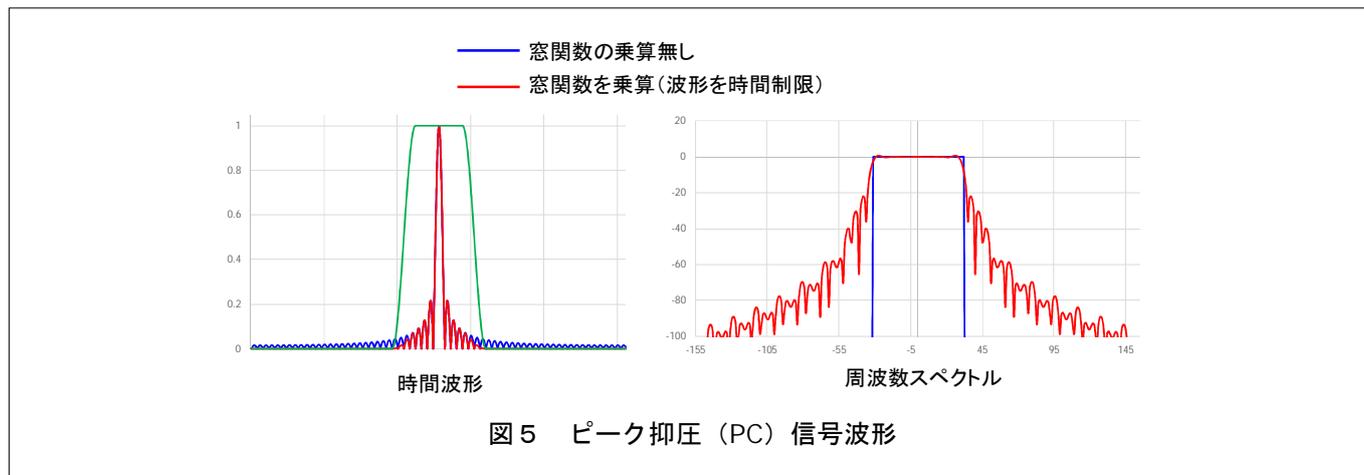
値の大きさを推定制御することである。PC 信号を加算すると、送信信号には帯域内歪みおよび帯域外スペクトル放射が生じ、EVM および ACLR が増加する。

図 5 に示すように、逆位相加算するパルス波形は既知であるので、ピーク振幅の低減 (パルス波形の加算) により送信信号に発生する歪みの程度 (歪み電力の上昇量) を事前に把握できる。この考えに基づき、提案方式ではピーク電力の抑圧により発生する歪み電力の上昇量を観測し、その値を一定値以下に抑える (所要の受信品質を維持する)。その結果、提案方式では帯域内歪み電力 (EVM) と帯域外輻射電力 (ACLR) をシステムで定義される許容値以下に自動的に制限することができ、従来のリミタ方式における歪み問題の解決と大幅な計算量の低減を達成できる。また、本方式の原理はマルチキャリア信号だけでなく、符号多重等の他の信号のピーク電力低減にも応用できる。

提案方式を MIMO システムに適用する場合は、アンテナ毎に個別にピーク抑圧処理を行う [6]。MIMO システムの各アンテナにおける提案手法の手順を図 6 および以下に示す。図 6 は、PC 信号を 3 回加算することにより、閾値を超える送信信号のピーク値が削減されていく様子を描いたものである。

