

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6540295号
(P6540295)

(45) 発行日 令和1年7月10日(2019.7.10)

(24) 登録日 令和1年6月21日(2019.6.21)

(51) Int. Cl. F I
HO 4 B 3/10 (2006.01) HO 4 B 3/10 C
HO 4 B 10/61 (2013.01) HO 4 B 10/61

請求項の数 7 (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2015-137587 (P2015-137587)	(73) 特許権者	000005223
(22) 出願日	平成27年7月9日(2015.7.9)		富士通株式会社
(65) 公開番号	特開2017-22509 (P2017-22509A)		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(43) 公開日	平成29年1月26日(2017.1.26)	(74) 代理人	100104190
審査請求日	平成30年4月13日(2018.4.13)		弁理士 酒井 昭徳
		(72) 発明者	佐々木 大輔
			神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内
		(72) 発明者	波多江 一彦
			神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 適応等化回路、デジタルコヒーレント受信器および適応等化方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

演算部と平均化部と補償部と適応等化部とを備える適応等化回路であって、
 前記演算部は、対象信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が前記補償部によって補償された第2信号と、前記第2信号に基づくチャネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、
 前記平均化部は、前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、
 前記補償部は、前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第2信号を得、
 前記適応等化部は、前記第2信号に基づく設定値によって前記対象信号の適応等化処理を行う、
 ことを特徴とする適応等化回路。

【請求項 2】

前記平均化部は、前記推定値の数が所定数に達した場合に、前記所定数の推定値の平均値を得ることを特徴とする請求項 1 に記載の適応等化回路。

【請求項 3】

前記雑音電力が前記所定電力以下か否かを判定した回数が前記所定数より大きい閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させる制御を行う制御部を備えることを特徴とする請求

項 2 に記載の適応等化回路。

【請求項 4】

前記対象信号における前記所定シンボルの信号の位置を推定し、推定した位置に基づいて前記対象信号から前記所定シンボルの信号を取得する取得部を備え、

前記演算部は、取得された前記所定シンボルの信号に基づいて前記雑音電力を演算し、

前記平均化部は、取得された前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が前記所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの推定値を保持し、

前記制御部は、前記雑音電力が前記所定電力以下か否かを判定した回数が前記閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させ、取得された前記所定シンボルの信号の位置の推定をやり直させる制御を行う、

10

ことを特徴とする請求項 3 に記載の適応等化回路。

【請求項 5】

前記雑音電力が前記所定電力より大きいと判定した回数が閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させる制御部を備えることを特徴とする請求項 2 ~ 4 のいずれか一つに記載の適応等化回路。

【請求項 6】

受光処理部と演算部と平均化部と補償部と適応等化部と復号部とを備えるデジタルコヒーレント受信器であって、

前記受光処理部は、伝送路からの信号光と局発光とを混合して得られた光の光電変換およびデジタル変換を行い、

20

前記演算部は、前記受光処理部により得られた信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が前記補償部によって補償された第 2 信号と、前記第 2 信号に基づくチャネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、

前記平均化部は、前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、

前記補償部は、前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第 2 信号を得、

30

前記適応等化部は、前記第 2 信号に基づく設定値によって、前記受光処理部により得られた信号の適応等化処理を行い、

前記復号部は、前記適応等化部によって適応等化処理が行われた信号に基づく復号を行う、

ことを特徴とするデジタルコヒーレント受信器。

【請求項 7】

対象信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が補償された第 2 信号と、前記第 2 信号に基づくチャネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、

前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、

40

前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第 2 信号を得、

前記第 2 信号に基づく設定値によって前記対象信号の適応等化処理を行う、

ことを特徴とする適応等化方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、適応等化処理を行う適応等化回路、デジタルコヒーレント受信器および適

50

応等化方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、光の振幅と位相の両方の情報を電流に変換し、デジタル処理によってデータを復号するデジタルコヒーレント受信器が知られている。デジタルコヒーレント受信器においては、たとえば光伝送路の伝播特性の時間変動に対する適応等化処理を行うAEQ (Adaptive Equalizer: 適応等化器) が用いられる。また、光通信や無線通信などにおいて、送信側の発振周波数と受信側の発振周波数との間のずれ(周波数オフセット)を補償する技術が知られている(たとえば、下記特許文献1~4参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2012-244255号公報

【特許文献2】特開2003-198651号公報

【特許文献3】特開2013-123161号公報

【特許文献4】特開2014-060708号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、上述した従来技術では、たとえば信号光の伝送路が長い場合は、信号光に生じる雑音が大きくなるため、周波数オフセットを高い確度で推定することが困難であるという問題がある。

【0005】

このため、たとえば、チャンネル推定や、チャンネル推定の結果に基づくAEQの設定を高い確度で行うことができず、伝送路特性によって信号光に生じた歪みをAEQによって高い確度で補償することができないという問題がある。

【0006】

1つの側面では、本発明は、雑音の影響を減らして確度の高い周波数オフセットの推定値を得ることができる適応等化回路、デジタルコヒーレント受信器および適応等化方法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】

【0007】

上述した課題を解決し、目的を達成するため、本発明の一側面によれば、対象信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が補償された第2信号と、前記第2信号に基づくチャンネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第2信号を得、前記第2信号に基づく設定値によって前記対象信号の適応等化処理を行う適応等化回路、デジタルコヒーレント受信器および適応等化方法が提案される。

【発明の効果】

【0008】

本発明の一側面によれば、雑音の影響を減らして確度の高い周波数オフセットの推定値を得ることができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】図1は、実施の形態にかかる適応等化回路の一例を示す図である。

【図2】図2は、実施の形態にかかるAEQによる補償対象の伝送路特性の一例を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 3】図 3 は、実施の形態にかかる A E Q による補償対象の伝送路特性の他の一例を示す図である。

【図 4】図 4 は、実施の形態にかかる A E Q による補償対象の伝送路特性のさらに他の一例を示す図である。

【図 5】図 5 は、実施の形態にかかるデジタルコヒーレント受信器の一例を示す図である。

【図 6】図 6 は、実施の形態にかかる A E Q の一例を示す図である。

【図 7】図 7 は、実施の形態にかかる F I R フィルタの一例を示す図である。

【図 8】図 8 は、実施の形態にかかる T S 位置推定によるタップ係数の初期値の算出の一例を示す図である。

10

【図 9】図 9 は、実施の形態にかかる周波数オフセットの一例を示す図である。

【図 10】図 10 は、実施の形態にかかる周波数オフセットの推定の一例を示す図である。

【図 11】図 11 は、実施の形態にかかる A E Q __ T S の一例を示す図である。

【図 12】図 12 は、実施の形態にかかる A E Q __ T S による処理の一例を示すフローチャートである。

【図 13】図 13 は、実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の一例を示す図である。

【図 14】図 14 は、実施の形態にかかる周波数オフセット平均化部の一例を示す図である。

20

【図 15】図 15 は、実施の形態にかかる A E Q __ T S による処理の他の一例を示すフローチャートである。

【図 16】図 16 は、実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の他の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下に図面を参照して、本発明にかかる適応等化回路、デジタルコヒーレント受信器および適応等化方法の実施の形態を詳細に説明する。

【0011】

(実施の形態)

30

(実施の形態にかかる適応等化回路)

図 1 は、実施の形態にかかる適応等化回路の一例を示す図である。図 1 に示すように、実施の形態にかかる適応等化回路 100 は、A E Q 110 と、A E Q __ T S 120 と、を備える。適応等化回路 100 は、たとえばデジタルコヒーレント受信器のデジタル処理部に適用することができる。

【0012】

A E Q 110 は、適応等化回路 100 へ入力された信号(対象信号)に対する適応等化処理を行う適応等化部である。A E Q 110 は、適応等化処理によって得られた信号を出力する。適応等化処理は、たとえば、伝送路の特性による受信信号の歪みを、伝送路の特性の変動に応じて適応的に補償する処理である。A E Q 110 は、たとえば、複数段のタップを有する F I R (Finite Impulse Response: 有限インパルス応答) フィルタにより実現することができる(たとえば図 6, 図 7 参照)。

40

【0013】

A E Q __ T S 120 は、適応等化回路 100 へ入力される信号に繰り返し含まれる T S (Training Sequence) パターンに基づいて、A E Q 110 におけるタップ係数の初期値を設定する。T S パターンは、適応等化回路 100 において既知の所定シンボルのトレーニング信号である。

【0014】

たとえば、A E Q __ T S 120 は、適応等化回路 100 へ入力される信号に繰り返し含まれる T S パターンの雑音電力(ノイズの電力)を演算する。雑音電力は、T S パターン

50

と、TSパターンに基づくチャネル推定値と、TSパターンの既知のシンボル（所定シンボル）と、に基づいて演算することができる。

【0015】

雑音電力の演算に用いるTSパターンは、たとえば、適応等化回路100へ入力される信号から取得されたTSパターンである。したがって、このTSパターンには、AEQ110による適応等化処理による補償対象の歪みが含まれる。また、雑音電力の演算に用いるチャネル推定値は、たとえば、後述の平均化を行っていない周波数オフセットの推定値によって周波数オフセットを補償されたチャネル推定値である。雑音電力の演算に用いる既知のシンボルは、AEQ110による適応等化処理による補償対象の歪みを含まないTSパターンのシンボルである。

