

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007年度～2010年度

課題番号：19360170

研究課題名(和文) 飽和増幅器を用いた線形変調信号の高効率送信の研究

研究課題名(英文) High-Efficiency Transmission of Linear Modulation Signals with a Saturated Amplifier

研究代表者

山尾 泰(YAMAO YASUSHI)

電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーションセンター・教授

研究者番号：10436735

研究成果の概要(和文): 本研究ではブロードバンド移動通信で用いられる OFDM などの線形変調信号の送信電力効率の限界を打ち破るため、増幅器の最大効率領域(飽和領域)で常時動作させる新たな線形送信方法(包絡線パルス幅送信法; Envelope Pulse Width Modulation Transmitter, EPWM 法)を提案し、その実現の鍵である量子化雑音の詳細な解析を行うと共に、これを抑圧するための振幅補償(Amplitude Noise Compensation, ANC 法)を提案し、その効果が大きいことを確認した。

研究成果の概要(英文): In order to break the limit of transmitter power efficiency for linear modulation signals used in broadband mobile communications, a novel transmitter architecture called EPWM (Envelope Pulse Width Modulation) transmitter has been proposed. The transmitter can be operated in the saturation region of a power amplifier and gain maximum power efficiency. However, reducing quantization noise from EPWM process is a critical issue. After analyzing characteristics of the noise in detail, an ANC (Amplitude Noise Compensation) method has been proposed and validated to be effective in reducing the noise.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,700,000	2,610,000	11,550,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：無線通信用装置技術

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学(5104)

キーワード：移動体通信、省エネルギー、高周波増幅器

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 携帯電話は今や国民生活になくてはならない社会インフラとなっているが、さらに「電話」から、モバイルインターネットや音楽配信など、高速・大量のデータを送受信するための「携帯情報機器」へと向かっており、携帯電話ブロードバンド化の研究開発が進められた。

(2) これに用いる無線信号として、OFDM

などの線形マルチキャリア信号の採用が進んでいたが、この信号をひずみ無く送信するために電力効率を犠牲にせざるを得ず、新たな送信機の構成法の検討が望まれていた。

## 2. 研究の目的

(1) OFDM などの線形マルチキャリア信号をひずみ無くしかも高い電力効率で送信できる送信方法を検討し、その実現上の課題を

分析する。

(2) 実現上の課題を解決するための方法を考案し、その効果を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) OFDM など振幅変動の大きな入力信号の包絡線振幅を - 変調器を用いてパルス幅変調信号に一旦変換することで、増幅器の最大効率領域（飽和領域）で常時動作させる新しい線形送信方法（包絡線パルス幅送信法；Envelope Pulse Width Modulation Transmitter, EPWM 法）を提案し、その実現の鍵である、

- 変調器から発生する量子化雑音の詳細な解析を行う。

(2) 量子化雑音の送信波への影響を明らかにし、移動通信システムで許容される変調信号帯域内および帯域外での SN 比が達成できるように回路と信号処理のパラメータを決定する。

(3) 量子化雑音をさらに低減するため、

- 変調器の入出力信号の差分から量子化雑音を抽出し、その低域成分のみを用いて振幅を微小量だけ制御することにより、通信への影響が大きい搬送波近傍の量子化雑音を選択して打ち消す方法を提案し、その効果を明確にする。

このため以下のように研究を進めた。

#### 【2007年度】

提案方式の基本動作を確認した。

- ・ 提案送信機のプログラム上での実現
- ・ 提案方式での量子化雑音の性質とその影響の基本解析
- ・ 伝送実験系の構築

#### 【2008 - 2010年度】

提案方式での量子化雑音の変調波への影響を詳細に解析するため、以下を検討した。

- ・ 提案方式での量子化雑音の性質とその影響の詳細解析
- ・ 量子化雑音のさらなる低減方法の検討とその効果の定量化
- ・ 伝送実験によるシミュレーション結果の確認と提案方式の実用化に向けた論理回路および無線回路設計

### 4. 研究成果

#### 【2007年度】

- (1) 提案送信機のプログラム上での実現。
- 提案した EPWM 送信機の構成図を図 1 に示す。この構成に対して複素包絡線の生成、位相変調器、 - 変調器、バンドパスフィルタ(BPF)など、提案した送信機の構成要素をプログラムで実現し、以上の要素を結合して IEEE 802.11a OFDM 信号を発生させ、総合動作を確認した。
- (2) 提案方式での量子化雑音の性質とその影響の基本解析

