

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 25 年 4 月 22 日現在

機関番号： 14101
 研究種目： 基盤研究 (C)
 研究期間： 2010 ～ 2012
 課題番号： 22560372
 研究課題名（和文）OFDM 時間軸信号の周期性を利用した PAPR 特性改善方式に関する研究
 研究課題名（英文）Study on PTS Method with Cycle Sample Shifting for PAPR Reduction in OFDM System
 研究代表者
 小林 英雄 (KOBAYASHI HIDEO)
 三重大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号： 60303749

研究成果の概要（和文）：本研究では、OFDM 通信方式の PAPR 問題を解決する「循環サンプルシフト-PTS 方式」を提案した。提案方式は、OFDM 時間軸信号の周期性により時間遅延を与えることは時間軸信号を単に巡回シフトとなることに着目し、時間遅延された信号の加算処理だけで PAPR 特性の改善を可能としている。一方、時間遅延は周波数軸上で位相偏移に相当するフーリエ変換の特徴を利用することにより、受信側で自律的に送信側の時間遅延量を推定可能とする方式提案を行った。

研究成果の概要（英文）：This project proposed a new PTS method with cycle sample shifting which can achieve the better PAPR performance than that for the conventional PTS method. The salient feature of proposed method is to enable the PAPR reduction with small computational complexity, which includes only the processing of cyclic time shifting in each cluster signal and summations of time domain signal for all clusters. This is different from the conventional PTS method, which requires both the processing of summation and multiplication.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総 計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：OFDM, PAPR, PTS, 無線通信, マルチパスフェージング, 非線形増幅器, 非線形歪み

1. 研究開始当初の背景

OFDM 通信方式は、周波数の有効利用に優れ、マルチパスフェージング環境下で優れたビット誤り率(BER)特性を達成し、簡易な送受信機構成で多値 QAM 等の高能率変調方式の同期検波復調が可能なることから、次世代広帯域マルチメディア無線通信システムの通信方式として注目されている。OFDM 方式は、多く

の優れた特長を有する半面、時間軸信号のピーク電力対平均電力比(PAPR: Peak to Average Power Ratio)特性が従来の単一キャリア方式に比べて非常に大きいことが問題となっていた。PAPR 問題は、A/D 変換器の所要ダイナミックレンジの増大や非線形増幅器の電力利用効率の低下につながり、特に低コスト・低消費電力での運用が要求されるバ

ッテリ運用の携帯端末での OFDM 方式の利用を制限していた。OFDM 方式の PAPR 問題に対しては、これまでに多くの改善方式が提案されていたが、所望の PAPR 特性を達成するためには演算処理量が大きくなることや、受信側に制御情報を通知する必要があり装置構成が複雑になると言う問題があった。PAPR 問題は、現在でも未解決な課題として広く検討されており、簡易な装置構成で実現可能な PAPR 改善方式の実現が強く求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、OFDM 方式の利用に際して残された課題となっている PAPR 問題を、簡易な装置構成で解決することを目的とした。本研究では、OFDM 信号の時間軸信号が周期性を有していることから、時間遅延を与えることは時間軸信号系列を単に巡回シフトさせることに対応し、時間遅延された信号の加算処理だけで PAPR 特性を改善できるのではないかと考えた。また、時間遅延はクラスターごとに独立に設定可能であり、PAPR 特性の最適化に必要な繰り返し回数を従来方式と比較して各段に削減できるのではないかと考えた。一方、時間遅延は周波数軸上で位相偏移に相当するフーリエ変換の特徴を利用することにより、受信側で自律的に送信側の時間遅延量を推定可能と考え、サイド制御情報なしに高精度な復調が可能となるのではないかと考えた。

本研究では、上記の着想より「循環サンプルシフト-PTS 方式」を提案し、理論的検討と計算機シミュレーションにより各種伝送方式について評価検討し、提案方式の有効性を実証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 循環サンプルシフト-PTS 方式の提案

