ディジタルテレビ送信機用アダプティブディジタル補償器

Adaptive Digital Corrector for Digital TV Transmitter

正会員 武田 陽 夫[†], 福 地 章 夫[†], 榎 本 和 義[†], 正会員 小 室 憲 司[†]Haruo Takeda[†], Akio Fukuchi[†], Kazuyoshi Enomoto[†] and Kenji Komuro[†]

あらまし 地上波デジタル放送用の送信機には、高いリニアリティ特性が要求されている。送信機の歪みを補償するために、プリディストーション型アダプティブディジタル補償器を開発し、良好な結果が得られたので報告する。送信機の高周波部で発生する非線形歪みと線形歪みを、DSP(Digital Signal Processor)により解析し、算出した補償係数を自動的に更新することができる構成とすることにより、送信機特性変動に追従するアダプティブ補償を実現している。

キーワード：地上波デジタルテレビジョン放送, OFDM 変調器, 非線形補償, 線形補償, アダプティブ, デジタルフィルタ

1. ま え が き

近年、世界各国で地上波デジタルテレビ放送の導入が進んでいる。ディジタル変調された信号はピーク/アベレージ比率の大きい信号であり、この信号を忠実に増幅するには送信機に高いリニアリティが要求されている。

増幅器の非線形歪みを補償するために、アナログ式に替わるディジタル方式の補償器が実用化されている¹⁾²⁾。

また、ディジタル変調波を増幅する際の増幅器の動作特性を考慮し、特殊パルスを用いた非線形歪みの測定方法などが提案されている^{3)~5)}。

高出力の電力増幅器は、環境条件によって特性が変動することがあり、高品質の信号を維持するには、運用中のプログラム信号から直接歪み特性を解析し、自動的に補償係数を更新させていくことが望ましい⁶⁾。

また、実際の送信機には非線形歪みと線形歪み（周波数特性）が混在しており、精度の高い補償を実現するには、これら双方の歪みを解析し、補償を行っていくことが必要である。

本稿では、これらの要求に答えるためにディジタル信号処理を用いたアダプティブディジタル補償器を開発し、良好な結果が得られたので報告する。

2. 構 成

図1に本補償システムの系統図を示す。補償処理は全てディジタル領域におけるベクトル信号処理として行われる。送信機への入力信号が、例えばアナログIF信号

図1 補償システム 系統図。

Block diagram of the transmitter correction system.

の場合は、周波数変換の後に A/D 変換器によりディジタル信号に変換する。さらに、直交復調処理を行い、直交関係にある I と Q の 2 つのベースバンド信号を作り出す。なお、補償器を OFDM 変調器に内蔵する場合には、IFFT（逆フーリエ変換）されたあとの I, Q ベースバンド信号をそのまま利用することができる。この入力 I, Q ベースバンド信号に対して線形歪み補償、非線形歪み補償のプリディストーション処理を行い、直交変調により再度 IF 信号に戻す。プリディストーションのための補償係数は、入力信号からサンプリングしたオリジナル I, Q 信号と送信機出力部からのフィードバックされた I_{FB} , Q_{FB} 信号を DSP(Digital Signal Processor) によって比較することにより算出される。補償は主に電力増幅器で発生する非線形歪みと、出力 BPF など発生する線形歪み（周波数特性歪み）の双方に対して行われる。

隣接チャネル帯域の混変調成分 (IM 成分) まで補償す

2002 年 7 月 31 日受付, 2002 年 9 月 13 日再受付, 2002 年 10 月 2 日採録
[†] 日本電気株式会社 放送映像事業部

(〒 183-8501 府中市日新町 1-10, TEL 042-333-3818)

[†] NEC Corporation, Broadcast and Video Equipment Division
 (1-10, Nisshin-cho, Fuchu, Tokyo, 183-8501, Japan)

図 2 非線形補償系統図.
Block diagram of non-linearity corrector.

るため、アナログ/デジタル変換部のサンプリング周波数は、65MHz の高速サンプリングを行っており、最大でサンプリング周波数の 1/2 程度の帯域幅の補償が可能となる。

本補償器では、テスト信号を使用せずにプログラム信号のサンプリングデータから補償係数を生成でき、また自動的に補償係数を更新することができる。このため、電力増幅器の温度変化、経年変化、または増幅ユニット故障・交換時においても、その状態での最適係数を自動的に更新することができ、送信機の出力信号品質を常に最適な状態に保つことができる。

