

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7200363号
(P7200363)

(45)発行日 令和5年1月6日(2023.1.6)

(24)登録日 令和4年12月23日(2022.12.23)

(51)国際特許分類	F I
H 0 4 B 10/2507(2013.01)	H 0 4 B 10/2507
H 0 4 B 3/06 (2006.01)	H 0 4 B 3/06 A
H 0 4 L 25/03 (2006.01)	H 0 4 L 25/03 Z

請求項の数 14 (全36頁)

(21)出願番号	特願2021-517426(P2021-517426)	(73)特許権者	504161984 ホアウェイ・テクノロジーズ・カンパニー・リミテッド 中華人民共和国・518129・グァン ドン・シェンツェン・ロンガン・ディス トリクト・バンティアン・(番地なし) ・ホアウェイ・アドミニストレーション ・ビルディング
(86)(22)出願日	令和1年9月25日(2019.9.25)	(74)代理人	100110364 弁理士 実広 信哉
(65)公表番号	特表2022-501948(P2022-501948 A)	(74)代理人	100133569 弁理士 野村 進
(43)公表日	令和4年1月6日(2022.1.6)	(72)発明者	アハメド・モハメド・イブラヒム・メド ラ カナダ・オンタリオ・K 2 T・0 A 7・ 最終頁に続く
(86)国際出願番号	PCT/CN2019/107735		
(87)国際公開番号	WO2020/063637		
(87)国際公開日	令和2年4月2日(2020.4.2)		
審査請求日	令和3年5月7日(2021.5.7)		
(31)優先権主張番号	16/146,079		
(32)優先日	平成30年9月28日(2018.9.28)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		

(54)【発明の名称】 狭帯域フィルタ済み信号のためのノイズホワイトニング後補償の効率的実施

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

ノイズホワイトニング後補償のための装置であって、

第1のフィルタ済み信号を生成するため、シンボルを含む受信信号をフィルタするように構成された第1のホワイトニングフィルタと、

前記第1のフィルタ済み信号を受信するため、前記第1のホワイトニングフィルタの出力に結合された入力を有し、前記受信信号の前記シンボルの推定を生成するため、前記第1のフィルタ済み信号に判定帰還等化(DFE)を適用するように構成された第1の判定帰還等化器とを含み、

前記第1の判定帰還等化器は、

入力と出力とを有するフィードフォワードフィルタ(FFF)と、

第1の入力と、第2の入力と、出力とを有する第1の結合器と、

入力と出力とを有する第1の判定デバイスと、

入力と出力とを有するフィードバックフィルタ(FBF)とを含み、

前記第1のホワイトニングフィルタによって生成される前記第1のフィルタ済み信号を受信するため、前記FFFの前記入力は前記第1のホワイトニングフィルタの前記出力に結合され、

前記FFFによって生成される第2のフィルタ済み信号を受信するため、前記第1の結合器の前記第1の入力は前記FFFの前記出力に結合され、

前記FBFによって生成される第3のフィルタ済み信号を受信するため、前記第1の結合器

の前記第2の入力は前記FBFの前記出力に結合され、
 前記第1の結合器によって生成される第1のシンボル推定を受信するため、前記第1の判定デバイスの前記入力には前記第1の結合器の前記出力に結合され、
 前記第1の判定デバイスによって生成される第2のシンボル推定を受信するため、前記FBFの前記入力には前記第1の判定デバイスの前記出力に結合され、前記第2のシンボル推定は、
 前記DFEの出力であり、
 前記FFFは、前記第2のフィルタ済み信号を生成するため、前記第1のフィルタ済み信号をフィードフォワードフィルタするように構成され、
 前記第1の結合器は、前記第1のシンボル推定を生成するため、前記FFFによって生成される前記第2のフィルタ済み信号と前記FBFによって生成される前記第3のフィルタ済み信号を結合するように構成され、
 前記第1の判定デバイスは、前記第1のシンボル推定に基づいて前記第2のシンボル推定を生成するように構成され、
 前記FBFは、前記第3のフィルタ済み信号を生成するため、前記第2のシンボル推定をフィルタするように構成され、
 前記第1の判定デバイスは、前記第1のシンボル推定の対数尤度比を計算し、前記対数尤度比を使用して軟シンボル判定である前記第2のシンボル推定を生成するように構成された軟判定デバイスである、装置。

10

【請求項2】

逆転信号を生成するため、前記受信信号の前記シンボルの順序を逆転させるように構成された第1の逆転器と、

20

前記逆転信号を受信するため、前記第1の逆転器の出力に結合された入力を有し、フィルタ済み逆転信号を生成するため、前記逆転信号をフィルタするように構成された第2のホワイトニングフィルタと、

前記フィルタ済み逆転信号を受信するため、前記第2のホワイトニングフィルタの出力に結合された入力を有し、前記逆転信号のシンボルについて逆転シンボル推定を生成するため、前記フィルタ済み逆転信号にDFEを適用するように構成された第2の判定帰還等化器と、

前記逆転シンボル推定を受信するため、前記第2の判定帰還等化器の出力に結合された入力を有し、第3のシンボル推定を生成するため、前記逆転シンボル推定のシンボルの順序を逆転させるように構成された第2の逆転器と、

30

前記第3のシンボル推定を受信するため、前記第2の逆転器の出力に結合された第1の入力を有し、前記第2のシンボル推定を受信するため、前記第1の判定デバイスの前記出力に結合された第2の入力を有し、第4のシンボル推定を生成するため、前記第3のシンボル推定と前記第2のシンボル推定を結合するように構成された第2の結合器と、

前記第2の結合器の出力に結合された入力を有し、前記第4のシンボル推定に基づいてシンボル判定を生成するように構成された第2の判定デバイスとをさらに含む、

請求項1に記載の装置。

【請求項3】

前記シンボル判定を受信するため、前記第2の判定デバイスの前記出力に結合された入力を有し、前記受信信号でノイズを予測するように構成されたノイズ予測器と、

40

予測ノイズを受信するため、前記ノイズ予測器の出力に結合された入力を有し、第5のシンボル推定を生成するため、前記受信信号から前記予測ノイズを差し引くように構成された第1の減算器とをさらに含む、

請求項2に記載の装置。

【請求項4】

前記ノイズ予測器は、

前記シンボル判定を受信するため、前記ノイズ予測器の前記入力に結合された入力を有し、ノイズ推定を生成するため、前記受信信号から前記シンボル判定を差し引くように構成された第2の減算器と、

50

前記ノイズ推定を受信するため、前記第2の減算器の出力に結合された入力を有し、前記ノイズ予測器の前記出力に結合された出力を有し、前記予測ノイズを生成するため、前記ノイズ推定に線形予測符号化(LPC)を適用するように構成された線形予測符号化器とを含む、請求項3に記載の装置。

【請求項5】

前記線形予測符号化器は、

【数1】

$$\hat{z}[n] = -q_1\hat{z}[n-1] - q_2\hat{z}[n-2] \dots - q_M\hat{z}[n-M] + e[n]$$

10

を計算し、

【数2】

$$\hat{z}$$

は前記予測ノイズを表し、

【数3】

$$\hat{z}$$

20

は前記ノイズ推定を表し、 n は前記受信信号の前記シンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す、ようにさらに構成される、請求項4に記載の装置。

【請求項6】

前記第1のホワイトニングフィルタと前記予測フィルタは同じフィルタタップに基づいている、請求項5に記載の装置。

30

【請求項7】

前記第5のシンボル推定を受信するため、前記第1の減算器の出力に結合された入力を有し、前記第5のシンボル推定について第1の対数尤度比(LLR)セットを生成するため、前記第5のシンボル推定をソフトデマッピングするように構成されたソフトデマッパーをさらに含む、

請求項3から6のいずれか一項に記載の装置。

【請求項8】

前記第1のLLRセットを受信するため、前記ソフトデマッパーの出力に結合された入力を有し、第2のLLRセットを生成するため、前記第1のLLRセットをFEC復号するように構成された順方向誤り訂正(FEC)復号器をさらに含む、

40

請求項7に記載の装置。

【請求項9】

前記第2のLLRセットを受信するため、前記FEC復号器の出力に結合された入力を有し、前記第2のLLRセットを使用して前記受信信号の前記シンボルを再生成するように構成された再生成器をさらに含む、

請求項8に記載の装置。

【請求項10】

前記第2のLLRセットを受信するため、前記FEC復号器の前記出力に結合された入力を有し、1回以上の復号を実行するように構成された復号ループをさらに含む、

請求項8または9に記載の装置。

50

【請求項 1 1】

前記復号ループは、前記第1の判定帰還等化器の入力に結合された出力を含み、前記第1の判定帰還等化器は、前記第2のLLRセットを受信するように構成される、請求項10に記載の装置。

【請求項 1 2】

前記復号ループは、前記第1の判定帰還等化器とは異なる等化器の入力に結合された出力を含み、前記第1の判定帰還等化器とは異なる前記等化器は、前記第2のLLRセットを受信するように構成される、請求項11に記載の装置。

【請求項 1 3】

受信器におけるノイズホワイトニング後補償のための方法であって、

第1のフィルタ済み信号を生成するため、シンボルを含む受信信号にホワイトニングフィルタを適用するステップと、

前記受信信号の前記シンボルの推定を生成するため、前記第1のフィルタ済み信号に判定帰還等化 (DFE) を適用するステップとを含み、

前記第1のフィルタ済み信号にDFEを適用する前記ステップは、

第2のフィルタ済み信号を生成するため、前記第1のフィルタ済み信号をフィードフォワードフィルタするステップと、

第1のシンボル推定を生成するため、前記第2のフィルタ済み信号と第3のフィルタ済み信号を結合するステップと、

前記第1のシンボル推定に基づいて第2のシンボル推定を生成するステップであって、前記第2のシンボル推定は、前記DFEの出力である、ステップと、

前記第3のフィルタ済み信号を生成するため、前記第2のシンボル推定をフィードバックフィルタするステップとを含み、

前記第1のシンボル推定に基づいて前記第2のシンボル推定を生成する前記ステップは、前記第1のシンボル推定の対数尤度比を計算し、前記対数尤度比を使用して軟シンボル判定である前記第2のシンボル推定を生成するステップを含む、方法。

【請求項 1 4】

逆転信号を生成するため、前記受信信号の前記シンボルの順序を逆転させるステップと、
フィルタ済み逆転信号を生成するため、前記逆転信号にホワイトニングフィルタを適用するステップと、

前記逆転信号のシンボルについて逆転シンボル推定を生成するため、前記フィルタ済み逆転信号にDFEを適用するステップと、

第3のシンボル推定を生成するため、前記逆転シンボル推定のシンボルの順序を逆転させるステップと、

第4のシンボル推定を生成するため、前記第3のシンボル推定と前記第2のシンボル推定を結合するステップと、

前記第4のシンボル推定に基づいてシンボル判定を生成するステップとをさらに含む、請求項13に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願の相互参照