10

【0016】

また、AEQ__TS120は、適応等化回路100へ入力される信号に繰り返し含まれるTSパターンに基づく周波数オフセットの各推定値のうちの、演算した雑音電力が所定電力以下であるTSパターンに基づく周波数オフセットの推定値を保持する。すなわち、AEQ__TS120は、適応等化回路100へ入力される信号に繰り返し含まれるTSパターンに基づく周波数オフセットの各推定値のうちの、雑音電力が所定電力より大きいTSパターンに基づく周波数オフセットの推定値については破棄する。

【0017】

そして、AEQ__TS120は、保持した複数の推定値を平均化した推定値に基づいてTSパターンの周波数オフセットを補償する。また、AEQ__TS120は、平均化した推定値に基づいて周波数オフセットを補償したTSパターンに基づいて、AEQ110における設定値を算出する。AEQ110における設定値は、たとえば上述したFIRフィルタのタップ係数の初期値である。そして、AEQ__TS120は、算出した設定値をAEQ110に設定する。

20

【0018】

このように、AEQ__TS120は、入力された信号に含まれるTSパターンに基づく周波数オフセットの各推定値のうちの、雑音電力が所定電力以下であるTSパターンに基づく周波数オフセットの複数の推定値を平均化する。これにより、雑音の影響を減らして確度の高い周波数オフセットの推定値を得ることができる。

【0019】

また、AEQ__TS120は、平均化した推定値に基づいて周波数オフセットを補償したTSパターンに基づいてAEQ110の設定値を算出する。これにより、伝送路特性によって信号光に生じた歪みをAEQ110により高い確度で補償することが可能になる。

30

【0020】

（実施の形態にかかるAEQによる補償対象の伝送路特性）

図2は、実施の形態にかかるAEQによる補償対象の伝送路特性の一例を示す図である。図1に示したAEQ110は、たとえば図2に示す偏波回転200を補償する。偏波回転200は、信号光の偏波方向が伝送路において回転する現象である。図2に示すZ方向は、伝送路における信号光の進行方向を示している。図2に示す例では、信号光に含まれるX偏波成分211の偏光方向221と、信号光に含まれるY偏波成分212の偏光方向222と、が伝送路をZ方向に進行することによりそれぞれ90度回転している。

40

【0021】

図3は、実施の形態にかかるAEQによる補償対象の伝送路特性の他の一例を示す図である。図1に示したAEQ110は、たとえば図3に示す偏波間ディレイ差300を補償する。偏波間ディレイ差300は、伝送路において、信号光に含まれるX偏波成分311の偏光方向と、信号光に含まれるY偏波成分312と、の間にディレイ差（遅延差）が生じるDGD（Differential Group Delay：群遅延時間差）である。図3に示す例では、伝送路を進行する信号光において、信号光に含まれるX偏波成分311とY偏波成分312との間にDGD = が発生している。

【0022】

50

図4は、実施の形態にかかるAEQによる補償対象の伝送路特性のさらに他の一例を示す図である。図1に示したAEQ110は、たとえば図4に示す偏波間ロス差400を補償する。偏波間ロス差400は、伝送路において、信号光に含まれるX偏波成分411と、信号光に含まれるY偏波成分412と、の間にロスの差が生じるPDL(Polarization Dependent Loss: 偏波依存損失)である。

【0023】

図2～図4に示した各伝送路特性は、伝送路の設置条件などで決まり、運用(通信)中にも変動する。これに対して、AEQ110は、たとえば図2～図4に示した伝送路特性を補償し、かつ伝送路特性の変動にも追従しつつ、分離した各偏波成分に伝送路特性の逆特性のフィルタをかけることにより送信信号を復元する。

【0024】

(実施の形態にかかるデジタルコヒーレント受信器)

図5は、実施の形態にかかるデジタルコヒーレント受信器の一例を示す図である。図5に示すように、実施の形態にかかるデジタルコヒーレント受信器500は、コヒーレント受光フロントエンド510と、波形歪み補償器520と、位相調整器530と、適応等化器540と、復調/データ再生回路550と、を備える。図1に示した適応等化回路100は、たとえば適応等化器540に適用することができる。

【0025】

デジタルコヒーレント受信器500は、たとえば、受信信号と局部発振光源を用いて、光位相ハイブリッドで受信信号と局部発振光源を混合して受信信号の電界および位相の成分を抽出する。そして、デジタルコヒーレント受信器500は、抽出した成分の光電変換、A/D(Analog/Digital: アナログ/デジタル)変換およびデジタル信号処理を行うことで、受信信号から送信データを復元する。

【0026】

波形歪み補償器520、位相調整器530、適応等化器540および復調/データ再生回路550は、たとえばデジタル回路501により実現することができる。デジタル回路501には、たとえばDSP(Digital Signal Processor)やFPGA(Field Programmable Gate Array)など各種のデジタル回路を用いることができる。

【0027】

コヒーレント受光フロントエンド510は、伝送路を介してデジタルコヒーレント受信器500へ入力された信号光(光信号)を、デジタルコヒーレント受信器500の局発光を用いてコヒーレント受信する光フロントエンド(受光処理部)である。

【0028】

たとえば、コヒーレント受光フロントエンド510は、信号光と局発光とを混合して受光する。これにより、伝送路からデジタルコヒーレント受信器500へ入力された信号光に含まれるH軸偏波成分およびV軸偏波成分の各信号が得られる。H軸偏波成分およびV軸偏波成分は、偏波方向が互いに直交する各偏波成分である。また、H軸偏波成分およびV軸偏波成分の各信号は、たとえばそれぞれIチャンネル(同相)成分およびQチャンネル(直交)成分を含む。

【0029】

コヒーレント受光フロントエンド510は、得られたH軸偏波成分およびV軸偏波成分の各信号をデジタルの信号に変換し、デジタルの信号に変換した各信号を波形歪み補償器520へ出力する。

【0030】

波形歪み補償器520は、コヒーレント受光フロントエンド510から出力された各信号の歪み成分を補償する。波形歪み補償器520が補償する歪み成分は、たとえば波長分散などによる歪み成分である。波形歪み補償器520は、歪み成分を補償した各信号を位相調整器530へ出力する。

【0031】

10

20

30

40

50

位相調整器 530 は、波形歪み補償器 520 から出力された各信号の位相調整を行う。これにより、各信号における信号光と局発光との位相差のうちの、局発光の位相変動に起因する位相差を補償することができる。位相調整器 530 は、位相調整を行った各信号を適応等化器 540 へ出力する。

【0032】

適応等化器 540 は、位相調整器 530 から出力された H 軸偏波成分および V 軸偏波成分の各信号 (H_in , V_in) に基づく適応等化处理を行う。そして、適応等化器 540 は、適応等化处理によって得られた各信号 (H_out , V_out) を復調/データ再生回路 550 へ出力する。

【0033】

たとえば、適応等化器 540 は、適応等化处理により、送信側が送信した H 偏波成分および V 偏波成分の各信号を分離して抽出する。また、適応等化器 540 は、適応等化处理により、波形歪み補償器 520 の等化残である残留波長分散や偏波モード分散、波長多重などの帯域制限による波形歪み成分を適応的に等化する。

【0034】

復調/データ再生回路 550 は、適応等化器 540 から出力された各信号に基づく復調およびデータ再生(復号)を行う復号部である。たとえば、復調/データ再生回路 550 は、適応等化器 540 から出力された各信号が示す位相および振幅の組み合わせを判定することにより各信号の復調およびデータ再生を行う。復調/データ再生回路 550 は、復調およびデータ再生により得られたデータを出力する。

【0035】

(実施の形態にかかる AEQ)

図 6 は、実施の形態にかかる AEQ の一例を示す図である。図 1 に示した AEQ 110 は、たとえば、図 6 に示すように、FIR フィルタ 611 ~ 614 と、加算部 621, 622 と、係数制御部 630 と、を備える。FIR フィルタ 611 ~ 614 のそれぞれは、N 段 (N は 2 以上の自然数) のタップを有するバタフライ型の FIR フィルタである。

【0036】

たとえば、AEQ 110 へ入力される H 偏波成分の信号 (H_in) は、伝送路において発生した偏波回転が補償されていない信号光の受信時における H 偏波成分である。このため、AEQ 110 へ入力される H 偏波成分の信号 (H_in) においては、信号光の送信時における H 偏波成分および V 偏波成分が混在している。

【0037】

同様に、AEQ 110 へ入力される V 偏波成分の信号 (V_in) は、伝送路において発生した偏波回転が補償されていない信号光の受信時における V 偏波成分である。このため、AEQ 110 へ入力される V 偏波成分の信号 (V_in) においては、信号光の送信時における H 偏波成分および V 偏波成分が混在している。

【0038】

FIR フィルタ 611 (HH) は、AEQ 110 へ入力された H 偏波成分の信号 (H_in) から送信時の H 偏波成分を抽出する。FIR フィルタ 612 (VH) は、AEQ 110 へ入力された V 偏波成分の信号 (V_in) から送信時の H 偏波成分を抽出する。FIR フィルタ 611, 612 はそれぞれ抽出した H 偏波成分を加算部 621 へ出力する。

【0039】

FIR フィルタ 613 (HV) は、AEQ 110 へ入力された H 偏波成分の信号 (H_in) から送信時の V 偏波成分を抽出する。FIR フィルタ 614 (VV) は、AEQ 110 へ入力された V 偏波成分の信号 (V_in) から送信時の V 偏波成分を抽出する。FIR フィルタ 613, 614 はそれぞれ抽出した V 偏波成分を加算部 622 へ出力する。

