(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5238564号
(P5238564)

(45)発行日　平成25年7月17日(2013.7.17)　(24)登録日　平成25年4月5日(2013.4.5)

(51)Int.Cl.　　　　　　　　　　F I
H03F　1/32　(2006.01)　　H03F　1/32
H04B　1/04　(2006.01)　　H04B　1/04　R

請求項の数 4　(全 26 頁)

(21)出願番号　特願2009-65890 (P2009-65890)
(22)出願日　平成21年3月18日 (2009.3.18)
(65)公開番号　特開2010-220004 (P2010-220004A)
(43)公開日　平成22年9月30日 (2010.9.30)
審査請求日　平成24年3月15日 (2012.3.15)

(73)特許権者　000004330
日本無線株式会社
東京都三鷹市下連雀５丁目１番１号
(74)代理人　100119677
弁理士　岡田　賢治
(74)代理人　100115794
弁理士　今下　勝博
(72)発明者　柴田　孝基
東京都三鷹市下連雀五丁目１番１号　日本無線株式会社内
(72)発明者　船山　拓也
東京都三鷹市下連雀五丁目１番１号　日本無線株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】プリディストータ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

ルックアップテーブルが入力信号に基づいて生成した予歪補償信号を被補償回路へ出力する歪補償回路と、

前記入力信号及び前記被補償回路の出力信号が入力され、前記ルックアップテーブルが前記入力信号に基づいて生成した歪補償値と前記入力信号とから計算した入力計算信号と、前記ルックアップテーブルが前記出力信号に基づいて生成した歪補償値と前記出力信号とから計算した出力計算信号との差分から誤差ルックアップテーブル内の全ての値を計算し、前記誤差ルックアップテーブルを前記ルックアップテーブルに加算して前記ルックアップテーブル内の全ての値を更新する制御部と、

を備えるプリディストータ。

【請求項２】

ルックアップテーブルが入力信号に基づいて生成した予歪補償信号を被補償回路へ出力する歪補償回路と、

前記予歪補償信号及び前記被補償回路の出力信号が入力され、前記予歪補償信号と前記ルックアップテーブルが前記出力信号に基づいて生成した出力計算信号との差分から誤差ルックアップテーブル内の全ての値を計算し、前記誤差ルックアップテーブルを前記ルックアップテーブルに加算して前記ルックアップテーブル内の全ての値を更新する制御部と、

を備えるプリディストータ。

【請求項３】
前記制御部は、前記ルックアップテーブルを更新する際に前記誤差ルックアップテーブルに乗じる更新係数を、前記ルックアップテーブルを更新した回数に基づいて決定することを特徴とする請求項１又は２に記載のプリディストータ。
【請求項４】
前記制御部は、前記ルックアップテーブルを更新する際に前記誤差ルックアップテーブルに乗じる更新係数を、前記予歪補償信号と前記計算信号との差分に基づいて決定することを特徴とする請求項１又は２に記載のプリディストータ。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、信号増幅器などの被補償回路のメモリ効果による歪を補償するプリディストータに関するものである。
【背景技術】
【０００２】
従来のプリディストータとしては、単一のルックアップテーブル（ＬＵＴ）で歪補償を行うもの（例えば、特許文献１を参照。）、およびルックアップテーブルを求めた後に歪補償多項式を用いて再び生成した単一のルックアップテーブルを用いて歪補償を行うもの（例えば、特許文献２を参照。）がある。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００３】
【特許文献１】特許第３５６０３９８号
【特許文献２】特開２００６－０９３９４７号公報
【特許文献３】特開２００２－２２３１７１号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
従来のプリディストーションアンプでは適応信号処理による歪補償値（テーブル値）の計算量、およびメモリ量を減らす目的で、更新する際にアドレス数を減らして歪補償値（テーブル値）を算出し、後でアドレスの間のテーブル値を補間する方式（例えば、特許文献３を参照）がある。しかし、この方式の場合、補間した歪補償値（テーブル値）に基づく歪補償の精度に課題があった。
【０００５】
そこで、本発明は、上記課題を解決するためになされたもので、ルックアップテーブルのアドレス間の歪補償値を補間することが不要であるプリディストータを提供することを目的とする。
【課題を解決するための手段】
【０００６】
前記目的を達成するために、本発明に係るプリディストータは、入力信号を引用し、ルックアップテーブルを用いて得られた予歪補償信号と、被補償回路の出力信号又は予歪補償信号を引用し、ルックアップテーブルを用いて得られた計算信号と、の差分が小さくなるようにルックアップテーブルを更新することとした。
【０００７】
具体的には、本発明に係るプリディストータは、ルックアップテーブルが入力信号に基づいて生成した予歪補償信号を被補償回路へ出力する歪補償回路と、前記入力信号及び前記被補償回路の出力信号が入力され、前記ルックアップテーブルが前記入力信号に基づいて生成した歪補償値と前記入力信号とから計算した入力計算信号と、前記ルックアップテーブルが前記出力信号に基づいて生成した歪補償値と前記出力信号とから計算した出力計算信号との差分から誤差ルックアップテーブル内の全ての値を計算し、前記誤差ルックア

ップテーブルを前記ルックアップテーブルに加算して前記ルックアップテーブル内の全ての値を更新する制御部と、を備える。

【０００８】

また、本発明に係る他のプリディストータは、ルックアップテーブルが入力信号に基づいて生成した予歪補償信号を被補償回路へ出力する歪補償回路と、前記予歪補償信号及び前記被補償回路の出力信号が入力され、前記予歪補償信号と前記ルックアップテーブルが前記出力信号に基づいて生成した出力計算信号との差分から誤差ルックアップテーブル内の全ての値を計算し、前記誤差ルックアップテーブルを前記ルックアップテーブルに加算して前記ルックアップテーブル内の全ての値を更新する制御部と、を備える。

【０００９】

予歪補償信号と計算信号との差分を解消するようにルックアップテーブルを更新するため、アドレスの間のテーブル値を補間する必要がない。従って、本発明は、ルックアップテーブルのアドレス間の歪補償値を補間することが不要であるプリディストータを提供することができる。

【００１０】

また、従来のプリディストータは、ルックアップテーブルの更新において更新係数を一定にしていた。この従来の方式では、更新係数を大きくすると追従速度、および収束速度は速いものの雑音の影響が誤差に直接反映されるので歪補償の精度を高くできず、更新係数を小さくすると歪補償の精度を高くできるものの収束が遅くなる課題があった。

【００１１】

そこで、本発明に係るプリディストータの前記制御部は、前記ルックアップテーブルを更新する際に前記誤差ルックアップテーブルに乗じる更新係数を、前記ルックアップテーブルを更新した回数に基づいて決定してもよい。また、本発明に係るプリディストータの前記制御部は、前記ルックアップテーブルを更新する際に前記誤差ルックアップテーブルに乗じる更新係数を、前記予歪補償信号と前記計算信号との差分に基づいて決定してもよい。

【００１２】

本発明に係るプリディストータは、更新係数を固定値ではなく可変値としている。このため更新係数を大きくすることで追従速度、および収束速度を速くすることができ、更新係数を小さくすることで十分な歪補償精度を得ることができる。

【発明の効果】

【００１３】

本発明は、ルックアップテーブルのアドレス間の歪補償値を補間することが不要であるプリディストータを提供することができる。本プリディストータは、歪補償値を精度よく算出でき、歪補償量を十分に確保できる。また、本発明は、追従速度、および収束速度を速くすることもでき、十分な歪補償精度を得ることもできるプリディストータを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１４】

【図１】本発明に係るプリディストータの構成を説明するブロック図である。

【図２】本発明に係るプリディストータの構成を説明するブロック図である。

【図３】本発明に係るプリディストータの歪補償回路を説明するブロック図である。

【図４】複数の増幅器で構成された増幅回路をモデル化した図である。

【図５】本発明に係るプリディストータの歪補償部を説明するブロック図である。

【図６】本発明に係るプリディストータの歪補償部を説明するブロック図である。

【図７】従来のプリディストータにおけるルックアップテーブルを更新する方法のフローチャートを示した図である。

【図８】本発明に係るプリディストータにおけるルックアップテーブルを更新する方法のフローチャートを示した図である。

【図９】数式３６を説明する図である。

【図１０】数式３８を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【００１５】

添付の図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。以下に説明する実施の形態は本発明の構成の例であり、本発明は、以下の実施の形態に制限されるものではない。なお、本明細書及び図面において符号が同じ構成要素は、相互に同一のものを示すものとする。また、枝番号を付さない符号での説明は該符号に枝番号を付した構成要素や信号全てに共通する説明である。