本願は、2018年9月28日に提出された「狭帯域フィルタ済み信号のためのノイズホワイトニング後補償の効率的実施」と題する米国特許出願第16/146,079号の優先権の利益を主張するものであり、同出願の内容は参照により本願に組み込まれる。

【0002】

本開示は、歪み信号の等化のためのシステムおよび方法に関し、特に狭帯域フィルタ済み信号のためのノイズホワイトニング後補償に対する実施形態に関する。

【背景技術】

【0003】

10

20

30

40

50

通信システムにおいてチャンネル上で伝送される信号は通常、歪みを被る。チャンネルには歪みの原因が数多くあり、これは光学的部品と電気的部品を含み得る。例えば、信号の全帯域幅を受け入れることができない通過帯域を有するチャンネル内の帯域幅が限られた部品（例えば、波長選択スイッチ（WSS））によって歪みが生じることがある。信号の周波数スペクトルは、これらの帯域幅が限られた部品のためにカットオフされることがあり、あるいはフィルタされることがある。もう1つの歪み原因は、無干渉受信のためのナイキスト基準に違反するレート（シグナリング）に、すなわちファスタ・ザン・ナイキスト（FTN）シグナリングの名で知られるものに、起因する。チャンネル歪みとは対照的に、意図的なFTN歪みは受信側で事前に知ることができる。

【0004】

分散型の光学的部品と電気的部品も歪みの原因となる。信号の位相速度が周波数に依存する部品は色分散（CD）を呈し、信号の位相速度が偏波に依存する部品は偏波モード分散（PMD）を呈する。CDとPMDは伝播する信号を拡散させて、歪みを引き起こすことがある。

【0005】

信号の歪みの原因が何であれ、その結果は、時間領域における信号の拡散を含み得る。この拡散によって信号内のシンボルがしだいに隣接するシンボルと重なり合うが、これはシンボル間干渉（ISI）と呼ばれている。他の干渉原因と同様、ISIは通常、通信システムの性能を低下させる。

【0006】

歪みの作用を覆して、チャンネルによってもたらされるISIを軽減するため、受信器側で等化が実施され得る。等化は、時間領域（TD）または周波数領域（FD）多重入出力（MIMO）等化器などの線形等化器を使用して達成され得る。線形等化器は一般的に実装しやすく、その出力が効率的に使用されてチャンネル障害を推定し、チャンネルによってもたらされるISIを等化することができる。その一方で、線形等化器は信号に関わるノイズにも影響を及ぼす。場合によっては、信号内のノイズが増幅される。線形等化器は、特定の周波数のノイズに他の周波数のノイズとは異なる影響を与える。例えば、信号におけるノイズ増幅は周波数次第となり得る。ノイズはもはやホワイトノイズとみなされることができないため、これはしばしばノイズカラーリングと呼ばれる。ノイズカラーリングは受信器の性能に悪影響を及ぼし、ビット誤り率（BER）の増加に結びつく恐れがある。そこで、ノイズ

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0007】

本開示の一態様によると、ノイズホワイトニング後補償のための装置が提供され、該装置は、第1のフィルタ済み信号を生成するため、シンボルを含む受信信号をフィルタするように構成された第1のホワイトニングフィルタと、第1のフィルタ済み信号を受信するため、第1のホワイトニングフィルタの出力に結合された入力を有し、受信信号の前記シンボルの推定を生成するため、第1のフィルタ済み信号に判定帰還等化（DFE）を適用するように構成された第1の判定帰還等化器とを含む。

【0008】

いくつかの実施形態において、第1の判定帰還等化器は、入力と出力とを有するフィードフォワードフィルタ（FFF）と、第1の入力と、第2の入力と、出力とを有する第1の結合器と、入力と出力とを有する第1の判定デバイスと、入力と出力とを有するフィードバックフィルタ（FBF）とを含み、第1のホワイトニングフィルタによって生成される第1のフィルタ済み信号を受信するため、FFFの入力は第1のホワイトニングフィルタの出力に結合され、FFFによって生成される第2のフィルタ済み信号を受信するため、第1の結合器の第1の入力はFFFの出力に結合され、FBFによって生成される第3のフィルタ済み信号を受信するため、第1の結合器の第2の入力はFBFの出力に結合され、第1の結合器によって生成される第1のシンボル推定を受信するため、第1の判定デバイスの入力は第1の結合器の

10

20

30

40

50

出力に結合され、第1の判定デバイスによって生成される第2のシンボル推定を受信するため、FBFの入力は第1の判定デバイスの出力に結合され、FFFは、第2のフィルタ済み信号を生成するため、第1のフィルタ済み信号をフィードフォワードフィルタするように構成され、第1の結合器は、第1のシンボル推定を生成するため、FFFによって生成される第2のフィルタ済み信号とFBFによって生成される第3のフィルタ済み信号を結合するように構成され、第1の判定デバイスは、第1のシンボル推定に基づいて第2のシンボル推定を生成するように構成され、FBFは、第3のフィルタ済み信号を生成するため、第2のシンボル推定をフィルタするように構成される。

【0009】

いくつかの実施形態において、第1の判定デバイスは、少なくとも1つの対数尤度比を生成するように構成された軟判定デバイスである。

10

【0010】

いくつかの実施形態において、該装置は、逆転信号を生成するため、受信信号のシンボルの順序を逆転させるように構成された第1の逆転器と、逆転信号を受信するため、第1の逆転器の出力に結合された入力を有し、フィルタ済み逆転信号を生成するため、逆転信号をフィルタするように構成された第2のホワイトニングフィルタと、フィルタ済み逆転信号を受信するため、第2のホワイトニングフィルタの出力に結合された入力を有し、逆転信号のシンボルについて逆転シンボル推定を生成するため、フィルタ済み逆転信号にDFEを適用するように構成された第2の判定帰還等化器と、逆転シンボル推定を受信するため、第2の判定帰還等化器の出力に結合された入力を有し、第3のシンボル推定を生成するため、逆転シンボル推定のシンボルの順序を逆転させるように構成された第2の逆転器と、第3のシンボル推定を受信するため、第2の逆転器の出力に結合された第1の入力を有し、第2のシンボル推定を受信するため、FFFの出力に結合された第2の入力を有し、第4のシンボル推定を生成するため、第3のシンボル推定と第2のシンボル推定を結合するように構成された第2の結合器と、第2の結合器の出力に結合された入力を有し、第4のシンボル推定に基づいてシンボル判定を生成するように構成された第2の判定デバイスとをさらに含む。

20

【0011】

いくつかの実施形態において、該装置は、シンボル判定を受信するため、第2の判定デバイスの出力に結合された入力を有し、受信信号でノイズを予測するように構成されたノイズ予測器と、予測ノイズを受信するため、ノイズ予測器の出力に結合された入力を有し、第5のシンボル推定を生成するため、受信信号から予測ノイズを差し引くように構成された第1の減算器とをさらに含む。

30

【0012】

いくつかの実施形態において、ノイズ予測器は、シンボル判定を受信するため、ノイズ予測器の入力に結合された入力を有し、ノイズ推定を生成するため、受信信号からシンボル判定を差し引くように構成された第2の減算器と、ノイズ推定を受信するため、第2の減算器の出力に結合された入力を有し、ノイズ予測器の出力に結合された出力を有し、予測ノイズを生成するため、ノイズ推定に線形予測符号化(LPC)を適用するように構成された線形予測符号化器とを含む。

40

【0013】

いくつかの実施形態において、線形予測符号化器は、

【数1】

$$\hat{z}[n] = -q_1\hat{z}[n-1] - q_2\hat{z}[n-2] \dots - q_M\hat{z}[n-M] + e[n]$$

を計算し、

【数2】

50

\tilde{z}

は予測ノイズを表し、

【数3】

 \bar{z}

はノイズ推定を表し、 n は受信信号のシンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す、ようにさらに構成される。

【0014】

いくつかの実施形態において、第1のホワイトニングフィルタと予測フィルタは同じフィルタタップに基づいている。

【0015】

いくつかの実施形態において、該装置は、第5のシンボル推定を受信するため、第1の減算器の出力に結合された入力を有し、第5のシンボル推定について第1の対数尤度比(LLR)セットを生成するため、第5のシンボル推定をソフトマッピングするように構成されたソフトデマッパーをさらに含む。

【0016】

いくつかの実施形態において、該装置は、第1のLLRセットを受信するため、出力ソフトデマッパーに結合された入力を有し、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットをFEC復号するように構成された順方向誤り訂正(FEC)復号器をさらに含む。

【0017】

いくつかの実施形態において、該装置は、第2のLLRセットを受信するため、FEC復号器の出力に結合された入力を有し、第2のLLRセットを使用して受信信号のシンボルを再生成するように構成された再生器をさらに含む。

【0018】

いくつかの実施形態において、該装置は、第2のLLRセットを受信するため、FEC復号器の出力に結合された入力を有し、1回以上の復号を実行するように構成された復号ループをさらに含む。

【0019】

いくつかの実施形態において、復号ループは、第1の判定帰還等化器の入力に結合された出力を含み、第1の判定帰還等化器は、第2のLLRセットを受信するように構成される。

【0020】

いくつかの実施形態において、復号ループは、第1の判定帰還等化器とは異なる等化器の入力に結合された出力を含み、第1の判定帰還等化器とは異なる等化器は、第2のLLRセットを受信するように構成される。

【0021】

本開示の別の態様によると、ノイズホワイトニング後補償のための装置が提供され、該装置は、シンボルを含む受信信号に基づいてシンボル判定を生成するように構成された判定デバイスと、シンボル判定を受信するため、判定デバイスの出力に結合された入力を有し、受信信号でノイズを予測するように構成されたノイズ予測器と、予測ノイズを受信するため、ノイズ予測器の出力に結合された入力を有し、シンボル推定を生成するため、受信信号から予測ノイズを差し引くように構成された減算器とを含む。

【0022】

いくつかの実施形態において、ノイズ予測器は、シンボル判定を受信するため、ノイズ予測器の入力に結合された入力を有し、ノイズ推定を生成するため、受信信号からシンボル判定を差し引くように構成された第2の減算器と、ノイズ推定を受信するため、第2の減

10

20

30

40

50

算器の出力に結合された入力を有し、ノイズ予測器の出力に結合された出力を有し、予測ノイズを生成するため、ノイズ推定に線形予測符号化(LPC)を適用するように構成された線形予測符号化器とを含む。

【0023】

いくつかの実施形態において、線形予測符号化器は、

【数4】

$$\hat{z}[n] = -q_1\bar{z}[n-1] - q_2\bar{z}[n-2] \dots - q_M\bar{z}[n-M] + e[n]$$

10

を計算し、

【数5】

$$\hat{z}$$

は予測ノイズを表し、

【数6】

$$\bar{z}$$

20

はノイズ推定を表し、 n は受信信号のシンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す、ようにさらに構成される。

