

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5265590号
(P5265590)

(45) 発行日 平成25年8月14日 (2013. 8. 14)

(24) 登録日 平成25年5月10日 (2013. 5. 10)

(51) Int. Cl.	F I	
HO 4 J 99/00 (2009. 01)	HO 4 J 15/00	
HO 4 J 11/00 (2006. 01)	HO 4 J 11/00	Z
HO 4 B 7/04 (2006. 01)	HO 4 B 7/04	

請求項の数 11 外国語出願 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2010-15556 (P2010-15556)	(73) 特許権者	595020643
(22) 出願日	平成22年1月27日 (2010. 1. 27)		クァアルコム・インコーポレイテッド
(62) 分割の表示	特願2003-572206 (P2003-572206) の分割		QUALCOMM INCORPORATED
原出願日	平成15年2月19日 (2003. 2. 19)		アメリカ合衆国、カリフォルニア州 92
(65) 公開番号	特開2010-158034 (P2010-158034A)		121-1714、サン・ディエゴ、モア
(43) 公開日	平成22年7月15日 (2010. 7. 15)		ハウス・ドライブ 5775
審査請求日	平成22年2月26日 (2010. 2. 26)	(74) 代理人	100108855
(31) 優先権主張番号	10/085, 456		弁理士 蔵田 昌俊
(32) 優先日	平成14年2月26日 (2002. 2. 26)	(74) 代理人	100109830
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 福原 淑弘
前置審査		(74) 代理人	100088683
			弁理士 中村 誠
		(74) 代理人	100103034
			弁理士 野河 信久

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 多重伝送モードを有する多重入力、多重出力 (MIMO) システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

多重入力多重出力 (MIMO) 通信システムにおいて複数の空間サブチャネルでデータを送信する方法であって、

前記 MIMO システムの動作中の信号対雑音および干渉比 (SNR) を決定することと、

前記動作中の SNR に基づいて複数の可能なパワー割当て送信方式の中から選択された特定のパワー割当て送信方式を識別することと、ここにおいて、前記複数の送信方式の各々は、動作中の SNR のそれぞれの範囲のための使用のために指定されている、

前記選択された送信方式に基づいて送信されるべき 1 以上のデータ流を決定することと、

前記選択された送信方式に基づいて前記 1 以上のデータ流に全パワーを割り当てることと、および

前記選択された送信方式に基づいて前記 1 以上のデータ流を処理することとを具備し、

前記複数の送信方式は、部分的 CSI 送信方式およびビーム形成送信方式を含んでおり、前記動作中の SNR がしきい値 SNR より上である場合には前記部分的 CSI 送信方式が選択されて使用され、前記動作中の SNR が前記しきい値 SNR より下である場合には前記ビーム形成送信方式が選択されて使用される、方法。

【請求項 2】

10

20

無線通信システムにおける装置であって、
前記通信システムの動作状態を決定する手段と、
前記決定された動作状態に基づいて複数の可能なパワー割当て送信方式の中から選択された特定のパワー割当て送信方式を識別する手段と、
前記選択された送信方式に基づいて送信されるべき 1 以上のデータ流を決定する手段と、
前記選択された送信方式に基づいて前記 1 以上のデータ流に全送信パワーを割り当てる手段と、および

前記選択された送信方式に基づいて前記 1 以上のデータ流を処理する手段とを具備し、

10

前記特定の送信方式は、前記通信システムの動作中の信号対雑音および干渉比 (S N R) に基づいて選択され、前記複数の送信方式の各々は、動作中の S N R のそれぞれの範囲のための使用のために指定され、

前記複数の送信方式は、部分的 C S I 送信方式およびビーム形成送信方式を含んでおり、前記動作中の S N R がしきい値 S N R より上である場合には前記部分的 C S I 送信方式が選択されて使用され、前記動作中の S N R が前記しきい値 S N R より下である場合には前記ビーム形成送信方式が選択されて使用される、装置。

【請求項 3】

前記無線通信システムは、多重入力多重出力 (M I M O) 通信システムであり、前記複数の送信チャンネルは、前記 M I M O 通信システムの複数の空間サブチャンネルに対応する、請求項 2 記載の装置。

20

【請求項 4】

各データ流についてのレートを、前記データ流によって達成可能な信号対雑音および干渉比 (S N R) に基づいて選択することをさらに具備する、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 5】

通信システムにおける送信装置であって、

前記通信システムの動作状態の表示を受信することと、

前記動作状態に基づいて複数の可能なパワー割当て送信方式の中から選択された特定のパワー割当て送信方式を識別することと、

前記選択された送信方式に基づいて送信されるべき 1 以上のデータ流を決定することと、

30

前記選択された送信方式に基づいて前記 1 以上のデータ流に全送信パワーを割り当てることと、

各データ流についてのレートを前記データ流に割り当てられた送信パワーの量に部分的に基づいて選択することと、

前記選択された送信方式に基づいて前記 1 以上のデータ流の処理を指令することによって、複数の送信チャンネル上でのデータ送信を指令するように動作する制御装置と、

各データ流を前記選択されたレートに基づいて処理してそれぞれのシンボル流を提供するように動作する送信 (T X) データプロセッサと、および

40

1 以上のシンボル流を処理して通信チャンネルによる送信に適した 1 以上の変調された信号を提供するように動作する 1 以上の送信機と

を具備し、

前記複数の送信方式は、部分的 C S I 送信方式およびビーム形成送信方式を含み、

前記制御装置は、前記通信システムの動作中の信号対雑音および干渉比 (S N R) がしきい値 S N R より上である場合には前記部分的 C S I 送信方式を選択するように動作し、前記動作中の S N R が前記しきい値 S N R より下である場合には前記ビーム形成送信方式を選択するように動作する、送信装置。

【請求項 6】

前記制御装置は、前記部分的 C S I 送信方式の場合、各データ流のためにピーク送信パ

50

ワ-を使用し、前記ビーム形成送信方式の場合、単一のデータ流のために全ての送信パワーを割り当てるようにさらに動作する、請求項5記載の送信装置。

【請求項7】

前記ビーム形成送信方式の場合、特異ベクトルに基づいて単一のデータ流についての前記シンボル流を予備調整するように動作するTX MIMOプロセッサをさらに具備する、請求項5記載の送信装置。

【請求項8】

請求項5記載の送信装置を具備する基地局。

【請求項9】

通信システムにおける受信装置であって、

特定の受信機処理方式にしたがって受信された複数のシンボル流を受信して処理し、少なくとも1つの再生されたシンボル流を提供するとともに、再生されたシンボル流のそれぞれについてのチャンネル状態情報(CSI)を導出するように動作する受信(RX) MIMOプロセッサと、

少なくとも1つの再生されたシンボル流を、少なくとも1つの復調および復号方式にしたがって処理して復号されたデータを提供するように動作するRXデータプロセッサと、および

前記CSIを処理して送信されたものを送信装置に返送するように動作するTXデータプロセッサと

を具備する受信装置であって、

特定のパワー割当て送信方式が前記CSIに基づいて複数の可能なパワー割当て送信方式の中から選択され、前記選択されたパワー割当て送信方式に基づいて1以上のデータ流が受信装置に送信され、前記選択されたパワー割当て送信方式に基づいて全送信パワーが1以上のデータ流に割り当てられ、

前記複数の送信方式は、部分的CSI送信方式およびビーム形成送信方式を含んでおり、動作中の信号対雑音および干渉比(SNR)がしきい値SNRより上である場合には前記部分的CSI送信方式が選択され、前記動作中のSNRが前記しきい値SNRより下である場合には前記ビーム形成送信方式が選択される、受信装置。