【００１６】

図１は、本実施例のプリディストータ３０１の構成を説明するブロック図である。プリディストータ３０１は、ルックアップテーブルが入力信号Ｘに基づいて生成した予歪補償信号Ａを被補償回路４０１へ出力する歪補償回路１１と、入力信号Ｘ及び被補償回路４０１の出力信号Ｙが入力され、予歪補償信号Ａとルックアップテーブルが出力信号Ｙに基づいて生成した計算信号との差分から誤差ルックアップテーブルを計算し、誤差ルックアップテーブルをルックアップテーブルに加算してルックアップテーブルを更新する制御部１３と、を備える。

【００１７】

図２は、本実施例のプリディストータ３０２の構成を説明するブロック図である。プリディストータ３０２は、ルックアップテーブルが入力信号Ｘに基づいて生成した予歪補償信号Ａを被補償回路４０１へ出力する歪補償回路１１と、予歪補償信号Ａ及び被補償回路４０１の出力信号Ｙが入力され、予歪補償信号Ａとルックアップテーブルが予歪補償信号Ａに基づいて生成した計算信号との差分から誤差ルックアップテーブルを計算し、誤差ルックアップテーブルをルックアップテーブルに加算してルックアップテーブルを更新する制御部１３と、を備える。

【００１８】

例えば、被補償回路４０１は増幅器である。以下の説明は、被補償回路４０１が増幅器として説明する。

【００１９】

図３は、プリディストータ３０１及びプリディストータ３０２の歪補償回路１１を説明するブロック図である。歪補償回路１１は、入力信号Ｘから互いに異なる時刻で取り込みした複数のサンプリング信号Ｓを生成する遅延部３１と、最新のサンプリング信号Ｓ、または遅延部３１が遅延させた少なくとも１つのサンプリング信号Ｓの強度を参照し、サンプリング信号Ｓを直接引用して歪補償値を算出し、歪補償値をサンプリング信号Ｓのいずれか１つに適用して歪信号Ｈを生成する複数のルックアップテーブル２３と、ルックアップテーブル２３のそれぞれに対して歪補償値を算出させて歪信号Ｈを生成させる指示を出力する制御部１３と、ルックアップテーブル２３が生成した歪信号を加算して生成した予歪補償信号Ａを被補償回路４０１へ出力する歪補償値生成部３３と、を備える。

【００２０】

遅延部３１は、例えば、直列に接続した複数の遅延素子２１を有する。入力された入力信号Ｘは連続して遅延素子２１を通過し、通過する毎に所定量（すなわち、サンプリング周期$Ｔ_{Ｓ}$）ずつ遅延していく。遅延素子２１を所定個通過した後の出力を取り出すことで入力信号Ｘから所定量遅延したサンプリング信号Ｓを取り出せる。言い換えれば、異なる遅延素子２１の出力を取り出すことで、入力信号Ｘから互いに異なる時刻で取り込みした複数のサンプリング信号Ｓが得られる。図３の遅延部３１は、入力信号Ｘから遅延していないサンプリング信号Ｓ－０、遅延素子２１を５個通過した入力信号のサンプリング信号Ｓ－５、遅延素子２１を９個通過した入力信号のサンプリング信号Ｓ－９、遅延素子２１を１１個通過した入力信号のサンプリング信号Ｓ－１１、遅延素子２１を１３個通過した入力信号のサンプリング信号Ｓ－１３、遅延素子２１を１７個通過した入力信号のサンプリング信号Ｓ－１７を取り出している。

【００２１】

歪信号生成部３２は、入力するサンプリング信号Ｓの強度を測定する強度算出部２２、強度算出部２２で測定されたサンプリング信号Ｓの強度を参照して歪補償値を算出するルックアップテーブル２３及びルックアップテーブル２３からの歪補償値とサンプリング信号Ｓとを乗算する乗算器２４を有する。ここで、サンプリング信号Ｓの強度とは、例えば、振幅や電力である。

【００２２】

歪信号生成部３２－０は、強度を参照したサンプリング信号Ｓ－０にルックアップテーブル２３－０がサンプリング信号Ｓ－０から算出した歪補償値を乗算器２４で乗算して歪信号Ｈ－０，０を出力する。同様に、歪信号生成部３２－１３は、強度を参照したサンプリング信号Ｓ－１３にルックアップテーブル２３－１３がサンプリング信号Ｓ－１３から算出した歪補償値を乗算器２４で乗算して歪信号Ｈ－１３，１３を出力する。尚、歪信号生成部３２－０は、増幅装置のメモリ効果により発生する非線形歪への対策を考慮していない従来の歪信号生成部（プリディストータ）に相当する。

【００２３】

歪信号生成部３２－５は、強度を参照したサンプリング信号Ｓ－５とは異なるサンプリング信号Ｓ－９にルックアップテーブル２３－５がサンプリング信号Ｓ－５から算出した歪補償値を乗算器２４で乗算して歪信号Ｈ－９，５を出力する。なお、ルックアップテーブルの引用に用いる信号が同一の場合もある。具体的には、ルックアップテーブル３２－５が引用に用いたサンプリング信号Ｓ－５を、図示しない他のルックアップテーブルが引用してサンプリング信号Ｓ－７に乗じ、歪信号Ｈ－７，５を出力してもよい。ここで、ルックアップテーブル２３－０、ルックアップテーブル２３－５及びルックアップテーブル２３－１３は一変数ルックアップテーブルである。

【００２４】

歪信号生成部３２－１１は、ルックアップテーブル２３－１１がサンプリング信号Ｓ－１１とサンプリング信号Ｓ－１７の強度を参照して歪補償値を算出し、乗算器２４が歪補償値をサンプリング信号Ｓ－１１に乗算して歪信号Ｈ－１１，１７を出力する。ここで、ルックアップテーブル２３－１１は二変数ルックアップテーブルである。

【００２５】

歪補償値生成部３３は、歪信号生成部３２が出力した歪信号Ｈを加算し、予歪補償信号Ａを生成する。具体的には、歪補償値生成部３３は、歪信号生成部３２－０が出力した歪信号Ｈ－０，０、歪信号生成部３２－５が出力した歪信号Ｈ－９，５、歪信号生成部３２－１３が出力した歪信号Ｈ－１３，１３、歪信号生成部３２－１１が出力した歪信号Ｈ－１１，１７を加算し、予歪補償信号Ａを生成する。予歪補償信号Ａは、被補償回路４０１の歪特性の逆歪特性（歪補償特性）が加えられているので、被補償回路４０１の出力信号Ｙの歪を小さくすることができる。

【００２６】

制御部１３は、図３に図示されない複数のルックアップテーブルの値を入力信号Ｘの強度により引用した歪補償値それぞれに入力信号Ｘを乗算して生成した複数の信号を加算して得た入力計算信号又は予歪補償信号Ａと、複数のルックアップテーブルの値を出力信号Ｙの強度により引用した歪補償値それぞれに出力信号Ｙを乗算して生成した複数の信号を加算して得た出力計算信号と、の差分が０に近づくようにそれぞれのルックアップテーブル２３のテーブル値を更新する。全てのルックアップテーブル２３のテーブル値を更新してもよく、更新が必要なルックアップテーブル２３のみのテーブル値を更新してもよい。

【００２７】

（歪補償アルゴリズム）

次に、プリディストータ３０１のルックアップテーブル２３の詳細について説明する。図４は複数の増幅器で構成された増幅回路をモデル化した図であり、入力信号Ｘが入力され出力信号Ｙを出力する。ここで、入力信号Ｘ、および出力信号Ｙをともに周期$Ｔ_{Ｓ}$でサンプリングした離散時間信号をそれぞれｘ（ｎ$Ｔ_{Ｓ}$）、およびｙ（ｎ$Ｔ_{Ｓ}$）とし、表記を簡単にするためにそれぞれｘ（ｎ）、およびｙ（ｎ）で表すこととする。また、ｘ（ｎ）

およびｙ（ｎ）はともに実数成分と虚数成分を持つ複素数信号であり、ｘ（ｎ）およびｙ（ｎ）に対する乗算、および加算は、それぞれ複素乗算、および複素加算を示すものとする。すなわち、先に説明した図１、及び図２においては、歪補償回路１１には複素数信号が入力され、歪補償回路１１と被補償回路４０１の間には図示しない直交変調器、Ｄ／Ａ変換器、およびアップコンバータがあり、被補償回路４０１と制御部１３の間には図示しないダウンコンバータ、Ａ／Ｄ変換器、および直交復調器がある。図４のようにモデル化された増幅器の歪補償値を得るのに、複数のルックアップテーブルを用いる。すなわち、増幅器を構成する要素増幅器の歪特性を表す歪特性多項式を