【0024】

いくつかの実施形態において、該装置は、シンボル推定を受信するため、第1の減算器の出力に結合された入力を有し、シンボル推定について第1の対数尤度比(LLR)セットを生成するため、シンボル推定をソフトマッピングするように構成されたソフトデマッパーをさらに含む。

【0025】

30

いくつかの実施形態において、該装置は、第1のLLRセットを受信するため、出力ソフトデマッパーに結合された入力を有し、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットをFEC復号するように構成された順方向誤り訂正(FEC)復号器をさらに含む。20。

【0026】

いくつかの実施形態において、該装置は、第2のLLRセットを受信するため、FEC復号器の出力に結合された入力を有し、第2のLLRセットを使用して受信信号のシンボルを再生成するように構成された再生成器をさらに含む。

【0027】

本開示のさらに別の一態様によると、受信器におけるノイズホワイトニング後補償のための方法が提供され、該方法は、第1のフィルタ済み信号を生成するため、シンボルを含む受信信号にホワイトニングフィルタを適用するステップと、受信信号のシンボルの推定を生成するため、第1のフィルタ済み信号に判定帰還等化(DFE)を適用するステップとを含む。

40

【0028】

いくつかの実施形態において、第1のフィルタ済み信号にDFEを適用するステップは、第2のフィルタ済み信号を生成するため、第1のフィルタ済み信号をフィードフォワードフィルタするステップと、第1のシンボル推定を生成するため、第2のフィルタ済み信号と第3のフィルタ済み信号を結合するステップと、第1のシンボル推定に基づいて第2のシンボル推定を生成するステップと、第3のフィルタ済み信号を生成するため、第2のシンボル推定をフィードバックフィルタするステップとを含む。

50

【 0 0 2 9 】

いくつかの実施形態において、第1のシンボル推定に基づいて第2のシンボル推定を生成するステップは、第1のシンボル推定に基づいて軟シンボル判定を生成するステップを含む。

【 0 0 3 0 】

いくつかの実施形態において、第1のシンボル推定に基づいて軟シンボル判定を生成するステップは、少なくとも1つの対数尤度比を生成するステップを含む。

【 0 0 3 1 】

いくつかの実施形態において、ホワイトニングフィルタは第1のホワイトニングフィルタであり、該方法は、逆転信号を生成するため、受信信号のシンボルの順序を逆転させるステップと、フィルタ済み逆転信号を生成するため、逆転信号に第2のホワイトニングフィルタを適用するステップと、逆転信号のシンボルについて逆転シンボル推定を生成するため、フィルタ済み逆転信号にDFEを適用するステップと、第3のシンボル推定を生成するため、逆転シンボル推定のシンボルの順序を逆転させるステップと、第4のシンボル推定を生成するため、第2のシンボル推定と第3のシンボル推定を結合するステップと、第4のシンボル推定に基づいてシンボル判定を生成するステップとをさらに含む。

10

【 0 0 3 2 】

いくつかの実施形態において、該方法は、受信信号でノイズを予測するステップと、第5のシンボル推定を生成するため、受信信号から予測ノイズを差し引くステップとをさらに含む。

20

【 0 0 3 3 】

いくつかの実施形態において、受信信号でノイズを予測するステップは、ノイズ推定を生成するため、受信信号からシンボル判定を差し引くステップと、予測ノイズを生成するため、ノイズ推定に線形予測符号化(LPC)を適用するステップとを含む。

【 0 0 3 4 】

いくつかの実施形態において、ノイズ推定にLPCを適用するステップは、

【数7】

$$\hat{z}[n] = -q_1\bar{z}[n-1] - q_2\bar{z}[n-2] \dots - q_M\bar{z}[n-M] + e[n]$$

30

を計算するステップを含み、

【数8】

$$\tilde{z}$$

は予測ノイズを表し、

【数9】

$$\bar{z}$$

40

はノイズ推定を表し、 n は受信信号のシンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す。

【 0 0 3 5 】

いくつかの実施形態において、受信信号にホワイトニングフィルタを適用するステップは、フィルタタップを生成するステップを含み、ノイズ推定にLPCを適用するステップは、フィルタタップに基づいて予測フィルタを生成するステップを含む。

【 0 0 3 6 】

50

いくつかの実施形態において、該方法は、第5のシンボル推定について第1の対数尤度比 (LLR) セットを生成するため、第5のシンボル推定をソフトデマッピングするステップをさらに含む。

【0037】

いくつかの実施形態において、該方法は、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットを順方向誤り訂正 (FEC) 復号するステップをさらに含む。

【0038】

いくつかの実施形態において、該方法は、第2のLLRセットを使用して受信シンボルのシンボルを再生成するステップをさらに含む。

【0039】

いくつかの実施形態において、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットをFEC復号するステップは、1回以上の復号ループを実行するステップを含む。

【0040】

いくつかの実施形態において、1回以上の各々を実行するステップは、第1のフィルタ済み信号に適用されるDFEの以降の反復実行のためのアプリアリ情報として第2のLLRセットを送信するステップを含む。

【0041】

いくつかの実施形態において、1回以上の各々を実行するステップは、第1のフィルタ済み信号に適用されるDFEとは異なる等化の以降の反復実行のためのアプリアリ情報として第2のLLRセットを送信するステップを含む

【0042】

本開示のさらに別の一態様によると、受信器におけるノイズホワイトニング後補償のための方法が提供され、該方法は、シンボルを含む受信信号に基づいてシンボル判定を生成するステップと、シンボル判定に基づいて受信信号でノイズを予測するステップと、シンボル推定を生成するため、受信信号から予測ノイズを差し引くステップとを含む。

【0043】

いくつかの実施形態において、受信シンボルに基づいてシンボル判定を生成するステップは、受信信号に基づいて軟シンボル判定を生成するステップを含む。

【0044】

いくつかの実施形態において、受信シンボルに基づいてシンボル判定を生成するステップは、受信信号に基づいて硬シンボル判定を生成するステップを含む。

【0045】

いくつかの実施形態において、受信信号でノイズを予測するステップは、ノイズ推定を生成するため、受信信号からシンボル判定を差し引くステップと、予測ノイズを生成するため、ノイズ推定に線形予測符号化 (LPC) を適用するステップとを含む。

【0046】

いくつかの実施形態において、ノイズ推定にLPCを適用するステップは、

【数10】

$$\hat{z}[n] = -q_1\bar{z}[n-1] - q_2\bar{z}[n-2] \dots - q_M\bar{z}[n-M] + e[n]$$

を計算するステップを含み、

【数11】

\hat{z}

は予測ノイズを表し、

【数12】

10

20

30

40

50

\bar{z}

はノイズ推定を表し、 n は受信信号のシンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す。

【0047】

いくつかの実施形態において、受信信号にホワイトニングフィルタを適用するステップは、フィルタタップを生成するステップを含み、ノイズ推定にLPCを適用するステップは、フィルタタップに基づいて予測フィルタを生成するステップを含む。

10

【0048】

いくつかの実施形態において、該方法は、シンボル推定について第1の対数尤度比(LLR)セットを生成するため、シンボル推定をソフトデマッピングするステップをさらに含む。

【0049】

いくつかの実施形態において、該方法は、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットを順方向誤り訂正(FEC)復号するステップをさらに含む。

【0050】

いくつかの実施形態において、該方法は、第2のLLRセットを使用して受信シンボルのシンボルを再生成するステップをさらに含む。

【0051】

いくつかの実施形態において、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットをFEC復号するステップは、1回以上の復号ループを実行するステップを含む。

20

【0052】

いくつかの実施形態において、1回以上の各々を実行するステップは、受信信号におけるノイズ予測の以降の反復実行のためのアプリアリ情報として第2のLLRセットを送信するステップを含む。

【0053】

いくつかの実施形態において、1回以上の各々を実行するステップは、LPCとは異なる等化の以降の反復実行のためのアプリアリ情報として第2のLLRセットを送信するステップを含む。

30

【0054】

これより添付の図面を参照しながら実施形態が詳しく説明される。

【図面の簡単な説明】

【0055】

【図1】線形等化器の出力で後補償等化处理を実施する受信器の一例を示すブロック図である。

【図2】後補償器の一例を示すブロック図である。

【図3】判定帰還等化(DFE)法を使用する後補償器の一例を示すブロック図である。

【図4】16QAMコンスタレーションの一例を示すプロットである。

【図5】線形予測符号化(LPC)法を使用する後補償器の一例を示すブロック図である。

40

【図6】双方向DFE法とこれに続けてLPC法を使用する後補償器の一例を示すブロック図である。

【図7】ターボ等化ループを有する後補償器の一例を示すブロック図である。

【図8】ここで説明されている例示的实施形態による装置における例示的操作の流れ図である。

【図9】ここで説明されている例示的实施形態による装置における例示的操作のもう1つの流れ図である。

【発明を実施するための形態】

【0056】

前述したノイズカラーリングの問題に対するソリューションは、ホワイトニングフィル

50

タとこれに続けて後補償（非線形）等化器を使用する後補償を含む。線形（TDまたはFD MIMO）等化器の出力で後補償等化処理を実施する受信器の一例を示すブロック図である図1には、後補償が示されている。

【0057】

図1は、線形等化器100に入力される受信信号を示している。線形等化器100の出力ではX偏波成分とY偏波成分が生成され、後補償ブロック102に入力される。その後、後補償ブロック102の出力は順方向誤り訂正（FEC）復号器104に入力される。任意に選べることとして、FEC復号器104の出力が後補償ブロック102にフィードバックされ、図1の103に示されているようにFEC復号ループを形成してもよい。線形等化器100と後補償ブロック102とFEC復号器104は、全体的に、または部分的に、ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアを実行する1つ以上のコンポーネント、またはそれらの組み合わせで実装されてよい。図1の等化器は受信ユニットの一部であってよい。

10

【0058】

図1の受信信号は、ことによるとチャネルによってフィルタされ、ノイズを被る、一連の送信シンボルを含む。いくつかの実施形態において、受信信号は受信器にて光信号のコヒーレント検出によって生成されてよい。別の実施形態において、受信信号は受信器にてマイクロ波信号の検出によって生成されてよい。図1ではX偏波成分とY偏波成分が別々に示されているが、これらの成分はまとめて取り扱われてもよい。

【0059】

線形等化器100は受信信号を等化し、これにより、歪みよる関連ISIを軽減できる。いくつかの実施形態において、線形等化器100は2x2 MIMO（またはバタフライ）等化器である。ただし、別の実施形態では別のタイプの線形等化器を使用してもよい。図1のいくつかの実装において、受信信号は2つの直交偏波成分（XおよびY偏波）として形成されてよく、それぞれの成分は2つの直交位相成分（同相成分Iと直交位相成分Q）を含んでよい。線形等化器100は受信信号をX偏波成分とY偏波成分に分離する。X偏波成分とY偏波成分の分離によって、チャネルによってもたらされるPMDによって生じるISIを軽減できる。受信信号が単一の成分として取り扱われる（すなわち、2つの直交偏波成分として形成されない）別の実施形態も予期される。