図 1 に、本研究で提案する PAPR 改善方式の送信機構成の概念図を示す。提案方式は、先ず周波数軸上の情報データを複数のクラスターに分割し、各クラスターに含まれる周波数軸信号を IFFT により時間軸信号に変換する。提案方式では、PAPR 特性が最小となるように各クラスターの時間軸信号に時間遅延を与える。時間遅延を与えることは、図 1 に示すように OFDM 時間軸信号の有する周期性により、単に時間軸信号を巡回シフトすることに相当する。これにより、各クラスターの時間遅延量は簡易に変更可能となり、更に OFDM 時間軸信号は各クラスターの時間軸信号を加算演算するだけで求めることができる。従来方式である PTS(Partial Transmission Sequence) 方式が加算と乗算処理が必要なのに対して、提案方式では基本的に加算処理だけで簡易に PAPR 特性の改善が可能となることを特徴としている。

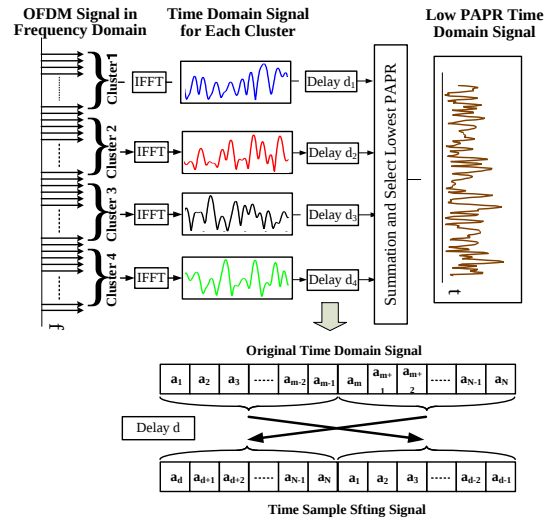


図 1 提案する循環サンプルシフト-PTS 方式の送信機構成

受信機側では、図 2 に示すように時間遅延された時間軸信号は、周波数軸上では位相偏移された信号となるフーリエ変換の特徴を利用することにより、送信機側で設定された時間遅延量を制御情報なしに推定可能となる。本研究では、送信側で与えた時間遅延量の推定法として、伝送路推定用のパイロット信号を利用した方式を提案する。

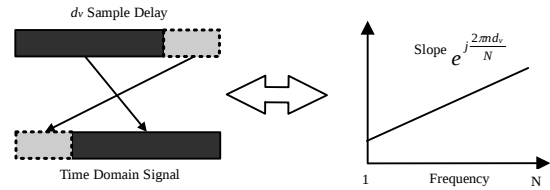


図 2 時間遅延と位相回転量の関係

(2) 提案方式の送信機構成

図 3 に、提案方式の送信機構成を示す。送信側では、周波数軸上の情報データは複数のクラスターに分割され、それぞれが IFFT により時間軸信号に変換される。各クラスターの時間軸信号は、図 1 に示すように巡回シフトすることにより時間遅延が付加される。ここで、各クラスターの時間軸信号に与える時間遅延は、予め用意された複数の遅延量の候補の中から順次選択される。クラスターごとに時間遅延量が与えられた時間軸信号は合成され PAPR 特性が計算され、予め決められた時間遅延量の組み合わせの中で最小の PAPR 特性を有する時間遅延の組み合わせの信号が送信される。

ここで、各クラスターに与えられる循環サンプルシフト数は次式の中から選択される。

$$d_v \in [m_1, m_2, \dots, m_{N/D}] \quad (1)$$

但し、 N は IFFT ポイント数で D は循環サンプルシフト間隔を示し、循環サンプルシフト候

補数は N/D となる。クラスター数 V が 4 の場合、式 (1) より PAPR 特性を最小にするシフト数は次式によって最適化される。

$$[d_1, d_2, d_3, d_4] = \arg \min_{[m_1, m_2, \dots, m_{N/D}]} \left\{ \max_{0 \leq k \leq N-1} |x_k| \right\} \quad (2)$$