【0040】

加算部 621 は、FIR フィルタ 611, 612 から出力された各 H 偏波成分を加算し、加算結果を H 偏波成分の信号 (H_out) として出力する。加算部 622 は、FIR フィルタ 613, 614 から出力された各 V 偏波成分を加算し、加算結果を V 偏波成分の

10

20

30

40

50

信号 (V__out) として出力する。これにより、A E Q 1 1 0 は、入力された H 偏波成分および V 偏波成分の各信号から、送信時の H 偏波成分の信号 (H__out) および V 偏波成分の信号 (V__out) をそれぞれ抽出して出力することができる。

【 0 0 4 1 】

係数制御部 6 3 0 は、F I R フィルタ 6 1 1 ~ 6 1 4 における各タップ係数の初期値を設定する。また、係数制御部 6 3 0 は、F I R フィルタ 6 1 1 ~ 6 1 4 における各タップ係数を、伝送路特性の変動に追従するように、加算部 6 2 1 , 6 2 2 から出力される各信号に基づくフィードバック処理により更新する。図 1 に示した A E Q __ T S 1 2 0 は、係数制御部 6 3 0 におけるタップ係数の初期値を設定する処理部に適用することができる。

【 0 0 4 2 】

また、係数制御部 6 3 0 は、たとえば復調 / データ再生回路 5 5 0 における B E R (B i t E r r o r R a t e : ビット誤り率) 等の受信品質が閾値を下回った場合に、F I R フィルタ 6 1 1 ~ 6 1 4 における各タップ係数の初期値の設定をやり直してもよい。

【 0 0 4 3 】

(実施の形態にかかる F I R フィルタ)

図 7 は、実施の形態にかかる F I R フィルタの一例を示す図である。図 6 に示した F I R フィルタ 6 1 1 ~ 6 1 4 のうち、図 7 において F I R フィルタ 6 1 1 の構成について説明するが、F I R フィルタ 6 1 2 ~ 6 1 4 の構成についても同様である。図 7 に示すように、F I R フィルタ 6 1 1 は、N 個の遅延部 7 1 1 ~ 7 1 N (Z^{-1}) と、N + 1 個の乗算部 7 2 0 ~ 7 2 N と、を備える。

【 0 0 4 4 】

たとえば、遅延部 7 1 1 は、F I R フィルタ 6 1 1 へ入力された信号 (H__in) を遅延させ、遅延させた信号を遅延部 7 1 2 および乗算部 7 2 1 へ出力する。また、遅延部 7 1 2 は、遅延部 7 1 1 から出力された信号を遅延させ、遅延させた信号を遅延部 7 1 3 および乗算部 7 2 2 へ出力する。また、遅延部 7 1 N は、遅延部 7 1 (N - 1) から出力された信号を遅延させ、遅延させた信号を乗算部 7 2 N へ出力する。

【 0 0 4 5 】

たとえば、乗算部 7 2 0 は、F I R フィルタ 6 1 1 へ入力された信号 (H__in) と、タップ係数 $W(HH_0)$ と、を乗算する。また、乗算部 7 2 1 は、遅延部 7 1 1 から出力された信号と、タップ係数 $W(HH_1)$ と、を乗算する。また、乗算部 7 2 N は、遅延部 7 1 N から出力された信号と、タップ係数 $W(HH_N)$ と、を乗算する。乗算部 7 2 0 ~ 7 2 N による各乗算結果は、加算されてフィルタリング後の信号 (H__out) として F I R フィルタ 6 1 1 から出力される。

【 0 0 4 6 】

図 6 に示した係数制御部 6 3 0 は、乗算部 7 2 0 ~ 7 2 N へ入力されるタップ係数 $W(HH_1) \sim W(HH_N)$ の初期値を設定する。そして、係数制御部 6 3 0 は、乗算部 7 2 0 ~ 7 2 N へ入力されるタップ係数 $W(HH_1) \sim W(HH_N)$ を、フィードバック処理によって伝送路特性の変化に追従させて更新する。

【 0 0 4 7 】

ここで、係数制御部 6 3 0 は、フィードバック処理によって少しずつタップ係数を変更するため、設定したタップ係数の初期値が適切な値から乖離している場合は、フィードバック処理によるタップ係数の更新が失敗する場合がある。

【 0 0 4 8 】

これに対して、係数制御部 6 3 0 (A E Q __ T S 1 2 0) は、受信する信号に含まれる T S (T r a i n i n g S e q u e n c e : トレーニングシーケンス) を用いて適切なタップ係数の初期値を算出する。たとえば、係数制御部 6 3 0 は、T S の区間を特定し、特定した T S の区間の信号に基づく周波数オフセットの推定値によって信号の周波数オフセットを補償する。そして、係数制御部 6 3 0 は、周波数オフセットを補償した信号に基づくチャネル推定を行い、チャネル推定の結果に基づきタップ係数の初期値を算出する。

【 0 0 4 9 】

10

20

30

40

50

(実施の形態にかかるTS位置推定によるタップ係数の初期値の算出)

図8は、実施の形態にかかるTS位置推定によるタップ係数の初期値の算出の一例を示す図である。図8において、横方向は時間を示す。信号810は、送信側から伝送路820を介して送信され、デジタルコヒーレント受信器500へ入力される信号である。

【0050】

送信側は、信号810の中にTS811, 812, ...を定期的に格納する。TS811, 812, ...は、送信側およびデジタルコヒーレント受信器500において既知のパターンからなる。周期801は、信号810においてTS811, 812, ...が格納される周期である。

【0051】

AEQ__TS120は、信号810のデータパターンに基づいてTSの位置(タイミング)を推定する。図8に示す例では、AEQ__TS120はTS811の位置の推定結果としてTS推定位置821を導出したとする。AEQ__TS120は、信号810のうちのTS推定位置821の信号と、既知のTSのパターン(TSシンボル)と、を比較することによりチャンネル推定を行う。チャンネル推定は、たとえば伝送路820の特性(インパルス応答)の推定である。

【0052】

また、デジタルコヒーレント受信器500は、チャンネル推定の結果(チャンネル推定値)の逆特性を求めることにより、上述したAEQ110のタップ係数の初期値を算出する。たとえば、信号810のうちのTS推定位置821の信号をR、既知のTSのパターンをS、伝送路820の特性をWとすると、 $R = WS$ となる。したがって、AEQ__TS120は、 $S = W^{-1}R$ となる W^{-1} を導出することによって、AEQ110のタップ係数の初期値を算出することができる。

【0053】

(実施の形態にかかる周波数オフセット)

図9は、実施の形態にかかる周波数オフセットの一例を示す図である。図9においては、送信部910から伝送路920を介して受信部930へ信号光を送信する場合について説明する。伝送路920は、たとえば上述した伝送路820に対応する。受信部930は、たとえば上述したデジタルコヒーレント受信器500に対応する。

【0054】

送信部910においては、送信データ $P(t)$ と、周波数 ω_1 の局発光 $e^{j\omega_1 t}$ と、を混合するハイブリッド処理911により信号 $P(t) * e^{j\omega_1 t}$ が生成される。信号 $P(t) * e^{j\omega_1 t}$ は、伝送路920を伝播することにより、伝送路920の伝達特性Hによって信号 $P(t) * H * e^{j\omega_1 t}$ となり受信部930へ入力される。

【0055】

受信部930は、入力された信号 $P(t) * H * e^{j\omega_1 t}$ と、周波数 ω_2 の局発光 $e^{j\omega_2 t}$ と、を混合するハイブリッド処理931により信号 $P(t) * H * e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}$ を得る。ハイブリッド処理931は、たとえば上述したコヒーレント受光フロントエンド510による処理である。この得られた信号 $P(t) * H * e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}$ のうちの $e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}$ は、送信部910における局発光の周波数 ω_1 と、受信部930における局発光の周波数 ω_2 と、の差により生じる周波数オフセットである。

【0056】

ここで、送信データ $P(t)$ に含まれるTSシンボルは既知である。このため、AEQ__TS120は、TS推定位置における信号 $P(t) * H * e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}$ に、既知のTSシンボルの逆数と、周波数オフセットの推定値の逆数と、をかけることにより伝送路920の伝達特性Hを算出することができる。そして、AEQ__TS120は、算出した伝達特性Hの逆数 H^{-1} をタップ係数の初期値として算出することができる。

【0057】

このように、AEQ__TS120は、周波数オフセットの推定値に基づいて伝送路920の伝達特性Hを算出し、タップ係数の初期値(H^{-1})を算出する。このため、タップ係

10

20

30

40

50

数の適切な初期値を算出するためには、周波数オフセットの正確な推定値を導出することを要する。

【0058】

(実施の形態にかかる周波数オフセットの推定)

図10は、実施の形態にかかる周波数オフセットの推定の一例を示す図である。図10において、図8に示した部分と同様の部分については同一の符号を付して説明を省略する。図10に示すように、たとえばTS811には、一定の繰り返し間隔Tでm個のTSパターン1, 2, ..., mが含まれている。TSパターン1, 2, ..., mは互いに同一のパターンP(TSシンボル)である。