【数１】

$$v_j(n)=\sum_{d=-D1_j}^{D2_j}\sum_{k=1}^{K_j}v_{j,d,k}\,x(n-d)\,|\,x(n-d)\,|^{k-1}\qquad ,1\le j\le J$$

とし，要素増幅器を合成する比率が入力信号の振幅値の関数（合成多項式）

【数２】

$$f_j(n)=\sum_{r=-R1_j}^{R2_j}\sum_{l=1}^{L_j}f_{j,r,l}\,|\,x(n-r)\,|^{l-1}\qquad ,1\le j\le J$$

として図４のモデルを数式で表現した数式３において、同じサンプリング時刻の入力信号、および入力信号の強度を有する項を数式７のようにまとめて分類する。この多項式の分類により、入力信号の強度から歪補償値の一部を算出する複数のルックアップテーブルが作成できる。

【数３】

$$\begin{aligned}
y(n)&=\sum_{j=1}^{J}f_j(n)v_j(n)\\
&=\sum_{j=1}^{J}\left(\sum_{r=-R1_j}^{R2_j}\sum_{l=1}^{L_j}f_{j,r,l}\,|\,x(n-r)\,|^{l-1}\right)\left(\sum_{d=-D1_j}^{D2_j}\sum_{k=1}^{K_j}v_{j,d,k}\,x(n-d)\,|\,x(n-d)\,|^{k-1}\right)\\
&=\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=-R1_j}^{R2_j}\sum_{d=-D1_j}^{D2_j}\sum_{l=1}^{L_j}\sum_{k=1}^{K_j}f_{j,r,l}v_{j,d,k}\,x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}\\
&=\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=-R1_j}^{R2_j}\sum_{d=-D1_j}^{D2_j}\sum_{l=1}^{L_j}\sum_{k=1}^{K_j}h_{j,r,d,l,k}\,x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}
\end{aligned}$$

但し、$h_{j,r,d,l,k}=f_{j,r,l}v_{j,d,k}$ である。

ここで、各パラメータの定義を整理しておく。

ｊ：要素増幅器の番号

Ｊ：要素増幅器の総数

ｒ：正規化先行時間、または正規化遅延時間

Ｒ１$_j$：ｊ番目要素増幅器に対応する合成多項式の最大の正規化先行時間

Ｒ２$_j$：ｊ番目要素増幅器に対応する合成多項式の最大の正規化遅延時間

ｄ：入力信号の正規化先行時間、または正規化遅延時間

Ｄ１$_j$：ｊ番目要素増幅器の最大の正規化先行時間

Ｄ２$_j$：ｊ番目要素増幅器の最大の正規化遅延時間

ｌ：要素増幅器の合成多項式の次数

Ｌ$_j$：ｊ番目要素増幅器の合成多項式の最大次数

ｋ：要素増幅器の歪特性多項式の次数

K_j：ｊ番目要素増幅器の歪多項式の最大次数

【００２８】

ここで、数式３を整理する。まず、異なる増幅器（異なるｊ）の同じ項をまとめると

【数４】

$$y(n)=\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=-R1_j}^{R2_j}\sum_{d=-D1_j}^{D2_j}\sum_{l=1}^{L_j}\sum_{k=1}^{K_j}h_{j,r,d,l,k}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

$$=\sum_{r=-\max(R1_1,\cdots,R1_J)}^{\max(R2_1,\cdots,R2_J)}\sum_{d=-\max(D1_1,\cdots,D1_J)}^{\max(D2_1,\cdots,D2_J)}\sum_{l=1}^{\max(L_1,\cdots,L_J)}\sum_{k=1}^{\max(K_1,\cdots,K_J)}(h_{1,r,d,l,k}+h_{2,r,d,l,k}+\cdots+h_{J,r,d,l,k})x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

$$=\sum_{r=-R1}^{R2}\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\hat{h}_{r,d,l,k}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

となる。但し、

$\hat{h}_{r,d,l,k}=h_{1,r,d,l,k}+h_{2,r,d,l,k}+\cdots+h_{J,r,d,l,k}$、

$R1=\max(R1_1,R1_2,\cdots,R1_J)$ 、$R2=\max(R2_1,R2_2,\cdots,R2_J)$ 、

$D1=\max(D1_1,D1_2,\cdots,D1_J)$、$D2=\max(D2_1,D2_2,\cdots,D2_J)$、

$L=\max(L_1,L_2,\cdots,L_J)$ 、$K=\max(K_1,K_2,\cdots,K_J)$

である。なお、ここでｍａｘ（ｃ１、ｃ２、・・・、ｃＪ）はｃ１、ｃ２、・・・、ｃＪの最大値である。

【００２９】

次に、数式４のｒ＝ｄの項をまとめると

【数５】

$$
\begin{aligned}
y(n) &= \sum_{r=-R1}^{R2} \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d) \left| x(n-r) \right|^{l-1} \left| x(n-d) \right|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{d,d,l,k} x(n-d) \left| x(n-d) \right|^{l-1} \left| x(n-d) \right|^{k-1} \\
&\quad + \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r \neq d}}^{R2} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d) \left| x(n-r) \right|^{l-1} \left| x(n-d) \right|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{d,d,l,k} x(n-d) \left| x(n-d) \right|^{k+l-2} \\
&\quad + \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r \neq d}}^{R2} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d) \left| x(n-r) \right|^{l-1} \left| x(n-d) \right|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} \tilde{h}_{d,k} x(n-d) \left| x(n-d) \right|^{k-1} \\
&\quad + \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r \neq d}}^{R2} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d) \left| x(n-r) \right|^{l-1} \left| x(n-d) \right|^{k-1}
\end{aligned}
$$

となる。但し、

$$
\sum_{k=1}^{K+L-1} \tilde{h}_{d,k} x(n-d) \mid x(n-d) \mid^{k-1} = \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{d,d,l,k} x(n-d) \mid x(n-d) \mid^{k+l-2}
$$

である。

【００３０】

また、数式５は、

【数６】

$$
\begin{aligned}
y(n) &= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} \tilde{h}_{d,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} \\
&+ \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d)|x(n-r)|^{l-1}|x(n-d)|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} \tilde{h}_{d,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} + \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,1,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} \\
&+ \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{l=2}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d)|x(n-r)|^{l-1}|x(n-d)|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} \tilde{h}_{d,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} + \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{k=1}^{K} (\hat{h}_{-R1,d,1,k} + \cdots + \hat{h}_{R2,d,1,k}) x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} \\
&+ \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{l=2}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d)|x(n-r)|^{l-1}|x(n-d)|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} \tilde{h}_{d,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} + \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{k=1}^{K} \tilde{h}'_{d,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} \\
&+ \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{l=2}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d)|x(n-r)|^{l-1}|x(n-d)|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} (\tilde{h}_{d,k} + \tilde{h}'_{d,k}) x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} \\
&+ \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{l=2}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d)|x(n-r)|^{l-1}|x(n-d)|^{k-1} \\
&= \sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)} \sum_{k=1}^{K+L-1} h'_{d,k} x(n-d)|x(n-d)|^{k-1} \\
&+ \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \sum_{l=2}^{L} \sum_{k=1}^{K} \hat{h}_{r,d,l,k} x(n-d)|x(n-r)|^{l-1}|x(n-d)|^{k-1}
\end{aligned}
$$

と整理される。

ただし、$\sum_{d=-D1}^{D2} \tilde{h}'_{d,k} = \sum_{d=-D1}^{D2} \sum_{\substack{r=-R1 \\ r\neq d}}^{R2} \hat{h}_{r,d,1,k}$ であり、$h'_{d,k} = \tilde{h}_{d,k} + \tilde{h}'_{d,k}$

である。

【００３１】

さらに、

【数７】

$$y(n)=\sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)}\sum_{k=1}^{K+L-1}h'_{d,k}x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$
$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=1}^{K}\hat{h}_{r,d,l,k}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$
$$=\sum_{d=-\max(D1,R1)}^{\max(D2,R2)}\sum_{k=1}^{K+L-1}h'_{d,k}x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\hat{h}_{r,d,l,1}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}$$
$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}\hat{h}_{r,d,l,k}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$
$$=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}h'_{d,k}x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}h'_{r,d,l}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}$$
$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}h'_{r,d,l,k}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

と整理される。但し、$K_b=K+L-1$ 、$h'_{r,d,l}=\hat{h}_{r,d,l,1}$ 、$h'_{r,d,l,k}=\hat{h}_{r,d,l,k}$ 、
$D_a=\max(D1,R1)$ 、$D_b=\max(D2,R2)$
である。