20

【0060】

上述したように、線形等化器100はX偏波成分とY偏波成分でノイズの増幅とカラーリングを引き起こす。適切な補正が適用されない限り、この増幅され着色されたノイズはシステムのBER性能を大幅に低下させる恐れがあり、誤りのない後FEC復号を達成するにはより高いSNR（信号対ノイズ比）を必要とする。

30

【0061】

線形等化器100の出力における信号は $r_p[n]$ で表すことができ、ここで、 p は信号の偏波を指し（XまたはY）、 n は受信信号のシンボルインデックスである。変数 $r_p[n]$ は次のように表すことができる。

【数13】

$$r_p[n] = s_p[n] + \bar{z}[n] \quad (1)$$

40

【0062】

ここで、 $s_p[n]$ は送信シンボルであり、

【数14】

$$\bar{z}[n]$$

はカラー付加ノイズである。カラー付加ノイズは相関付加ノイズと呼ばれることもあ

50

る。

【 0 0 6 3 】

ノイズカラーリングの問題に対処するため、フィルタとこれに続く後補償等化器とを含む後補償ブロック102が実装される。いくつかの実施形態において、後補償ブロック102内のフィルタはホワイトニングフィルタである。後補償ブロック102内のフィルタは、X偏波成分とY偏波成分でノイズのカラーリングを軽減する。

【 0 0 6 4 】

後補償ブロック102におけるフィルタリング段の後には、カラーノイズがホワイトニングされる。ただし、フィルタリングの結果として、信号内のシンボルはこのとき相関されている。この相関は信号のX偏波成分とY偏波成分の歪みを引き起こし、ISIに結びつく。後補償ブロック102内の後補償非線形等化器の目的は、フィルタリングの結果としてホワイトニングされたノイズを増幅またはカラーリングすることなく、この相関によるISIを等化することである。結果的に、受信信号の全体的な検出と復号が改善される。

10

【 0 0 6 5 】

いくつかの実施形態において、後補償ブロック102における等化によってノイズ増強はなくなるか最小限になる。

【 0 0 6 6 】

後補償ブロック102における等化の後に、X偏波成分とY偏波成分は復号のためFEC復号器104へ転送される。FEC復号器は、X偏波成分とY偏波成分を復号することで復号済みビットを生成する。いくつかの実施形態では、XおよびY偏波の両方がまとめて送信器で符号化され、受信器で復号されてもよい。FEC復号は受信信号の検出誤差を補正できる。

20

【 0 0 6 7 】

任意のFEC復号ルーブ103を使用する場合は、後補償ブロック102の出力がアプリアリ情報としてFEC復号器104へ送信される。1回の復号の後に、FEC復号器104は、出力を、または対数尤度比 (LLR) の観点から見て外的な情報を、次の等化のためのアプリアリ情報として、後補償ブロック102の後補償等化器に提供する。このプロセスはターボ等化の名で知られている。

【 0 0 6 8 】

これより、後補償を、例えば後補償ブロック102で遂行される後補償を、詳しく説明する。

30

【 0 0 6 9 】

図2を参照すると、後補償器の一例を示すブロック図が示されている。図2は、受信シンボルと、フィルタタップ計算ブロック200と、フィルタ202と、等化器204とを含んでいる。受信シンボルはフィルタタップ計算ブロック200とフィルタ202へ送信される。フィルタタップ計算ブロック200からの出力もフィルタ202へ送信される。フィルタタップ計算ブロック200とフィルタ202の出力は等化器204へ送信される。その後、等化器204の出力はFEC復号器へ送信される。フィルタタップ計算ブロック200とフィルタ202と等化器204は、全体的に、または部分的に、ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアを実行する1つ以上のコンポーネント、またはそれらの組み合わせで実装されてよい。図2の後補償器は等化器の一部であってよい。いくつかの実施形態において、図1の後補償ブロック102は図2に示された後補償器を含む。

40

【 0 0 7 0 】

図2の受信シンボルはカラーノイズを含み、1つの偏波を、または2つの偏波を、含むことがある。これらの受信シンボルは、図1に示された線形等化器100などの線形等化器から受信されてよい。いくつかの実施形態において、受信シンボルは狭帯域フィルタ済み信号に関する。

【 0 0 7 1 】

フィルタタップ計算ブロック200は、チャンネルと、受信シンボルを携えた信号が通過した送信器および受信器の少なくともいずれか一方の質を表すフィルタタップを計算する。このチャンネルと、送信器および受信器の少なくともいずれか一方は、受信シンボルを携え

50

た信号が通過した実質的なチャネルと考えられることができる。上述したように、この実質的なチャネルは線形等化器を含むことがある。フィルタタップは、受信シンボルに関わるノイズカラーリングも表す。フィルタタップは $g = g_1, g_2, \dots, g_M$ と表され、ここで、 M はフィルタ長を表す。フィルタタップはフィルタ係数と考えられることもできる。

【 0 0 7 2 】

いくつかの実施形態において、これらのフィルタタップの計算は、送信器側だけでなく受信器側でも知られている信号であるパイロット信号に基づく。フィルタタップ計算は、自己回帰スペクトル推定や最小二乗平均などの適応的方法を含む様々な方法を用いて遂行されることができる。

【 0 0 7 3 】

図2のいくつかの実装では、効率を上げるため、推定パターンに基づいてタップ数が選択されてよく、メインタップの所定のパーセンテージを上回るタップ値は支えられない。フィルタタップは実数値または複素数値であってよい。

【 0 0 7 4 】

図2のいくつかの実装では、フィルタタップが一度だけ計算される。しかし、他の実装では、フィルタタップが周期的に再計算される。

【 0 0 7 5 】

計算されたフィルタタップはフィルタ202へ送信される。いくつかの実施形態において、フィルタ202は、受信シンボルに関わるカラードノイズをホワイトニングするために使用されるホワイトニングフィルタである。しかし、上述したように、受信シンボルをフィルタすると、フィルタされたシンボルが相関される可能性がある。

【 0 0 7 6 】

フィルタ202から出力されるフィルタ済み信号は $a_p[n]$ と表され、これは次のように表現されることができる。

【 数 1 5 】

$$a_p[n] = \sum_{m=1}^M g[m] s_p[n-m] + \hat{z}[n] \quad (2)$$

【 0 0 7 7 】

ここで、

【 数 1 6 】

$$\hat{z}[n]$$

はフィルタ202でカラードノイズ

【 数 1 7 】

$$\bar{z}[n]$$

をフィルタすることによって生成されるホワイト付加ノイズである。

【 0 0 7 8 】

等化器204は、後補償等化器、非線形等化器、後補償非線形等化器、または第2段等化器と考えられることができる。数通りの等化法が等化器204で使用され得る。一例において、等化器204は最適シンボル単位復号器であるBCJR（バール、カーク、ジェリネック、およびラビブ）法を使用する。別の一例において、等化器204は、ビタビアルゴリズムや軟出力ビタビアルゴリズム（SOVA）などの最尤系列推定（MLSE）法を使用する。MLSE法は最適系列復号器である。しかし、BCJR法とMLSE法はいずれも多大な計算複雑性を伴

10

20

30

40

50

うことがある。

【 0 0 7 9 】

BCJR法とMLSE法、ならびに低減状態双方向法を含むBCJR法およびMLSE法の改良版は、トレリス構造から成る。トレリスの計算複雑性は、シンボルコンスタレーションサイズ（例えば、QPSK（直交位相偏移キーイング）、64-QAM（直交振幅変調））とフィルタ長が増すにつれて指数関数的に増大する。加えて、トレリスは多大な遅延をもたらす可能性がある。これらの問題のため、BCJR法とMLSE法は、トレリス構造の並列化をもつても、リソースに限りがある場合は、ハードウェアで実装することが困難である。ハードウェア等化器実装で制限されるリソースは、電力と、冷却能力と、ゲート数とを含み得る。

【 0 0 8 0 】

図1に示されたFEC復号ループ103などの復号ループの中で後補償等化器が実装される場合は、BCJR法とMLSE法に関わる計算複雑性と遅延が悪化される。これらの実装で、後補償等化器によって生じる計算複雑性と遅延は、広域復号回数と内部FEC復号回数を大幅に制限する可能性がある。

【 0 0 8 1 】

本開示の態様は、より少ないリソースを使用して最適法に匹敵するBER性能でノイズホワイトニングと後補償等化を遂行できる後補償法と後補償器とに関する。これらの態様のいくつかによると、後補償法の計算複雑性と遅延は、シンボルコンスタレーションサイズとホワイトニングフィルタ長と共に直線的に増大する。加えて、後補償法は、より良い等化器性能が求められる場合に組み合わせて実装されることができ、あるいは低計算複雑性が求められる場合に個別に実装されることができ。

【 0 0 8 2 】

本開示のいくつかの実施形態では、後補償等化の一方法として判定帰還等化（DFE）が使用される。DFEは、線形等化器と比べて改善されたBER性能を発揮できる非線形等化法である。DFEは、チャンネルがひどく歪んでいる場合に、例えば、チャンネルインパルス応答のZ変換のルートが単位円に近い場合に、とりわけ有用となり得る。DFE法の計算複雑性もBCJR法やMLSE法と比べて比較的低い。例えば、DFE法の計算複雑性は、シンボルコンスタレーションサイズとホワイトニングフィルタ長と共に直線的に増大する。

【 0 0 8 3 】

図3を参照すると、DFE法を使用する後補償器の一例を示すブロック図が示されている。図3は、送信シンボル s と、ホワイトニングフィルタ300と、ホワイト付加ノイズ

【数 1 8】

\hat{z}

と、フィルタ済み信号 a と、フィードフォワードフィルタ（FFF）302と、推定済みシンボル

【数 1 9】

\bar{s}

および判定済みシンボル

【数 2 0】

\hat{s}

と、判定デバイス304と、フィードバックワードフィルタ（FBF）306とを含んでいる。

10

20

30

40

50

ホワイトニングフィルタ300、FFF 302、およびFBF 306の伝達関数はそれぞれ、 $G(z)$ 、 $F(z)$ 、および $B(z) - 1$ と表される。ここで、 z は複素周波数領域変数を表す。図2の後補償器と同様、図3の後補償器も等化器の一部であってよい。いくつかの実施形態において、図1の後補償ブロック102は図3に示された後補償器を含む。

【0084】

図3で、送信シンボル s はホワイトニングフィルタ300に入力される。ホワイトニングフィルタ300の出力はホワイト付加ノイズ

【数21】

$$\hat{z}$$

10

と結合されてフィルタ済み信号 a を形成する。その後、フィルタ済み信号 a はFFF 302に入力される。FFF 302の出力はFBF 306の出力と結合されて推定済みシンボル