但し、 d_1 から d_4 はクラスター 1 から 4 の時間軸信号に与えられる時間遅延量であり、 x_k は合成された時間軸信号を示す。式 (2) より最少の PAPR 特性を得るために必要な時間遅延量に組み合わせ数は、クラスター数が V で予め決められた時間遅延量の候補数が $m_{N/D}$ 個とすると、次式で与えられる。

$$I_{te} = V^{N/D} \quad (3)$$

図 4 に、クラスター数 $V=4$ 、IFFT ポイント数 $N=32$ 、サブキャリア数 $M=16$ の場合で、循環サンプル間隔 D を変化させた場合の提案方式の PAPR 特性を示す。図より、提案方式は D を小さくするに従って PAPR 特性を大幅に改善可能となることが分かる。特に、 $D=1$ の場合の提案方式は、CCDF $=10^{-1}$ の点で従来方式である PTS 方式と比べて 1.8dB、PAPR 低減を行わない OFDM 方式と比べて 4.0dB の改善が得られている。しかしながら、提案方式は D を小さくすることにより PAPR 特性を大幅に改善可能とするが、式 (3) より明らかなように時間遅延量の組み合わせ数が指数関数的に増加するという問題がある。

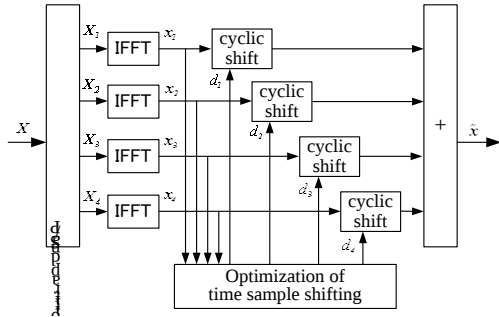


図3 提案方式の送信機構成

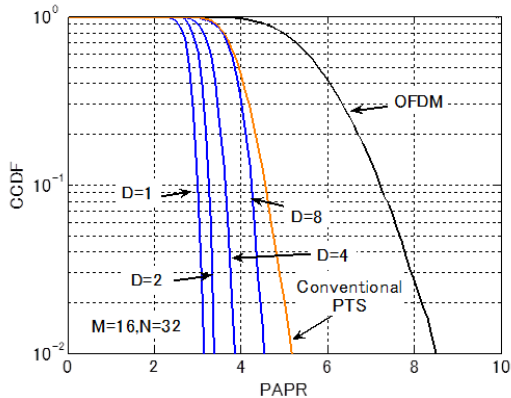


図4 提案方式の PAPR 特性

(3) 演算量削減アルゴリズムの提案

提案方式で問題となる演算量の指数関数的な増大を回避するために、従来の PTS 方式と同等の演算量で優れた PAPR 特性を実現可能な演算量削減アルゴリズムを提案した。

図5に、提案アルゴリズムのフローチャートを示す。図5で、 S 、 V 、 N/D は提案アルゴリズムの繰り返し回数、クラスター数、時間遅延候補数を示し、それぞれ s 、 v 、 m をパラメータとする。

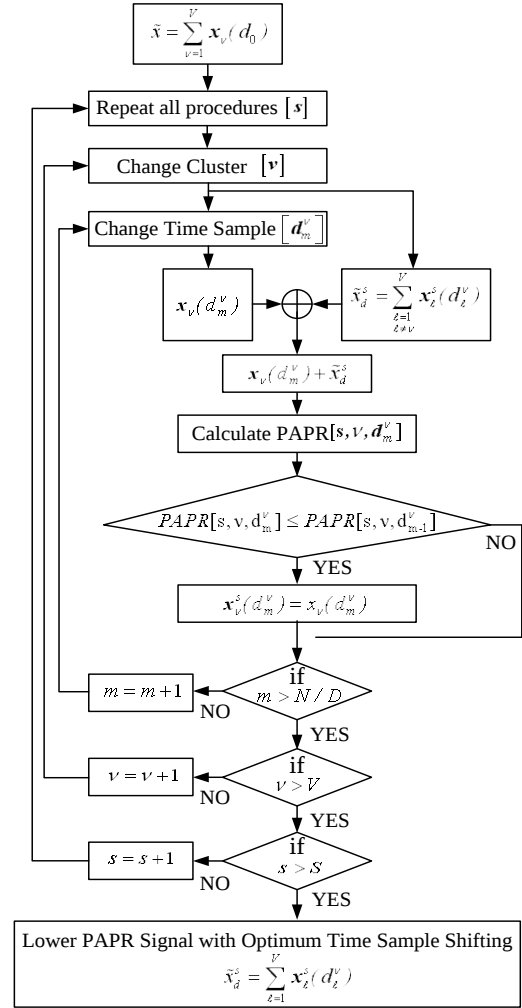


図5 提案方式の演算量削減アルゴリズム

提案アルゴリズムでは、時間遅延量の最適化をクラスターごとに独立に行う。まず、 s 回目の提案アルゴリズムにおける、 v 番目のクラスターについて考える。時間遅延処理前の v 番目のクラスター $x_v(d_0)$ に対して、 d_m^v の時間遅延を与える。時間遅延処理を行わないその他のクラスターについては次式によって予め合成しておく。