【請求項10】

前記ビーム形成送信方式の場合、前記RX MIMOプロセッサは、特異ベクトルにより前記複数の受信されたシンボル流を予備調整して単一の再生されたシンボル流を提供するようにさらに動作する、請求項9記載の受信装置。

【請求項11】

前記部分的CSI送信方式の場合、前記RX MIMOプロセッサは、前記複数の受信されたシンボル流を、逐次干渉除去を伴う最小2乗平均エラー(MMSE-SC)受信機処理技術に基づいて処理し、複数の再生されたシンボル流を提供するようにさらに動作する、請求項9記載の受信装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般にデータ通信に関し、とくに、多重チャンネル通信システム(たとえば、多重入力、多重出力(MIMO)システム)に関する。

【背景技術】

【0002】

無線通信システムにおいて、送信機からのRF変調された信号は、複数の伝播路を介して受信機に到達する可能性がある。伝播路の特性は典型的に、フェーディングおよびマルチパスのようないくつかのファクタのために時間的に変化する。有害な通路効果に対抗するダイバーシティを提供して性能を改善するために、多数の送信および受信アンテナが使用されることができる。送信アンテナと受信アンテナとの間の伝播路が線形的に独立している(すなわち、1つの通路上の伝送が別の通路上の伝送の線形結合として形成されてい

10

20

30

40

50

ない) 場合、これは一般に、少なくともある程度事実であるが、データ送信を正しく受信する可能性は、アンテナの数の増加と共に増加する。一般に、送信および受信アンテナの数が増加すると、ダイバーシティは増加し、性能は改善される。

【 0 0 0 3 】

多重入力、多重出力 (MIMO) 通信システムは、データ送信のために多重送信 (N_T) アンテナおよび多重受信 (N_R) アンテナを使用する。 N_T の送信アンテナおよび N_R の受信アンテナにより形成された MIMO チャンネルは、 N_S 個の独立したチャンネルに分解されてもよく、ここで N_S 個 $\min\{N_T, N_R\}$ である。 N_S 個の独立したチャンネルのそれぞれは、MIMO チャンネルの空間サブチャンネルとも呼ばれ、あるディメンションに対応する。MIMO システムは、多重送信および受信アンテナにより生成された追加のディメンションが使用された場合、改善された性能 (たとえば、増加した伝送容量) を提供することができる。たとえば、独立したデータ流はシステムスペクトル効率を増加させるために N_S 個の空間サブチャンネルのそれぞれで送信されることができる。

10

【 0 0 0 4 】

MIMO システムの空間サブチャンネルは種々のチャンネル条件 (たとえば、種々のフェーディングおよびマルチパス効果) を経験する可能性があり、また、所定の量の送信パワーに対して種々の信号対雑音比 (SNR) を達成する可能性がある。その結果、空間サブチャンネルによりサポートされることのできるデータレートは、データ流に割当てられた送信パワーの量およびそれらにより得られた SNR に応じて、サブチャンネルごとに異なったものになる可能性がある。チャンネル条件は典型的に時間と共に変化するため、空間サブチャンネルの伝送容量もまた時間と共に変化する。

20

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 5 】

符号化通信システムにおける重要な問題は、チャンネル条件に基づいて N_S 個の空間サブチャンネルでデータ送信を行うために送信機で利用可能な全送信パワー P_{tot} を効率的に使用することである。空間サブチャンネルでデータを送信するために種々の方式が使用されることができる。各送信方式は MIMO チャンネルに関するあるタイプの情報を必要とすることがあり、さらに、送信機および受信機におけるある信号処理を前提とすることがある。一般に、複雑さの増した送信方式は種々の量の送信パワーを種々の性能の空間サブチャンネルに割当てて、これらのサブチャンネルによる送信の前にデータ流を予め調整することにより、最適に近いスペクトル効率を達成できる可能性がある。しかしながら、これらの送信方式では一般に、MIMO チャンネルに関して多くの情報が必要とされ、このような情報は受信機において獲得し難いことがあり、また、無線リンクリソースが送信機に報告することが要求される。複雑さの少ない送信方式は、限られた動作条件範囲にわたってしか優れた性能を提供することができないが、しかしそれが必要とするチャンネル情報は少ない。

30

【 0 0 0 6 】

したがって、高いスペクトル効率を達成すると共に複雑さの少ない MIMO システムにおいてデータを送信する技術が必要とされている。

40

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 7 】

本発明によれば、システム全体のスペクトル効率が高くなり、および、またはその他の利点が達成されることができるよう、多重チャンネル通信システムにおいて利用可能な伝送チャンネルによりデータを送信する技術が提供される。伝送チャンネルは MIMO システムの空間サブチャンネル、OFDM システムの周波数サブチャンネル、または MIMO-OFDM システムにおける周波数サブチャンネルの空間サブチャンネルに対応することができる。

【 0 0 0 8 】

1 つの特徴において、最適に近いまたはほぼ最適の全体効率を提供するために、複数の

50

送信方式が選択的に使用される。各送信方式は、伝送チャンネルによる送信前のデータ処理のために全チャンネル状態情報(CSI)(以下、説明する)または部分的CSIのいずれが送信機で利用可能であるかに依存する。部分的CSI送信方式に対しては、データ流は各送信アンテナで送信されることができる(たとえば、そのアンテナに対するピーク送信パワーで)。N_T個の送信アンテナの全てまたは一部だけがデータ送信のために任意の所定の瞬間に使用されることができる。

【0009】

全CSI送信方式について、1以上のデータ流が送信機において全CSI処理(または以下に説明するようにその変形)に基づいて処理され、MIMOチャンネルによって送信される。全CSI送信方式は、ウォーターフィリング(water-filling)送信方式、“選択的チャンネル反転”送信方式、“均一”送信方式、“主要固有モード(eigenmode)ビーム形成”送信方式、および“ビーム操縦”送信方式を含んでおり、これらは全て、送信機における全CSI処理に依存する。ウォーターフィリング送信方式は、雑音が少ない伝送チャンネルに多くの送信パワーを割当て、雑音の多いチャンネルには少ない伝送パワーを割当てる。ウォーターフィリング送信方式は最適であり、容量を達成することができる。選択的チャンネル反転送信方式は、事後検出SNRが選択された伝送チャンネルに対して類似するように伝送チャンネルの選択されたものに対して送信パワーを不均一に割当てる。均一送信方式は全送信パワーを全ての伝送チャンネルに等しく割当て、ビーム形成送信方式は、最高の性能を有する単一の伝送チャンネルに全ての送信パワーを割当てる。ビーム操縦送信方式は、単一のデータ流を送信するために使用される全ての送信アンテナに全ての送信パワーを均一に割当てるが、しかしそのデータ流はこれらの送信アンテナから適当な位相で送信される。一般的に、改善された全体的な性能を提供するために、多重モードMIMOシステムにより任意の数およびタイプの送信方式が使用されてもよい。

【0010】

各送信方式は特定の動作条件範囲に対して良好な、または最適に近い性能を提供することができ、それは動作信号対雑音比(SNR)により定量化されることができる。したがって、これらの種々のタイプの複数の送信方式(部分的CSI、全CSI等に基づいた)は、MIMOシステムによりサポートされるSNRの全範囲をカバーする“多重モード”送信方式を形成するように区分的に組合せられてもよい。したがって、任意の所定の瞬間にデータを送信するために使用される特定の送信方式は、システムによりその瞬間に経験される特定の動作条件に依存する。