【数22】

$$\bar{s}$$

を形成する。推定済みシンボル

20

【数23】

$$\bar{s}$$

は判定デバイス304に入力され、判定デバイス304は推定済みシンボル

【数24】

$$\bar{s}$$

30

に対して軟判定か硬判定を行い、判定済みシンボル

【数25】

$$\hat{s}$$

を出力する。その後、判定済みシンボル

【数26】

$$\hat{s}$$

40

はFBF 306に入力される。

【0085】

送信シンボル s は線形等化器100などの線形等化器から受信されてよく、ホワイトニングフィルタ300に入力される。図3には示されていないが、ホワイトニングフィルタ300は送信シンボル s に関わるノイズカラーリングを軽減し、ホワイト付加ノイズ

【数27】

50

\hat{z}

を生成する。上述したように、ホワイトニングフィルタ300は送信シンボル s の相関を引き起こすこともある。フィルタ済み信号 a は、これらの相関シンボルとホワイト付加ノイズ
【数28】

 \hat{z}

10

との結合である。図3では送信シンボル s とホワイト付加ノイズ
【数29】

 \hat{z}

が別々の入力として示されているが、具体的な応用では、送信シンボルとホワイト付加ノイズが1つの信号として受信されるであろう。

【0086】

20

上述した式(2)と同様、図3のフィルタ済み信号 a は次のように表現できる。

【数30】

$$a_p[n] = \sum_{m=1}^M g[m] s_p[n-m] + \hat{z}[n] = \mathbf{G} \mathbf{s}_p + \hat{z} \quad (3)$$

【0087】

DFE法はフィルタ済み信号 a を処理し、判定済みシンボル

【数31】

30

 \hat{s}

を提供する。DFE法は2つの主要フィルタを、すなわちFFF 302とFBF 306とを、含む。いずれのフィルタも、最小平均二乗誤差(MMSE)基準に基づいて最適化されることができる。FFF 302はフィルタ済み信号 a を処理し、FBF 306は、判定デバイス304による以前のシンボル判定の加重線形結合を形成する。FBF 306はその後、FFF 302の出力からの以前のシンボルによって生じるISIを打ち消して推定済みシンボル

【数32】

40

 \bar{s}

を生成する。推定済みシンボル

【数33】

 \bar{s}

は次のように表現されることができる。

50

【数 3 4】

$$\bar{s}[n] = \sum_{k=1}^{L_F} f[k]a[n-k] - \sum_{k=1}^{L_B} b[k]\hat{s}[n-k] \quad (4)$$

【0088】

ここで、 $f[k]$ と $b[k]$ はそれぞれ、 $F(z) = \sum_k f[k]z^{-k}$ および $B(z) = \sum_k b[k]z^{-k}$ の時間領域表現である。 L_F と L_B はそれぞれ、FFFおよびFBFのタップ数を表す。 f と b について式(4)を解くと以下の式が生成される。

$$f = ((G - DD^H) + \sigma^2 I)^{-1}g, \text{ および (5)}$$

$$b = D^H f \text{ (6)}$$

10

【0089】

ここで、 D はフィルタ g のコンボリューション行列であり、 G はフィルタタップ g の自己相関行列であり、 σ^2 は実次元のノイズ分散であり、 I は恒等行列である。図3のいくつかの実装では、式(5)および(6)が解かれた後に変数 f および b が固定される。ただし、別の実施形態では、フィルタタップ g が周期的に更新されるため、変数 f および b も相応に更新され得る。

【0090】

DFE法の実装に関わる問題は、式(5)で要求される逆行列計算である。しかし、この計算は、行列 $(G - DD^H) + \sigma^2 I$ が正定値行列であることに注目することによって簡素化されることができる。したがって、 $(G - DD^H) + \sigma^2 I$ はコレスキー分解を用いて $(G - DD^H) + \sigma^2 I = L * L'$ に分解でき、 L は下三角行列である。したがって、 $((G - DD^H) + \sigma^2 I)^{-1} = (L * L')^{-1} = L^{-1} * L'^{-1}$ である。 L は下三角行列であるから、 L の逆数の計算は行変換演算を用いて効率的に実施されることができる。

20

【0091】

判定デバイスは、全体的に、または部分的に、ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアを実行する1つ以上のコンポーネント、またはそれらの組み合わせで実装されてよい。図3のいくつかの実施形態によると、判定デバイス304は、判定済みシンボル

【数 3 5】

$$\bar{s}$$

30

の各々について1回の判定を行う、硬判定スライサなどの硬判定デバイスである。これらの実施形態で、判定済みシンボル

【数 3 6】

$$\hat{s}$$

40

は硬判定シンボルである。DFE法はその後、以前の判定が正しいという仮定のもとで稼働する。

【0092】

別の実施形態によると、判定デバイス304は軟判定デバイスである。軟判定デバイスは信号におけるノイズ分散についての知識を必要とし、判定済みシンボルのより良い推定を提供する。軟判定デバイスは、硬判定デバイスと比べてDFEで誤差伝播の作用を軽減できる。これらの実施形態で、判定済みシンボル

【数 3 7】

50

\hat{s}

は軟判定シンボルである。軟判定デバイスは、2つのステップに基づいて軟判定シンボル
【数 3 8】

 \hat{s}

を生成する。第1のステップで、軟判定デバイスは推定済みシンボル
【数 3 9】

10

 \bar{s}

を構成するビットの対数尤度比 (LLR) λ_b を計算する。これはソフトマッピングの名でも知られている。第2のステップで、軟判定デバイスは計算したLLRを使用して軟判定済みシンボル
【数 4 0】

20

 \hat{s}

を生成する。一例として、QPSKコンスタレーションとコンスタレーションの次元ごとに個別の処理を伴うシンボルの場合、これら2つのステップは次のように遂行されてよい。
【数 4 1】

$$\lambda_b = \frac{2\bar{s}}{\sigma^2}; \text{ および} \quad (7)$$

30

$$\hat{s} = \tanh(0.5\lambda_b) = \tanh\left(\frac{\bar{s}}{\sigma^2}\right) \quad (8)$$

【 0 0 9 3 】

いくつかの実装において、 \tanh 関数の実施は、 \tanh 関数の以下の特性を利用することによって、要素が比較的少ないルックアップテーブルを使用して行われる。

a) \tanh 関数は奇対称を有し、したがって $\tanh(-x) = -\tanh(x)$ であり、

b) \tanh 関数は x が無限大に近づくにつれて1に近づき、したがって $x \rightarrow \infty$ である場合に $\tanh(x) \rightarrow 1$ である。

40

【 0 0 9 4 】

高次QAMコンスタレーションなど、より大きいコンスタレーションが使用される場合は、LLRの計算が計算的により複雑になる可能性がある。しかし、本開示のいくつかの態様は、以下に述べるように、LLRの計算に簡素な式を使用して複雑さを軽減する。

【 0 0 9 5 】

図4は、16QAMコンスタレーションの一例を示すプロットである。図4は、 x 軸上に実次元、 y 軸上に虚次元を含んでいる。コンスタレーションにおける16のシンボルの位置も示されている。

【 0 0 9 6 】

50

図4に示された16QAMコンスタレーションの各次元について、LLRは次のように計算できる。

【数42】

$$\lambda_{b1} = \begin{cases} \bar{s}_d, & |\bar{s}_d| \leq 2 \\ 2(\bar{s}_d - 1), & \bar{s}_d > 2; \text{および} \\ 2(\bar{s}_d + 1), & \bar{s}_d < -2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_{b2} = \frac{4(-|\bar{s}_d|+2)}{\sigma^2} \quad (10)$$

10

【0097】

ここで、dは推定済みシンボル

【数43】

\bar{s}

20

の実または虚数成分を表す。式(9)および(10)を使用し、軟シンボル推定は次のように計算されることができる。

【数44】

$$P = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{4\lambda_{b1}}{\sigma^2}\right)} = 1 - 0.5 \left(1 + \tanh\left(\frac{2\lambda_{b1}}{\sigma^2}\right)\right); \quad (11)$$

$$Q = \tanh\left(\frac{\lambda_{b2}}{2}\right); \text{および} \quad (12)$$

30

$$\hat{s}_d = (2P - 1)Q \quad (13)$$

【0098】

式(9)～(13)はLLRの厳密計算を表さないが、これらの式は厳密計算より計算的に複雑ではないものになり得る。軟シンボル判定デバイスの速度と効率を上げるため、式(11)および(12)では上述したtanh関数の近似が実施されることもできる。

【0099】

40

本開示のさらなる実施形態では、後補償等化の一方法として線形予測符号化(LPC)が使用される。LPCは、過去のサンプルの線形結合に基づいてサンプルの値を予測するプロセスである。線形等化器から受信されるシンボルに関わるノイズは相関され、このノイズ相関を利用することで後補償等化器の動作のさらなる改善に結びつけることができる。換言すると、LPC法が実施されて、過去のシンボルに関連するノイズサンプルに基づいて現在の受信シンボルに関連するノイズサンプルを予測できる。

【0100】

数学的に、LPC法を使用して提供される予測ノイズサンプル

【数45】

50

\hat{z}

は次のように表現されることができる。

【数 4 6】

$$\hat{z}[n] = -q_1\hat{z}[n-1] - q_2\hat{z}[n-2] \dots - q_M\hat{z}[n-M] + e[n] \quad (14)$$

10

【 0 1 0 1】

ここで、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す。いくつかの実施形態において、平均二乗誤差 (MSE) を最小限に抑える予測フィルタは上述したフィルタタップ g に相当し、第1のタップはゼロに設定され、すなわち $g(1) = 0$ である。これらの実施形態で、式(14)は次のように表現されることができる。

【数 4 7】

$$\hat{z}[n] = -g_1\hat{z}[n-1] - g_2\hat{z}[n-2] \dots - g_M\hat{z}[n-M] + e[n] \quad (15)$$

20

【 0 1 0 2】

LPC法の実施に伴う計算複雑性は比較的低いものになり得る。例えば、LPC法はコンスタレーションサイズとは無関係であり、予測フィルタの長さに直線的に依存する。いくつかの実装において、予測フィルタの長さは3~5であってよい。LPC法の一欠点は、LPC法が予測ノイズサンプルに予測誤差を加えることである。しかし、LPC法のいくつかの実装では、予測ノイズサンプルを差し引くことによるノイズ軽減が加えられる予測誤差を上回るため、LPC法は有益である。