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems



- (a) 第 m アンテナにおける OFDM 信号の最大振幅値を x_{max} 、事前に与えられた閾値を A_{th} とする。
 $x_{max} > A_{th}$ のとき、PC 信号を加算しピーク振幅の低減を実行する。抑圧前後の時間波形を図 7 に示す。
- (b) 加算された PC 信号の大きさから、ピーク抑圧後の帯域外輻射電力 (ACLR) および帯域内歪み電力 (EVM) をそれぞれ求める。
- (c) EVM 値および ACLR 値が許容値を満たす場合、送信信号にピーク抑圧信号 (PC 信号) を逆位相で加算し、ピーク振幅値を閾値まで抑圧する。もし、推定された EVM もしくは ACLR のどちらかが許容値を超える場合は、その時点で抑圧処理を停止する。
- (d) (a)~(c) の操作を OFDM 信号の観測区間の最大振幅値が閾値以下になるまで、もしくは加算回数が規定の回数に到達するまで繰り返す。

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems

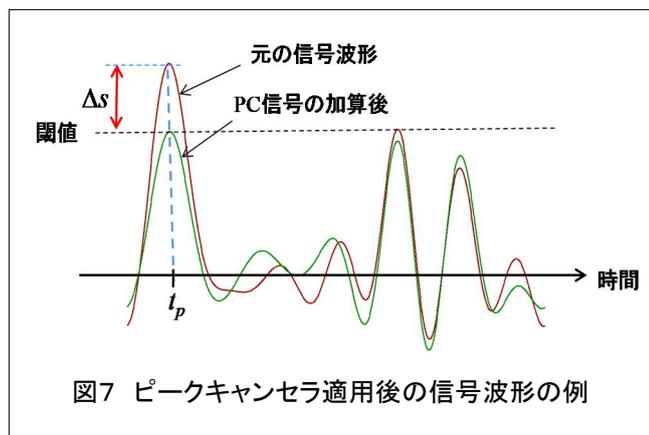


図7 ピークキャンセラ適用後の信号波形の例

PC 信号を 1 回から 3 回まで加算した場合の OFDM 信号スペクトルの一例を図 8 に示す。PC 信号の加算により ACLR が上昇するものの、それが許容値以下 (図 8 では -50dB 以下) に抑えられることがわかる。

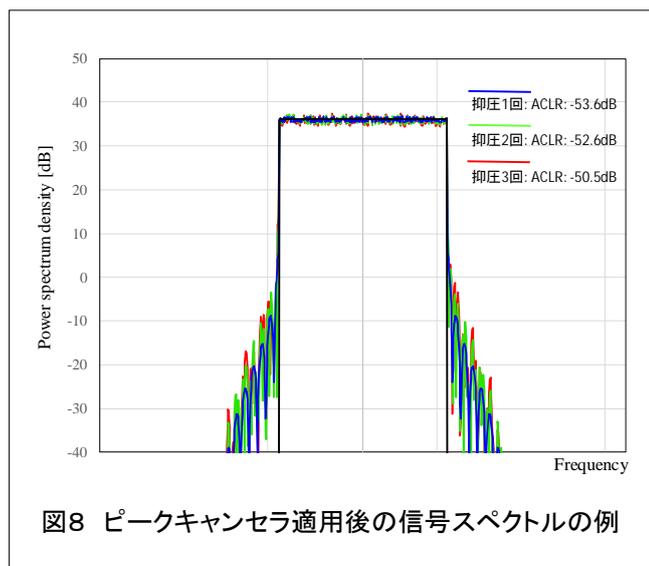


図8 ピークキャンセラ適用後の信号スペクトルの例

提案方式の特性評価結果を以下に示す。MIMO-OFDM の構成は図 4 と同一である。送信アンテナ数 4、受信アンテナ数 2 とする。プリコーディング・ポストコーディングの手法として、固有ビーム空間多重方式[3]を用いる。

提案方式によるピーク電力低減の統計的な効果を示すために、ピーク電力抑圧前後の MIMO-OFDM 信号の瞬時電力分布を評価した。図 9 は、MIMO-OFDM システムにおけるアンテナ毎の送信信号の瞬時電力値の相補累積分布 (CCDF: Complementary Cumulative Distribution Function) を示す。比較のため、従来手法として繰り返し C&F 方式を適用した結果を合わせ

