

適応プレディストータ型歪み補償電力増幅器

瀬戸 義隆 水田 信治 赤岩 芳彦

九州大学大学院システム情報科学研究府
〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1
Phone:092-642-3891,
E-mail : yseto@mobcom.is.kyushu-u.ac.jp

あらまし 携帯電話の基地局では多重化された広帯域な信号を共通増幅するため、高い線形性と安定した動作特性が必要である。この目的のためにフィードフォワード法やプレディストータ法の歪み補償方式が使われている。本論文では、プレディストータ型に着目し、増幅器の特性に自動的に適応する歪み補償方式を提案する。高周波入力信号の電力に応じてテーブルを参照し、その出力により増幅器入力信号の利得と位相を変化させるものである。帯域外放射電力を評価関数として、その値を最小にするように反復学習を行うアルゴリズムにより、最適なテーブルの値を自動的に決めることができる。計算機シミュレーションの結果によれば、広帯域で高い電力効率をもつ電力増幅器が実現できる可能性が示された。また、時間遅延および回路部品の特性が理想的でない場合にも、テーブルを自動で更新することにより適応的に補正できることを示した。

キーワード 非線形歪み、適応プレディストータ、帯域外放射電力、反復アルゴリズム

An Adaptive Predistortion Method for Linear Power Amplifiers

Yoshitaka SETO, Shinji MIZUTA and Yoshihiko AKAIWA

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering,
Kyushu University
6-10-1, Hakozaeki, Fukuoka 812-8581, Japan
Phone:092-642-3891
E-mail : yseto@mobcom.is.kyushu-u.ac.jp

Abstract A basestation power amplifier requires high linearity and stable operation for common amplification of a multiplexed wideband signal. Nonlinearity compensation techniques with the feedforward or predistorter are useful for this purpose. This paper presents a predistortion amplifier with automatic control at RF band for application at a basestation. In this method, the predistorter distorts a RF input signal by referring to a look-up table (LUT) corresponding to the input power. Out-of-band radiation power are directly monitored at IF band to determine the LUT. A DSP with an iterative algorithm updates the content of the LUT to minimize the out-of-band radiation power. Computer simulation experiment is carried out. Out-of-band spectral density is suppressed below -80dB. This predistorter can cope with imperfect characteristics of the device used in the predistorter.

key words Nonlinear Distortion, Adaptive Predistorter, Out-of-Band Radiation Power, Iterative Algorithm

1 まえがき

携帯電話の基地局では、周波数、もしくは符号分割多重された信号を共通増幅するために、高い線形性と広帯域な動作特性が必要である[1]。通常の増幅器において非線形歪みを少なくすると電力効率が劣化する。電力増幅器における非線形歪みを何らかの方法で補償して、電力効率を高める努力がなされてきた。基地局の電力増幅器の装置の規模は移動局の電力増幅器ほど問題にならない。そこで、より複雑な手法が基地局の電力増幅器には用いることが出来る。これらの手法では回路素子の性能劣化や温度、供給電力の変動に対する適応的な補償が必要である。このために適応的なフィードフォワード型の歪み補償[2]が広く使われている。しかし、フィードフォワード法は副増幅器を用いるために、電力効率が悪い。プレディストータ法は副増幅器が不要なのでこの点では有利である。ベースバンド帯におけるAM-AM、AM-PM特性への適応プレディストータ型歪み補償はこれまでに発表されている[3]、[4]。ベースバンドのプレディストータ型歪み補償はデジタル信号処理に適しているものの、IF帯やRF帯の多重信号の共通増幅における動作環境の変化に柔軟に対応できない、さらに、適応制御には電力増幅器からベースバンドへの帰還回路が必要であり、これは回路の構成上、望ましくない。RF帯のプレディストータ[5][6]はこのような問題がない。

デジタル信号処理を用いたRF帯のアナログプレディストータを使った方式が知られているが[6]、このプレディストータでは利得と位相を、限られた次数で歪み補償を行うために、補償特性が十分でない。