【0059】

TSパターン1, 2, ..., mは既知であるため $P(t) = P$ とし、伝達特性Hは時間に依存しないため、TS推定位置821をaとすると、TS811の1つ目のTSパターン1は、 $TS(1) = P * H * e^{j(1-2)a}$ となる。また、TS811の2つ目のTSパターン2は、 $TS(2) = P * H * e^{j(1-2)(a+T)}$ となる。

【0060】

これらの相関値を算出すると、 $TS(1) * TS(2)^{-1} = e^{j(1-2)T}$ となる。これを繰り返し間隔Tで除算することで周波数オフセットを推定することができる。すなわち、AEQ__TS120は、 $TS(1) * TS(2)^{-1} / T$ によって、TS811の1つ目のTSパターンおよび2つ目のTSパターンに基づく周波数オフセットを推定することができる。

【0061】

同様に、AEQ__TS120は、たとえば $TS(2) * TS(3)^{-1} / T$ によって、TS811の2つ目のTSパターンおよび3つ目のTSパターンに基づく周波数オフセットを推定することができる。このように、AEQ__TS120は、TS811における複数のTSパターンの組み合わせについて周波数オフセットを推定することで、周波数オフセットを複数推定することができる。

【0062】

TS811における複数のTSパターンの組み合わせは、たとえば、TS811において隣接する各TSパターンとすることができる。この場合は、TS811における複数のTSパターンの組み合わせは最大で(m-1)個になる。

【0063】

なお、TS811, 812, ...のうちの1個のTS811に基づいて周波数オフセットを推定する場合について説明したが、TS811, 812, ...のうちの複数のTSに基づいて周波数オフセットを推定するようにしてもよい。

【0064】

ここで、たとえば伝送路820の距離が長いと、伝送路820で印加される雑音が大きくなる。このため、伝送路820による雑音や逆伝達特性を求めるチャネル推定に誤差が生じ、上述した相関値の誤差が大きくなる。たとえば、伝送路820において雑音nが印加されているとすると、周波数オフセットは $e^{j(1-2)T} + n$ となる。この雑音nには、たとえばASE(Amplified Spontaneous Emission: 自然放出)雑音やチャネル推定誤差などが含まれる。

【0065】

このため、雑音nが大きくなると、周波数オフセットを正確に推定することができなくなる。その結果、上述したタップ係数の適切な初期値を算出することができなくなる。タップ係数の適切な初期値とは、たとえば、伝送路820の実際の伝達特性Hの逆数 H^{-1} に近い値である。

【0066】

これに対して、実施の形態にかかる適応等化回路100のAEQ__TS120は、雑音電力による周波数オフセットの選別および周波数オフセットの平均化を行う。これにより、周波数オフセットの算出における雑音nによる影響を小さくし、適切な(確度の高い)

10

20

30

40

50

タップ係数の初期値を算出することができる。

【 0 0 6 7 】

雑音電力による周波数オフセットの選別は、雑音電力が大きい場合に推定した周波数オフセットは信頼度が低いいため、除外する処理である。周波数オフセットの平均化は、雑音電力による選別によって除外されなかった各周波数オフセットの推定値の平均値を算出する処理である。これにより、雑音の影響を抑え、周波数オフセットの推定の確度を向上させることができる。このため、チャンネル推定を高い確度で行い、A E Q 1 1 0 のタップ係数の適切な初期値を算出することができる。

【 0 0 6 8 】

(実施の形態にかかる A E Q __ T S)

図 1 1 は、実施の形態にかかる A E Q __ T S の一例を示す図である。図 1 に示した A E Q __ T S 1 2 0 は、たとえば、図 1 1 に示すように、T S 同期部 1 1 0 1 と、周波数オフセット推定部 1 1 0 2 と、周波数オフセット選択部 1 1 0 3 と、周波数オフセット補償部 1 1 0 4 と、チャンネル推定部 1 1 0 5 と、を備える。また、A E Q __ T S 1 2 0 は、雑音電力演算部 1 1 0 6 と、周波数オフセット除外判定部 1 1 0 7 と、周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 と、制御部 1 1 0 9 と、を備える。

【 0 0 6 9 】

T S 同期部 1 1 0 1 は、A E Q __ T S 1 2 0 へ入力された信号に含まれる T S の位置である T S 位置 (たとえば図 8 に示した T S 推定位置 8 2 1) を推定する。そして、T S 同期部 1 1 0 1 は、推定した T S 位置に基づいて、A E Q __ T S 1 2 0 へ入力された信号に含まれる T S パターンを取得する。T S 同期部 1 1 0 1 は、取得した T S パターンを周波数オフセット推定部 1 1 0 2 へ出力する。

【 0 0 7 0 】

周波数オフセット推定部 1 1 0 2 は、T S 同期部 1 1 0 1 から出力された T S パターンに基づいて、デジタルコヒーレント受信器 5 0 0 における周波数オフセットを推定する。そして、周波数オフセット推定部 1 1 0 2 は、推定した周波数オフセットを周波数オフセット選択部 1 1 0 3 および周波数オフセット除外判定部 1 1 0 7 へ通知する。

【 0 0 7 1 】

周波数オフセット選択部 1 1 0 3 は、周波数オフセット補償部 1 1 0 4 において用いる周波数オフセットを選択する。すなわち、周波数オフセット選択部 1 1 0 3 は、周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 から平均化終了通知が出力される前は、周波数オフセット推定部 1 1 0 2 から通知される周波数オフセットを選択する。

【 0 0 7 2 】

また、周波数オフセット選択部 1 1 0 3 は、周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 から平均化終了通知が出力された後は、周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 から通知される周波数オフセットを選択する。周波数オフセット選択部 1 1 0 3 は、選択した周波数オフセットを周波数オフセット補償部 1 1 0 4 へ通知する。

【 0 0 7 3 】

周波数オフセット補償部 1 1 0 4 は、周波数オフセット選択部 1 1 0 3 から通知された周波数オフセットの推定値に基づいて、A E Q __ T S 1 2 0 へ入力された各信号の周波数オフセットを補償する。そして、周波数オフセット補償部 1 1 0 4 は、周波数オフセットを補償した信号をチャンネル推定部 1 1 0 5 および雑音電力演算部 1 1 0 6 へ出力する。

【 0 0 7 4 】

チャンネル推定部 1 1 0 5 は、周波数オフセット補償部 1 1 0 4 から出力された信号に基づくチャンネル推定を行う。そして、チャンネル推定部 1 1 0 5 は、チャンネル推定値によって得られたチャンネル推定値を雑音電力演算部 1 1 0 6 へ通知する。また、チャンネル推定部 1 1 0 5 は、周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 から平均化終了通知が出力されると、チャンネル推定値に基づいて A E Q 1 1 0 のタップ係数の初期値を算出する。そして、チャンネル推定部 1 1 0 5 は、算出したタップ係数の初期値を A E Q 1 1 0 へ出力する。

【 0 0 7 5 】

10

20

30

40

50

雑音電力演算部 1106 は、周波数オフセット補償部 1104 から出力された信号と、チャンネル推定部 1105 から通知されたチャンネル推定値と、既知の TS シンボルと、に基づいて、AEQ__TS120 への入力信号の雑音電力を演算する。そして、雑音電力演算部 1106 は、演算した雑音電力を周波数オフセット除外判定部 1107 へ通知する。

【0076】

たとえば、送信された TS パターン（既知の TS シンボル）を P 、受信された TS パターンを P' とする。ここで、受信された TS パターンは、受信された TS パターンに伝達特性 H および雑音 n が印加されたものであるため、 $P' = (P + n) * H$ となる。したがって、雑音電力 $= |P' * H^{-1} - P|^2 = |(P + n) * H * H^{-1} - P|^2 = |n|^2$ となる。

10

【0077】

すなわち、雑音電力演算部 1106 は、周波数オフセット補償部 1104 から出力された信号 (P') に、チャンネル推定部 1105 から通知されたチャンネル推定値の逆数 (H^{-1}) をかけた結果と、既知の TS シンボル (P) と、の差の 2 乗を演算する。これにより、雑音電力 $|n|^2$ を演算することができる。

【0078】

周波数オフセット除外判定部 1107 は、周波数オフセット推定部 1102 から新たな周波数オフセットの推定値が通知されるごとに、雑音電力演算部 1106 から通知された雑音電力と所定の閾値とを比較する。そして、周波数オフセット除外判定部 1107 は、雑音電力が閾値より小さい場合にのみ、周波数オフセット推定部 1102 から通知された周波数オフセットの推定値を周波数オフセット平均化部 1108 へ通知する。これにより、周波数オフセット推定部 1102 によって推定された各周波数オフセットのうちの、雑音電力が閾値より大きい TS パターンに基づき推定された周波数オフセットを、周波数オフセット平均化部 1108 における平均化の対象から除外することができる。

20

【0079】

また、周波数オフセット除外判定部 1107 は、雑音電力演算部 1106 から通知された雑音電力と所定の閾値とを比較した回数を、周波数オフセットの推定値の除外の判定回数としてカウントアップする。そして、周波数オフセット除外判定部 1107 は、判定回数が所定の閾値を超えると、制御部 1109 に対して動作リセットを指示する。

【0080】

30

周波数オフセット平均化部 1108 は、周波数オフセット除外判定部 1107 から通知された周波数オフセットの推定値を保持する。また、周波数オフセット平均化部 1108 は、周波数オフセット除外判定部 1107 からの周波数オフセットの通知回数を周波数オフセット保持数としてカウントアップする。