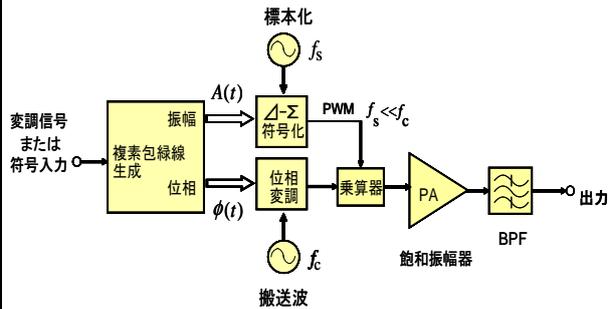


図 1 EPWM 送信法の構成

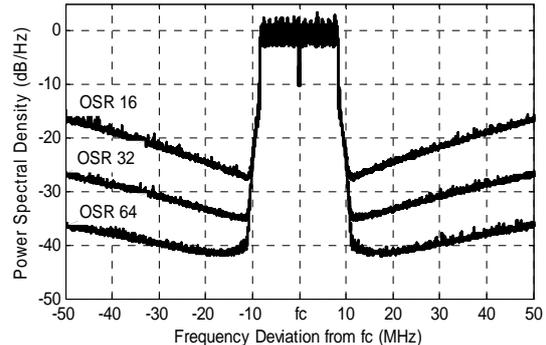


図 2 EPWM 送信機で発生した OFDM 信号送信スペクトルと - 変調器のオーバーサンプル次数(OSR)との関係

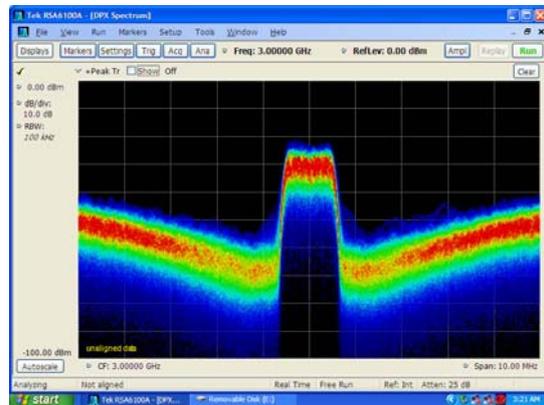


図 3 実験で発生した EPWM 送信波

- ・ OFDM 信号包絡線のスペクトルと、これを - 変調した場合の量子化雑音スペクトルの間の関係を把握し、量子化雑音スペクトルの基本的性質を分析・定式化した。
  - ・ - 変調器のオーバーサンプル次数、 - 変調器の伝達関数と量子化雑音スペクトルの関係を明らかにし、帯域内電力と、帯域外電力を分離して算出した。例としてオーバーサンプル次数を変えた場合の OFDM 信号スペクトルを図 2 に示す。
- (3) (1)で作成したプログラムで発生させた EPWM 時系列データを直交座標変換してベクトル信号発生器に入力し、搬送波帯域に

変換して周波数スペクトルを観測した結果、本提案法で OFDM 変調波の発生が可能であることを確認した。これを図 3 に示す。

【2008 - 21年度】

(1) 提案方式での量子化雑音の性質とその影響の詳細解析

前年度に引き続き、EPWM 送信機の量子化雑音スペクトルと各種パラメータの性質を分析し、理論解析結果とシミュレーション結果とのよい一致を見た。例として OFDM 信号を入力した場合の 1 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器で発生する量子化雑音スペクトルの理論計算値とシミュレーション実験値との比較を図 4 に示す。

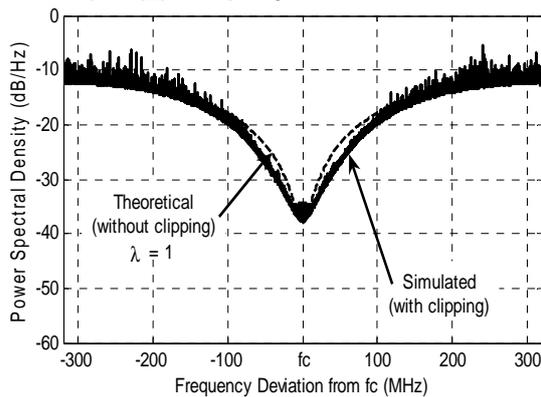


図 4 OFDM 信号を入力した場合の 1 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器で発生する量子化雑音スペクトルの理論計算値とシミュレーション実験値との比較