て示す。ここで、繰り返し C&F 方式とは、リミタによる振幅制限とフィルタリングによる帯域外輻射の除去を交互に繰り返し行う手法である。図 9 より、提案方式を用いることにより、OFDM 信号の CCDF=10⁻⁴ における瞬時電力値を抑圧無しの場合と比べて 4dB 以上低減できることがわかる。また、提案方式は、従来方式 (C&F) において繰り返し回数が十分に多い場合と同等の特性を達成できることがわかる。

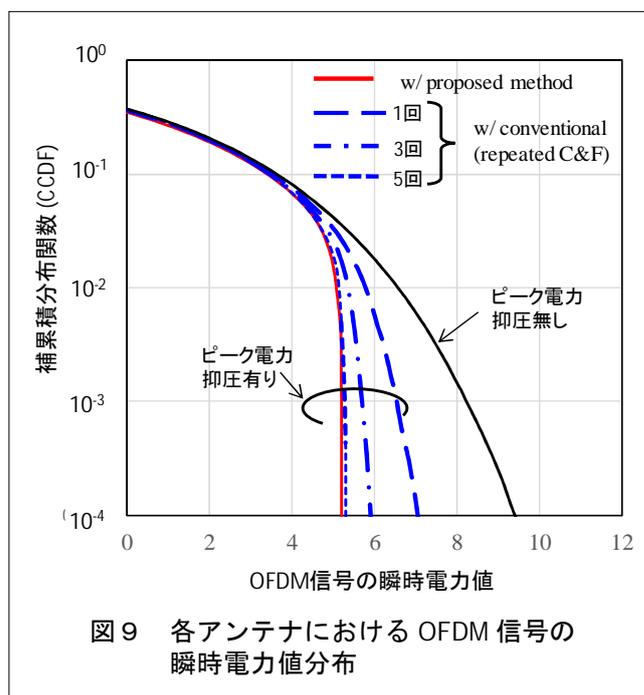


図9 各アンテナにおける OFDM 信号の瞬時電力値分布

図 10 に、帯域内歪み (EVM) と帯域外輻射電力 (ACLR) を信号電力に比べて -20dB 以下、-50dB 以下にそれぞれ制限した場合の MIMO-OFDM システムのビット誤り率特性 (BER : bit error rate) を示す。送受信で単一アンテナを使用する SISO (Single-Input Single-Output) システムにおける特性もあわせて示す。赤い実線は提案方式、黒い実線はピーク電力抑圧による品質劣化がない理想状態での BER 特性を示す。提案方式を用いることで、理想時と比べた場合の BER 特性の劣化量を抑えられていることがわかる。提案方式と理想時との BER の差異は、帯域内歪み量 (EVM) の許容値をいくつに設定するかによって依存する。提案方式では、EVM 許容値をより厳しい値 (例えば、EVM を -25dB 以下等) に設定することで BER の劣化量をより少なくできる。ただし、その場合はピーク電力の抑圧量も下