【００３２】

ここで、数式３、および数式３を整理して得られた数式７でモデル化される歪特性多項式を持つ増幅器の歪補償方法について説明する。増幅装置全体の入力信号と対応する出力信号の関係は
ｙ（ｎ）＝Ｇｘ（ｎ）
となり、線形であるのが理想的である。但し、Ｇは増幅装置の利得を表す実数定数である。ここでは、以降の議論を簡単にする目的で、Ｇ＝１とおくこととする。

【００３３】

しかし、実際の増幅装置では、入力信号の振幅（もしくは電力）が大きくなると入出力信号の関係は線形ではなく数式３、又は数式３を整理した数式７で表現されるように非線形となる。一方、数式３、又は数式７において入力信号と出力信号の関係が理想的になるとき、ｙ（ｎ）＝ｘ（ｘ）の関係が成立する。従って、図４のモデルに基づいた増幅回路を歪補償するには、図４のモデルを数式で表現した歪特性多項式である数式３、または数式７において入力信号Ｘと出力信号Ｙを入れ替えた

【数８】

$$x(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}w'_{d,k}y(n-d)\left|y(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}w'_{r,d,l}y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}$$
$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}w'_{r,d,l,k}y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}\left|y(n-d)\right|^{k-1}$$

を満たす複素数係数$w'_{d,k}$、$w'_{r,d,l}$、および$w'_{r,d,l,k}$を求め、歪補償回路１１において、

【数９】

$$a(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}w'_{d,k}x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}w'_{r,d,l}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}w'_{r,d,l,k}x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

なる予歪補償信号Ａのａ（ｎ）を出力すればよい。ここで、数式８を満たす係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$を求めるには、係数の個数よりも多い個数Ｎの入力信号ｘ（ｎ）と出力信号ｙ（ｎ）の組を数式８のｘ（ｎ）とｙ（ｎ）に代入してＮ個の連立方程式を作成し、掃き出し法、あるいは最小2乗法などで解けばよい。

【００３４】

但し、実際には数式８を満たす係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$を求めるのに必要な係数の個数よりも多い個数Ｎのｘ（ｎ）とｙ（ｎ）の組が確保できても雑音の影響で歪補償量の精度が十分に確保できない場合がある。そこで、雑音の影響があっても歪補償量の精度を向上させる目的でＮを係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$の個数よりも大幅に増やす場合が多い。しかし、現実にはｘ（ｎ）、およびｙ（ｎ）を保持しておくメモリ量が十分に確保できず歪補償の精度が十分に得られない場合がある。このような場合には、係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$を求めるのが可能で、かつメモリに保持しておけるＮ個のｘ（ｎ）とｙ（ｎ）の組で連立方程式を作成して係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$の誤差を求め、適応信号処理で更新する。

【００３５】

ここで、係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$を更新する場合についても説明する。増幅回路の歪補償をしながら歪補償多項式ａ（ｎ）の係数を更新する場合、増幅回路へ入力する信号はｘ（ｎ）ではなく、増幅回路の出力信号Ｙであるｙ（ｎ）をｘ（ｎ）に近づけるように歪補償した数式１０で表せる予歪補償信号Ａ、すなわちａ’（ｎ）である。但し、ｗ’$_{ｄ，ｋ}$（ｉ）、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$（ｉ）、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$（ｉ）はｉ回目の更新で得られた歪補償多項式ａ（ｎ）の係数ｗ’$_{ｄ，ｋ}$、ｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ}$、およびｗ’$_{ｒ，ｄ，ｌ，ｋ}$をそれぞれ表す。

【数１０】

$$a'(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}w'_{d,k}(i)x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}w'_{r,d,l}(i)x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}w'_{r,d,l,k}(i)x(n-d)\left|x(n-r)\right|^{l-1}\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

このとき、正確に増幅回路の歪補償がなされていれば、ｙ（ｎ）＝ｘ（ｎ）が成立するので、

【数１１】

$$a'(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}w'_{d,k}(i)y(n-d)\left|y(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}w'_{r,d,l}(i)y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}w'_{r,d,l,k}(i)y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}\left|y(n-d)\right|^{k-1}$$

も成立する。

しかし、増幅回路の歪補償が十分でなければ、ｙ（ｎ）＝ｘ（ｎ）とはならず、
【数１２】

$$a''(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}w'_{d,k}(i)y(n-d)\left|y(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}w'_{r,d,l}(i)y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}$$

$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}w'_{r,d,l,k}(i)y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}\left|y(n-d)\right|^{k-1}$$

とおくと、誤差信号ｅ（ｎ）が得られる。
【数１３】

$$e(n)=a'(n)-a''(n)$$

この誤差信号ｅ（ｎ）と出力信号ｙ（ｎ）の組により得られる式
【数１４】

$$e(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b}\Delta w'_{d,k}y(n-d)\left|y(n-d)\right|^{k-1}+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\Delta w'_{r,d,l}y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}$$

$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}\Delta w'_{r,d,l,k}y(n-d)\left|y(n-r)\right|^{l-1}\left|y(n-d)\right|^{k-1}$$

をＮ個用いて係数$w'_{d,k}$、$w'_{r,d,l}$、および$w'_{r,d,l,k}$それぞれの誤差$\Delta w'_{d,k}$、$\Delta w'_{r,d,l}$、および$\Delta w'_{r,d,l,k}$を求めて数式１５により更新する。
【数１５】

$$w'_{d,k}(i)=w'_{d,k}(i-1)+\Delta w'_{d,k}\quad、$$

$$w'_{r,d,l}(i)=w'_{r,d,l}(i-1)+\Delta w'_{r,d,l}\quad、$$

$$w'_{r,d,l,k}(i)=w'_{r,d,l,k}(i-1)+\Delta w'_{r,d,l,k}$$

但し、$w'_{d,k}(i)$、$w'_{r,d,l}(i)$、および$w'_{r,d,l,k}(i)$はｉ回目の更新により得られた係数$w'_{d,k}$、$w'_{r,d,l}$、および$w'_{r,d,l,k}$を表す。
【００３６】
以下、例として図３の場合について予歪補償信号Ａのａ’（ｎ）を得る方法について説明する。このａ’（ｎ）を得るのに、例えば数式１０の一部である

【数１６】

$$\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b} w'_{d,k}(i)x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

においてｄ＝０の項は

$$\sum_{k=1}^{K_b} w'_{0,k}(i)x(n)\left|x(n)\right|^{k-1}$$

$$= x(n)\sum_{k=1}^{K_b} w'_{0,k}(i)\left|x(n)\right|^{k-1}$$

となり、数式１６の多項式表現そのものではなく、強度｜ｘ（ｎ）｜により引用されるルックアップテーブル値と最新の入力信号ｘ（ｎ）との乗算によっても表現できるのが理解できる。

【００３７】

入力信号ｘ（ｎ）に対する強度｜ｘ（ｎ）｜を用いたルックアップテーブルは数式１７により、全ての｜ｘ｜を代入することで得られる。

【数１７】

$$1_D LUT_{0,0}(|\,x\,|) = \sum_{k=1}^{K_b} w'_{0,k}(i)\,|\,x\,|^{k-1}$$

ただし、$|\,x\,|$ は $|\,x(n)\,|_{\min} \leq |\,x\,| \leq |\,x(n)\,|_{\max}$ を満たす量子化された値、

$|\,x(n)\,|_{\min}$ は入力信号Ｘの最小振幅値、$|\,x(n)\,|_{\max}$ は入力信号Ｘの最大振幅値

である。例えば、０≦｜ｘ｜≦８１９１を満たす全ての整数値である。

【００３８】

数式１７で計算されるルックアップテーブル２３－０が出力する歪補償値は表１のようになる。ここで、前述したように係数ｗ’$_{0,k}$（ｉ）は複素数なので、表１の歪補償値も複素数である。

【表１】

強度 $\|x\|$	歪補償値
$A(1)$	$1_D LUT_{0,0}(A(1))$
$A(2)$	$1_D LUT_{0,0}(A(2))$
$A(3)$	$1_D LUT_{0,0}(A(3))$
⋮	⋮
$A(M_{\max})$	$1_D LUT_{0,0}(A(M_{\max}))$

【００３９】

同様にして、数式１０の一部

【数１８】

$$\sum_{d=-D_a}^{D_b}\sum_{k=1}^{K_b} w'_{d,k}(i)x(n-d)\left|x(n-d)\right|^{k-1}$$

においてｄ＝１３の項は、

$$\sum_{k=1}^{K_b} w'_{13,k}(i)x(n-13)\left|x(n-13)\right|^{k-1}$$

$$= x(n-13)\sum_{k=1}^{K_b} w'_{13,k}(i)\left|x(n-13)\right|^{k-1}$$

となり、数式１８の多項式表現そのものではなく、強度｜ｘ（ｎ－１３）｜により引用されるルックアップテーブル値と遅延した入力信号ｘ（ｎ－１３）との乗算によっても表現できるのが理解できる。