この論文では、デジタル信号処理を用いた利得と位相を任意に制御できるRF帯のプレディストータを提案する[9][11]。プレディストータの構成をはじめに述べ、次に適応アルゴリズムについて述べる。最後にアナログ回路の素子が理想的でない場合[10]を考慮した計算機シミュレーション結果を示す。

2 提案方式

2.1 適応プレディストータ型歪み補償方式

システム構成図を図1に示す。送信信号は遅延器のあとで、利得調整器、移相器によりそれぞれ振幅と位相を補正され、AGC(Automatic Gain Control)回路を通った後に電力増幅器に入力される。利得調整器および移相器は参照テーブルからの制御電圧により制御され、RF帯の入力信号の振幅と位相を補正している。参照テーブルはランダムアクセスメモ

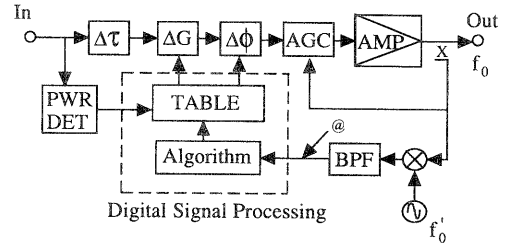


図1 提案方式

リからできており、電力検出器の出力電圧に対しアドレスが割り当ててある。破線の部分の回路はデジタル信号処理部分で、入力、出力に対してA/D変換とD/A変換をそれぞれ行っている。参照テーブルの中身は後に述べる反復学習を用いたデジタル信号処理により自動的に更新される。

電力増幅器の入力と出力の平均電力を測定し、その比が規定値となるように、プレディストータ後の信号の利得をAGCで変化させる。AGCを用いることによりプレディストータでの利得の減衰分を補い、システム全体の利得を一定に保っている[12]。

電力増幅器の出力信号は方向性結合器により取り出し、IF帯に周波数を落とされる。IFバンドパスフィルタは電力増幅器の非線形性により生じた帯域外電力を取り出している。この帯域外電力(図1の@)はテーブルの値を決めるアルゴリズムの評価関数であり、その値を最小にするように、反復学習を行う[7]。参照テーブルを更新するアルゴリズムはMatching Pursuits法[8]に基づいている。テーブル値の更新は、当初は広範囲にわたって大きく行い、次第に範囲を狭くして細かく行う。電力増幅器の特性が変化しても、テーブルの値が自動的に更新される。遅延による制御タイミングのずれも帯域外電力を評価関数とすることにより自動的に補正することができる。

2.2 テーブル更新アルゴリズム

利得調整器および移相器の参照するテーブルについて、入力電力に応じたテーブルのアドレスを用意する。テーブルの初期値を任意に設定する(通常は一定値)。そのテーブルの範囲を大きく4つに分け、まず、範囲1で利得のテーブルの値を重み付けの関数を上下させることによって変化させる(図2-a)。帯域外電力が最小となるところで更新をひとまず終了する。最小となる場所が見つかった次は範囲2に移り、テーブルを帯域外電力が最小となるように更新する(図2-b)。同様にすべての範囲についてテーブルの更新を行う。すべての範囲の更新が終わると、また範囲1に戻り更新を繰り返す(図2-c)。