$$\tilde{x}_d^s = \sum_{l=1, l \neq v}^V x_l^s(d_l^v) \quad (4)$$

次に、時間遅延処理後の v 番目のクラスター $\mathbf{x}_v(d_m^v)$ と式(4)によって与えられる $\tilde{\mathbf{x}}_d^s$ との合成信号 $\mathbf{x}_v(d_m^v) + \tilde{\mathbf{x}}_d^s$ のPAPRを計算する。その後、次式によって、 v 番目のクラスターに d_{m-1}^v の時間遅延を与えた場合の合成後の信号 $\mathbf{x}_v(d_{m-1}^v) + \tilde{\mathbf{x}}_d^s$ のPAPR特性と比較する。

$$\text{PAPR}[s, v, d_m^v] \leq \text{PAPR}[s, v, d_{m-1}^v] \quad (5)$$

式(5)が成立する場合は、次式によって v 番目のクラスターの現時点での最適な信号 $\mathbf{x}_v^s(d_m^v)$ を更新する。

$$\mathbf{x}_v^s(d_m^v) = \mathbf{x}_v(d_m^v) \quad (6)$$

$m=1$ から $m=N/D$ の全ての時間遅延候補についてPAPRの評価を行った後の $\mathbf{x}_v^s(d_m^v)$ が、最適な時間遅延量を持つ v 番目のクラスターとなる。 v を変化させ、全てのクラスターについて同様の処理を行うことにより、各クラスターに与えられる最適な時間遅延量が決定される。さらに、 s を変化させ、全ての処理を複数回繰り返すことによりPAPRの改善が可能となる。

(4) 受信側での時間遅延量の推定法

受信側で、送信信号に与えられた時間遅延量推定法について説明する。図2に示すように、時間軸信号に d_v サンプルの時間遅延を与えることは、周波数軸上では $2\pi d_v n / N$ ($n=0, 1, \dots, N-1$)の位相回転を与えることに相当する。この関係を用いると、 v 番目のクラスターの受信パイロット信号は次式によって表される。

$$R_v(l, k) = A e^{j(\phi_0 + \frac{2\pi d_v k}{N})} \cdot H(l, k) \quad (7)$$

$$k = p_1, p_2, \dots, p_{M/VJ}$$

ここで、 $A e^{j\phi_0}$ は受信側で既知のパイロット信号を示す。また、 $k = p_1, p_2, \dots, p_{M/VJ}$ は周波数軸上のパイロット信号の位置を示し、 J はパイロット信号間隔で M/VJ は1クラスター当たりのパイロット信号数を示す。式(7)より、受信信号には、送信側で与えられた時間遅延量に相当する位相回転成分が含まれるため、伝送路推定を正しく行うためには、この位相回転成分を推定する必要があることが分かる。

本研究では、連続するシンボル間では伝送路特性の時間変動は十分小さいと仮定し、受信信号 $R_v(l, k)$ を1つ前の $(l-1)$ 番目のシンボルの伝送路特性を用いて等化する。ここで、1シンボル目のプリアンブルシンボルについては、時間遅延処理を行っていないため、通常の手順で伝送路推定が可能である。これによって2シンボル目以降のデータシンボルの時間遅延量の推定が可能となる。また、全てのパイロット信号に同一情報を用いることで、伝送路特性のレベルに応じて重み付けを行う最大比合成が利用可能となる。次式に、時間遅延量が d_v と想定した場合の最大比合成の