【００４０】

遅延した入力信号ｘ（ｎ－１３）に対する強度｜ｘ（ｎ－１３）｜のルックアップテーブルは数式１９により、全ての｜ｘ｜を代入することで得られる。

【数１９】

$$1_D LUT_{13,13}(|\,x\,|) = \sum_{k=1}^{K_b} w'_{13,k}(i)\,|\,x\,|^{k-1}$$

ただし、

$|\,x\,|$は$|\,x(n-13)\,|_{\min} \leq |\,x\,| \leq |\,x(n-13)\,|_{\max}$ を満たす量子化された値、

$|\,x(n-13)\,|_{\min}$ は入力信号の最小振幅値、

$|\,x(n-13)\,|_{\max}$ は入力信号の最大振幅値

である。例えば、０≦｜ｘ｜≦８１９１を満たす全ての整数値である。

【００４１】

数式１９で計算されるルックアップテーブル２３－１３が出力する歪補償値は表２のようになる。ここで、前述したように係数$w'_{13,k}$（ｉ）は複素数なので、表2の歪補償値も複素数である。

【表２】

強度 $\|x\|$	歪補償値
$A(1)$	$1_D LUT_{13,13}(A(1))$
$A(2)$	$1_D LUT_{13,13}(A(2))$
$A(3)$	$1_D LUT_{13,13}(A(3))$
⋮	⋮
$A(M_{\max})$	$1_D LUT_{13,13}(A(M_{\max}))$

【００４２】

また、数式１０の一部、

【数２０】

$$\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L} w'_{r,d,l}(i)x(n-d)\,|\,x(n-r)\,|^{l-1}$$

においてｒ＝５、ｄ＝９の項は、

$$\sum_{l=2}^{L} w'_{5,9,l}(i)x(n-9)\,|\,x(n-5)\,|^{l-1}$$

$$= x(n-9)\sum_{l=2}^{L} w'_{5,9,l}(i)\,|\,x(n-5)\,|^{l-1}$$

となり、数式２０の多項式表現そのものではなく、強度｜ｘ（ｎ－５）｜により引用されるルックアップテーブル値と遅延した入力信号ｘ（ｎ－９）との乗算によっても表現できるのが理解できる。

【００４３】

遅延した入力信号ｘ（ｎ－９）に対する強度｜ｘ（ｎ－５）｜のルックアップテーブルは数式２１により、全ての｜ｘ｜を代入することで得られる。

【数２１】

$$1_D LUT_{9,5}(|\,x\,|) = \sum_{l=2}^{L} w'_{5,9,l}(i)\,|\,x\,|^{l-1}$$

但し、

$|\,x\,|$ は $|\,x(n-5)\,|_{\min} \leq |\,x\,| \leq |\,x(n-5)\,|_{\max}$ を満たす量子化された値、

$|\,x(n-5)\,|_{\min}$ は入力信号の最小振幅値、

$|\,x(n-5)\,|_{\max}$ は入力信号の最大振幅値

である。

例えば、０≦｜ｘ｜≦８１９１を満たす全ての整数値である。
【００４４】
　ここでの注意点は、入力信号のサンプリング時刻と、ルックアップテーブルを引用する入力信号の強度のサンプリング時刻が異なる点である。数式２１で計算されるルックアップテーブル２３－５が出力する歪補償値は表３のようになる。ここで、前述したように係数ｗ’$_{５，９，１}$（ｉ）は複素数なので、表３の歪補償値も複素数である。
【表３】

強度 $\lvert x\rvert$	歪補償値
$A(1)$	$1_D LUT_{9,5}(A(1))$
$A(2)$	$1_D LUT_{9,5}(A(2))$
$A(3)$	$1_D LUT_{9,5}(A(3))$
⋮	⋮
$A(M_{\max})$	$1_D LUT_{9,5}(A(M_{\max}))$

【００４５】
　更に、次のように入力信号と異なる２つのサンプリング時刻における入力信号の強度を用いる場合もある。具体的には数式１０の一部
【数２２】

$$\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2}\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K} w'_{r,d,l,k}(i)x(n-d)\,|\,x(n-r)\,|^{l-1}\,|\,x(n-d)\,|^{k-1}$$

において、ｒ＝１７、ｄ＝１１の項は、

$$\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K} w'_{17,11,l,k}(i)x(n-11)\,|\,x(n-17)\,|^{l-1}\,|\,x(n-11)\,|^{k-1}$$

$$= x(n-11)\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K} w'_{17,11,l,k}(i)\,|\,x(n-17)\,|^{l-1}\,|\,x(n-11)\,|^{k-1}$$

となり、数式２２の多項式表現そのものではなく、ルックアップテーブルは２つの異なるサンプリング時刻における入力信号の強度｜ｘ（ｎ－１７）｜、および強度｜ｘ（ｎ－１１）｜により引用される。
【００４６】
　このように２つの入力信号の強度の二変数ルックアップテーブルは数式２３により、全ての｜ｘ$_1$｜と｜ｘ$_2$｜を代入することで得られる。

【数２３】

$$2_D LUT_{11,17}(|x_1|,|x_2|)=\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K} w'_{17,11,l,k}(i)\,|x_1|^{l-1}\,|x_2|^{k-1}$$

ただし、

$|x_1|$ は $|x(n-17)|_{\min} \le |x_1| \le |x(n-17)|_{\max}$ を満たす量子化された値、

$|x_2|$ は $|x(n-11)|_{\min} \le |x_2| \le |x(n-11)|_{\max}$ を満たす量子化された値、

$|x(n-17)|_{\min}$ と $|x(n-11)|_{\min}$ は入力信号の最小振幅値、

$|x(n-17)|_{\max}$ と $|x(n-11)|_{\max}$ は入力信号の最大振幅値

である。例えば、０≦｜ｘ$_1$｜≦８１９１、０≦｜ｘ$_2$｜≦８１９１を満たす全ての整数値である。

【００４７】

ここでの注意点は、サンプリング時刻の異なる２つの入力信号の振幅でルックアップテーブル値を引用していることである。数式２３で計算されるルックアップテーブル２３－１１が出力する歪補償値は表４のようになる。ここで、前述したように係数ｗ’$_{17,11,l,k}$（ｉ）は複素数なので、表４の歪補償値も複素数である。

【表４】

強度1|x1|	強度2|x2|	歪補償値
$A_1(1)$	$A_2(1)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(1), A_2(1))$
$A_1(1)$	$A_2(2)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(1), A_2(2))$
$A_1(1)$	$A_2(3)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(1), A_2(3))$
⋮	⋮	⋮
$A_1(1)$	$A_2(M_{max})$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(1), A_2(M_{max}))$
$A_1(2)$	$A_2(1)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(2), A_2(1))$
$A_1(2)$	$A_2(2)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(2), A_2(2))$
$A_1(2)$	$A_2(3)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(2), A_2(3))$
⋮	⋮	⋮
$A_1(2)$	$A_2(M_{max})$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(2), A_2(M_{max}))$
● ● ●	● ● ●	● ● ●
$A_1(M_{max})$	$A_2(1)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(M_{max}), A_2(1))$
$A_1(M_{max})$	$A_2(2)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(M_{max}), A_2(2))$
$A_1(M_{max})$	$A_2(3)$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(M_{max}), A_2(3))$
⋮	⋮	⋮
$A_1(M_{max})$	$A_2(M_{max})$	$2_D LUT_{11,17}(A_1(M_{max}), A_2(M_{max}))$

【００４８】

ここまでは、本発明の内容をわかりやすく説明する目的で、数式１０の一部である数式１６、数式１８、および数式２０においてそれぞれｄ＝０とｄ＝１３の項のみ、ｒ＝５かつｄ＝９の項のみ、およびｒ＝１７かつｄ＝１１の項のみが存在する場合のプリディストータ（図３）について説明した。しかし、より一般的に数式９又は数式１０に対応するプリディストータを表すと図５となる。図５において、遅延部２７の遅延時間は、遅延部２７毎に設定できる。

【００４９】

更に、ここまでの議論では数式９又は数式１０を歪補償多項式として用いてきたので、ある１つのサンプリング時刻の入力信号の強度で一変数ルックアップテーブルを引用するか、サンプリング時刻の異なる２つの入力信号の強度で二変数ルックアップテーブルを引

用した例を示したが、より一般的にサンプリング時刻の異なる３個以上の入力信号の強度で多変数ルックアップテーブルを引用することも可能である。サンプリング時刻の異なる３個以上の入力信号の強度でルックアップテーブルを引用する場合は、数式１０の一部である数式２２をより一般化した