【0011】

特定の実施形態において、多重チャンネル通信システムにおいて多数の伝送チャンネルでデータを送信する方法が提供される。この方法によると、システムの動作条件(たとえば、動作SNR)が最初に決定され、特定の送信方式が、いくつかの可能な送信方式の中からその決定された動作条件と、その送信機で利用可能なチャンネル状態情報の量とに基づいて選択される。各送信方式は各動作SNR範囲に対する使用を指定されてもよい。その後、選択された送信方式に基づいて、送信されるべき1以上のデータ流が決定される。その後、この1以上のデータ流は選択された送信方式および利用可能なCSIに基づいて処理される。たとえば、各データ流に対して使用するべきデータレートと符号化および変調方式は、CSIに基づいて決定される。1実施形態において、動作SNRがしきい値SNRより上である場合は部分的CSI送信方式の使用が選択され、動作SNRがしきい値SNRより下である場合はビーム形成送信方式の使用が選択される。

【0012】

以下において本発明の種々の特徴および実施形態がさらに詳細に説明されている。本発明はさらに、以下に詳細に説明されるように本発明の種々のアспект、実施形態および特徴を構成する方法、プロセッサ、送信装置、受信装置、基地局、ターミナル、システムおよびその他の装置および素子を提供する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

【図 1】ウォーターフィリング、MMSE-SCを伴う部分的CSI、およびビーム形成送信方式を使用する4×4MIMOシステムに対して得られる3つの効率を示すグラフ。

【図 2】多重モード送信方式に基づいてMIMOシステムにおいて利用可能な伝送チャンネルでデータを送信するプロセスの1実施形態のフロー図。

【図 3】送信システムおよび受信システムの1実施形態のブロック図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

本発明の特徴、性質および利点は、以下の詳細な説明および添付図面からさらに明らかになるであろう。なお、図面において同じ参照符号が対応的に使用されている。

この明細書に記載されているデータ送信技術は、種々の多重チャンネル通信システムに対して使用されることができる。このような多重チャンネル通信システムには、多重入力多重出力(MIMO)通信システム、直交周波数分割多重化(OFDM)通信システム、OFDMを使用するMIMOシステム(すなわち、MIMO-OFDMシステム)およびその他が含まれる。多重チャンネル通信システムはまた符号分割多元アクセス(CDMA)、時分割多元アクセス(TDMA)、周波数分割多元アクセス(FDMA)、または別のある多元アクセス技術を実施する。簡明にするために、とくに多重アンテナ無線通信システムのようなMIMOシステムに関して、本発明のある特徴および実施形態を説明する。

【 0 0 1 5 】

MIMOシステムは、データ送信のために多数の(N_T 個の)送信アンテナおよび多数の(N_R 個の)受信アンテナを使用する。 N_T 個の送信アンテナと N_R 個の受信アンテナによって形成されるMIMOチャンネルは、 $N_R \times N_T$ MIMOシステムと呼ばれ、 N_S 個の独立したチャンネルに分割されることができ、ここで、 $N_S = \min\{N_T, N_R\}$ である。 N_S 個の独立したチャンネルのそれぞれは、MIMOチャンネルの空間サブチャンネル(または伝送チャンネル)とも呼ばれる。空間サブチャンネルの数は、MIMOチャンネルに対する固有モードの数によって決定され、したがってそれは N_T 個の送信アンテナと N_R 個の受信アンテナとの間の応答特性を記述するチャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ に依存する。

【 0 0 1 6 】

チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ の要素は、以下のように独立したガウス確率変数から構成されている：

【数 1】

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix}, \quad \text{式(1)}$$

【 0 0 1 7 】

ここで、 $h_{i,j}$ はj番目の送信アンテナとi番目の受信アンテナとの間の結合(すなわち、複素数利得)である。

【 0 0 1 8 】

MIMOシステムに対するモデルは次のように表されることができる：

$$\underline{y} = \underline{H} \underline{x} + \underline{n} \quad \text{式(2)}$$

ここで、

$\underline{y}$ は受信されたベクトル、すなわち、

10

20

30

40

【数 2】

$$\underline{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N_R}]^T$$

【0019】

であり、ここで、 $\{y_i\}$ は i 番目の受信アンテナで受信されたエントリであり、 $i \in \{1, \dots, N_R\}$ である；

$\underline{x}$ は送信されたベクトル、すなわち、

【数 3】

$$\underline{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N_T}]^T$$

【0020】

であり、ここで、 $\{x_j\}$ は j 番目の送信アンテナから送信されたエントリであり、 $j \in \{1, \dots, N_T\}$ である；

$\underline{H}$ は、MIMO チャンネルに対するチャンネル応答特性マトリックスである；

$\underline{n}$ は $\underline{0}$ の平均ベクトルおよび $\underline{\Lambda}_n = \sigma^2 \underline{I}$ の共分散マトリックスを有する加法的ホワイトガウス雑音 (AWGN) であり、ここで、 $\underline{0}$ はゼロのベクトルであり、 $\underline{I}$ は対角線に沿った 1 と他の全ての箇所における 0 を有する恒等行列であり、 σ^2 は雑音の分散である；

$[\cdot]^T$ は $[\cdot]$ の転置を示す。

【0021】

簡単にするために、MIMO チャンネルは平坦フェーディングチャンネルであると仮定される。この場合、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ の要素はスカラーであり、各送信・受信アンテナ対の間の結合 $h_{i,j}$ は単一のスカラー値によって表されることが可能である。しかしながら、ここに記載されている技術は、異なった周波数において異なったチャンネル利得を有する周波数選択チャンネルに適用されてもよい。このような周波数選択チャンネルにおいては、動作帯域幅は、各帯域が平坦フェーディングチャンネルであるとみなされるように、いくつかの（等しいまたは等しくない）周波数帯域に分割されてもよい。その後、ある所定の送信アンテナの全ての周波数帯域に対して使用された全送信パワーをそのアンテナのピーク送信パワー以内に維持することのようなある制約を条件として、各周波数帯域に対して特定の送信方式が使用されてもよい。このようにして、個々の周波数帯域のチャンネル応答特性がデータ送信において考慮されることができる。

【0022】

伝播環境における散乱のために、 N_T 個の送信アンテナから送信された N_S 個のデータ流は、受信機において互いに干渉する。チャンネル状態情報 (CSI) を使用して、多数のデータ流が空間サブチャンネルで送信されることができる。なお、CSI は MIMO チャンネルの特性を記述したものである。CSI は、“全 CSI” または “部分的 CSI” のいずれかに分類されることができる。全 CSI は、 $(N_R \times N_T)$ MIMO マトリックスにおける各送信・受信アンテナ対の間の伝播路に対する特性を十分に表すもの（たとえば、振幅および位相等）と、およびデータ流に対する適切な変調 / 符号化情報とを含んでいる。部分的 CSI は、たとえば、データ流の信号対雑音および妨害比 (SNR) を含んでいることができる。全または部分的 CSI は、受信機において決定され（たとえば、受信されたパイロットおよび、またはトラフィックデータに基づいて）、送信機に報告されてもよい。

【0023】

全または部分的 CSI のどちらが送信機において利用可能であるかに応じて、種々の送信方式が使用されることができる。全 CSI が利用可能である場合、データ流は MIMO チャンネルの固有モードで送信されることができる。これは、以下に説明するように、チ

10

20

30

40

50

チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ から得られた(右)固有ベクトルのセットに基づいてデータ流を送信機で予備調整することによって行われてもよい。受信機において、送信されたデータ流は、やはりこのマトリックス $\underline{H}$ から得られた(左)固有ベクトルのセットと受信されたシンボル流を乗算することにより再生されることができる。したがって、全CSI(または固有モード)送信方式は、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ の知識に依存する。以下に全CSI送信方式およびこの方式の変形をさらに詳細に説明する。

【0024】

部分的CSIだけが利用可能であるとき、データ流は送信機において予備調整されずに送信アンテナから送信されてもよい。受信機においては、データ流の分離を試みるために、受信されたシンボル流が特定の空間または空間・時間的受信機処理技術にしたがって処理される。部分的CSI送信方式もまた以下においてさらに詳細に説明される。