出力結果を示す。

$$\sum_{k=p_1}^{p_{M/VJ}} \frac{|H(l-1, k)|^2}{\sum_{t=p_1}^{p_{M/VJ}} |H(l-1, t)|^2} \cdot \frac{R_v(l, k)}{H(l-1, k)} \cdot A e^{-j \frac{2\pi d_v k}{N}} \quad (8)$$

$$\cong A e^{j\phi_0}$$

ここで、時間遅延量 d_v は N/D 個の候補の全ての時間遅延候補を代入し、式(8)の出力結果が受信側で既知のパイロット信号 $A e^{j\phi_0}$ との信号点間距離が最も小さくなる時の d_v が送信側で与えられた時間遅延量と判定される。以上の操作により、送信側で与えられた時間遅延量を受信側で自律的に推定することが可能となる。

(5) 提案方式の特性評価

計算機シミュレーションにより提案方式の有効性を評価した。OFDM方式の周波数帯域幅は5MHz、変調方式は256QAM、サブキャリア数 M は128、PAPRの正確な評価を行うためにオーバーサンプリング比を4として、FFTポイント数 N は512とした。非線形増幅器としてSSPAを想定し、ラップ係数6、インプットバックオフ(ISO)は-5dBとした。提案方式と従来方式のクラスター数 V は4、従来方式の位相回転候補数は4とした。

① 提案方式と従来方式のPAPR特性の比較

図6に、時間遅延間隔 D を変化させた場合の、従来方式からのPAPR特性の改善量を示す。ここで、非線形回線下においては、 $CCDF=10^{-1}$ 付近のPAPR特性がBER特性に対して支配的となるため、 $CCDF=10^{-1}$ におけるPAPR特性を比較した。図より、PAPR特性の改善量は、 D の値に関わらず提案アルゴリズムの繰り返し回数 S が2で収束している。また、 D を小さくとり、時間遅延候補数を増やすほどPAPR特性の改善量は大きくなるが、演算量は増大する。

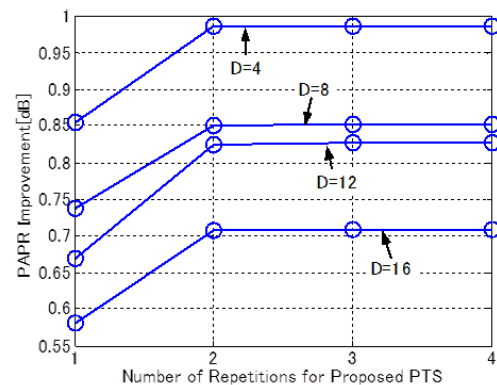


図6 従来方式からのPAPR特性の改善量

② 提案方式の所要演算量

表1に、提案方式の循環サンプルシフト間隔 D を変化させた場合の従来方式と提案方式

の所要演算量比 R (=提案方式の演算量/従来方式の演算量) と PAPR 特性の改善量を示す。提案方式の演算量削減アルゴリズムの繰り返し回数は図 6 の結果より $S=2$ とした。

表 1 提案方式の所要演算量

時間遅延 間隔 D	所要演算量比 R	PAPR 改善量 (dB)
4	2.55	0.99
8	1.33	0.85
12	0.93	0.83
16	0.72	0.71

表 1 より、時間遅延間隔 D が 6 と 8 の場合に、提案方式は従来方式と比較して PAPR 特性をそれぞれ 0.83dB, 0.71dB 改善可能であることが分かる。また、このときの演算量はそれぞれ従来方式の 0.93 倍, 0.72 倍となり、提案方式は従来方式と比較して少ない演算量で PAPR 特性の改善が可能であることが分かる。

③ 提案方式の PAPR 特性

図 7 に、 $V=4$, $D=12$, $S=2$ の場合の提案方式の PAPR 特性を示す。比較のために、PAPR 低減処理を行わない従来の OFDM 方式と、従来の PTS 法の PAPR 特性を示す。図より、提案方式は $CCDF=10^{-1}$ における PAPR 特性が従来の OFDM 信号と比較して 2.8dB, 従来の PTS 法と比較して 0.83dB 改善していることが分かる。