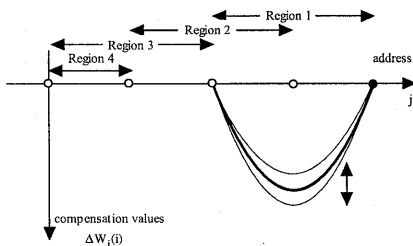


図2 (a) 帯域外電力最小となるようにを更新する。

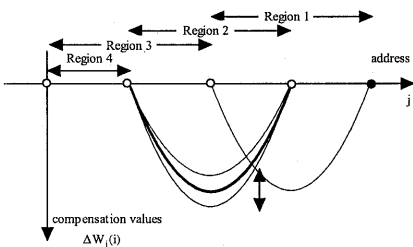


図2 (b) 範囲1の更新が終わると範囲2を更新する。

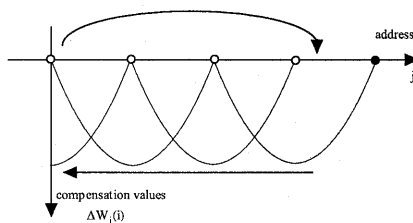


図2 (c) 利得調整期および位相器の参照テーブルの更新を交互に繰り返す。

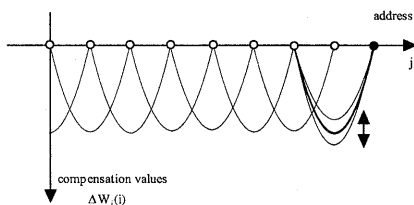


図2 (d) テーブルの更新が終わると範囲を狭くし更新を行う。

すべての範囲について帯域外電力が最小になったら、次は位相のテーブルについて、同様に更新を行う。同様にして、利得と位相のテーブルの更新を交互に行う。帯域外電力が最小になったら、次はテーブルの範囲を半分にして、同様に更新を行う(図2-d)。範囲を狭くしながら、順次テーブルを更新し、アドレスが1つ刻みとなる最小範囲まで更新を行う。

3 計算機シミュレーション

提案した歪み補償方式を用いた増幅器について計算機シミュレーションにより実験を行った。入力した信号はシングルキャリアのQPSK信号を用いた。ロールオフ係数0.5のルートナイキストフィルタで帯域制限に用いた。シミュレーションで用いた電力増幅器の利得特性、位相特性を図3に示す。入力信号の最大ピーク電力を30 dBmとしている。

このシミュレーションではIFバンドパスフィルタは実際には考慮されておらず、帯域外電力はFFTを用いて計算した。参照テーブルのアドレス数は128とした。テーブルの更新に用いた重み付け関数は4次曲線を用いた。信号の伝送速度を4.6 Mbpsと仮定した場合のテーブルの収束にかかる時間は約7.8秒となった。

3.1 回路部分の特性が理想的な場合

システムで使われた電力検出器や利得調整器などのアナログ回路の特性はすべて理想的であるとする。図4はプレディスタータによって補正された全体の利得特性、位相特性を示す。入力信号の最大ピーク電力を30 dBmとしたため30 dBm以下の特性が補正され線形になっている。図5は増幅器によって歪んだ信号とプレディスタータ型の歪み補償を行った後の信号のスペクトルを示す。帯域外電力が約-80 dBほど抑えられている。帯域外電力は参照テーブルのアドレス数を増加するか、または、利得調整器と位相器の制御電圧を参照テーブルから読み出す際に、入力電力の大きさに対応したアドレスの値と隣接したアドレスの値を補間することにより、さらに抑えることができる。またこのときの電力効率率は測定した入力電力対電力効率の曲線から計算すると17.0%となった。