30

【 0 1 0 3】

図5を参照すると、LPC法を使用する後補償器の一例を示すブロック図が示されている。図5は、受信信号 r と、判定デバイス500と、判定済みシンボル

【数 4 8】

\hat{s}

と、減算器502と、カラード付加ノイズ

40

【数 4 9】

\bar{z}

と、フィルタタップ g と、LPCブロック504と、予測ノイズサンプル

【数 5 0】

50

\tilde{z}

と、減算器506と、推定済みシンボル

【数51】

 \tilde{s}

10

とを含んでいる。受信信号 r は、判定デバイス500と減算器502と減算器506とに入力される。判定デバイス500からは判定済みシンボル

【数52】

 \hat{s}

20

が出力され、これも減算器502に入力される。カラード付加ノイズ

【数53】

 \bar{z}

はLPCブロック504に入力される。LPCブロック504にはフィルタタップ g も入力される。LPCブロック504からは予測ノイズサンプル

【数54】

30

 \tilde{z}

が出力され、減算器506に入力される。減算器506からは推定済みシンボル

【数55】

 \tilde{s}

40

が出力される。

【0104】

図5では、軟判定か硬判定を使用して受信信号 r がデマッピングされる。したがって、判定デバイス500は軟判定デバイスか硬判定デバイスであってよい。同様に、判定済みシンボル

【数56】

50

\hat{s}

は軟判定シンボルか硬判定シンボルであってよい。いくつかの実施形態において、判定デバイス500は判定デバイス304と同様である。

【0105】

受信シンボル r に関わるノイズの推定を与えるため、減算器502によって受信信号から判定済みシンボル

10

【数57】

 \hat{s}

が差し引かれる。受信シンボル r に関わるノイズの推定はカラード付加ノイズ

【数58】

 \bar{z}

20

である。LPCを使用してカラード付加ノイズ

【数59】

 \bar{z}

がさらに処理されることで予測ノイズサンプル

30

【数60】

 \hat{z}

を生成する。LPCブロック504はカラード付加ノイズ

【数61】

 \bar{z}

40

に対してLPC法を遂行する。LPCブロック504は、LPC法を実施するため、上述した式14か式15を使用できる。減算器506を使用して受信信号 r から予測ノイズサンプル

【数62】

 \hat{z}

が差し引かれ、推定済みシンボル

【数63】

50

\bar{s}

を生成する。減算器502および506は、全体的に、または部分的に、ハードウェア、ファームウェア、ソフトウェアを実行する1つ以上のコンポーネント、またはそれらの組み合わせで実装されてよい。

【0106】

本開示のいくつかの実施形態では、DFE法とLPE法の組み合わせが後補償等化に使用される。例えば、DFE法とこれに続くLPC法が後補償等化に使用されてよい。

10

【0107】

図6を参照すると、双方向DFE法とこれに続けてLPC法を使用する後補償器の一例を示すブロック図が示されている。図6は、受信信号 r と、シンボル順序逆転ブロック600および610と、ホワイトニングフィルタ602および604と、DFEブロック606および608と、推定済みシンボル

【数64】

$\bar{s}, \bar{s}_1, \bar{s}_2$ および \bar{s}

20

と、ノイズ推定ブロック612と、フィルタタップ g と、LPCブロック614とを含んでいる。図6の後補償器は等化器の一部であってよい。いくつかの実施形態において、図1の後補償ブロック102は図6の後補償器を含む。

【0108】

受信信号 r はホワイトニングフィルタ602へ送信され、ホワイトニングフィルタ602はその出力をDFEブロック606へ送信し、推定済みシンボル

【数65】

\bar{s}_1

30

を生成する。受信信号 r はシンボル順序逆転ブロック600にも送信され、シンボル順序逆転ブロック600はその出力をホワイトニングフィルタ604へ、次いでDFEブロック608へ送信し、推定済みシンボル

【数66】

\bar{s}_2

を生成する。その後、DFEブロック608の出力はシンボル順序逆転ブロック610へ送信される。DFEブロック606とシンボル順序逆転ブロック610の出力は結合され、推定済みシンボル

40

【数67】

\bar{s}

を形成する。ノイズ推定ブロック612は受信信号 r に関わるノイズ推定を計算し、これはLPCブロック614へ送信される。LPCブロック614はその後、フィルタタップ g を入力として使用して受信信号 r に関わる予測ノイズを計算する。その後、推定済みシンボル

50

【数 6 8】

$$\tilde{s}$$

を生成するため、減算器616によって受信信号rに関わる予測ノイズが受信信号rから差し引かれる。

【0 1 0 9】

受信信号rはカラードノイズを有する等化済み信号であり、送信シンボルsとカラード付加ノイズ

【数 6 9】

$$\bar{z}$$

との結合である。いくつかの実施形態において、この等化済み信号rは線形等化器100などの線形等化器の出力である。

【0 1 1 0】

ホワイトニングフィルタ602とDFEブロック606の組み合わせは、図3に示された後補償器と同様に動作する。ホワイトニングフィルタ604とDFEブロック608の組み合わせも、図3に示された後補償器と同様に動作する。ただし、受信信号r内の送信シンボルsの順序はシンボル順序逆転ブロック600を使用して逆転されている。シンボル順序逆転ブロック600は、受信信号r内のシンボルの順序を、最初のシンボルが最後のシンボルになるように反転させる。例えば、シンボル順序逆転操作は、 $r(\text{end} : -1 : 1)$ と表現されることができ。推定済みシンボル

【数 7 0】

$$\bar{s}_2$$

が生成された後は、推定済みシンボル

【数 7 1】

$$\bar{s}_1$$

でシンボル順序を一致させるため、シンボル順序逆転ブロック610を使用して再び順序が逆転される。この受信信号の順序を反転させるコンセプトは後方DFEの名で知られており、これは前方DFEと比べて異なるシンボル推定に結びつく可能性がある。

【0 1 1 1】

図6では、フィルタgが実数値ホワイトニングフィルタであると仮定されている。しかし、これは必ずしも双方向DFE法の全ての実装に当てはまるとは限らない。gが前方向のための複素数値ホワイトニングフィルタである場合は、逆方向でホワイトニングフィルタはgの共役になる。

【0 1 1 2】

推定済みシンボル

【数 7 2】

$$\bar{s}_1 \text{ および } \bar{s}_2$$

は平均化されて推定済みシンボル

【数 7 3】

$$\bar{s}$$

を形成する。これらの推定済みシンボル

【数 7 4】

$$\bar{s}$$

10

は、受信信号 r と比べて送信シンボル s に対してより近いユークリッド距離を有することがある。前方DFEと後方DFEと一緒に使用するこの方法は双方向DFEの名で知られており、これは前方DFEのみと比べてSNRで ~ 0.6 dBの利得に結びつくことがある。ただし、DFE法とこれに続いてLPC法を使用する後補償が双方向DFEなしでも遂行されることを理解されたい。いくつかの実施形態によると、前方DFEと後方DFEのいずれか一方のみがLPC法と組み合わせて使用される。

【0 1 1 3】

推定済みシンボル

20

【数 7 5】

$$\bar{s}$$

が生成された後は、受信信号 r に関わるノイズ推定がノイズ推定ブロック612によって計算される。いくつかの実装において、ノイズ推定ブロック612は式

【数 7 6】

$$\text{ノイズ} = r - \bar{f}(\bar{s})$$

30

を使用してこの計算を行い、ここで、

【数 7 7】

$$\bar{f}(\bar{s})$$

は硬または軟判定デバイスなどの判定デバイスを表す。判定デバイス

【数 7 8】

40

$$\bar{f}(\bar{s})$$

は推定済みシンボル

【数 7 9】

$$\bar{s}$$

50

について判定を生成する。いくつかの実施形態において、判定デバイス
【数 8 0】

$$\bar{f}(\bar{s})$$

は判定デバイス304と同様に動作できる。noiseの計算は、例えば減算器によって行われてよい。その後、ノイズ推定はLPCブロック614へ送信される。ノイズ推定ブロック612によって生成されるノイズ推定は粗いノイズ推定と考えられることができる。

【0114】

LPCブロック614はノイズ推定に対してLPC法を遂行する。LPCブロック614は図5に示された後補償器と同様に動作できる。ただし、LPCブロック614に判定デバイスは無い。図6で、LPCブロック614によって使用される予測フィルタはフィルタタップgに基づいており、これらはホワイトニングフィルタ602および604によっても使用される。LPCブロック614は式(15)に示された計算を行うことができ、ノイズ推定ブロック612で計算されるnoiseは式(15)で

【数 8 1】

$$\bar{z}$$

の値として使用される。受信信号rに関わるノイズは相関されるため、LPC法が使用されて、過去のノイズサンプルに基づいて現在のノイズサンプルの値を予測することができる。したがって、LPCブロック614は受信信号rに関わる予測ノイズを生成する。ノイズ推定ブロック612とLPCブロック614の組み合わせはノイズ予測器と考えられることができる。その後、減算器616によって受信信号rに関わる予測ノイズが受信信号rから差し引かれて、推定済みシンボル

【数 8 2】

$$\tilde{s}$$

を形成する。

【0115】

図6の後補償器は、DFE法とLPC法が別々に実施される場合と比べて改善されたBER性能を発揮することがある。例えば、LPC法をDFE法と組み合わせて使用すると、DFE法のみと比べてSNRで~0.1~0.2 dBの利得に結びつくことがある。いくつかの実装において、図6の後補償器は、より少ないリソースを使用してBCJR法に匹敵するBER性能を発揮する。

【0116】

本開示のいくつかの実施形態において、図3、5、および6に示された後補償器は、少なくとも部分的には、図1に示されたターボ等化ループ103などのターボ等化ループの中で実装される。例えば、後補償等化器は、検出性能と復号性能のうち少なくともいずれか一方を向上させるため、FEC復号器とアプリアリ情報を交換できる。後補償等化器は、ターボ等化ループの反復実行のたびに、フィルタ済み信号を等化する。後補償等化器はその後LLR値を出力し、LLR値はスケールされ、復号のときに使用されるアプリアリ情報としてFEC復号器へ送信される。FEC復号器の出力もLLR値を含み、これはスケールされ、以降の反復実行で後補償等化のときに使用されるアプリアリ情報として後補償等化器へ送り返される。

【0117】

10

20

30

40

50

ターボ等化ループにおいて、後補償等化器に関わる計算複雑性と遅延は、実装の観点から見てボトルネック問題を生む可能性がある。本開示のいくつかの実施形態によると、ターボ等化ループに適した低複雑性の後補償等化器実装が提供され、これはBCJR法やMLSE法に匹敵するBER性能を生み出す。

【0118】

図7を参照すると、ターボ等化ループを有する後補償器の一例を示すブロック図が示されている。図7は、受信信号と、フィルタタップ計算ブロック700と、フィルタ702と、DFE/LPCブロック704と、LLR計算ブロック705および707と、LPCブロック706と、スケーリングブロック708および710と、FEC復号器712とを含んでいる。