【0081】

そして、周波数オフセット平均化部 1108 は、周波数オフセット保持数が所定の閾値に達すると、保持していた各周波数オフセットを平均化する。そして、周波数オフセット平均化部 1108 は、周波数オフセット選択部 1103 およびチャンネル推定部 1105 へ、周波数オフセットの平均化が終了したことを示す平均化終了通知を出力する。また、周波数オフセット平均化部 1108 は、平均化した周波数オフセット（周波数オフセット平均値）を周波数オフセット選択部 1103 へ通知する。

40

【0082】

制御部 1109 は、周波数オフセット除外判定部 1107 から動作リセットを指示されると、AEQ__TS120 の動作をリセットする。これにより、AEQ__TS120 の各部の処理がやり直される。たとえば、制御部 1109 は、動作リセットを指示されると、周波数オフセット平均化部 1108 によって保持されている周波数オフセットの推定値を破棄させるとともに、TS 同期部 1101 における TS 位置の推定 (TS 同期) をやり直させる制御を行う。

【0083】

これにより、たとえば、大きな雑音電力が継続または頻発する期間において推定した信

50

頼度の低い周波数オフセットに基づいてタップ係数の初期値を設定して受信品質が低下することを回避することができる。

【 0 0 8 4 】

また、TS同期部1101において誤ったTS位置が推定されたことによりTSパターンの雑音電力として大きな値が演算されていた場合に、TS位置の推定および周波数オフセットの保持をやり直すことができる。このため、TS位置の誤推定が発生した場合のりカバリが可能になる。

【 0 0 8 5 】

適応等化回路100へ入力される信号に繰り返し含まれるTSパターンの雑音電力(ノイズの電力)を演算する演算部は、たとえば雑音電力演算部1106により実現することができる。また、雑音電力が所定電力以下であるTSパターンに基づく周波数オフセットの各推定値を平均化する平均化部は、たとえば周波数オフセット除外判定部1107および周波数オフセット平均化部1108により実現することができる。

10

【 0 0 8 6 】

また、平均化した推定値に基づいてTSパターンの周波数オフセットを補償する補償部は、たとえば周波数オフセット選択部1103および周波数オフセット補償部1104により実現することができる。また、周波数オフセットを補償したTSパターンに基づいてAEQ110における設定値を算出する算出部は、たとえばチャンネル推定部1105により実現することができる。

【 0 0 8 7 】

20

また、適応等化回路100へ入力された信号におけるTSパターンの位置を推定し、推定した位置に基づいてTSパターンを取得する取得部は、たとえばTS同期部1101により実現することができる。また、保持された推定値を破棄させる制御を行う制御部は、たとえば周波数オフセット除外判定部1107および制御部1109により実現することができる。

【 0 0 8 8 】

(実施の形態にかかるAEQ__TSによる処理)

図12は、実施の形態にかかるAEQ__TSによる処理の一例を示すフローチャートである。AEQ__TS120は、たとえば、判定回数閾値C1および保持数閾値C2を設定し、図12に示す各ステップを実行する。ここで、 $C2 < C1 \cdot m$ とする。mは、一回のTSに含まれている繰り返しパターンの数である(図10参照)。

30

【 0 0 8 9 】

まず、AEQ__TS120は、受信した信号におけるTSの位置(タイミング)であるTS位置を推定する(ステップS1201)。ステップS1201によって推定されるTS位置は、たとえば図8に示したTS推定位置821である。ステップS1201は、たとえば図11に示したTS同期部1101により行われる。

【 0 0 9 0 】

つぎに、AEQ__TS120は、ステップS1201によって推定したTS位置から一対のTSパターンを取得する(ステップS1202)。一対のTSパターンは、たとえば同期タイミングsにおけるTSパターン1および同期タイミングs+TにおけるTSパターン2である。同期タイミングsは、たとえば、初期状態においてはステップS1201によって推定したTS位置であり、後述のステップS1212によってTずつシフトする。Tは、たとえば図10に示したTSパターンの既知の繰り返し周期Tである。ステップS1202は、たとえば図11に示したTS同期部1101により行われる。

40

【 0 0 9 1 】

つぎに、AEQ__TS120は、ステップS1202によって取得した一対のTSパターンに基づく周波数オフセットを推定する(ステップS1203)。ステップS1203は、たとえば図11に示した周波数オフセット推定部1102により行われる。

【 0 0 9 2 】

つぎに、AEQ__TS120は、周波数オフセットの平均化が終了しているか否かを判

50

断する（ステップS1204）。ステップS1204は、たとえば、図11に示した周波数オフセット平均化部1108から出力される平均化終了通知に基づいて、図11に示した周波数オフセット選択部1103により行われる。

【0093】

ステップS1204において、周波数オフセットの平均化が終了していない場合（ステップS1204：No）は、AEQ__TS120は、ステップS1203によって推定した周波数オフセットを選択し（ステップS1205）、ステップS1207へ移行する。ステップS1205は、たとえば図11に示した周波数オフセット選択部1103により行われる。

【0094】

ステップS1204において、周波数オフセットの平均化が終了している場合（ステップS1204：Yes）は、AEQ__TS120は、平均化した周波数オフセットを選択する（ステップS1206）。ステップS1206は、たとえば図11に示した周波数オフセット選択部1103により行われる。

【0095】

つぎに、AEQ__TS120は、ステップS1205またはステップS1206によって選択した周波数オフセットに基づいて、AEQ__TS120へ入力された信号の周波数オフセットを補償する（ステップS1207）。ステップS1207は、たとえば図11に示した周波数オフセット補償部1104により行われる。

【0096】

つぎに、AEQ__TS120は、ステップS1207によって周波数オフセットを補償した信号に基づくチャネル推定を行う（ステップS1208）。ステップS1208は、たとえば図11に示したチャネル推定部1105により行われる。

【0097】

つぎに、AEQ__TS120は、周波数オフセットの平均化が終了しているか否かを判断する（ステップS1209）。ステップS1209は、たとえば、図11に示した周波数オフセット平均化部1108から出力される平均化終了通知に基づいて、図11に示したチャネル推定部1105により行われる。

【0098】

ステップS1209において、周波数オフセットの平均化が終了していない場合（ステップS1209：No）は、AEQ__TS120は、AEQ__TS120へ入力された信号の雑音電力を演算する（ステップS1210）。たとえば、AEQ__TS120は、ステップS1207によって周波数オフセットを補償した信号と、ステップS1208のチャネル推定により得られたチャネル推定値と、既知のTSシンボルと、に基づいて雑音電力を演算する。ステップS1210は、たとえば図11に示した雑音電力演算部1106により行われる。

【0099】

つぎに、AEQ__TS120は、ステップS1210によって演算した雑音電力が所定の閾値より大きいか否かを判断する（ステップS1211）。ステップS1211は、たとえば図11に示した周波数オフセット除外判定部1107により行われる。

【0100】

ステップS1211において、雑音電力が閾値より大きい場合（ステップS1211：Yes）は、AEQ__TS120は、上述した同期タイミングsをTだけシフトさせ（ステップS1212）、ステップS1202へ戻る。これにより、直近のステップS1203によって推定した周波数オフセットを平均化の対象から除外しつつ、次の繰り返しパターンの対による周波数オフセットの推定を行うことができる。ステップS1212は、たとえば図11に示したTS同期部1101により行われる。

【0101】

ステップS1211において、雑音電力が閾値より大きくない場合（ステップS1211：No）は、AEQ__TS120は、現在の判定回数が上述した判定回数閾値C1以上

10

20

30

40

50

であるか否かを判断する（ステップS 1 2 1 3）。判定回数は、周波数オフセット除外判定の回数、すなわち雑音電力が閾値より大きいか否かを判定したTSパターンの数である。たとえば、判定回数は、初期値が“0”であり、ステップS 1 2 1 1が実行されるごとにカウントアップされる。ステップS 1 2 1 3は、たとえば図11に示した周波数オフセット除外判定部1107により行われる。

【0102】

ステップS 1 2 1 3において、判定回数が判定回数閾値C 1以上である場合（ステップS 1 2 1 3：Yes）は、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 0 1によって推定したTS位置をリセットし（ステップS 1 2 1 4）、ステップS 1 2 0 1へ戻る。また、このとき、AEQ__TS 1 2 0は、上述した判定回数や後述の周波数オフセット保持数もリセットする。これにより、タップ係数の初期値を算出する処理を、TS位置の推定からやり直すことができる。また、このとき、AEQ__TS 1 2 0は、後述のステップS 1 2 1 5によって保持した周波数オフセットについてもリセットしてもよい。

10

【0103】

ステップS 1 2 1 3において、判定回数が判定回数閾値C 1未満である場合（ステップS 1 2 1 3：No）は、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 0 3によって推定された周波数オフセットを保持する（ステップS 1 2 1 5）。ステップS 1 2 1 5は、たとえば図11に示した周波数オフセット平均化部1108により行われる。

【0104】

つぎに、AEQ__TS 1 2 0は、現在の周波数オフセット保持数が上述した保持数閾値C 2以上であるか否かを判断する（ステップS 1 2 1 6）。周波数オフセット保持数は、ステップS 1 2 1 5によって周波数オフセットを保持した回数である。たとえば、周波数オフセット保持数は、初期値が“0”であり、ステップS 1 2 1 5が実行されるごとにカウントアップされる。ステップS 1 2 1 6は、たとえば図11に示した周波数オフセット除外判定部1107により行われる。