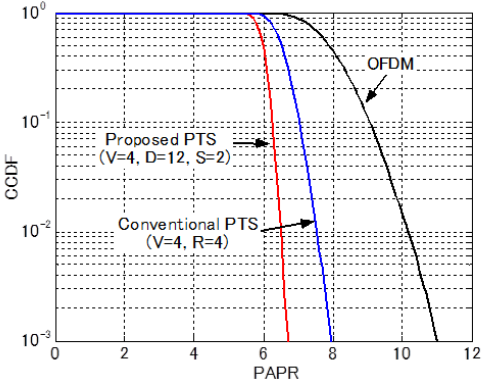


図 7 提案方式の PAPR 特性

④ 提案方式の時間遅延量の判定誤り率

図 8 に、受信側で送信信号に与えられた時間遅延量を推定した場合の判定誤り率特性を示す。図より、移動通信環境下では静止通信環境下と比較して判定誤り率が劣化している。これは、移動通信環境下においては、時間遅延量を自シンボルの 1 つ前のシンボルの伝送路特性を用いて推定するため、時間遅延量の推定に一旦誤りが発生するとそれ以降のデータシンボルの同じクラスターに誤り伝搬が発生するためである。ただし、誤り伝搬を考慮しても判定誤り率は $C/N=36$ dB で 10^{-4} 付近となり、BER 特性に与え

る影響は小さいことが期待される。また、AWGN 環境下においては時間遅延量の推定誤りはほとんど発生せず、 $C/N=16$ dB 以降での判定誤り率は 0 となった。

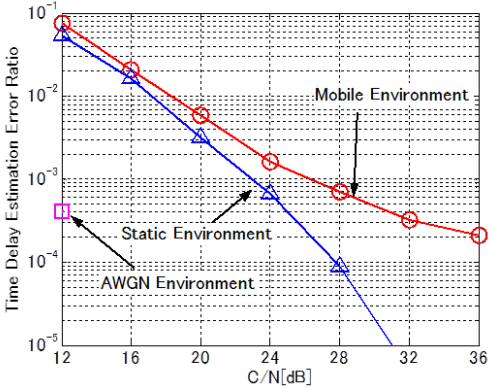


図 8 時間遅延量の判定誤り率特性

⑤ 提案方式の総合特性

図 9 に、非線形回線と移動通信環境下における提案方式の BER 特性を示す。図には、従来の OFDM 方式、従来の PAPR 底辺方式と線形回線下における OFDM 方式の BER 特性も合わせて示す。また、送信側で与えた時間遅延量が受信側で既知の理想的な場合の提案方式の BER 特性も示す。図より、提案方式は従来方式と比較して優れた BER 特性が得られており、線形回線下の OFDM 方式と同等の BER 特性を達成可能であることが分かる。また、時間遅延量を受信側で推定した場合の提案方式の BER 特性は、受信側で既知とした理想的な場合の BER 特性とほぼ一致しており、提案した時間遅延量の推定方式の有効性が実証された。

以上の結果より、提案方式は従来方式と比較して少ない演算量で PAPR 特性を改善可能とし、更に従来方式で必要であった制御情報を受信側に通知することなく、受信側で自律的に推定可能であることが実証された。

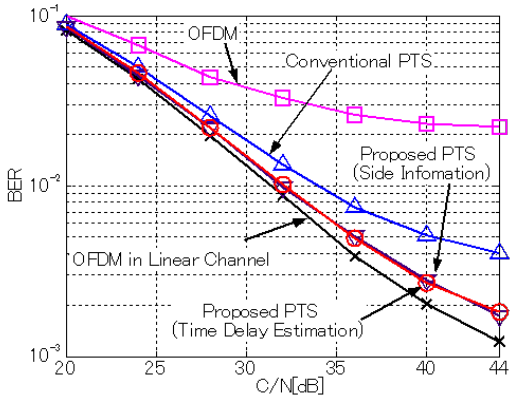


図 9 非線形回線と移動通信環境下における提案方式の BER 特性

4. 研究成果

OFDM 方式は、周波数利用効率に優れ、マルチパスフェージング環境下で優れた BER 特性が得られる等の優れた特長を有する半面、時間軸信号の PAPR 特性が従来の単一キャリア方式に比べて非常に大きいことが問題となっていた。本研究では、OFDM 方式の利用に際して残された課題となっていた PAPR 問題を解決する「循環サンプルシフト-PTS 方式」を提案した。提案方式は、各クラスターの時間軸信号に独立に時間遅延を与えることによって、従来の PTS 法と比較して、少ない演算量で優れた PAPR 特性を達成可能であり、受信側で送信信号に与えた時間遅延量を自律的に推定することによって、制御情報なしに高精度な復調を可能とすることを特徴としている。本研究では、計算機シミュレーションにより、非線形回線と移動通信環境下における特性評価を行い、提案方式の有効性を実証した。