【0119】

図7で、受信信号はフィルタタップ計算ブロック700へ送信される。受信信号はフィルタ702とLPC等化ブロック706にも送信される。LPC等化ブロック706の出力はLLR計算ブロック707へ送信される。フィルタ702の出力はDFE/LPCブロック704へ送信される。DFE/LPCブロック704の出力はLLR計算ブロック705へ送信される。LLR計算ブロック707とLLR計算ブロック705の出力はスケーリングブロック708へ送信される。スケーリングブロック708の出力はFEC復号器712へ送信される。FEC復号器712の出力はスケーリングブロック710へ送信され、スケーリングブロック710の出力はLPCブロック706へ送信される。

【0120】

図7の受信信号は、カラードノイズの他に一連の送信シンボルを含む。受信信号は、1つの偏波を、または複数の偏波を、含むことがある。受信信号は、図1に示された線形等化器100などの線形等化器から受信されてよい。

【0121】

図7のフィルタタップ計算ブロック700は図2のフィルタタップ計算ブロック200と同様である。フィルタタップ計算ブロック700はフィルタ702で使用するフィルタタップを計算する。いくつかの実装において、フィルタタップはDFE/LPCブロック704のLPC予測フィルタとLPCブロック706でも使用される。フィルタタップは1度計算されてよく、あるいは定期的に計算されてもよい。

【0122】

フィルタタップが計算された後に、図7の後補償器は受信信号内の各シンボルにつきターボ等化ループを複数回実行する。ある特定のシンボルのための第1回のターボ等化ループでは、該特定のシンボルに関わるカラードノイズを軽減するため、フィルタ702を使用するフィルタリングが行われる。このフィルタは図2に示されたフィルタ202と同様である。いくつかの実装において、フィルタ702はホワイトニングフィルタである。

【0123】

第1回でのフィルタ702の後には、DFE/LPCブロック704で後補償等化が行われるが、これには、DFE法、LPC法、またはDFE法とLPC法との組み合わせを使用できる。いくつかの実装では、図6に示された方法と同様の方法を使用してDFE/LPCブロック704で後補償等化が行われる。別の実装では、DFE/LPCブロック704がLPC法をまったく使用しない。これらの実装では、図3に示された後補償等化法を使用してDFE/LPCブロック704で後補償等化が行われてよい。さらなる実装では、DFE/LPCブロック704がDFE法を使用しない。これらの実装では、図5に示された後補償等化法を使用してDFE/LPCブロック704で後補償等化が行われてよい。

【0124】

DFE/LPCブロック704は該特定のシンボルの推定を生成し、これはその後LLR計算ブロック705へ送信される。計算ブロック705はその後、該特定のシンボルの推定について1つのLLR値（または複数のLLR値）を計算する。このLLR値はその後スケーリングブロック708へ送信され、スケーリングブロック708はLLR値に倍率を掛ける。スケーリングブロック708の後に、LLR値はその後FEC復号器712へ送信され、FEC復号器712は送信された符号語を回復する。スケーリングブロック708は、例えば、FEC復号器712の固定小

10

20

30

40

50

数点精度に限りがある場合に実装されてよい。第1回のターボ等化ループでLPCブロック706が迂回されることに注意されたい。

【0125】

図7の第2回のターボ等化ループでは、FEC復号器712からの出力または外的情報がスケールリングブロック710によってスケールされ、LPCブロック706へ送信される。LPCブロック706は、FEC復号器712のスケールされた出力または外的情報をアプリアリ情報として使用して送信シンボルの軟推定を生成し、これらの推定を使用して、受信信号からそれらを差し引くことによってノイズの推定を計算する。次に、LPC法によって受信信号に関わる予測ノイズが計算される。受信信号から予測ノイズが差し引かれ、その後にはソフトデマッピングが続く。LLR計算ブロック707はソフトデマッピングを行って、第2回のターボ等化ループの更新LLR値を生成する。更新LLR値はスケールされ、FEC復号器712へ送り込まれる。いくつかの実装において、LPCブロック706では、図5に示された方法と同様の方法を使用して後補償等化が行われる。

10

【0126】

第2回にFEC復号器712へ送信される軟シンボル推定の更新LLRは、第1回にFEC復号器712へ送信される軟シンボル推定のLLRより正確なものになり得る。図7の後補償法は第2回の後に終了してよい。あるいは、LPCブロック706を使用した軟シンボル推定をさらに改善するため、さらなる反復実行が何回でも行われてよい。例えば、全部で3または4回の反復実行が行われてよい。第1回の後のターボ等化ループではフィルタ702とDFE/LPCブロック704が迂回されることに注意されたい。ターボ等化ループの反復実行が全て行われた後は、受信信号内のシンボルを再生成するため、FEC復号器712の出力にある最終的なLLRが使用されてよい。

20

【0127】

LLR計算ブロック705および707はLLR値を生成するものとして説明されているが、一般的に、LLR計算ブロック705および707は推定済みシンボルについて何らかの適切な信頼性尺度を生成できる。

【0128】

図8は、ここで説明されている例示的实施形態によるノイズホワイトニング後補償の例示的操作800の流れ図である。ブロック802では、第1のフィルタ済み信号を生成するため、シンボルを含む受信信号にホワイトニングフィルタが適用される。その後ブロック804では、受信信号のシンボルの推定を生成するため、第1のフィルタ済み信号にDFEが適用される。任意に選べることとして、ブロック806では、受信信号内のノイズが予測される。任意に選べることとして、その後ブロック808では、シンボル推定を生成するため、受信信号から予測ノイズが差し引かれる。任意に選べることとして、ブロック810では、シンボル推定について第1のLLRセットを生成するため、シンボル推定に対してソフトデマッピングが行われる。任意に選べることとして、ブロック812では、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットにFEC復号が適用される。任意に選べることとして、第1のフィルタ済み信号に適用されるDFEの以降の反復実行のために第2のLLRセットをアプリアリ情報として送信する1回以上の復号ループの実行の一部として、例示的操作800は、814に示されているように、ブロック814からブロック804に復帰してもよい。

30

40

【0129】

例示的操作800は例示的实施形態を例証するものである。ここでは、遂行され得る他の操作の例だけでなく、例証されている操作を遂行する様々なやり方が説明されている。さらなるバリエーションは明白であり得るし、あるいは明白となる。

【0130】

例えば、いくつかの実施形態において、ブロック804でDFEを適用するステップは、第2のフィルタ済み信号を生成するため、第1のフィルタ済み信号をフィードフォワードフィルタするステップと、第1のシンボル推定を生成するため、第2のフィルタ済み信号と第3のフィルタ済み信号を結合するステップと、第1のシンボル推定に基づいて第2のシンボル推定または判定を生成するステップと、第3のフィルタ済み信号を生成するため、第2のシ

50

ンボル推定または判定をフィードバックフィルタするステップとを含んでよい。さらなる実施形態において、第1のシンボル推定に基づいて第2のシンボル推定または判定を生成するステップは、第1のシンボル推定に基づいて軟シンボル判定を生成するステップを含む。いくつかの実施形態において、第1のシンボル推定に基づいて軟シンボル判定を生成するステップは、少なくとも1つの対数尤度比を生成するステップを含む。

【0131】

いくつかの実施形態において、例示的操作800はまた、逆転信号を生成するため、受信信号のシンボルの順序を逆転させるステップと、フィルタ済み逆転信号を生成するため、逆転信号にホワイトニングフィルタを適用するステップと、逆転信号のシンボルについて逆転シンボル推定を生成するため、フィルタ済み逆転信号にDFEを適用するステップと、第3のシンボル推定を生成するため、逆転シンボル推定のシンボルの順序を逆転させるステップと、第4のシンボル推定を生成するため、第2のシンボル推定と第3のシンボル推定を結合するステップと、第4のシンボル推定に基づいてシンボル判定を生成するステップとを含む

10

【0132】

いくつかの実施形態において、ブロック806は、ノイズ推定を生成するため、受信信号からシンボル判定を差し引くステップと、予測ノイズを生成するため、ノイズ推定にLPCを適用するステップとを含む。さらなる実施形態において、LPCを適用するステップは、

【数83】

$$\tilde{z}[n] = -q_1\tilde{z}[n-1] - q_2\tilde{z}[n-2] \dots - q_M\tilde{z}[n-M] + e[n]$$

20

を計算するステップを含み、ここで、

【数84】

\tilde{z}

は予測ノイズを表し、

【数85】

\tilde{z}

30

はノイズ推定を表し、 n は受信信号のシンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す。別の実施形態において、受信信号にホワイトニングフィルタを適用するステップは、フィルタタップを生成するステップを含み、ノイズ推定にLPCを適用するステップは、フィルタタップに基づいて予測フィルタを生成するステップを含む。

40

【0133】

いくつかの実施形態において、例示的操作800はまた、第2のLLRセットを使用して受信シンボルのシンボルを再生成するステップを含む。

【0134】

いくつかの実施形態において、814に示された復号ループは、第1のフィルタ済み信号に適用されるDFEとは異なる等化の以降の反復実行のために第2のLLRセットをアプリアリ情報として送信する1回以上の復号ループを含む。

【0135】

図9は、ここで説明されている例示の実施形態によるノイズホワイトニング後補償の例示的操作900の流れ図である。ブロック902では、受信信号に基づいてシンボル判定が生

50

成される。ブロック904では、シンボル判定に基づいて受信信号内のノイズが予測される。その後ブロック906では、シンボル推定を生成するため、受信信号から予測ノイズが差し引かれる。任意に選べることとして、ブロック908では、シンボル推定について第1のLLRセットを生成するため、シンボル推定に対してソフトデマッピングが行われる。任意に選べることとして、ブロック910では、第2のLLRセットを生成するため、第1のLLRセットにFEC復号が適用される。任意に選べることとして、受信信号でノイズを予測する以降の反復実行のために第2のLLRセットをアプリアリ情報として送信する1回以上の復号ループの実行の一部として、例示的操作900は、912に示されているように、ブロック910からブロック904に復帰してもよい。

【0136】

例示的操作900は例示的实施形態を例証するものである。ここでは、遂行され得る他の操作の例だけでなく、例証されている操作を遂行する様々なやり方が説明されている。さらなるバリエーションは明白であり得るし、あるいは明白となる。

【0137】

例えば、いくつかの実施形態において、ブロック902は、受信シンボルに基づいて軟シンボル判定を生成するステップを含む。別の実施形態において、ブロック902は、受信シンボルに基づいて硬シンボル判定を生成するステップを含む。

【0138】

いくつかの実施形態において、ブロック904は、ノイズ推定を生成するため、受信信号からシンボル判定を差し引くステップと、予測ノイズを生成するため、ノイズ推定にLPC

【数86】

$$\tilde{z}[n] = -q_1\tilde{z}[n-1] - q_2\tilde{z}[n-2] \dots - q_M\tilde{z}[n-M] + e[n]$$