10

【0025】

全および部分的CSI送信方式の両者について、データレートならびに各データ流に対する符号化および変調は、そのデータ流に対して得られたSNRに依存する。各データ流のSNRは受信機において推定されることができる。その後、推定されたSNRを記述する情報または各データ流に対して使用される特定の符号化および変調方式が送信機に提供され、MIMOチャンネルによる送信の前にそのデータ流を処理するために使用されてもよい。

【0026】

全CSIが利用可能であるとき、データ流の間の干渉を除去または減少する1つの技術は、データ流が直交空間サブチャンネルで効率的に送信されるようにMIMOチャンネルを“対角化する”ことである。MIMOチャンネルを対角化する1つの技術は、以下のように表されることのできるチャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ に関する特異値分解を行うことである：

20

$$\underline{H} = \underline{U} \underline{D} \underline{V}^H \quad \text{式(3)}$$

ここで、

$\underline{U}$ は $N_R \times N_R$ ユニタリマトリックスである(すなわち、 $\underline{U}^H \underline{U} = \underline{I}$)；

$\underline{D}$ は $N_R \times N_T$ マトリックスである；

$\underline{V}$ は $N_T \times N_T$ ユニタリマトリックスである；

“ H ”はあるマトリックスの複素数転置を示す。

30

【0027】

マトリックス $\underline{D}$ の対角エントリは、 λ_i および $i \in \{1, \dots, N_S\}$ によって示される $\underline{G} = \underline{H}^H \underline{H}$ の固有値の平方根であり、ここで、 $N_S = \min\{N_T, N_R\}$ は分解可能なデータ流の数である。 $\underline{D}$ の全ての非対角エントリはゼロである。

【0028】

したがって、対角マトリックス $\underline{D}$ は対角線に沿った負でない実数値とその他の箇所におけるゼロとを含んでおり、ここで、負でない実数値は $d_i = (\lambda_i)^{1/2}$ である。この d_i は、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ の特異値とも呼ばれる。特異値分解は、技術的に知られているマトリックス演算であり、種々の参考文献に記載されている。1つのこのような参考文献は、この明細書において参考文献とされているGilbert Strang氏によって著された本(“Linear Algebra and Its Applications,” Second Edition, Academic Press, 1980)である。

40

【0029】

特異値分解は、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ を2つのユニタリマトリックス $\underline{U}$ および $\underline{V}$ と、ならびに対角マトリックス $\underline{D}$ に分解する。マトリックス $\underline{D}$ は、空間サブチャンネルに対応したMIMOチャンネルの固有モードを記述する。ユニタリマトリックス $\underline{U}$ および $\underline{V}$ はそれぞれ受信機および送信機に対して“ステアリング(steering)”ベクトル(またはそれぞれ左および右固有ベクトル)を含んでおり、これがMIMOチャンネルを対角化するために使用されてもよい。とくに、MIMOチャンネルを対角化するために、以下のように、信号ベクトル $\underline{s}$ が送信機においてマトリックス $\underline{V}$ と予備乗算され、

50

送信されたベクトル $\underline{x}$ を提供することができる：

$$\underline{x} = \underline{V} \underline{s} \quad \text{式(4)}$$

その後、このベクトル $\underline{x}$ は MIMO チャンネルによって受信機に送信される。

【0030】

受信機において、以下のように、受信されたベクトル $\underline{y} = \underline{H} \underline{x} + \underline{n}$ は、マトリックス $\underline{U}^H$ と予備乗算されて、再生されたベクトル $\underline{r}$ を得ることができる：

【数4】

$$\begin{aligned} \underline{r} &= \underline{U}^H \underline{H} \underline{V} \underline{s} + \underline{U}^H \underline{n} \\ &= \underline{D} \underline{s} + \underline{\hat{n}} \end{aligned} \quad \text{式(5)}$$

10

【0031】

式(4)に示されているように、マトリックス $\underline{V}$ による信号ベクトル $\underline{s}$ の予備乗算およびマトリックス $\underline{U}^H$ による受信されたベクトル $\underline{y}$ の予備乗算の結果、実効的な対角チャンネル $\underline{D}$ が得られ、これは信号ベクトル $\underline{s}$ と再生されたベクトル $\underline{r}$ との間の伝達関数である。その結果、MIMO チャンネルは N_s 個の独立した干渉のない直交および平行チャンネルに分解される。これらの独立したチャンネルは、MIMO チャンネルの空間サブチャンネルとも呼ばれる。空間サブチャンネル i または固有モード i は、固有値 λ_i に等しい利得を有しており、ここで、 $i \in I$ であり、集合 I は $I = \{1, \dots, N_s\}$ と定義される。送信機がチャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ の推定値を与えられた場合、 N_s 個の直交空間サブチャンネルを得るために MIMO チャンネルの対角化が行われることができる。

20

【0032】

全 CSI 送信方式に関して、 N_s 個の空間サブチャンネルまたは固有モードのそれぞれで1つのデータ流が送信されることができる。データ送信に使用される各空間サブチャンネルに関して、送信機はそのサブチャンネルに適した変調/符号化情報だけでなく、(右)固有ベクトルもまた与えられる。したがって、 N_s 個の空間サブチャンネルの全てがデータ送信のために使用される場合、送信機はチャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ 、またはユニタリマトリックス $\underline{V}$ のいずれかと、および適切な変調/符号化情報とを与えられる。

【0033】

30

部分的 CSI 送信方式に関しては、 N_s 個の送信アンテナのそれぞれで1つのデータ流が送信されることができる ($\underline{H}$ はフルランク (full-rank) マトリックスであり、 $N_s = N_T = N_R$ を仮定して)。部分的 CSI 送信方式について、送信機は、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ 、またはユニタリマトリックス $\underline{V}$ を提供される必要がない。これは、データ流が MIMO チャンネルにより送信される前に予備調整されないためである。

【0034】

部分的 CSI 送信方式では、受信されたシンボル流を処理して送信されたデータ流から分離するために種々の受信機処理技術が受信機で使用されることができる。これらの受信機処理技術は、空間的受信機処理技術 (平坦フェーディングを有する分散的でないチャンネルに対して使用されることができる) および空間・時間的処理技術 (周波数選択フェーディングを有する分散的なチャンネルに対して使用されることができる) を含んでいる。空間的受信機処理技術はチャンネル相関マトリックス反転 (CCMI) 技術および最小2乗平均エラー (MMSE) 技術を含んでいる。空間・時間的処理技術は、MMSE 線形等化装置 (MMSE-LE)、決定フィードバック等化装置 (DFE)、および最大尤度シーケンス推定装置 (MLSE) を含んでいる。一般に、これらの空間および空間・時間的受信機処理技術では、受信機 (送信機ではなく) においてチャンネル応答特性の推定値が必要とされる。

40

【0035】

改善された性能を提供するために、上述された空間または空間・時間的技術の任意のものと共に “連続的なゼロ化/等化および干渉消去” 受信機処理技術 (“連続的干渉消去”

50

または“連続的消去”とも呼ばれている受信機処理技術)もまた使用されることができる。たとえば、連続的妨害消去は、受信されたシンボル流を受信機において処理してデータ流を再生するためにMMSEと共に使用されることができる(すなわち、MMSE-SC)。

【0036】

種々の受信機処理技術は、米国特許出願第 09/993,087号明細書(“Multiple-Access Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)Communication System,” 2001年11月6日出願)、米国特許出願第 09/854,235号明細書(“Method and Apparatus for Processing Data in a Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)Communication System Utilizing Channel State Information,” 2001年5月11日出願)ならびに米国特許出願第 09/826,481号明細書および第 09/956,449号明細書(2001年3月23日および2001年9月18日にそれぞれ出願され、表題は共に“Method and Apparatus for Utilizing Channel State Information in a Wireless Communication System,”)に詳細に記載されている。これらの特許出願明細書は全てその権利が本出願人に譲渡され、ここにおいて参考文献とされている。