3. 非線形補償

図 2 に、非線形補償部の系統図を示す。非線形補償部では、直交座標成分である I, Q 信号を振幅 R と位相 θ の極座標成分に変換する。振幅 R は振幅補償係数が格納されているテーブル (RAM) によってデータ変換される。位相 θ には、振幅 R に応じて補償テーブルから呼び出された位相誤差 $\Delta\theta$ が加算される。補償処理された R_{PD} , θ_{PD} は再び直交座標系の信号 I_{PD} , Q_{PD} に変換される。

変換テーブルを利用した非線形補償部は、プログラム信号の経路であり、ハードウェアによるリアルタイム処理となっている。補償係数の計算はソフトウェア処理によって行われ、新たな補償係数が算出された時点で係数の更新が行われる。補償テーブルはプログラム信号用の現用テーブルと係数更新用の予備テーブルがあり、新たな係数が予備テーブルに格納された後に、現用と予備を入れ替える。入れ替えは、クロック単位でシームレスに行われるため、プログラム信号が途切れることはない。

4. 線形補償

線形歪み補償 (周波数特性補償) には、図 3 に示す可変係数型の複素デジタル FIR フィルタを用いてい

図 3 可変係数複素 FIR フィルタ.
Variable tap type complex FIR filter.

図 4 線形歪みの非線形歪みへの影響.
Effect of linear distortion to non-linear distortion.

る。複素フィルタを用いることにより、振幅周波数特性と位相周波数特性 (群遅延特性) の双方に対して補償処理を行うことができ、また I, Q ベースバンド信号に対して直接処理を行える。補償係数には実数のタップ係数 $rh_{0\sim n}$ と虚数のタップ係数 $ih_{0\sim n}$ が必要となる。それぞれ DSP により算出され、非線形補償の場合と同様に自動更新される。温度変化による出力 BPF の特性変動にも追従させることができる。

5. DSP によるベクトル信号解析

DSP では、オリジナルとフィードバックの I, Q ベースバンド信号から、ベクトル信号解析により補償係数を算出している。信号解析では、時間軸領域、周波数領域の処理を組合せることにより、非線形歪みと線形歪みの分離、サンプリングタイミングの補正などを行っている。これにより、少ないサンプリング数でも精度の高い補償係数を求めることができる。16K ポイント程度のデータ (OFDM 変調波, Mode 1, 1 シンボル期間, 65MHz サンプリング) で全ての解析が行える。

送信機出力部からのフィードバック信号には非線形歪

図 5 デジタル補償ボード外観.
Outside view of the digital corrector board.

みと線形歪みの両方が含まれており、これらは互いにノイズを付加したように影響しあう。図 4 に示すように、入出力特性から非線形歪みを求める際に、線形歪みを事前に取り除くことにより、より正確に補償係数を求めることができる。

6. 装置試作

補償処理および信号解析を行うデジタル補償ボードの外観を図 5 に示す。ボードのサイズは 132mm (H) x 132mm (D) であり、大規模 FPGA 1 個、DSP 1 個と複数のメモリーなどで構成されている。本ボードは、IF 信号入力の EXCITER ユニットか、または OFDM 変調器に実装することができる。

本補償器では補償係数算出の他に、出力信号品質の監視を目的とした解析も行っている。デジタル送信機の一般的な監視項目である IM レベル、MER (Modulation Error Ratio) やコンスタレーションのデータをフィードバック信号から算出し、送信機制御ユニットやリモート監視装置に出力している。DSP による信号解析能力を高めることにより、特別な測定器なしに信号品質の簡易監視を行うことができる。現用システムに何らかの不具合が発生し、送信機出力信号が劣化し始めた場合に、受信機の誤り訂正が破綻する前に予備系のシステムへ切り替えるなどのシステム制御が可能となる。

7. 実験結果

図 6 に 3 kW 出力のデジタル送信機 (ISDB-T 方式) に本補償器を実装した場合の非線形歪み補償特性を示す。補償無しで -38dB 程度の IM レベルが発生しているが、補償により -50dB 以下とすることができた。

送信機の非線形歪みを補償する場合、出力を一定に保ちながら補償係数を変化させると、電力増幅器の動作点が変わる。求めた補償係数は、その係数を適用した時

図 6 3kW 送信機出力スペクトラム.
Output spectrum of 3kW transmitter.

図 7 非線形補償係数の変化.
Non-linear correction coefficients.