【数２４】

$$\sum_{d_1=-D1_1}^{D2_1}\sum_{d_2=-D1_2}^{D2_2}\cdots\sum_{d_M=-D1_M}^{D2_M}\sum_{k_1=2}^{K_1}\sum_{k_2=2}^{K_2}\cdots\sum_{k_M=2}^{K_M} w'_{d_1,d_2,\cdots,d_M,k_1,k_2,\cdots,k_M}(i)x(n-d_1)x(n-d_2)\cdots x(n-d_M)|(x-d_1)|^{k_1-1}|(x-d_2)|^{k_2-1}\cdots|(x-d_M)|^{k_M-1}$$

のうち入力信号の強度が関わる部分を抜き出した

【数２５】

$$M_D LUT_{d_1,d_2,\cdots,d_M}(|x_1|,|x_2|,\cdots,|x_M|) = \sum_{k_1=2}^{K_1}\sum_{k_2=2}^{K_2}\cdots\sum_{k_M=2}^{K_M} w'_{d_1,d_2,\cdots,d_M,k_1,k_2,\cdots,k_M}(i)|x_1|^{k_1-1}|x_2|^{k_2-1}\cdots|x_M|^{k_M-1}$$

を用いて多変数ルックアップテーブルを作成すればよい。図６は、数式２４、および数式２４から得られた数式２５の多変数ルックアップテーブル２３－ＭＤを用いた場合の歪補償回路１１のブロック図である。

【００５０】

（ルックアップテーブル更新方法）

まず、従来のルックアップテーブルの更新方法について説明する。図７は、従来のプリディストータのルックアップテーブルの更新方法を説明するフローチャートである。ステップＳ１０１で、入力信号及び出力信号をサンプリングする。ステップＳ１０２で、入力信号と出力信号との差分を計算して誤差を算出する。ステップＳ１０３で、ステップＳ１０２で算出した誤差を小さくするようにルックアップテーブルを更新し、ステップＳ１０４で新たなルックアップテーブルを作成する。ステップＳ１０５で、歪補償値が存在しないアドレスの歪補償値を隣接するアドレスの歪補償値で直線補間し、当該アドレスの歪補償値を直線補間した値から取得する。更に、ステップＳ１０５では入力信号の振幅値（または電力値）の量子化ステップをさらに細かく設定したアドレスに対する歪補償値を直線補間した値から取得する。ステップＳ１０６で、当該アドレスを補間した歪補償値を用いたルックアップテーブルに差し替える。

【００５１】

図７のように、従来のプリディストータのルックアップテーブルの更新方法では、ルックアップテーブルの作成（および更新）に際して、歪補償値が算出されなかったアドレスに対応する歪補償値は、歪補償値（テーブル値）が存在するアドレスを用いて補間により算出していた。

【００５２】

図８は、本実施形態のプリディストータ３０１のルックアップテーブルの更新方法を説明するフローチャートである。なお、図２のプリディストータ３０２でも同様にルックアップテーブルを更新することができる。ステップＳ２０１でｉ回目の更新時における係数w_0（ｉ）、w_1（ｉ）、・・・、w_K（ｉ）に対応した入力信号Ｘ及び出力信号Ｙを取り込み、ステップＳ２０２で入力信号Ｘ及び出力信号Ｙの行列を生成する。入力信号Ｘ及び出力信号Ｙの行列は数式２６である。但し、ここでは簡単のために歪補償多項式の項数を（Ｋ＋１）としてある。また、ここでの数式２６は簡単のため、歪補償多項式として数

式１０の一部である数式１６のみを用いた場合の例を与えている。
【数２６】

$$\mathbf{X}(i)=\begin{pmatrix} x(i(N+M)) & x(i(N+M))|x(i(N+M))| & \cdots & x(i(N+M))|x(i(N+M))|^K \\ x(i(N+M)+1) & x(i(N+M)+1)|x(i(N+M)+1)| & \cdots & x(i(N+M)+1)|x(i(N+M)+1)|^K \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(i(N+M)+N-1) & x(i(N+M)+N-1)|x(i(N+M)+N-1)| & \cdots & x(i(N+M)+N-1)|x(i(N+M)+N-1)|^K \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Y}(i)=\begin{pmatrix} y(i(N+M)) & y(i(N+M))|y(i(N+M))| & \cdots & y(i(N+M))|y(i(N+M))|^K \\ y(i(N+M)+1) & y(i(N+M)+1)|y(i(N+M)+1)| & \cdots & y(i(N+M)+1)|y(i(N+M)+1)|^K \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(i(N+M)+N-1) & y(i(N+M)+N-1)|y(i(N+M)+N-1)| & \cdots & y(i(N+M)+N-1)|y(i(N+M)+N-1)|^K \end{pmatrix}$$

ここで、Ｘ（ｉ）は入力信号Ｘの行列、Ｙ（ｉ）は出力信号Ｙの行列である。但し、ここでのＭは次の多項式係数の更新時に用いる入出力信号の取り込み開始までにかかる時間に対応するサンプリングポイント数である。
【００５３】
　ここで、ルックアップテーブルが入力信号Ｘ及び出力信号Ｙに基づいて生成した計算信号をそれぞれ入力レプリカ信号Ａ’及び出力レプリカ信号Ａ”とする。ステップＳ２０３で入力レプリカ信号Ａ’と出力レプリカ信号Ａ”を生成する。数式１０の入力レプリカ信号Ａ’であるａ’（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をルックアップテーブルを用いて表すと数式２７のようになる。
【数２７】

$$a'(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b} x(n-d)\cdot 1_D LUT_{d,d}(|x(n-d)|)+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2} x(n-d)\cdot 1_D LUT_{d,r}(|x(n-r)|)$$

$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2} x(n-d)2_D LUT_{d,r}(|x(n-d)|,|x(n-r)|)$$

但し、ここでは記述の簡単のために、ａ’（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をａ’（ｎ）と記述し、ｘ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をｘ（ｎ）と記述している。
【００５４】
　また、数式１２の出力レプリカ信号Ａ”であるａ’’（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をルックアップテーブルを用いて表すと数式２８のようになる。
【数２８】

$$a''(n)=\sum_{d=-D_a}^{D_b} y(n-d)\cdot 1_D LUT_{d,d}(|y(n-d)|)+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2} y(n-d)\cdot 1_D LUT_{d,r}(|y(n-r)|)$$

$$+\sum_{d=-D1}^{D2}\sum_{\substack{r=-R1\\ r\neq d}}^{R2} y(n-d)\cdot 2_D LUT_{d,r}(|y(n-d)|,|y(n-r)|)$$

但し、ここでは記述の簡単のために、ａ’’（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をａ’’（ｎ）と記述し、ｙ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をｙ（ｎ）と記述している。
【００５５】
　ステップＳ２０４では、このａ’（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）とａ’’（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）とを用いて、誤差信号ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）を数式２９のように計算する。

【数２９】

$$e(i(N+M)+n)=a'(i(N+M)+n)-a''(i(N+M)+n)$$

さらに、この誤差信号ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）をＮ個並べたベクトルを数式３０のようにおく。

【数３０】

$$\mathbf{e}(i)=\mathbf{a}'(i)-\mathbf{a}''(i)$$
$$=\left(e(i(N+M)),\quad e(i(N+M)+1),\quad \cdots,\quad e(i(N+M)+N-1)\right)^T$$

ここで、$\mathbf{e}(i)$ は誤差信号ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）の行列である。

【００５６】

このとき、連立方程式が

【数３１】

$$\mathbf{Y}(i)\Delta\mathbf{w}(i)=\mathbf{e}(i)$$

であるから、ステップＳ２０５で数式３２のように行列要素を算出し、

【数３２】

$$\mathbf{Y}^H(i)\mathbf{Y}(i),$$
$$\mathbf{Y}^H(i)\mathbf{e}(i)$$

ステップＳ２０６で数式３３の歪補償多項式の係数の誤差を求める。但し、

$\Delta w(i)=(\Delta w_0(i),\ \Delta w_1(i),\ \cdots,\ \Delta w_K(i))^T$

である。

【数３３】

$$\Delta\mathbf{w}(i)=(\mathbf{Y}^H(i)\mathbf{Y}(i))^{-1}\mathbf{Y}^H(i)\mathbf{e}(i)$$