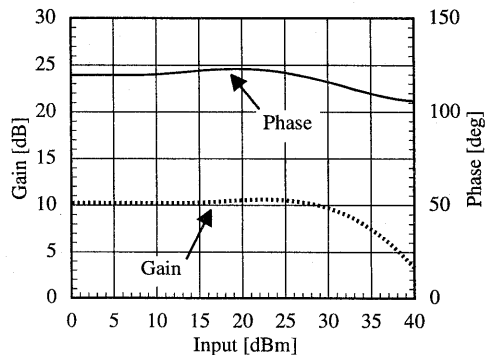


図3 電力増幅器の利得特性、位相特性

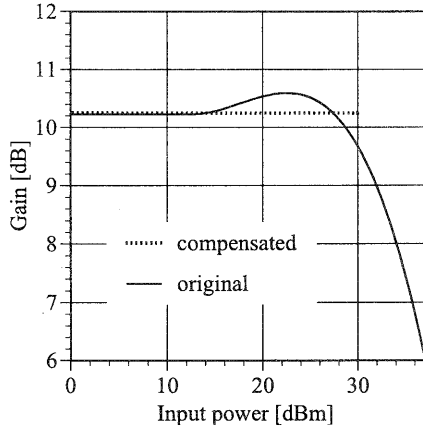


図4 (a) システム全体の利得特性

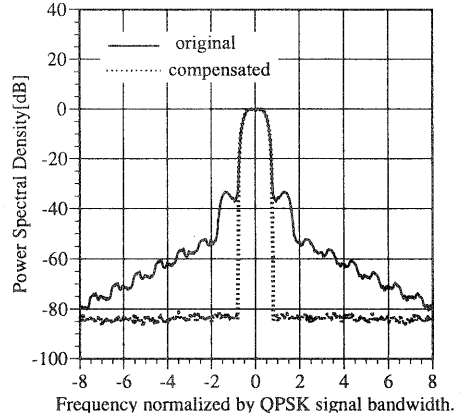


図5 出力信号スペクトル

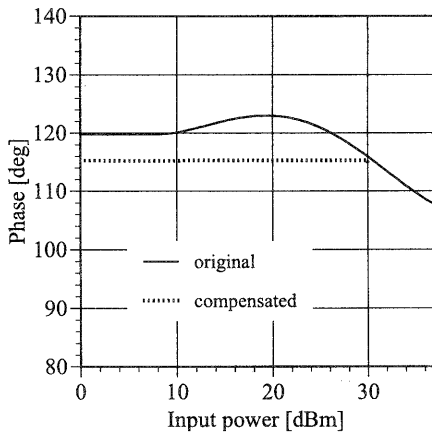


図4 (b) システム全体の位相特性

3.2 回路部分の特性が理想値から変化した場合

ブレディストータに使われる利得調整器や電力検出器は電子回路からできており、誤差を含み、理想的に働くとは限らない。実際の利得調整器は信号の利得だけでなく位相も同時に変えてしまう。同様に電力検出器もダイオードからなり、入力信号の電力に比例した出力を与えるとは限らない。

(1) 利得調整器の利得制御特性が線形でない場合

利得調整器は制御電圧により利得補正量を変化させるが、制御電圧に比例して補正量が変化しない場合を考える。テーブルより読み出された補正量が α のとき、利得調整器が $\sqrt{\alpha}$ だけ補正するような誤差が生じた場合のシミュレーション結果を図6に示す。参照テーブルが自動で更新され、全体の利得はほぼ線形になり帯域外放射電力を抑えることができた。

(2) 利得調整器で位相の変化も起きる場合

実際の利得調整器では利得を変化させる際に、位相も同時に変えてしまう。その位相の変化量を利得の変化量[dB]×5[degree]とした場合のシミュレーション結果を図7に示す。これより、テーブルの値は全体の特性が線形となるように自動で更新されているのがわかる。

(3) 電力検出器が一部非線形な特性を含む場合

電力検出器は一般にダイオードが使われており、ダイオードは入力電力が小さい場合での動作は非線形である。そこで、電力検出器の入出力特性を図8のように仮定した場合のシミュレーション結果を図9に示す。この場合も、回路の素子の誤差を許容することができていることがわかる。

(4) 補正するタイミングにずれがある場合

利得調整器や位相器は入力信号の電力に応じてテーブルの値を読み出して補正を行っている。このタイミングがずれている場合では、正しく補正を行うことができない。このタイミングをある程度まで手動で合わせることができると、温度変化などの特性変化によってずれることがある。そこで我々は補正するタイミングを自動で合わせるアルゴリズムを用いることにより、この問題を解決することができる。適切なタイミングかどうかを判断するために、帯域外電力を評価関数とし、この値を最小とするように試行錯誤を繰り返すことにより、適切なタイミングに合わせることが出来る。このときのシミュレーション結果を図10に示す。