【0037】

全CSI送信方式は、MIMOチャンネルに関する多くの情報(たとえば、マトリックスH)を必要とし、このような情報は典型的に受信機において得られ、送信機に報告される。したがって、全CSI送信方式に関連した高いオーバーヘッド費用が発生する。部分的送信方式はこの追加の情報を必要としない。

【0038】

典型的なMIMOシステムにおいて、 $P_{\max}$ のピーク送信パワーは N_T 個の送信アンテナのそれぞれに対して課されることができる。この場合、 N_T 個の送信アンテナの全てに対して送信機で利用可能な全送信パワー P_{tot} は、次のように表されることができる：

$$P_{\text{tot}} = N_T \cdot P_{\max} \quad \text{式(6)}$$

全送信パワーは、種々の方式に基づいてデータ流に割当てられることができる。

【0039】

全CSI送信方式に基づいて、いくつかの送信方式が導出されることができ、このような送信方式はそれぞれ、全送信パワーが固有モードにどのように割当てられるかに依存(部分的に)している。これらの送信方式は、“ウォーターフィリング(water-filling)”送信方式、“選択的チャンネル反転”送信方式、“均一”送信方式、“主要固有モードビーム形成”(または単に“ビーム形成”)送信方式、および“ビーム操縦”送信方式を含んでいる。少数の追加のおよび、または別の送信方式もまた考慮されることができ、それらは本発明の技術的範囲内である。ウォーターフィリング送信方式に関して、雑音が少ない伝送チャンネルには多くの送信パワーが割当てられ、雑音の多い伝送チャンネルには少ない送信パワーが割当てられるように全送信パワーが割当てられる。選択的チャンネル反転送信方式に関して、全送信パワーは、伝送チャンネルの選択されたものがほぼ同じ事後検出SNRを達成するようにそれらに不均一に割当てられる。均一送信方式に関して、全送信パワーは伝送チャンネルの間で等しく割当てられる。ビーム形成送信方式については、全ての送信パワーは最高の性能を有する単一の伝送チャンネルに割当てられる。ビーム操縦送信方式に関して、全送信パワーは単一のデータ流を送信するために使用される全ての送信アンテナに均一に割当てられるが、しかしそのデータ流はこれらの送信アンテナから適切な位相で送信される。これらの送信方式は、使用を選択された伝送チャンネルのそれぞれに対して送信機における全CSI処理(またはその変形)に依存する。以下、これら種々の全CSIベースの送信方式をさらに詳細に説明する。

【0040】

ウォーターフィリング送信方式は、伝送容量(すなわち、スペクトル効率)が最大化されるように全送信パワー P_{tot} を固有モードに割当てて、ウォーターフィリングパワー割当ては、でこぼこした底面を有する容器の中に固定された量の水を注ぐことに似ており、この場合、各固有モードは容器の底面上のある地点に対応し、任意の所定の地点における

底面の高度は、固有モードに関連付けられた信号対雑音比 (S N R) の逆数に対応している。したがって、ある低い高度は高い S N R に対応し、反対に高い高度は低い S N R に対応している。そして、容器内のその低い地点 (すなわち、高い S N R) が最初に満たされ、高い地点 (すなわち、低い S N R) が後で満たされるように、全送信パワー P_{tot} が容器の中に “ 注がれる ”。パワー分配は、全送信パワー P_{tot} と容器の底面までの深さとに依存する。全送信パワーが全て注ぎ込まれた後の容器に対する水面レベルは、容器内の全ての地点において一定である。その高度が水面レベルより上である地点は満たされない (すなわち、特定のしきい値より低い S N R を有する固有モードは使用されない)。ウォーターフィリング分布は、この明細書において参考文献とされている R o b e r t G . G a l l a g e r 氏による文献 (“ Information Theory and Reliable Communication, ” John Wiley and Sons, 1968) に記載されている。

10

【 0 0 4 1 】

容量は、情報がエラーの任意に低い確率で通信されることのできる最高のスペクトル効率として定義され、典型的にヘルツ当りの秒当りビット (b p s / H z) の単位で与えられる。 γ の S N R を有する 1 つのガウスチャンネルに対する容量は以下のように表されることができ :

$$C = \log_2 (1 + \gamma) \quad \text{式 (7)}$$

【 0 0 4 2 】

P_{tot} の制限された全送信パワーを有する M I M O システムに関して、ウォーターフィリング送信方式は、容量が達成されるまで全送信パワーを N_s 個の空間サブチャンネルに最適に割り当てることができる。ウォーターフィリング送信方式は、最低の雑音分散 (すなわち、最高の S N R) を有する固有モードが合計パワーの最大の部分を受信するように全送信パワー P_{tot} を固有モードに対して分配する。ウォーターフィリングの結果として固有モード i に割り当てられるパワーの量は、 $i = 1 \dots I$ に対して P_i によって表され、ここで、

20

【 数 5 】

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^I P_i \quad \text{式(8)}$$

【 0 0 4 3 】

$i = 1 \dots I$ に対する固有モード i としての P_i の割り当てられた送信パワーに基づいて、固有モード i に対する実効 S N R γ_i は、次のように表されることができ :

$$\gamma_i = (P_i \cdot \lambda_i) / \sigma^2 \quad \text{式 (9)}$$

ここで、全てのサブチャンネルに対して同じ雑音分散を仮定すると、 λ_i はサブチャンネル i 上のチャンネル利得であり、 σ^2 は M I M O チャンネルに対する雑音分散である。したがって、 N_s 個の空間サブチャンネルに対してウォーターフィリング送信方式によって達成される容量は、以下のように表されることができ :

30

【 数 6 】

$$C = \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 (1 + \gamma_i) \quad \text{式(10)}$$

40

【 0 0 4 4 】

各固有モードのスペクトル効率は、 S N R における特定の単調に増加する関数に基づいて決定されることができ。スペクトル効率に対して使用されることのできる 1 つの関数は、式 (7) に示されている容量関数である。この場合、固有モード i に対するスペクトル効率は以下のように表されることができ :

$$\rho_i = \log_2 (1 + \gamma_i) \quad \text{式 (1 1)}$$

システムの合計スペクトル効率は、式 (1 1) に示されているようにそれぞれ決定され

50

ることのできる全ての固有モードのスペクトル効率の和である。

【 0 0 4 5 】

MIMO-OFDMシステムに対してウォーターフィリングパワー割当てを行う特定のアルゴリズムは、米国特許出願第 09/978,337号明細書(“Method and Apparatus for Determining Power Allocation in a MIMO Communication System,” 2001年10月15日出願)に記載されている。MIMOシステムに対してウォーターフィリングパワー割当てを行う特定のアルゴリズムは、米国特許出願第[Attorney Docket No.020038]号明細書(“Reallocation of Excess Power in a Multi-Channel Communication System,” 2002年1月23日出願)に記載されている。これらの特許出願明細書は共にその権利が本出願人に譲渡され、ここにおいて参考文献とされている。

10

【 0 0 4 6 】

選択的チャンネル反転送信方式は、 N_s 個の固有モードの選択されたもので送信されたデータ流の事後検出SNRがほぼ同じになるように、これらの選択された固有モードに全送信パワー P_{tot} を不均一に割当てる。この送信方式では、貧弱な固有モードは選択されず使用されない。類似した事後検出SNRは、同じ符号化および変調方式が全てのデータ流に対して使用されることを可能にし、それによって送信機および受信機の両方における処理が簡単なものになることができる。