【００５７】

次にステップＳ２０７で、全てのｄ、もしくは全てのｄとｒの組み合わせの誤差ルックアップテーブル

【数３４】

$$\Delta 1_D LUT_{d,d}(|x|)=\sum_{k=1}^{K_b}\Delta w_{d,k}|x|^{k-1}$$

$$\Delta 1_D LUT_{d,r}(|x|)=\sum_{l=2}^{L}\Delta w_{r,d,l}|x|^{l-1}$$

$$\Delta 2_D LUT_{d,r}(|x_1|,|x_2|)=\sum_{l=2}^{L}\sum_{k=2}^{K}\Delta w_{r,d,l,k}|x_1|^{l-1}|x_2|^{k-1}$$

を全てのアドレス｜ｘ｜、もしくは全ての｜x_1｜と｜x_2｜の組において算出する。

【００５８】

次にステップＳ２０８で、全てのｄ、もしくは全てのｄとｒの組み合わせのルックアップテーブルを数式３５のようにアドレス｜ｘ｜、もしくは全ての｜ｘ$_1$｜と｜ｘ$_2$｜の組において更新する。

【数３５】

$$1_D LUT_{d,d}(|x|) \leftarrow 1_D LUT_{d,d}(|x|) + \mu \cdot \Delta 1_D LUT_{d,d}(|x|)$$
$$1_D LUT_{d,r}(|x|) \leftarrow 1_D LUT_{d,r}(|x|) + \mu \cdot \Delta 1_D LUT_{d,r}(|x|)$$
$$2_D LUT_{d,r}(|x_1|,|x_2|) \leftarrow 2_D LUT_{d,r}(|x_1|,|x_2|) + \mu \cdot \Delta 2_D LUT_{d,r}(|x_1|,|x_2|)$$

但し、μは更新係数であり、０＜μ≦１．０を満たす。

【００５９】

また、$1_D LUT_{0,0}$（｜ｘ｜）の歪補償値（テーブル値）の初期値は全てのアドレス｜ｘ｜において実数部が１．０で、虚数部が０．０の複素数１．０＋ｊ０．０であり、他のルックアップテーブルである$1_D LUT_{d,d}$（｜ｘ｜）、$1_D LUT_{d,r}$（｜ｘ｜）、$2_D LUT_{d,r}$（｜ｘ$_1$｜，｜ｘ$_2$｜）の歪補償値（テーブル値）の初期値は全てのアドレス｜ｘ$_1$｜と｜ｘ$_2$｜の組において実数部が０．０で、虚数部が０．０の複素数０．０＋ｊ０．０である。

【００６０】

最後にステップＳ２０９でルックアップテーブルをステップＳ２０８で更新したルックアップーブルに差し替える。

【００６１】

（更新係数）

本発明では更新回数、または誤差信号ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）の電力に応じて更新係数μを適応的に変化させる。例えば、本発明の例として更新係数μを更新回数に応じて変化させる場合には、更新係数を

【数３６】

$$\mu = \mu(i) = \begin{cases} \mu_{MAX} & ,(i < I_{MIN}) \\ \dfrac{\mu_{MIN} - \mu_{MAX}}{I_{MAX} - I_{MIN}}(i - I_{MAX}) + \mu_{MIN} & ,(I_{MIN} \le i \le I_{MAX}) \\ \mu_{MIN} & ,(i > I_{MAX}) \end{cases}$$

とする（図９）。但し、$0 < \mu_{MIN} < \mu_{MAX} \le 1.0$であり、$0 \le I_{MIN} < I_{MAX}$である。このように、更新開始時には更新係数の値を大きくしておき、更新が進むにつれて更新係数の値を小さくすると、収束速度が速く、かつ収束後の歪補償の精度を高める制御が可能となる。尚、数式３６は更新係数μを適応的に変える関数の一例であり、更新係数μを適応的に変える関数としては更新の回数ｉを変数とした関数であれば他の形でもよい。

【００６２】

また、本発明の別の例として更新係数μを誤差ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）の電力｜ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）｜^{2}に応じて変化させる場合には、誤差電力の総和を

【数３７】

$$S(i) = \sum_{n=0}^{N-1} \left| e(i(N+M)+n) \right|^2$$

とおくと、更新係数を数式３７の関数である

【数３８】

$$\mu = \mu(S(i)) = \begin{cases} \mu_{MAX} & ,(S(i) > S_{TH2}) \\ \dfrac{\mu_{MAX} - \mu_{MIN}}{S_{TH2} - S_{TH1}}(S(i) - S_{TH1}) + \mu_{MIN} & ,(S_{TH1} \le S(i) \le S_{TH2}) \\ \mu_{MIN} & ,(S(i) < S_{TH1}) \end{cases}$$

とする（図１０）。但し、$0 < \mu_{MIN} < \mu_{MAX} \leqq 1.0$であり、$0 < S_{TH1} \leqq S_{TH2}$である。このように、更新係数μを誤差電力の関数として誤差電力に応じて変化させると、誤差電力が大きいときは更新係数μを大きくして追従速度、および収束速度が速くなるように動作し、誤差電力が小さいときは更新係数μを小さくして歪補償の精度を高める制御が可能となる。尚、数式３８は更新係数μを適応的に変える関数の一例であり、更新係数μを適応的に変える関数としては誤差信号ｅ（ｉ（Ｎ＋Ｍ）＋ｎ）の電力$|e(i(N+M)+n)|^2$を変数とした関数であれば他の形でもよい。

【産業上の利用可能性】

【００６３】

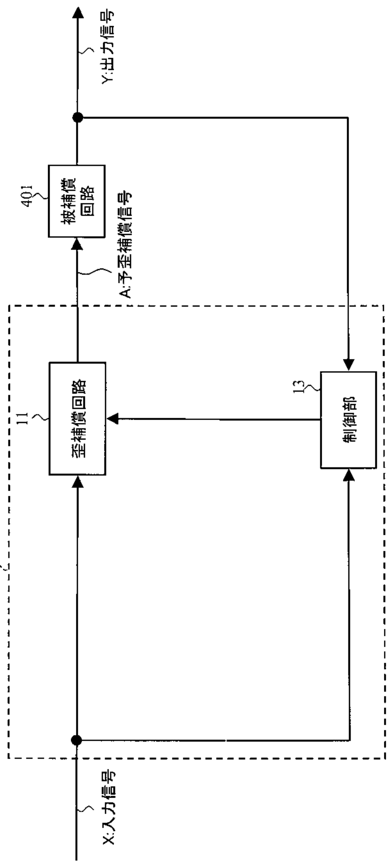
本発明に係るプリディストータは、移動体通信基地局などに用いられる無線送信機の電力増幅器に適用することができる。

【符号の説明】

【００６４】

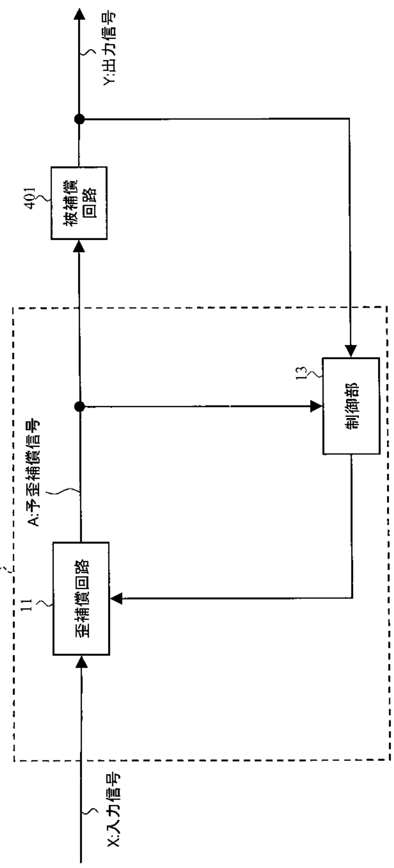
３０１、３０２：プリディストータ
１１：歪補償回路
１３：制御部
２１：遅延素子
２２：強度算出部
２３、２３－０、２３－５、２３－１１、２３－１３：ルックアップテーブル
２３－1D：一変数ルックアップテーブル
２３－2D：二変数ルックアップテーブル
２３－ＭＤ：多変数ルックアップテーブル
２４：複素乗算器
２７：遅延部
３１：遅延部
３２、３２－０、３２－５、３２－１１、３２－１３：歪信号生成部
３３：歪補償値生成部
４０１：被補償回路
５１１：遅延素子
５１２－ｊ：振幅値関数（ｊは自然数）
５１３：要素増幅器
５１４：複素乗算器
５１５：積算器
Ｘ：入力信号
Ｙ：出力信号
Ａ：予歪補償信号
Ｓ、Ｓ－０、Ｓ－５、Ｓ－９、Ｓ－１１、Ｓ－１３：サンプリング信号
Ｈ、Ｈ－０、０，Ｈ－９，５、Ｈ－１１，１７：歪信号