また、隣接チャンネルへの量子化雑音の影響を抑えるため、零点を有する 2 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器を用いた EPWM 送信機の量子化雑音スペクトルの検討を行った。この場合、特性は零点の周波数に依存し、これを隣接チャンネル付近に設定することで、隣接チャンネル漏えい電力比 (ACLR; Adjacent Channel Leakage power Ratio) の改善に効果があることを示した。

次に信号帯域内雑音電力の変調波への影響については、送信機の精度評価に用いられるベクトル変調誤差量 (EVM; Error Vector Magnitude) を求めるプログラムを作成して定量評価を可能にした。さらにバンドパスフィルタ (BPF) の特性と帯域外雑音電力レベルの関係を明らかにし、BPF への所要特性を示した。この結果、IEEE 802.11a OFDM 信号の発生では、

オーバーサンプル次数 : 32

BPF の帯域幅 : 33.2MHz

とすることで、1 次および 2 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器のいずれにおいても、隣接チャンネル漏えい電力比で -37dB 以下、ベクトル変調誤差 2.6% 以下の満足な特性が得られることを明らかにした。

以上から、EPWM 送信法が実際のシステムの無線特性の規格に適合できることが明らかになった。

(2) 量子化雑音のさらなる低減方法の検討

帯域外雑音電力レベルを更に低減することで、電力増幅後の BPF への要求条件 (帯域幅と減衰特性) を緩和できれば、EPWM 送信機の適用範囲がさらに広がると考えられる。そこで、 $\Delta$ - $\Sigma$  変調器で発生した量子化雑音のうち、信号帯域近傍の雑音のみを取り出して打消す方法 (ANC-EPWM; Amplitude Noise Compensation-EPWM) を新たに提案した。その構成を図 5 に示す。

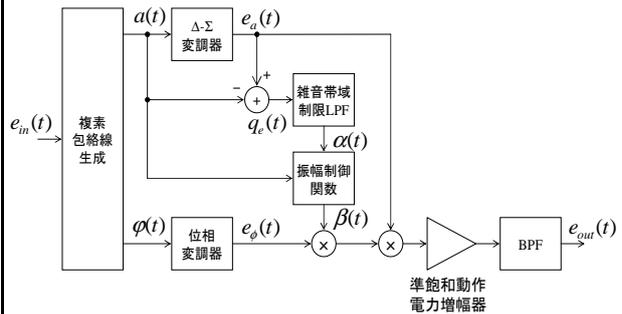


図 5 搬送波近傍の量子化雑音を低減する ANC-EPWM 送信法の構成

本方法では、BPF への要求条件を厳しくする搬送波付近の量子化雑音スペクトルのみ除去する。このため、雑音帯域制限用低域通過フィルタ (LPF) の帯域を最適化する必要があるが、この最適化は  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器の特性に依存することがわかった。1 次および零点を有する 2 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器で量子化雑音低減法の効果を調べたところ、2 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器を用いた場合に、雑音低減の効果が高く、隣接チャンネル漏えい電力比で 12dB、次隣接チャンネル漏えい電力比で 20dB 以上の効果が得られることが示された。雑音スペクトルの低減効果のシミュレーション結果を図 6 に示す。これによって、BPF の帯域幅を 33.2 MHz から、

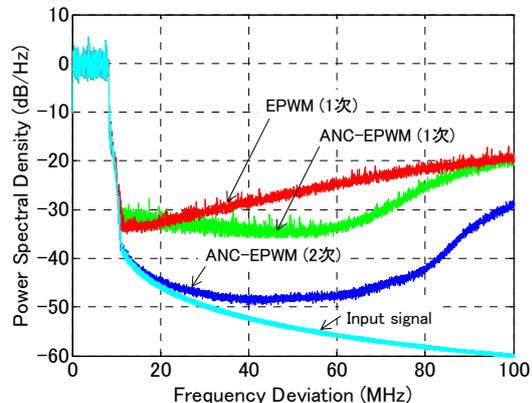


図 6 ANC-EPWM 送信法による雑音抑圧効果

3 倍程度広くすることができ、BPF の挿入損失を減らすことが容易となった。

#### 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 1 件 )

E. M. Umali, K. Kawazoe, Y. Toyama, and Y. Yamao, "Quantization Noise and Distortion Analysis of Envelope Pulse-Width Modulation (EPWM) Transmitters for OFDM Signal Amplification," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E93-A, no. 10, pp. 1724-1734, Oct. 2010, 査読有