【 0 0 4 7 】

類似した事後検出SNRを達成するために送信パワーを割当てる技術は、2001年5月17日に提出された米国特許出願第 09/860,274号明細書、2001年6月14日に提出された米国特許出願第 09/881,610号明細書、および2001年6月26日に提出された米国特許出願第 09/892,379号明細書に記載されている。なお、これら3つの特許出願明細書の表題は全て“Method and Apparatus for Processing Data for Transmission in a Multi-Channel Communication System Using Selective Channel Inversion,”であり、その権利は本出願人に譲渡され、この明細書において参考文献とされている。

20

【 0 0 4 8 】

均一送信方式は、全送信パワー P_{tot} を N_s 個の固有モードの全てに等しく割当てる。これは、 P_{tot}/N_s を各固有モードに割当てることによって達成される。 $i \in I$ に対する固有モード i に対して P_{tot}/N_s の割当てられた送信パワーに基づいて、

【数7】

30

固有モード i に対する実効SNR ρ_i は以下のように表されることができる:

$$\rho_i = \frac{P_{tot} \cdot \lambda_i}{N_s \cdot \sigma^2} . \quad \text{式(12)}$$

【 0 0 4 9 】

したがって、 N_s 個の空間サブチャンネルに対して均一送信方式により達成されるスペクトル効率は、以下のように表されることができる:

【数8】

40

$$\hat{C} = \sum_{i=1}^{N_s} \log_2(1 + \rho_i) . \quad \text{式(13)}$$

【 0 0 5 0 】

ビーム形成送信方式は、全送信パワー P_{tot} を単一の固有モードに割当てる。容量に近付くために、全送信パワーは最高の固有値 λ_{max} に対応した固有モードに割当てられる。したがって、これは、データ送信のために単一の固有モードを使用する制約を与えられたSNRを最大化する。単一(最良)の固有モードに対する実効SNRは、以下のように表されることができる:

50

【数 9】

$$\tilde{\gamma} = \frac{P_{tot} \cdot \lambda_{max}}{\sigma^2} \quad \text{式(14)}$$

【0051】

i I に対する固有値 λ_i は、値の高いものから低いもの順に並べられてもよい。したがって、この場合、 λ_1 は最高の固有値である（すなわち、 $\lambda_1 = \lambda_{max}$ ）。

【0052】

N_s 個の空間サブチャンネルに対してビーム形成送信方式によって達成されるスペクトル効率は、以下のように表されることができる：

10

【数 10】

$$\tilde{C} = \log_2(1 + \tilde{\gamma}) \quad \text{式(15)}$$

【0053】

データ送信のために 1 つの固有モードしか使用されないため、式 (15) は N_s 個の空間サブチャンネルの和を、ウォーターフリリングおよび均一送信方式のそれぞれの式 (10) および (13) の場合のようには含まない。

20

【0054】

ビーム形成送信方式は送信機における全 CSI 処理に基づいているが、この送信方式を実施するためにチャンネル状態情報はほとんど必要とされない。これは、データ送信のために 1 つの固有モードしか使用されないためである。とくに、選択された固有モードに対応した 1 つの特異ベクトルだけが送信機に提供されればよく、この送信機はその後、MIMO チャンネルによる伝送の前にこのベクトルを使用してデータ流を予備調整する。この特異ベクトルは受信機においてチャンネル応答特性マトリックス H に基づいて得られ、送信機に提供されることができる。

【0055】

ビーム操縦送信方式は、単一のデータ流を送信するために使用された全ての送信アンテナに対して全送信パワー P_{tot} を均一に割当てる。ウォーターフリリング送信方式は、低い SNR において、全送信パワーの大部分を主要な固有モードに割当てる傾向があり、この主要な固有モードは最高の固有値 λ_{max} に対応した固有モードである。ビーム形成送信方式では、単一のデータ流は主要な固有モードで送信され、このデータ流は、データ送信に使用された各送信アンテナと関連付けられた複素数利得値によってスケールされ、この複素数利得値は主要な固有モードに対応した特異ベクトルにより決定される。複素数利得値の大きさは、送信アンテナに対して使用される送信パワーの量を決定する。

30

【0056】

ビーム操縦送信方式はビーム形成送信方式に類似しており、MIMO チャンネルによって単一のデータ流を送信する。しかしながら、1 つのデータ流しか送信されないため、伝送チャンネルを直交させ、あるいは、主要な固有モードに対応した単一の伝送チャンネルでのこのデータ流の送信を制限する必要がない。ビーム操縦送信方式は、最良の性能を達成する主要な固有モードに依存するが、しかしデータ送信に使用された全ての送信アンテナに全送信パワーを均一に割当てる。このようにして、高い送信パワーがデータ流に対して使用され、その結果性能が改善されることができる。

40

【0057】

ビーム操縦送信方式では、最高の固有値 λ_{max} に対応した固有モードが最初に識別される（たとえば、受信機において）、この固有モードに対応した特異ベクトルが決定される。この特異ベクトルは、 N_T 個の送信アンテナに対して使用される複素数利得に対する N_T 個の複素数値を含んでいる。ビーム操縦送信方式は、単一のデータ流を N_T 個の送信アンテナ

50

ナからフルパワーで、しかも適当な位相により送信し、これらの位相は特異ベクトル中の N_T 個の複素数利得値の位相である。したがって、特異ベクトル中の N_T 個の要素の位相だけが送信機に提供されればよい。その後、データ流は、 N_T 個の送信アンテナから正規化された（たとえば、フル）送信パワーで、しかも主要なモードに対する位相により送信される。これによって N_T 個の送信アンテナからの送信が受信機において構成的に（またはコヒーレントに）結合されることが可能になり、改善された性能が提供されることができ

【 0 0 5 8 】

いくつかの送信方式もまた、部分的 C S I 送信方式に基づいて得られることができる。1 つの方式においては、ピーク送信パワー P_{max} が各データ流に対して使用され、 N_T 個のデータ流が部分的 C S I 処理を使用して N_T 個の送信アンテナから送信される（すなわち、送信機において予備調整は行われ

10

【 0 0 5 9 】

したがって、多数の送信方式がデータ送信のために使用されることができ

20

【 0 0 6 0 】

図 1 は、上述されたウォーターフィリング、均一、およびビーム形成送信方式を使用する例示的な 4×4 M I M O システムに対して達成される 3 つの効率を示している。効率は相関のない複素数ガウスチャンネルモデルの仮定に基づいて決定され、このモデルでは M I M O チャンネルは加法的ホワイトガウス雑音 (A W G N) を受けるが他の妨害は受けない。

【 0 0 6 1 】

ウォーターフィリング送信方式については、非常に多くのランダムチャンネルセット（すなわち、ランダム固有値を有する空間サブチャンネルのセット）が最初に発生される。その後、雑音分散 σ^2 の種々のディスクリートな値に対してこれらのチャンネルセットが評価され、ここで以下説明するように、各雑音分散値は特定の“動作” S N R に対応する。各チャンネルセットに対して、ウォーターフィリングは、サブチャンネルの固有値に基づいて、および種々の雑音分散値に対して、全送信パワーをそのセット中の空間サブチャンネルに割り当てるために使用される。各セット中の空間サブチャンネルに対する実効 S N R はそのサブチャンネルの固有値、割り当てられた送信パワー、および雑音分散に依存し、式 (9) に示されているように決定されることができ

30

【 0 0 6 2 】

ビーム形成送信方式に関しては、最高の固有値に対応した固有モードだけが選択されて使用されることを除いて、同じランダムに発生されたチャンネルセットが評価される。各チャンネルセットは雑音分散 σ^2 の種々のディスクリートな値に対して同様に評価され、これらのチャンネルセットの効率の統計学的平均が各雑音分散値に対して得られる。均一送信方式に関しては、全送信パワーはランダムに発生された各チャンネルセット中の固有モードに均一に割り当てられる。各セットはまた種々のディスクリートな雑音分散値に対して評価され、チャンネルセットの効率の統計学的平均が各雑音分散値に対して得られる。