【図１】



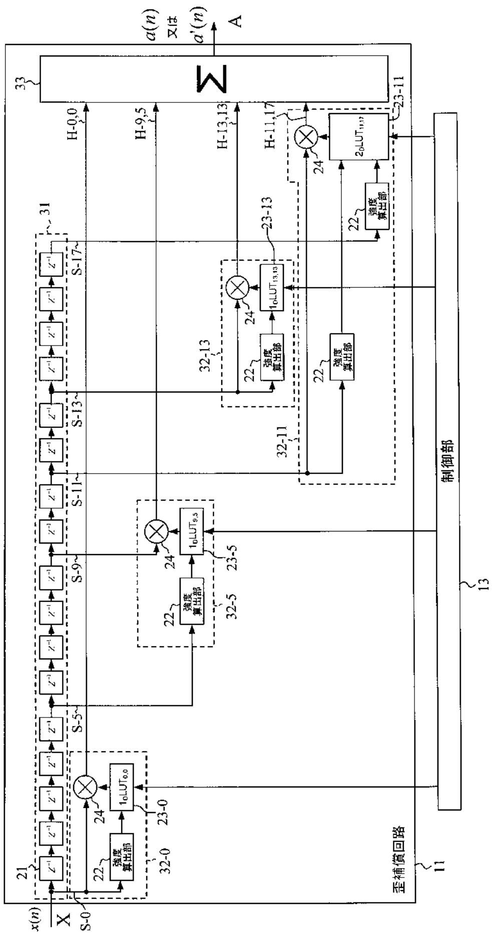
Y:出力信号
401
被補償回路
A:予補償信号
11
歪補償回路
13
制御部
301
X:入力信号

【図２】



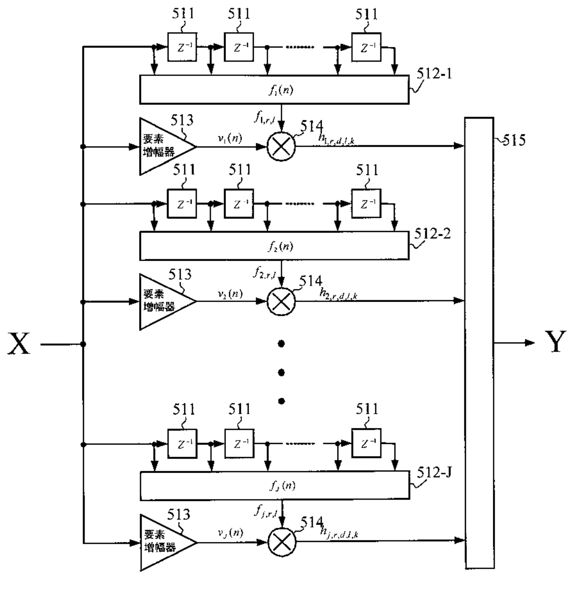
Y:出力信号
401
被補償回路
13
制御部
A:予歪補償信号
302
11
歪補償回路
X:入力信号

【図３】



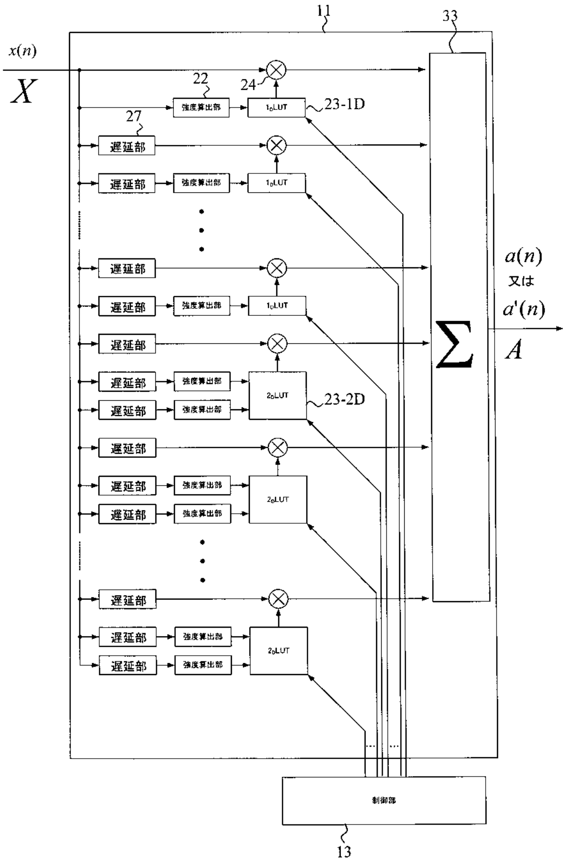
a(n)
又は
a'(n)
A
33
Σ
制御部
13
歪補償回路
11
x(n)
X

【図４】

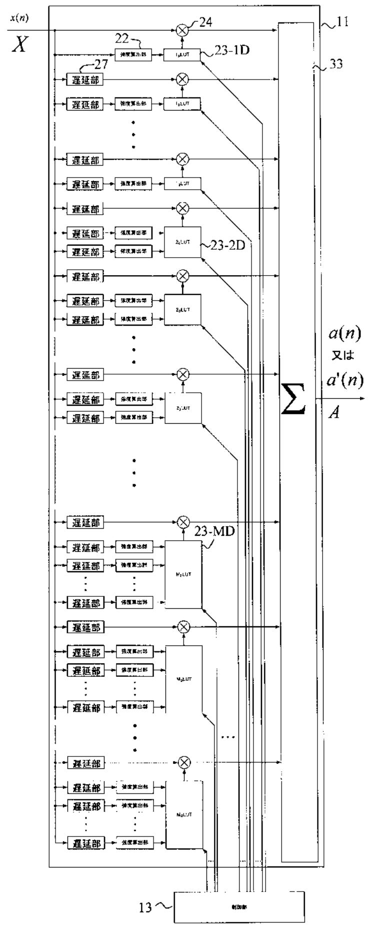


511
512-1
512-2
512-J
513
514
515
要素増幅器
X
Y

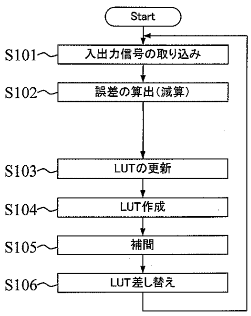
【図５】



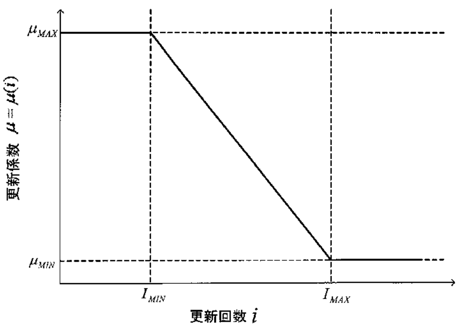
【図６】



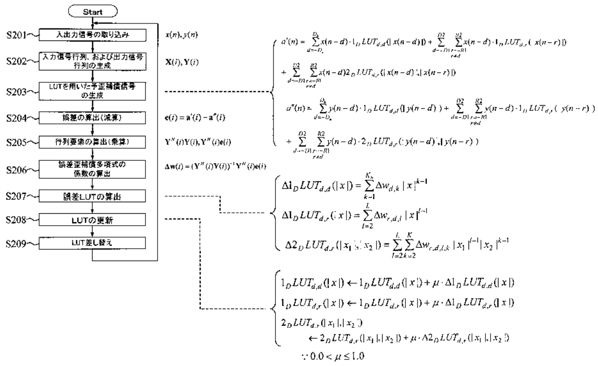
【図７】



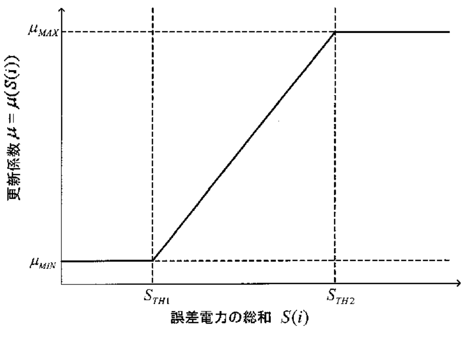
【図９】



【図８】



【図１０】



フロントページの続き

(72)発明者　羽田　亨
東京都三鷹市下連雀五丁目１番１号　日本無線株式会社内

審査官　安井　雅史

(56)参考文献　特開２００６－２７０２４６（ＪＰ，Ａ）
特開２００３－１４２９５９（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－１７２６７６（ＪＰ，Ａ）
特開２００５－１１７６１３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０３Ｆ　　　１／００－３／７２，７／００－７／０６
Ｈ０４Ｂ　　　１／０２－１／０４