20

【0105】

ステップS 1 2 1 6において、周波数オフセット保持数が保持数閾値C 2未満である場合（ステップS 1 2 1 6：No）である場合は、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 1 2へ移行する。直近のステップS 1 2 0 3によって推定した周波数オフセットを平均化の対象として保持しつつ、次の繰り返しパターンの対による周波数オフセットの推定を行うことができる。

30

【0106】

ステップS 1 2 1 6において、周波数オフセット保持数が保持数閾値C 2以上である場合（ステップS 1 2 1 6：Yes）は、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 1 7へ移行する。すなわち、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 1 5によって保持された、保持数閾値C 2に相当する数の周波数オフセットを平均化し（ステップS 1 2 1 7）、ステップS 1 2 0 4へ移行する。ステップS 1 2 1 7は、たとえば図11に示した周波数オフセット平均化部1108により行われる。ステップS 1 2 1 7により、周波数オフセットの平均化が終了する。

40

【0107】

ステップS 1 2 0 9において、周波数オフセットの平均化が終了している場合（ステップS 1 2 0 9：Yes）は、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 1 8へ移行する。すなわち、AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 1 7によって平均化された周波数オフセットに基づいてタップ係数の初期値を算出し（ステップS 1 2 1 8）、一連の処理を終了する。ステップS 1 2 1 8は、たとえば図11に示したチャンネル推定部1105により行われる。AEQ__TS 1 2 0は、ステップS 1 2 1 8によって算出したタップ係数の初期値をAEQ 1 1 0に設定する。

【0108】

判定回数が判定回数閾値C 1に達した場合にTS位置をリセットしてTS位置の推定をやり直す処理について説明したが、このような処理に限らない。たとえば、判定回数が判

50

定回数閾値 C 1 に達した場合に、上述した判定回数、周波数オフセット保持数および保持した周波数オフセットをリセットし、ステップ S 1 2 1 2 へ移行するようにしてもよい。この場合も、周波数オフセットの保持をやり直すことで、たとえば、大きな雑音電力が継続または頻発する期間において推定した信頼度の低い周波数オフセットに基づいてタップ係数の初期値を設定して受信品質が低下することを回避することができる。

【 0 1 0 9 】

(実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部)

図 1 3 は、実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の一例を示す図である。図 1 1 に示した周波数オフセット除外判定部 1 1 0 7 は、たとえば、図 1 3 に示すように、閾値判定部 1 3 0 1 と、閾値判定回数カウンタ 1 3 0 2 と、を備える。

10

【 0 1 1 0 】

閾値判定部 1 3 0 1 は、雑音電力演算部 1 1 0 6 (たとえば図 1 1 参照) から通知された雑音電力と所定の閾値とを比較する。そして、閾値判定部 1 3 0 1 は、雑音電力が閾値以下である場合は、周波数オフセット推定部 1 1 0 2 から通知された周波数オフセットを周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 (たとえば図 1 1 参照) へ通知する。

【 0 1 1 1 】

また、閾値判定部 1 3 0 1 は、雑音電力が閾値より大きい場合は、周波数オフセット推定部 1 1 0 2 から通知された周波数オフセットを周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 へ通知しない。これにより、周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 における周波数オフセットの平均化の対象から、雑音電力が閾値より高い場合の周波数オフセットの推定結果を除外

20

【 0 1 1 2 】

また、閾値判定部 1 3 0 1 は、雑音電力と閾値とを比較するごとに閾値判定回数カウンタ 1 3 0 2 をカウントアップさせる。閾値判定回数カウンタ 1 3 0 2 は、閾値判定部 1 3 0 1 における判定回数をカウントするカウンタである。閾値判定回数カウンタ 1 3 0 2 は、判定回数のカウント値が閾値以上になると、制御部 1 1 0 9 (たとえば図 1 1 参照) に対して動作リセットを指示する。これにより、判定回数が閾値に達した場合にタップ係数の初期値の算出をやり直すことができる。

【 0 1 1 3 】

(実施の形態にかかる周波数オフセット平均化部)

図 1 4 は、実施の形態にかかる周波数オフセット平均化部の一例を示す図である。図 1 1 に示した周波数オフセット平均化部 1 1 0 8 は、たとえば、図 1 4 に示すように、周波数オフセット保持部 1 4 0 1 と、値保持カウンタ 1 4 0 2 と、平均化部 1 4 0 3 と、を備える。

30

【 0 1 1 4 】

周波数オフセット保持部 1 4 0 1 は、周波数オフセット除外判定部 1 1 0 7 (たとえば図 1 1 参照) から通知された周波数オフセットを保持する。また、周波数オフセット保持部 1 4 0 1 は、周波数オフセットを新たに保持するごとに値保持カウンタ 1 4 0 2 をカウントアップさせる。

【 0 1 1 5 】

値保持カウンタ 1 4 0 2 は、周波数オフセット保持部 1 4 0 1 における周波数オフセットの保持数をカウントするカウンタである。値保持カウンタ 1 4 0 2 は、保持数のカウント値が閾値以上になると、平均化部 1 4 0 3 に周波数オフセットの平均化を指示するとともに、平均化終了通知を周波数オフセット選択部 1 1 0 3 およびチャンネル推定部 1 1 0 5 (たとえば図 1 1 参照) へ出力する。

40

【 0 1 1 6 】

平均化部 1 4 0 3 は、値保持カウンタ 1 4 0 2 によって周波数オフセットの平均化を指示されると、周波数オフセット保持部 1 4 0 1 によって保持された各周波数オフセットを平均化する。そして、平均化部 1 4 0 3 は、平均化した周波数オフセット(周波数オフセット平均値)を周波数オフセット選択部 1 1 0 3 へ通知する。

50

【 0 1 1 7 】

(実施の形態にかかる A E Q __ T S による処理の他の例)

図 1 5 は、実施の形態にかかる A E Q __ T S による処理の他の一例を示すフローチャートである。A E Q __ T S 1 2 0 は、たとえば、判定回数閾値 C 1、保持数閾値 C 2 および除外判定回数閾値 C 3 を設定し、図 1 5 に示す各ステップを実行してもよい。ここで、 $C 2 < C 3 < C 1 - m$ とする。m は、一回の T S に含まれている繰り返しパターンの数である(図 1 0 参照)。なお、除外判定回数閾値 C 3 は保持数閾値 C 2 以下であってもよい。図 1 5 に示すステップ S 1 5 0 1 ~ S 1 5 1 5 は、図 1 2 に示したステップ S 1 2 0 1 ~ S 1 2 1 5 と同様である。

【 0 1 1 8 】

ステップ S 1 5 1 5 のつぎに、A E Q __ T S 1 2 0 は、現在の除外判定回数が上述した除外判定回数閾値 C 3 以上であるか否かを判断する(ステップ S 1 5 1 6)。除外判定回数は、推定した周波数オフセットを平均化の対象から除外すると判定した回数である。たとえば、除外判定回数は、初期値が“0”であり、ステップ S 1 5 1 1 からステップ S 1 5 1 2 へ移行するごとにカウントアップされる。ステップ S 1 5 1 6 は、たとえば図 1 1 に示した周波数オフセット除外判定部 1 1 0 7 により行われる。

【 0 1 1 9 】

ステップ S 1 5 1 6 において、除外判定回数が上述した除外判定回数閾値 C 3 未満である場合(ステップ S 1 5 1 6 : N o) は、A E Q __ T S 1 2 0 は、ステップ S 1 5 1 7 へ移行する。図 1 5 に示すステップ S 1 5 1 7 ~ S 1 5 1 9 は、図 1 2 に示したステップ S 1 2 1 6 ~ S 1 2 1 8 と同様である。

【 0 1 2 0 】

ステップ S 1 5 1 6 において、除外判定回数が上述した除外判定回数閾値 C 3 以上である場合(ステップ S 1 5 1 6 : Y e s) は、A E Q __ T S 1 2 0 は、ステップ S 1 5 1 4 へ移行する。これにより、タップ係数の初期値を算出する処理を、T S 位置の推定からやり直すことができるため、たとえば判定回数の判定のみで T S 位置をリセットする場合に比べて、大きな雑音電力が継続または頻発する場合に早期に T S 位置をリセットすることができる。

【 0 1 2 1 】

このため、大きな雑音電力が継続または頻発し、正確な周波数オフセットを推定できない期間における処理量を低減し、装置の省電力化を図ることができる。また、早期に T S 位置をリセットすることで、T S 位置の推定からの処理を早期にやり直すことができるため、大きな雑音電力が継続または頻発した場合における動作遅延の短縮を図ることができる。

【 0 1 2 2 】

除外判定回数の判定を周波数オフセットの保持と周波数オフセット保持数の判定との間に行う場合について説明したが、除外判定回数の判定のタイミングはこれに限らない。たとえば、A E Q __ T S 1 2 0 は、ステップ S 1 5 1 1 からステップ S 1 5 1 2 へ移行して除外判定回数をカウントアップした直後に除外判定回数の判定を行ってもよい。また、図 1 5 に示した各ステップのうちステップ S 1 5 1 3 を省いてもよい。