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems

がるため、ピーク抑圧効果と BER 劣化量とのトレードオフを考慮して EVM 許容値を与えることが重要となる。

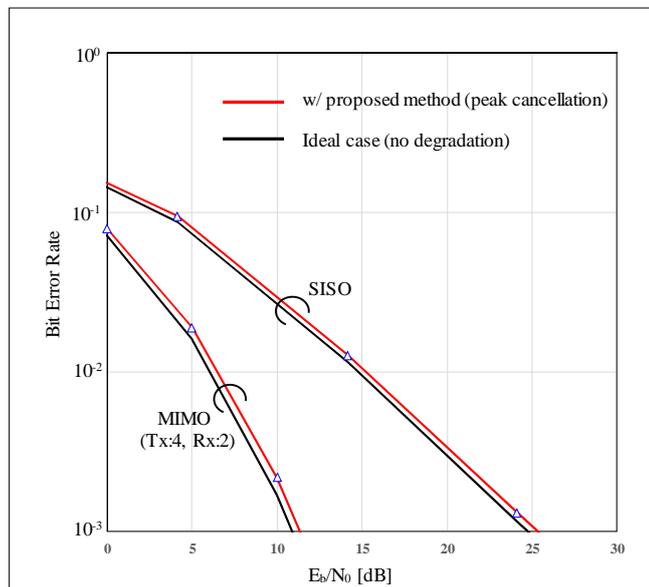


図 10 提案方式を適用した MIMO-OFDM システムのビット誤り率特性 (EVM 許容値-20dB 以下、ACLR 許容値-50dB 以下)

図 11 に、提案方式（ピークキャンセラ）と従来方式（繰り返し C&F 方式）の PAPR 低減に要する演算量の比較結果を示す。横軸は $CCDF=10^{-4}$ における OFDM 信号の瞬時電力値を表し、OFDM 信号のピーク電力値に対応する値として用いる。ここで、OFDM シンボルあたりに要する複素乗算回数を演算量と定義した。図 11 より、提案方式では同一のピーク電力値を達成するための演算量を従来方式（繰り返し C&F）と比べて、約 1/10 程度に減少できることがわかる。

4. まとめと今後の展望

本論文では、MIMO-OFDM システムにおいて、帯域外漏洩電力 (ACLR) および帯域内歪み電力 (EVM) を許容値以下に抑えながら、送信信号の PAPR を低減させる適応ピークキャンセラを提案した。提案方式は、人為的にピーク値を発生された孤立パルス (ピーク抑圧信号) を用いて、事前に与えられた閾値を超える信号振幅を打ち消すものである。また、ピーク抑圧信号の加算による帯域外漏洩電力と帯域内歪み電力の上昇量を逐次的に推定することで、それらをシステムで許容される上限

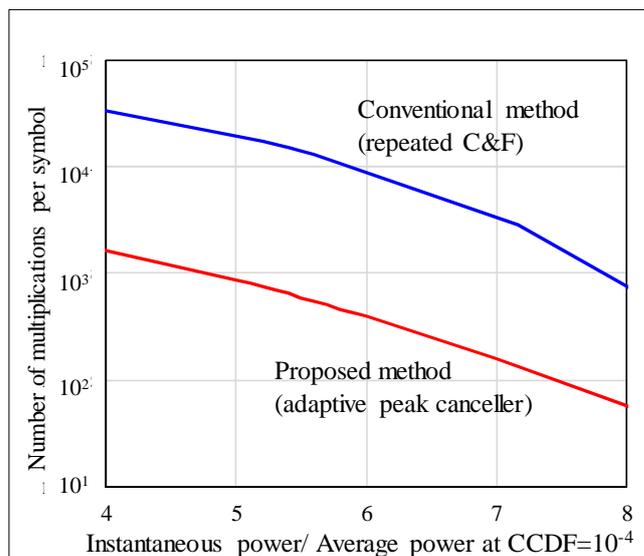


図 11 PAPR 低減に要するシンボルあたりの計算量 (複素乗算回数)

値以下に抑えることができる。提案方式は原理的にはマルチキャリア以外の信号にも適用可能である。

本稿では、マルチキャリア方式に焦点を絞り紹介を行ったが、シングルキャリア方式においてもピーク電力の低減は重要となる。シングルキャリア方式では、一般的に送信信号の PAPR は低い。しかしながら、変調多値数の増加に伴い PAPR は上昇する。また、MIMO システムの送信側において空間プリコーディングを適用する場合、シングルキャリア方式であっても信号の PAPR は上昇する。このとき、MIMO システムの送信機ではアンテナ素子毎の出力電力が同一ではなく、例えば、ほとんど全ての信号出力が 1 アンテナ素子に集中することも起こり得る (図 12)。