を計算するステップを含み、ここで、

【数87】

\tilde{z}

は予測ノイズを表し、

【数88】

\tilde{z}

はノイズ推定を表し、 n は受信信号のシンボルのシンボルインデックスを表し、 $q = q_1, q_2, \dots, q_M$ は予測フィルタを表し、 e は予測誤差を表す。別の実施形態において、受信信号にホワイトニングフィルタを適用するステップは、フィルタタップを生成するステップを含み、ノイズ推定にLPCを適用するステップは、フィルタタップに基づいて予測フィルタを生成するステップを含む。

【0139】

いくつかの実施形態において、例示的操作900はまた、第2のLLRセットを使用して受信シンボルのシンボルを再生成するステップを含む。

【0140】

いくつかの実施形態において、912に示された復号ループは、LPCとは異なる等化の以降の反復実行のために第2のLLRセットをアプリアリ情報として送信する1回以上の復号ループを含む。

10

20

30

40

50

【 0 1 4 1 】

これまで説明した内容は、本開示の原理の応用を例証するものに過ぎない。当業者によって、本開示の精神と範囲から逸脱せずに別の構成や方法が実施されることができる。

【 0 1 4 2 】

ここに例示されているいずれかのブロック、モジュール、コンポーネント、またはデバイスのハードウェア実装は、集積回路、プリント回路基板、ディスクリット回路、アナログ回路、デジタル回路、およびこれらの組み合わせなど、電気または光回路を含み得る。

【 0 1 4 3 】

さらに、ここに例示されているいずれかのブロック、モジュール、コンポーネント、またはデバイスは、命令を実行するソフトウェアまたはファームウェアを含み得、コンピュータ/プロセッサ読み取り可能命令、データ構造、プログラムモジュール、およびその他データのいずれか1つ以上などの情報の保存のために、1つまたは複数の持続性コンピュータ/プロセッサ読み取り可能記憶媒体を含み得る、またはこれにアクセスし得る。持続性コンピュータ/プロセッサ読み取り可能記憶媒体の非網羅的なリストは、磁気カセット、磁気テープ、磁気ディスクストレージまたはその他の磁気ストレージデバイス、コンパクトディスク読み取り専用メモリー（CD-ROM）、デジタルビデオディスクまたはデジタル多用途ディスク（DVD）、ブルーレイ（TM）ディスク、またはその他の光学式ストレージなどの光学式ディスク、何らかの方法または技術で実装された揮発性および不揮発性、取り外し可能および取り外し不能媒体、ランダムアクセスメモリー（RAM）、読み取り専用メモリー（ROM）、電氣的消去可能プログラム可能読み取り専用メモリー（EEPROM）、フラッシュメモリー、またはその他のメモリー技術を含む。そのような持続性コンピュータ/プロセッサ記憶媒体はデバイスの一部であってよく、あるいはデバイスにアクセス可能または接続可能であってよい。ここで説明されているアプリケーションやモジュールは、そのような持続性コンピュータ/プロセッサ読み取り可能記憶媒体に保管または保持できるコンピュータ/プロセッサ読み取り可能/実行可能命令を使用して実装されてよい。

【 符号の説明 】

【 0 1 4 4 】

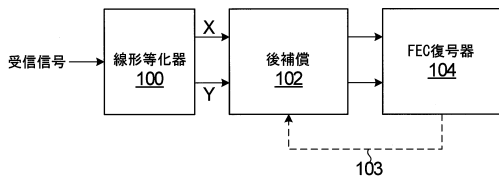
100	線形等化器	
102	後補償ブロック	30
104	FEC復号器	
200	フィルタタップ計算ブロック	
202	フィルタ	
204	等化器	
300	ホワイトニングフィルタ	
302	フィードフォワードフィルタ（FFF）	
304	判定デバイス	
306	フィードバックワードフィルタ（FBF）	
500	判定デバイス	
502	減算器	40
504	LPCブロック	
506	減算器	
600	シンボル順序逆転ブロック	
602	ホワイトニングフィルタ	
604	ホワイトニングフィルタ	
606	DFEブロック	
608	DFEブロック	
610	シンボル順序逆転ブロック	
612	ノイズ推定ブロック	
614	LPCブロック	50

- 616 減算器
- 700 フィルタタップ計算ブロック
- 702 フィルタ
- 704 DFE / LPCブロック
- 705 LLR計算ブロック
- 706 LPCブロック
- 707 LLR計算ブロック
- 708 スケーリングブロック
- 710 スケーリングブロック
- 712 FEC復号器
- 800 例示的操作
- 900 例示的操作

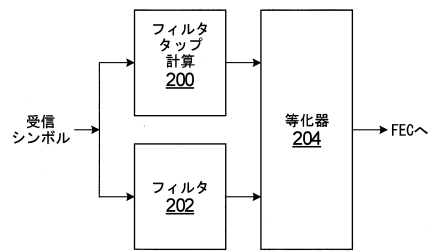
10

【図面】

【図 1】



【図 2】



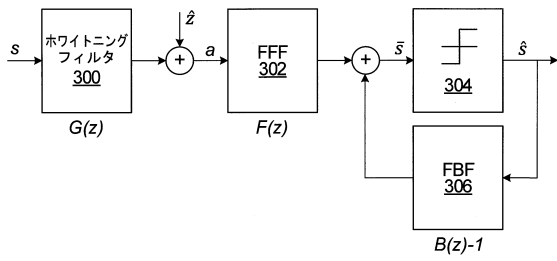
20

30

40

50

【 図 3 】



【 図 4 】

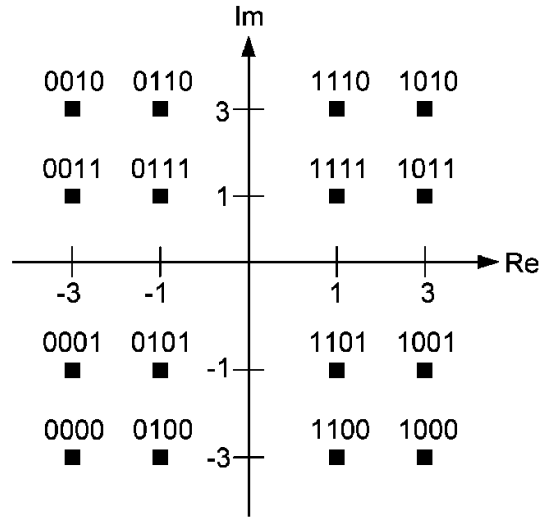
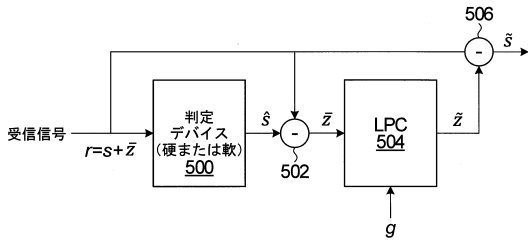
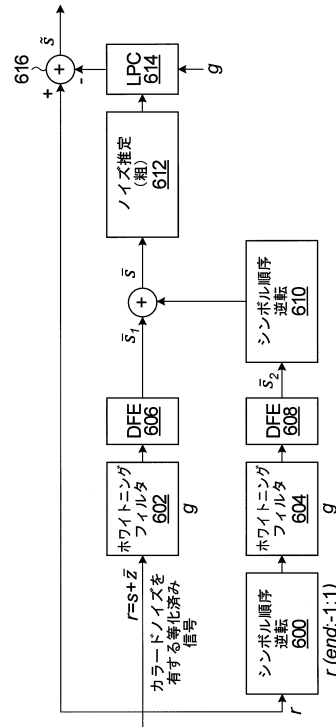


FIG. 4

【 図 5 】



【 図 6 】



10

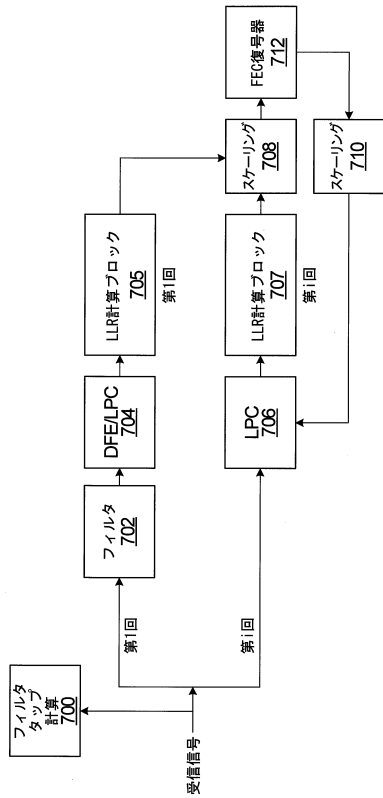
20

30

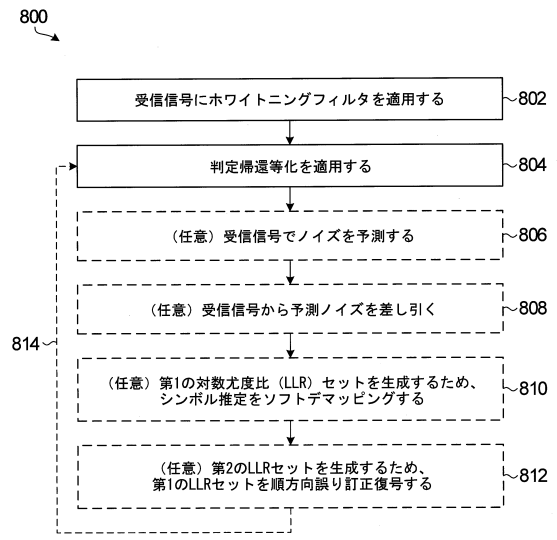
40

50

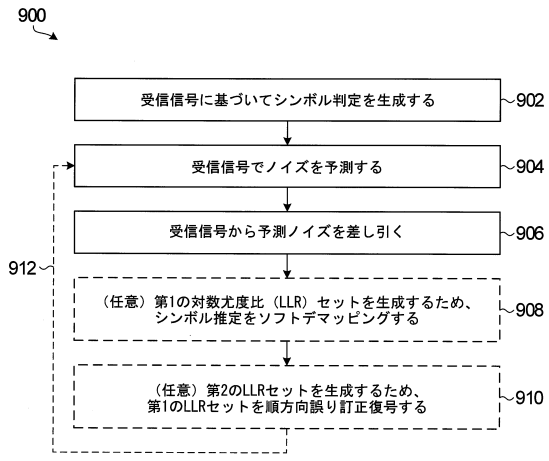
【図7】



【図8】



【図9】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- カナタ・バジェリー・アベニュー・291
- (72)発明者 ホセイン・ナジャフィ
カナダ・オンタリオ・K2M・0E3・カナタ・ペッパービル・クレセント・509
- (72)発明者 ジュホン・ジャン
カナダ・オンタリオ・K2T・1G3・オタワ・インズミル・クレセント・176
- 審査官 対馬 英明
- (56)参考文献 特表2005-512447(JP, A)
米国特許第08542724(US, B1)
特表2017-520974(JP, A)
- (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
H04L 25/03