【 0 1 2 3 】

また、除外判定回数が除外判定回数閾値 C 3 に達した場合に T S 位置をリセットして T S 位置の推定をやり直す処理について説明したが、このような処理に限らない。たとえば、除外判定回数が除外判定回数閾値 C 3 に達した場合に、上述した判定回数、周波数オフセット保持数、除外判定回数および保持した周波数オフセットをリセットし、ステップ S 1 5 1 2 へ移行するようにしてもよい。この場合も、周波数オフセットの保持をやり直すことで、たとえば、大きな雑音電力が継続または頻発する期間において推定した信頼度の低い周波数オフセットに基づいてタップ係数の初期値を設定して受信品質が低下することを回避することができる。

【 0 1 2 4 】

10

20

30

40

50

(実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の他の例)

図16は、実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の他の一例を示す図である。図16において、図13に示した部分と同様の部分については同一の符号を付して説明を省略する。AEQ_{TS120}が図15に示した処理を行う場合は、図11に示した周波数オフセット除外判定部1107は、たとえば、図16に示すように、図13に示した構成に加えて除外回数カウンタ1601を備える。

【0125】

閾値判定部1301は、雑音電力が閾値より大きいと判定するごとに除外回数カウンタ1601をカウントアップさせる。除外回数カウンタ1601は、閾値判定部1301によって雑音電力が閾値より大きいと判定することによって周波数オフセットが除外された回数をカウントするカウンタである。除外回数カウンタ1601は、判定回数のカウント値が閾値以上になると、制御部1109(たとえば図11参照)に対して動作リセットを指示する。これにより、周波数オフセットの除外回数が閾値に達した場合にタップ係数の初期値の算出をやり直すことができる。

10

【0126】

このように、実施の形態にかかる適応等化回路100によれば、入力信号に含まれるTSパターンに基づく周波数オフセットの各推定値のうちの、雑音電力が所定電力以下であるTSパターンに基づく周波数オフセットの複数の推定値を平均化することができる。これにより、周波数オフセットの推定に対する伝送路の雑音の影響を減らし、確度の高い周波数オフセットの推定値を得ることができる。

20

【0127】

また、実施の形態にかかる適応等化回路100によれば、平均化した推定値に基づいて周波数オフセットを補償したTSパターンに基づいてAEQ₁₁₀の設定値を算出することができる。これにより、伝送路特性により信号光に生じた歪みをAEQ₁₁₀により高い確度で補償することが可能になる。このため、たとえば、伝送エラーの発生頻度の低減と、伝送路の長距離化と、の少なくともいずれかを図ることができる。

【0128】

以上説明したように、適応等化回路、デジタルコヒーレント受信器および適応等化方法によれば、雑音の影響を減らして確度の高い周波数オフセットの推定値を得ることができる。

30

【0129】

たとえば、近年の光通信における伝送トラフィックの増加に伴い、伝送速度が100[Gbps]を超える次世代光伝送システム導入の要求が高まっている。また、次世代光伝送システムにおいては、従来システム以上の伝送距離の実現も同時に求められている。

【0130】

しかしながら、伝送速度で100[Gbps]超を実現するとなると、従来の光分散補償技術では補償性能が限界を迎える。このため、広範囲かつ高精度な波形歪み補償を行うことができるデジタルコヒーレント光受信器が望まれている。

【0131】

これに対して、上述した実施の形態によれば、たとえば、確度の高いチャネル推定が可能になるため、伝送路特性をより正確に補償可能なAEQのタップ係数の初期値を設定することができる。このため、伝送路特性を正確に補償し、伝送エラーの発生頻度の低減と、伝送路の長距離化と、の少なくともいずれかを図ることができる。

40

【0132】

上述した各実施の形態に関し、さらに以下の付記を開示する。

【0133】

(付記1) 演算部と平均化部と補償部と適応等化部とを備える適応等化回路であって、前記演算部は、対象信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が前記補償部によって補償された第2信号と、前記第2信号に基づくチャネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、

50

前記平均化部は、前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、

前記補償部は、前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第 2 信号を得、

前記適応等化部は、前記第 2 信号に基づく設定値によって前記対象信号の適応等化処理を行う、

ことを特徴とする適応等化回路。

【 0 1 3 4 】

(付記 2) 前記平均化部は、前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力より大きい前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの推定値を除外し、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの推定値の平均値を得ることを特徴とする付記 1 に記載の適応等化回路。

10

【 0 1 3 5 】

(付記 3) 前記平均化部は、前記推定値の数が所定数に達した場合に、前記所定数の推定値の平均値を得ることを特徴とする付記 1 または 2 に記載の適応等化回路。

【 0 1 3 6 】

(付記 4) 前記雑音電力が前記所定電力以下か否かを判定した回数が前記所定数より大きい閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させる制御を行う制御部を備えることを特徴とする付記 3 に記載の適応等化回路。

20

【 0 1 3 7 】

(付記 5) 前記対象信号における前記所定シンボルの信号の位置を推定し、推定した位置に基づいて前記対象信号から前記所定シンボルの信号を取得する取得部を備え、

前記演算部は、取得された前記所定シンボルの信号に基づいて前記雑音電力を演算し、

前記平均化部は、取得された前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が前記所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの推定値を保持し、

前記制御部は、前記雑音電力が前記所定電力以下か否かを判定した回数が前記閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させ、取得された前記所定シンボルの信号の位置の推定をやり直させる制御を行う、

30

ことを特徴とする付記 4 に記載の適応等化回路。

【 0 1 3 8 】

(付記 6) 前記雑音電力が前記所定電力より大きいと判定した回数が閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させる制御部を備えることを特徴とする付記 3 ~ 5 のいずれか一つに記載の適応等化回路。

【 0 1 3 9 】

(付記 7) 前記対象信号における前記所定シンボルの信号の位置を推定し、推定した位置に基づいて前記対象信号から前記所定シンボルの信号を取得する取得部を備え、

前記演算部は、取得された前記所定シンボルの信号に基づいて前記雑音電力を演算し、

前記平均化部は、取得された前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が前記所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、

40

前記制御部は、前記雑音電力が前記所定電力より大きいと判定した回数が前記閾値に達した場合に、前記推定値を破棄させ、取得された前記所定シンボルの信号の位置の推定をやり直させる制御を行う、

ことを特徴とする付記 6 に記載の適応等化回路。

【 0 1 4 0 】

(付記 8) 前記適応等化部は、設定されたタップ係数に応じたフィルタリングを行う FIR (Finite Impulse Response: 有限インパルス応答) フィルタ

50

によって前記適応等化処理を行い、周波数オフセットが補償された前記所定シンボルの信号に基づいて前記タップ係数の初期値を設定することを特徴とする付記 1 ~ 7 のいずれか一つに記載の適応等化回路。

【 0 1 4 1 】

(付記 9) 前記適応等化部は、周波数オフセットが補償された前記所定シンボルの信号に基づくチャネル推定値から算出されたタップ係数を前記初期値に設定することを特徴とする付記 8 に記載の適応等化回路。

【 0 1 4 2 】

(付記 10) 受光処理部と演算部と平均化部と補償部と適応等化部と復号部とを備えるデジタルコヒーレント受信器であって、

前記受光処理部は、伝送路からの信号光と局発光とを混合して得られた光の光電変換およびデジタル変換を行い、

前記演算部は、前記受光処理部により得られた信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が前記補償部によって補償された第 2 信号と、前記第 2 信号に基づくチャネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、

前記平均化部は、前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、

前記補償部は、前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第 2 信号を得、

前記適応等化部は、前記第 2 信号に基づく設定値によって、前記受光処理部により得られた信号の適応等化処理を行い、

前記復号部は、前記適応等化部によって適応等化処理が行われた信号に基づく復号を行う、

ことを特徴とするデジタルコヒーレント受信器。

【 0 1 4 3 】

(付記 11) 対象信号に繰り返し含まれる所定シンボルの信号が補償された第 2 信号と、前記第 2 信号に基づくチャネル推定値と、前記所定シンボルの信号と、に基づいて前記所定シンボルの信号の雑音電力を演算し、

前記繰り返し含まれる所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値のうち、前記雑音電力が所定電力以下である前記所定シンボルの信号に基づく周波数オフセットの各推定値の平均値を得、

前記平均値に基づいて前記所定シンボルの信号の周波数オフセットを補償して前記第 2 信号を得、

前記第 2 信号に基づく設定値によって前記対象信号の適応等化処理を行う、

ことを特徴とする適応等化方法。

【符号の説明】

【 0 1 4 4 】

- 1 0 0 適応等化回路
- 1 1 0 A E Q
- 1 2 0 A E Q _ T S
- 2 0 0 偏波回転
- 2 1 1 , 3 1 1 , 4 1 1 X 偏波成分
- 2 1 2 , 3 1 2 , 4 1 2 Y 偏波成分
- 2 2 1 , 2 2 2 偏光方向
- 3 0 0 偏波間ディレイ差
- 4 0 0 偏波間ロス差
- 5 0 0 デジタルコヒーレント受信器
- 5 0 1 デジタル回路