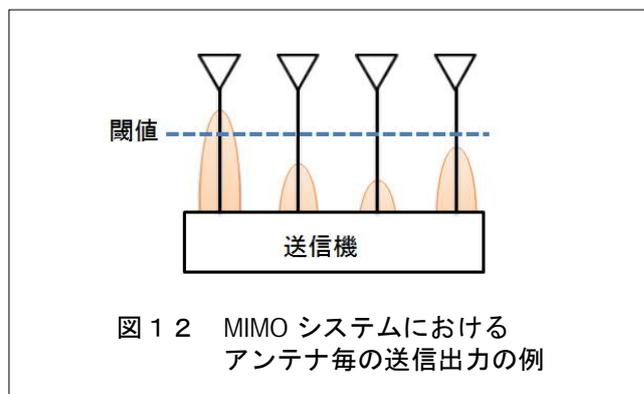


図 12 MIMO システムにおけるアンテナ毎の送信出力の例

MIMO 無線通信システムのためのピーク電力制御方式

Peak Power Control Techniques for MIMO Wireless Communication Systems

このような一時的な送信出力の増大に合わせて大出力の増幅器をアンテナ素子毎に設置することはコスト増につながるため、各アンテナ素子には最大出力を抑えた増幅器を設置することが望ましい。この問題を解決するには、所望の通信品質を維持しながら、アンテナ素子当たりの送信電力を増幅器の最大出力（許容値）以下に制限する必要がある。筆者らは、MIMO シングルキャリア方式においてアンテナ素子当たりの送信出力を制限可能なプリコーディング手法を開発した。その詳細は[7]において報告している。

MIMO におけるアンテナ数が極めて多数（例えば 100 素子以上）である場合、多素子（あるいは大規模）MIMO と呼ばれる[8][9]。多素子 MIMO の特徴は、空間プリコーディングを適用することで極めて鋭い指向性を形成できることであり、適切な制御を施すことで情報伝送に必要な送信電力を低減、つまりエネルギー効率を改善できる。しかしながら、多素子 MIMO システムを用いる場合においてもアンテナ毎の送信信号のピーク電力が高い場合、エネルギー効率を大きく下げため、依然として電力増幅器の電力効率の改善は重要な課題となる。本研究の成果は多素子 MIMO の場合においても活用できると考えられるため、多素子 MIMO に適したピーク電力制御技術を今後検討したい。

参考文献

- [1] R.V. Nee, V.K. Jones, G. Awater, A.V. Zelst, J. Gardner, and G. Steele, "The 802.11 n MIMO-OFDM standard for wireless LAN and beyond," *Wireless Personal Commun.*, No.37, 2006.
 - [2] T. Hwang, C. Yang, G. Wu S. Li, G. Ye. Li, "OFDM and Its Wireless Applications: A Survey," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 4, May 2009.
 - [3] Y. Akaiwa, "Introduction to Digital Mobile Communication, 2nd Edition," Wiley, June 2015.
 - [4] S.H.Han and J.H.Lee, "An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission," *IEEE Wireless Communications*, pp.57-65, April 2005.
 - [5] Y. Rahmatallah and S. Mohan, "Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey And Taxonomy," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol.15, no.4, pp.1567-1592, 2013.
 - [6] Tomoya Kageyama, Osamu Muta, and Haris Gacanin, "An Adaptive Peak Cancellation Method for Linear-Precoded MIMO-OFDM Signals," *Proc. the 2015 IEEE 25th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2015)*, Aug. 2015.
 - [7] Satoshi Takabatake, Osamu Muta, and Hiroshi Furukawa, "A Peak Power Aware Linear-Precoding Scheme for MIMO-SDM Systems," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2014*, Sept. 2014.
 - [8] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Sept. 2010.
 - [9] A. Chockalingam and B. S. Rajan, "Large MIMO System," Cambridge University Press, 2014.
- この研究は、平成 25 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 26 ~ 28 年度に実施されたものです。