本研究で提案した時間遅延情報の受信側での推定法は、従来の PTS 法にも適用可能であり、制御情報を必要としない PTS を提案した。また、本研究で利用した伝送路特性推定法を用いて、上り回線 OFDMA 通信方式の非線形増幅器で発生する帯域外輻射による隣接チャネル間干渉雑音の軽減方式を提案した。一方、OFDM 方式と比べて PAPR 特性が格段に優れた SC-OFDM 方式についても、本研究の一環として検討を行い、時間軸トレーニング信号を用いた伝送路インパルス応答推定法についても提案した。

本研究プロジェクトでは、OFDM 方式の利用に際して残された課題となっていた PAPR 問題に対して複数の方式提案を行い、これら研究成果を纏めて、学術雑誌 5 件、国際会議 15 件、研究会 8 件を発表した。これら研究成果は、電力と周波数の有効利用と高品質なデータ伝送を可能とするものであり、OFDM 方式の新たな利用促進と OFDM 方式を基本とした次世代無線通信システムへの更なる発展が図れるものと確信する。

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 21 件)

- ① 福井淳一, 内藤克浩, 森香津夫, 小林英雄, 上り回線 OFDMA 通信方式における隣接チャネル間干渉軽減方式の提案, 査読有, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J95-B, No. 12, 2012, pp. 1657-1661.
- ② Pornpawit Boonsrimuang, Pisit Boonsrimuang, Tawil Paungma and Hideo Kobayashi, Proposal of QAM-OFDM System with IDAR Method Designed for

Satellite Channel, 査読有, ECTI Trans. on Computer and Information Technology, Vol.6, No.2, 2012, pp.108-119.

- ③ Pornpawit Boonsrimuang, Pongsathorn, Reangsuntea, Pisit Boonsrimuang and Hideo Kobayashi, Proposal of Improved PTS Method Based on Split-Radix IFFT for OFDM Signal, 査読有, The David Publishing Journal, Trans. on Computer Technology and Application, Vol.3, No.6, 2012, pp.425-430.
- ④ 福井淳一, 内藤克浩, 森香津夫, 小林英雄, OFDMA 通信方式における上り回線用ユーザ間干渉軽減方式の提案, 査読有, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J95-B, No. 2, 2012, pp. 388-392.
- ⑤ Tanairat Mata, Pornpawit Boonsrimuang, Pisit Boonsrimuang and Hideo Kobayashi, Proposal of Improved PTS Method for STBC MIMO-OFDM Systems, IEICE Trans. on Communication, 査読有り, Vol.E93-B, 2010, pp.1615-1619.
- ⑥ 小林英雄, 次世代携帯電話システム (LTE) の通信方式について - 周波数軸変調方式 (OFDM) と時間軸変調方式 (SC-OFDM) -, 査読無, 中部電力 技術開発ニュース (トピックス), Vol.140, 2010, pp.3-4.

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① 小池友人, 内藤克弘, 森香津夫, 小林英雄, 移動通信環境下における OFDM 通信方式の PAPR 低減方式に関する検討, 電子情報通信学会・衛星通信研究会, 2012 年 2 月 17 日, 津市.
- ② 山本智一, 森香津夫, 内藤克浩, 小林英雄, 移動通信環境下における SC-OFDM 通信システム用伝送路推定方式に関する検討, 電子情報通信学会・衛星通信研究会, 2012 年 2 月 17 日, 津市.
- ③ 小林英雄, [招待講演] OFDM 通信方式の基礎とその応用, 電子情報通信学会・ユビキタスセンサーネットワーク研究会, 2012 年 1 月 19 日, 鳥羽市.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.com.elec.mie-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 英雄 (KOBAYASHI HIDEO)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60303749