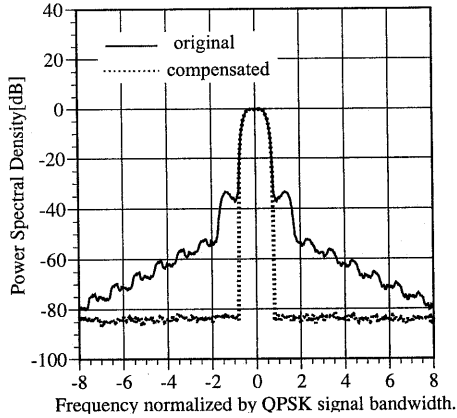


図6 利得調整器に誤差を含む場合の出力スペクトル

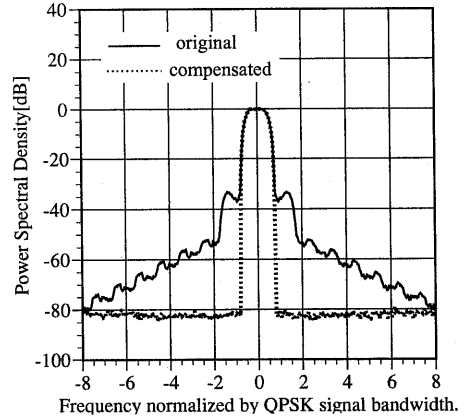


図9 電力検出器が一部非線形な場合の出力スペクトル

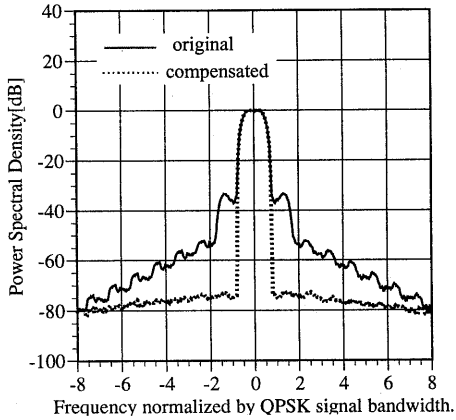


図7 利得調整器に誤差を含む場合の出力スペクトル

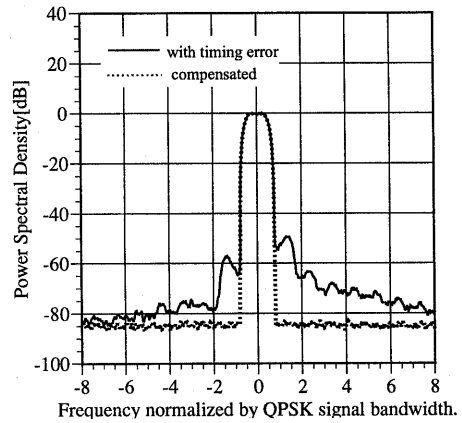


図10 タイミングを合わせた場合の出力スペクトル

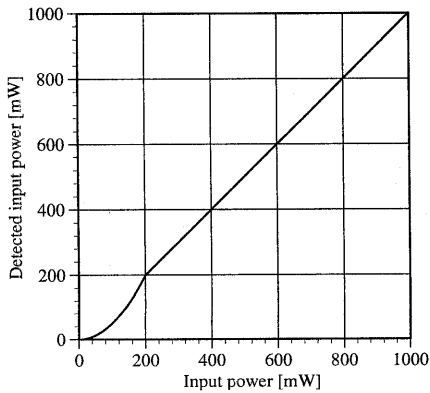


図8 電力検出器の特性

3.3 入力信号のピーク電力がテーブルの範囲を超えて入力された場合

この提案方式では以下のような問題点があった。入力信号のピーク電力が、テーブルの範囲を越えた場合に対応できない。更に、信号のピーク電力が飽和電力に近くなると、ピーク電力付近の参照テーブルの学習が正しく行われない。

予想された信号のピーク電力より大きなピーク電力を持つ信号が入力された場合に対応するために、予めトレーニング信号の電力を大きくして参照テーブルの更新を行う。これにより、大きなピーク電力を持つ入力信号のピーク付近におけるテーブルの学習が促進されるとともに、実際の使用領域で高い線形性を実現できる。