[ 学会発表 ] ( 計 1 6 件 )

S. Yokozawa and Y. Yamao, "Suppression of Quantization Noise for EPWM Transmitter with 2nd-order  $\Delta$ - $\Sigma$  Modulator," IEEE VTC2011 -Spring, May 17. 2011, Budapest, 査読有

横澤 真介、山尾 泰、" EPWM 送信法における量子化雑音の低減法とその効果 " 電子情報通信学会無線通信システム研究会、横須賀、2011 年 3 月 4 日

岩城晃二、横澤 真介、山尾 泰、" EPWM 送信に用いる - 変調器の固定小数点演算化の検討 " 電子情報通信学会総合大会、( CD 発行 ) 2011 年 3 月 1 日

高橋秀一郎、山尾 泰、" EPWM 送信法における RF バースト信号の増幅法 " 電子情報通信学会マイクロ波研究会、那覇、2010 年 11 月 26 日

E. M. Umali, S. Yokozawa and Y. Yamao, "Quantization Noise Suppression for Envelope Pulse-Width Modulation (EPWM) Transmitters," IEEE VTC2010-Fall, Oct. 7, 2010, Ottawa, 査読有

S. Yokozawa and Y. Yamao, "Suppression of Quantization Noise from EPWM Transmitter Generated near Signal Spectrum," Proc. of URSI AP-RASC '10, September 25, 2010, Toyama, 査読有.

横澤 真介、山尾 泰、" 零点を有する 2 次の - 変調器を用いた EPWM 送信法における量子化雑音の低減 "、電子情報通信学会ソサイエティ大会、大阪、2010 年 9 月 15 日

横澤 真介、山尾 泰、" EPWM 送信法における搬送波近傍の量子化雑音の低減 "、電子情報通信学会総合大会、仙台、2010 年 3 月 16 日

川添浩司、エドウィン ウマリ、山尾 泰、" Clipping & Filtering を適用した EPWM 送信機による OFDM 信号の発生 "、電子情報通信学会総合大会、仙台、2010 年 3

月 16 日

川添浩司、Edwin M. UMALI、山尾 泰、" Clipping & Filtering を施した OFDM 信号の EPWM 送信雑音特性 "、電子情報通信学会無線通信システム研究会、奈良、2009 年 10 月 16 日

E. M. Umali, K. Kawazoe, Y. Toyama and Y. Yamao, "Effects of Quantization Noise and Distortion in EPWM Transmitters for OFDM Signal Amplification," IEEE VTC2009 -Spring, April 28, 2009, Barcelona, 査読有

川添浩司、外山義和、Edwin M. UMALI、山尾 泰、" 零点を有する 2 次の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調器を用いた EPWM 送信機の OFDM 信号送信時の雑音特性 "、電子情報通信学会無線通信システム研究会、東京、2008 年 12 月 18 日

K. Kawazoe, Y. Toyama, E. M. Umali and Y. Yamao, "Generation of OFDM Signal with Envelope Pulse-Width Modulation (EPWM) Transmitter employing 2nd-order Delta-Sigma Modulator," IEEE APWCS2008, August 22, 2008, Sendai, 査読有

E. M. Umali, Y. Toyama, and Y. Yamao, "Power Spectral Analysis of the Envelope Pulse-Width Modulation (EPWM) Transmitter for High Efficiency Amplification of OFDM Signals." IEEE VTC2008-Spring, May 13, 2008, Singapore, 査読有

川添浩司、外山義和、エドウィン ウマリ、山尾 泰、" 包絡線パルス幅変調 (EPWM) 送信法による OFDM 信号の発生 "、電子情報通信学会総合大会、北九州、2008 年 3 月 21 日

Y. Yamao, Y. Toyama and E. M. Umali, "Power Efficiency Analysis for OFDM Signal Amplification with Doherty, Extended Doherty and EPWM Transmitters," ICT Triangle Forum 2007 Sept. 20, 2007, Beijing.

#### 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山尾 泰 ( YAMA O YASUSHI )

電気通信大学・先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター・教授

研究者番号 : 10436735