10

20

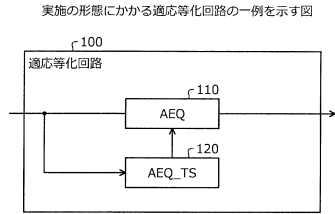
30

40

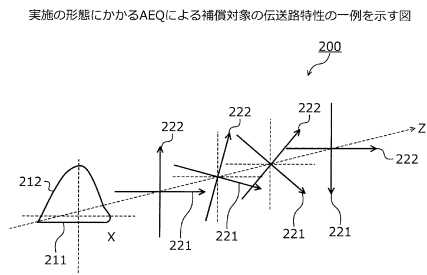
50

5 1 0	コヒーレント受光フロントエンド	
5 2 0	波形歪み補償器	
5 3 0	位相調整器	
5 4 0	適応等化器	
5 5 0	復調 / データ再生回路	
6 1 1 ~ 6 1 4	F I R フィルタ	
6 2 1 , 6 2 2	加算部	
6 3 0	係数制御部	
7 1 1 ~ 7 1 N	遅延部	
7 2 0 ~ 7 2 N	乗算部	10
8 0 1	周期	
8 1 0	信号	
8 1 1	T S	
8 2 0 , 9 2 0	伝送路	
8 2 1	T S 推定位置	
9 1 0	送信部	
9 1 1 , 9 3 1	ハイブリッド処理	
9 3 0	受信部	
1 1 0 1	T S 同期部	
1 1 0 2	周波数オフセット推定部	20
1 1 0 3	周波数オフセット選択部	
1 1 0 4	周波数オフセット補償部	
1 1 0 5	チャネル推定部	
1 1 0 6	雑音電力演算部	
1 1 0 7	周波数オフセット除外判定部	
1 1 0 8	周波数オフセット平均化部	
1 1 0 9	制御部	
1 3 0 1	閾値判定部	
1 3 0 2	閾値判定回数カウンタ	
1 4 0 1	周波数オフセット保持部	30
1 4 0 2	値保持カウンタ	
1 4 0 3	平均化部	
1 6 0 1	除外回数カウンタ	

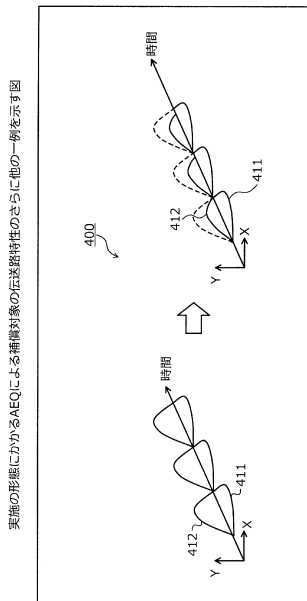
【図1】



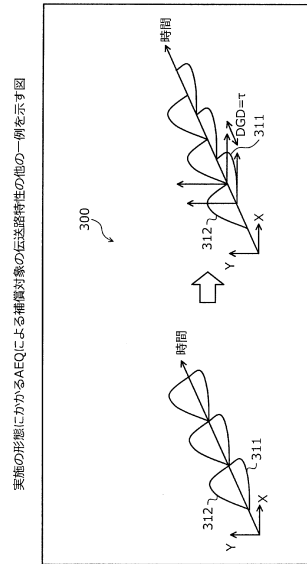
【図2】



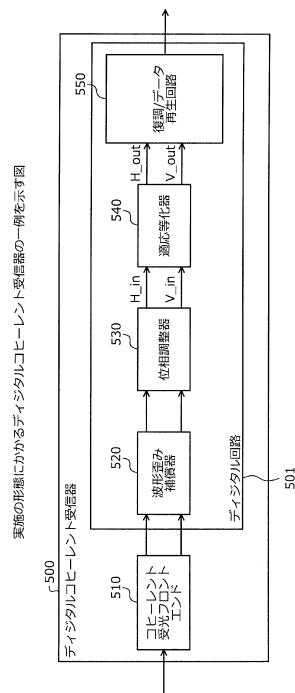
【図4】



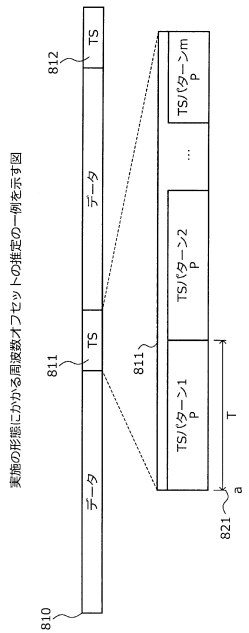
【図3】



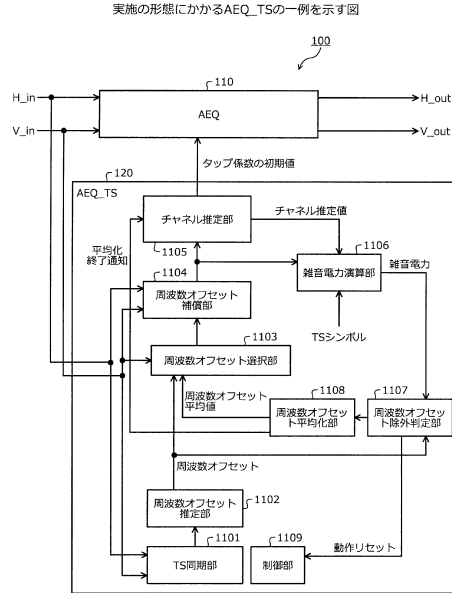
【図5】



【図10】

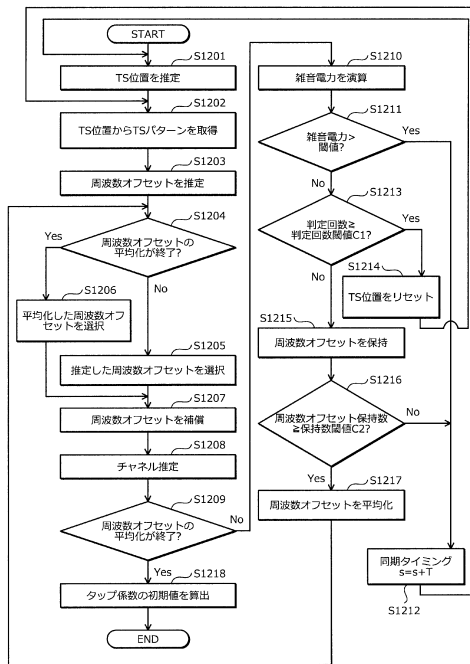


【図11】



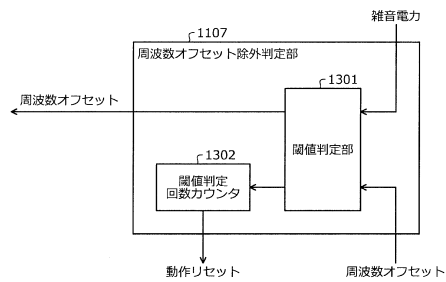
【図12】

実施の形態にかかるAEQ_TSによる処理の一例を示すフローチャート



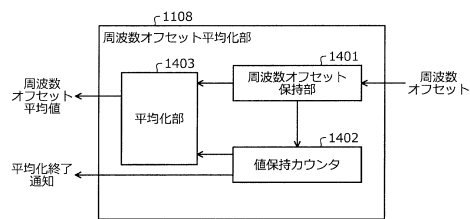
【図13】

実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の一例を示す図



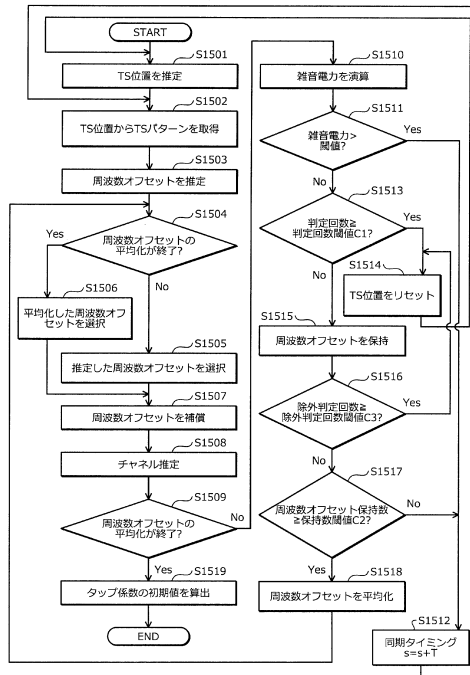
【図14】

実施の形態にかかる周波数オフセット平均部の一例を示す図



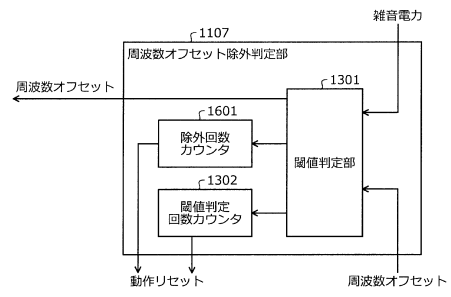
【図15】

実施の形態にかかるAEQ_TSによる処理の他の一例を示すフローチャート



【図16】

実施の形態にかかる周波数オフセット除外判定部の他の一例を示す図



フロントページの続き

- (72)発明者 加藤 知己
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 小泉 伸和
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 太田 昌人
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 大友 尉央
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 山 崎 学
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内
- (72)発明者 佐藤 将志
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通アドバンステクノロジー株式会社内

審査官 対馬 英明

- (56)参考文献 特開2012-244255(JP,A)
特開2015-91068(JP,A)
特開2005-354182(JP,A)
特開2005-27272(JP,A)
米国特許出願公開第2012/0087680(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04B 10/00 - 10/90
H04J 14/00 - 14/08
H04B 1/76 - 3/44
H04B 3/50 - 3/60
H04B 7/00 - 7/015