40

【 0 0 6 3 】

図 1 に示されているように、各送信方式によって得られた効率が動作 S N R に対して作図されている。動作 S N R は、受信機における加法的ホワイトガウス雑音の累乗の逆数であり、以下のように定義される：

50

$$\gamma_{op} = 1 / \sigma^2 \quad \text{式 (1 6)}$$

【 0 0 6 4 】

動作 S N R は、M I M O チャンネルの動作状態の尺度である。式 (1 6) に示されているように、動作 S N R および雑音分散 σ^2 は逆比例の関連にある。したがって、理解し易くするために、雑音分散の代りに、各送信方式に対する種々の雑音分散値について得られた効率が動作 S N R に対して描かれることができる。図 1 に示されているように、符号 112 で示されたウォーターフィリング送信方式のスペクトル効率は 3 つの送信方式の中で最良であり、容量と等しいことが示されることができ。均一およびビーム形成送信方式に対する効率はそれぞれ、符号 114 および 116 によって示されている。低い S N R では、ビーム形成送信方式は最適（すなわち、ウォーターフィリング送信方式）に近い。これは、これらの S N R で 1 つの固有モードだけが頻繁にアクティブであるためである。高い S N R においては、均一送信方式がウォーターフィリング送信方式の最適性能に近づく。

10

【 0 0 6 5 】

符号 114 によって示されている均一送信方式に対する性能は、送信機において全 C S I 処理を使用して得られる。とくに、式 (1 3) は、

【 数 1 1 】

**効率 $\hat{C}$ が空間サブチャンネルに対する ρ_i の実効 SNR 基について
得られることができること**

20

【 0 0 6 6 】

を示し、式 (1 2) は、固有値 λ_i を得るために全 C S I（たとえば、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ ）が必要とされることを示唆しており、この固有値 λ_i はその後実効 S N R を決定するために使用される。しかしながら、送信されたデータ流を処理して再生するために M M S E - S C 受信機処理技術が受信機で使用された場合、効率：

【 数 1 2 】

$\hat{C}$

30

【 0 0 6 7 】

は、部分的 C S I 送信方式に対して得られることも可能であることが示されることができ。M M S E - S C 受信機処理技術の代りに別のある受信機処理技術が受信機において使用された場合、部分的 C S I 送信方式に対する効率は、式 (1 3) に示されているものより小さくなる可能性がある。

【 0 0 6 8 】

ウォーターフィリング送信方式の最適効率を達成するために、送信機は M I M O チャンネルの十分の知識、すなわち、全 C S I を必要とする。全 C S I は、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ および雑音分散 σ^2 によって提供されることができ。その後、マトリックス $\underline{G} = \underline{H}^H \underline{H}$ の固有モードおよび固有値を決定するために、チャンネル応答特性マトリックス $\underline{H}$ が評価されてもよい（たとえば、特異ベクトル分解を使用して）。その後、ウォーターフィリング送信方式を使用して、全送信パワーが固有値および雑音分散に基づいて固有モードに割当てられることができる。

40

【 0 0 6 9 】

ウォーターフィリング送信方式は、種々のファクタのために、いくつかの M I M O システムに対して好ましいものではなく、利用不可能である。第 1 に、全 C S I は各送信・受信アンテナ対の間のチャンネル利得を測定する必要があるため、その獲得が難しい（たとえば、典型的に受信機において）ことがある。第 2 に、全ての固有モードに対する全 C S I を受信機から送信機に戻して報告するために追加の無線リンクリソースが必要とされる。第 3 に、チャンネル利得を表すために高い正確さ（すなわち、もっと多くのビット）が必

50

要とされる可能性があり、これは、エラーが結果的に直交性における対応した損失になるためである。第4に、MIMOチャンネルが時間的に変化している場合、チャンネル利得は測定および遅延の報告に対してさらに敏感に反応する。これらのファクタのために、いくつかのMIMOシステムに対してウォーターフィリング送信方式を使用することはできない。

【0070】

1つの特徴において、最適に近いまたは最適に近づく全体的な効率を提供するために、見掛け上は準最適効率を有しているが、実施すべきCSIをあまり必要としない複数の送信方式が選択的に使用される。これらの準最適送信方式は、たとえば、上述された部分的CSI送信方式（たとえば、MMSE-SC受信機処理）およびビーム形成送信方式（またはビーム操縦送信方式）を含んでいてもよい。別のおよび、または追加の送信方式もまた使用されることができ、これは本発明の技術的範囲内である。

10

【0071】

準最適送信方式に対して、必要なCSIを送信機に提供することにより“最適に近い”全体的性能が達成されることができ。このCSIは、以下に説明するように、空間的受信機処理を行った後に受信機において決定される N_s 個の固有モードでのデータ送信の“事後処理された”SNRを含んでいてもよい。事後処理されたSNRは、(1)多数の可能な送信方式の中からデータ送信に使用すべき特定の送信方式を選択するために、および(2)各データ流に使用すべきデータレートならびに符号化および変調方式を選択するために送信機によって使用されることができ。

20

【0072】

ビーム形成送信方式に関して、選択された固有モードと関連付けられたスカラー値（たとえば、最高の固有値 $\lambda_{\max}$ に対応した）の特異ベクトル $\underline{v}$ もまた送信機に与えられ、この固有モードでのデータ送信をビーム形成するために使用される。受信機は、送信されたデータ流を再生するために受信されたベクトル $\underline{y}$ に対応した特異ベクトル $\underline{u}$ と予備乗算することができる。

【0073】

部分的CSIだけを使用して高い性能を達成するために、受信機は、全CSIを必要とする均一送信方式により達成されるスペクトル効率を生じさせることのできるMMSE-SC受信機処理技術を使用することができる。

30

【0074】

SNRが減少されるにしたがって、ウォーターフィリング送信方式は、より優れた性能を有する主要固有モードに全送信パワーのより大きい部分を割当てて傾向がある。あるしきい値 $SNR_{y_{th}}$ において、ある優れた方策は、最大固有値に対応した固有モードに全送信パワーを割当ててることである。図1に示されているように、ビーム形成送信方式（プロット116）の性能は、SNRが低くなるにつれて次第にウォーターフィリング送信方式（プロット112）の最適効率に近づく。反対に、SNRが増加するにしたがって、全パワーに関するウォーターフィリング送信方式により割当てられる固有モード当りのパワーの差は減少し、パワー割当てはさらに均一に見える。SNRが増加するにしたがい、雑音分散 σ^2 は減少し、種々の固有モードの高さ(elevation)(σ^2/λ_i として決定された)は低下する。やはり図1に示されているように、均一送信方式およびMMSE-SC方式を伴う部分的CSI（プロット114）の性能は、SNRが高くなるにつれて次第にウォーターフィリング送信方式の効率に近づく。

40

【0075】

受信機におけるMMSE-SC（または等価方式）を伴う部分的CSI送信方式は、ある条件下において均一送信方式のスペクトル効率を、均一送信方式により要求される全CSIに関連した追加の“コスト”を伴わずに達成することができる。図1に示されているように、MMSE-SC方式を伴う部分的CSIのスペクトル効率は低いSNRにおいて実質的に減少する。