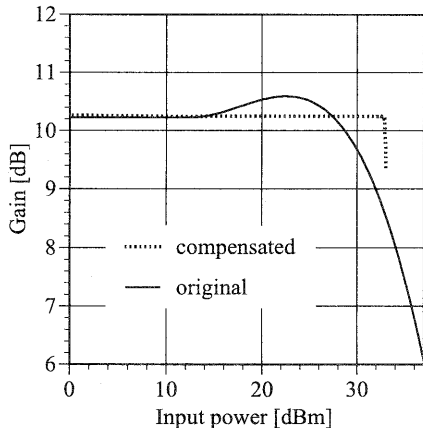


図11 AGCを用いた場合のシステム全体の利得特性

まず、トレーニング信号のピーク電力を 33dBm として参照テーブルの更新を行う。その結果、飽和点に近い 33dBm 付近は参照テーブルの学習がうまく行われていないが、33dBm より小さい入力電力に対してはシステム全体の特性が線形となっている (図 11)。その後、ピーク電力が 32dBm の信号を入力すると、ピーク電力付近で高い線形性を実現できているため帯域外電力を十分抑えられていることが分かる (図 12)。

4 むすび

適応プレディストータ型の非線形歪み補償方式を提案した。広帯域で高い電力効率をもつ電力増幅器が実現できる可能性がある。提案した方式では使われる素子の特性が理想的でなくても、テーブルを適応的に更新することにより誤差を許容し、帯域外電力を抑えることを示した。さらに、時間のずれがある場合でも適応的に補正することができた。さらに、トレーニング信号の電力を大きくすることにより、広範囲で線形性が得られ、予想よりも大きなピーク電力の信号が入力された場合にも対応できる。

【参考文献】

- [1] Y. Akaiwa, "Introduction to Digital Mobile Communication", John Wiley & Sons, 1997.
- [2] S. Uebayashi et al., "Base Station Equipment Technologies for Digital Cellular Systems", NTT Review, vol. 4, pp. 55-63, January 1992.
- [3] F. Antonio et al., "A Novel Adaptive Predistortion Techniques for Power Amplifiers", Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., pp. 1505-1509, May 1999.

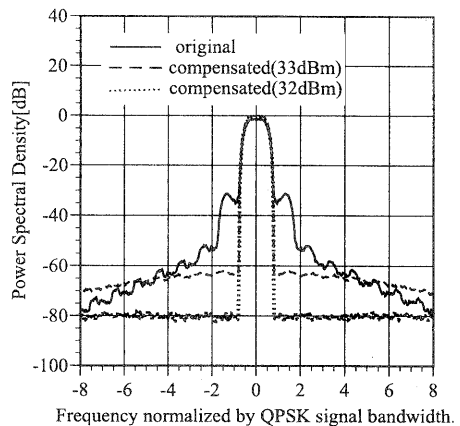


図12 AGCを用いた場合の出力スペクトル

- [4] Y. Nagata, "Linear Amplification Technique for Digital Mobile Communications", Proc IEEE Veh. Tech. Conf., pp. 159-164, May 1999.
- [5] P. B. Kenington, "A Wideband Linearizer for Single and Multi-carrier 3G CDMA", Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., pp. 248-252, Sep, 1999.
- [6] C. G. Rey, "Predistorter Linearizes CDMA Power Amplifiers", Microwaves and RF, pp. 114-123, Oct. 1998.
- [7] J. Namiki, "An Automatically Controlled Predistorter for Multilevel Quadrature Amplitude Modulation", IEEE Trans. Communications, vol. COM-31, pp. 707-712, May 1983.
- [8] S. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 41, pp. 3397-3415, Dec 1993.
- [9] 瀬戸, 水田, 大崎, 赤岩, "適応プレディストータ型歪み補償電力増幅器(I)", 信学総大, B-5-211, March 2000.
- [10] 水田, 瀬戸, 大崎, 赤岩, "適応プレディストータ型歪み補償電力増幅器(II)", 信学総大, B-5-212, March 2000.
- [11] Y. Seto, S. Mizuta, K. Oosaki, Y. Akaiwa, "An Adaptive Predistortion Method for Linear Power Amplifiers", Proc. VTC 2000-Spring, pp. 1889-1893, May. 2000.
- [12] 水田, 瀬戸, 大崎, 赤岩, "適応プレディストータ型歪み補償電力増幅器(III)", 信学総大, B-5-118, Sep. 2000.