点で、歪み特性とは合わなくなってしまう。このため、最適な補償係数を求める際、誤差最小となる適応制御を用いた。図 6 に示す特性の場合、3 回程度の係数更新で IM レベルが -50dB 以下となった。

図 7 に非線形歪みに対する補償係数を示す。横軸に正規化された入力信号レベル、縦軸に振幅補償量 ΔR (AM-AM) と位相補償量 $\Delta \theta$ (AM-PM) をそれぞれ示している。パラメータとして送信機の出力電力を用い、各特性はその出力での最適補償係数となっている。出力電力が大きくなると、入力信号レベルが高い部分で振幅補償量 ΔR が大きく上昇し始める。これは、電力増幅器の飽和特性の影響で信号が圧縮されるのを補償しているためである。さらに出力を大きくすると、補償不可能な領域に達し、信号のピーク部分がクリップされた状態になり、IM レベルが上昇することになる。

次に、線形歪み補償特性を図 8 に示す。図 8 は、送信機の出力部に設置される BPF の群遅延特性を補償した場合の特性である。補償 OFF の状態で 6MHz チャンネル

図 8 線形補償による群遅延特性の改善。
Improvement of group delay characteristics

帯域のエッジ部で 90ns 程度の群遅延特性が発生しているが、線形歪み補償により ± 10 ns 程度以下に補償されている。ここで用いられた複素 FIR フィルタのタップ数は 32 タップである。歪み量が最小となるように適応制御を行うことにより、少ないタップ数でも良好な特性が得られることを確認できた。

8. む す び

地上波デジタル放送用の送信機には高いリニアリティ特性が要求されており、この要求にこたえるためにプリディストーション方式のアダプティブデジタル補償器を開発した。

入力されたオリジナル信号と送信機出力からのフィードバック信号を I,Q ベースバンド信号上で比較することにより、非線形歪である振幅歪み特性 (AM-AM), 位相歪み特性 (AM-PM) に加え、線形歪みである振幅周波数特性, 位相周波数特性 (群遅延特性) に対する補償係数を求めることができた。

極座標変換を用いた非線形歪み補償回路, 複素 FIR フィルタを用いた線形歪み補償回路に, 信号解析から求めた補償係数を適応させることにより, 送信機の歪みを補償できることを確認した。非線形歪み補償では, 3kW 出力送信機において, IM レベルを -50dB 以下に改善することができた。

テスト信号を用いずにプログラム信号から補償係数を求めることができ, また運用中でも係数の更新が行えるアダプティブ機能を持った回路構成とした。そのため, 環境条件などによって送信機の特性が変動した場合にも, 逐次適切な補償係数に自動更新され, 送信機の出力信号品質を最適に保つことができる。さらに, 信号解析によって得られた IM データや MER 値を出力信号品質の監視用にも利用できるため, 送信機の保守・管理の負担を軽減することができる。

〔文 献〕

- 1) S.Andreoli, H.G.McClure: "Digital Linearizer for RF Amplifiers", IEEE Trans. Broadcast, 43, 1, pp.12-19 (March 1997)
- 2) G.Lazzarin, S.Pupolin, A.Sarti: "Nonlinearity Compensation in Digital Radio Systems", IEEE Trans. COM, 42, 2, pp.988-999 (Feb. 1994)
- 3) 永塚, 都竹: "増幅器による OFDM 信号の劣化と非線形特性の測定法", 映像学誌, 53, 11, pp.1550-1556 (Nov.1999)
- 4) 松下, 巽: "OFDM 信号増幅時における増幅器の非直線 (AM-AM, AM-PM) 特性の一測定法", 映像学誌, 54, 11, pp.1602-1605 (Nov.2000)
- 5) L.J.Cimini: "Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Trans. COM, 33, 7, pp.665-675 (July 1985)
- 6) 武田, 福地, 榎本, 小室: "自動追従型デジタルリニアリティ補償器の開発", 映像学技報, 25, 41, pp.25-28 (Jun.2001)

たけだ ほうお
武田 陽夫 1990 年, 法政大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, NEC 放送映像事業部入社。主として地上デジタル放送装置・システムの開発・設計に従事。現在, NEC 放送映像事業部第一システム部マネージャ。正会員。

ふくち あきお
福地 章夫 1987 年, 千葉大学工学部電子工学科卒業。同年, NEC 放送映像事業部入社。主として地上デジタル放送装置・システムの開発・設計に従事。現在, NEC 放送映像事業部第一システム部主任。

えのもと かずよし
榎本 和義 1995 年, 東京電機大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年, NEC 放送映像事業部入社。主として地上デジタル放送装置・システムの開発・設計に従事。現在, NEC 放送映像事業部第一システム部主任。

こむろ けんじ
小室 憲司 1984 年, 静岡大学大学院電子工学研究科修士課程修了。同年, NEC 放送映像事業部入社。主として地上デジタル放送装置・システムの開発・設計に従事。現在, NEC 放送映像事業部第一システム部長。正会員。