【0076】

50

1つの特徴において、MIMOシステムは、広範囲のSNRにわたって改善された性能を提供するために複数の送信方式（たとえば、MMSE-SC方式を伴う部分的CSIおよびビーム形成またはビーム操縦送信方式）を使用することが有効である。MIMOシステムによって使用される各送信方式は各動作モードに対応していてもよい。それ故、“多重モード”MIMOシステムは、チャンネル（または動作）状態に応じてサポートされている種々の動作モード（たとえば、部分的CSIとビーム形成モード）の間で切替えられてもよい。このようにして、高い性能を提供するために、所定の動作状態に対して最良の性能を提供する送信方式が選択されて使用されることができる。

【0077】

図1はまた、部分的CSI（MMSE-SCを伴う）およびビーム形成の両送信方式を使用する多重モードMIMOシステムにより達成される効率に対するプロット120（により表されている）を示している。この多重モードシステムにより任意の動作SNRで達成されるスペクトル効率 C_{mm} は、以下のように表されることができる：

【数13】

$$C_{mm} = \max(\hat{C}, \tilde{C}) \quad \text{式(17)}$$

ここで、 $\hat{C}$ および $\tilde{C}$ は式(13)および(15)によってそれぞれ与えられるMMSE-SCを使用する部分的CSIおよびビーム形成送信方式に対するスペクトル効率である。

【0078】

これら2つの送信方式の使用により直面する効率の最大損失は、 $\gamma_{op} = 0$ dBの動作SNR付近で発生し、それは、4個の送信アンテナおよび4個の受信アンテナを使用するこの例示的なMIMOシステムに対してほぼ1.75 dBである。この多重モードシステムの構成により、効率の損失は低いおよび高いSNRの両方で減少する。図1に示されているように、ビーム形成送信方式は、MIMOシステムに対して拡大された動作範囲を提供する（すなわち、低いSNRをカバーする）ために使用されることができる。MMSE-SCを伴う部分的CSIおよびビーム形成送信方式に対する性能は、相関のないチャンネルモデルを仮定する。チャンネルがさらに相関されるにしたがって、受信機において分解されることのできるデータ流は少なくなる。その結果、MMSE-SCを伴う部分的CSIとビーム形成送信方式との交差点は高いSNRにシフトし、低い側における広範囲のSNRに対して、ビーム形成送信方式が選択された動作モードになる。

【0079】

上述された送信方式のあるもの（たとえば、ビーム操縦送信方式）はまた、システムによって使用されてもよい。別の送信方式もまた使用されることができ、これは本発明の技術的範囲内である。たとえば、“選択的固有モード”送信方式は、あるサブセットの N_s 個の固有モードに全送信パワーを均一に割り当てるために使用されてもよい。この方式は、たとえば、2以上の固有モードがあるしきい値SNRより上の実効SNRを達成した場合等にその使用を選択されてもよい。送信アンテナのいくつかだけがデータ送信に使用され、その後残りの送信アンテナはオフに切替えられる“選択的部分的CSI”送信方式もまた使用されてもよい。

【0080】

ここに記載されている送信方式の変形もまた実施されてもよく、これは本発明の技術的範囲内に含まれている。たとえば、ビーム形成なしに単一のデータ流が N_T 個の送信アンテナの全てによってフルパワーで送信される送信ダイバーシティ方式が使用されてもよい。ある条件下において均一送信方式と同じスペクトル効率を生じさせるMMSE-SC方式を伴う部分的CSIでは、所定のデータ流に対して使用される実際の送信パワーは、

ある所定の（量子化された）データレートに対して必要とされる最小量であるように調節されることができる。

【0081】

一般に、改善された全体的な性能を提供するために任意の数および任意のタイプの送信方式が多重モードMIMOシステムにより使用されてもよい。各送信方式は、ある動作条件（たとえば、ある特定の範囲のSNR）にわたって優れたまたは最適に近い性能を提供する可能性がある。それ故、これらの複数の送信方式は、MIMOシステムによりサポートされている全ての動作条件（たとえば、全範囲のSNR）をカバーする多重モード送信方式を形成するように区分的に組合せられることができる。

【0082】

図1は、一般に平均して事実である3つの（ウォーターフィリング、均一およびビーム形成）送信方式のそれぞれによって達成されるスペクトル効率を示している。しかしながら、図1に示されているスペクトル効率は、特異ベクトルの量子化、チャンネルにおける相関およびその他のファクタに関連した損失を考慮していない。

【0083】

一般に、各送信方式によって任意の所定の瞬間に達成されるスペクトル効率は、動作SNRとその瞬間のチャンネルの関数である。したがって、高い性能を得るために、チャンネル（およびその他のファクタ）は、使用すべき送信方式を選択するときに考慮されてもよい。ゆっくり変化するチャンネルに関して、可能な送信方式を推定するために瞬間的なチャンネル推定値が使用されてもよい。速く変化するチャンネルについては、チャンネルの時間平均をとってチャンネル推定値として使用してもよい。

【0084】

任意の所定の瞬間にデータ送信に使用される特定の送信方式は、種々の方法で選択されてもよい。送信方式の選択は、システムによりその瞬間に経験される特有の動作条件に依存していてもよく、また、さらに別のファクタを考慮してもよい。以下、送信方式を選択するいくつかの方法を説明する。

【0085】

送信方式を選択する1つの方法において、データ送信に使用すべき特定の送信方式は、動作SNRだけに基づいて選択される。この方法は実施が簡単であり、所望のレベルの性能を提供する可能性がある。

【0086】

送信方式を選択する別の方法において、受信機は可能な各送信方式を評価し、最高のスペクトル効率を生じさせる送信方式を選択する。ビーム形成および部分的CSI送信方式だけをサポートしているシステムに関して、受信機はビーム形成送信方式（量子化された特異ベクトルを使用する）およびMMSE-SC（またはある別の受信機処理）方式を伴う部分的CSIに対して達成された性能を評価することができる。その後、受信機は、最高のスループットを生じさせる送信方式を選択してこの情報を送信機に提供することができる。

【0087】

送信方式を選択するさらに別の方法において、受信機は可能な各送信方式を評価し、達成可能なスペクトル効率およびその他の考慮事項に基づいて送信方式の1つを選択する。たとえば、受信機はビーム形成および均一送信方式に対して得られた性能を評価することができる。スペクトル効率の割合（たとえば、ビーム形成スペクトル効率/均一スペクトル効率）があるしきい値より大きい場合、ビーム形成送信方式がその使用のために選択されてもよい。その他の場合は、部分的CSI送信方式が選択されてもよい。均一送信方式は典型的にMMSE-SCを伴う部分的CSI送信方式より評価し“易”く（計算的に廉価で迅速である）、また、置換物として使用されてもよい（受信機は全CSIを得ることが可能であってもよいため、均一送信方式の性能を評価することができる）。しかしながら、ある構成損失のために、均一送信方式のスペクトル効率は、MMSE-SCを伴う部分的CSI送信方式のスペクトル効率と全く同じではない可能性がある。さらに、ビ

10

20

30

40

50

ーム形成送信方式に関連した量子化損失が生じている。したがって、これら種々のファクタを考慮するようにしきい値が選択されてもよい。

【 0 0 8 8 】

任意の所定の瞬間に使用すべき特定の送信方式を選択する別の方法がまた考えられてもよく、これは本発明の技術的範囲内である。一般に、任意の数の可能な送信方式（またはそれらの等価なもの）が評価されてもよく、（１）達成可能なスペクトル効率、（２）評価された構成損失等のような種々のファクタに基づいて、データ送信に使用される特定の送信方式が選択されてもよい。

【 0 0 8 9 】

図２は、多重モード送信方式に基づいてＭＩＭＯシステムにおいてデータを送信するプロセス200の１実施形態のフロー図である。最初に、ＭＩＭＯシステムの動作状態が決定される（ステップ212）。この動作状態は、式（１６）に示されている雑音分散および、またはその他のファクタに基づいて決定されることのできる動作ＳＮＲにより定量化されてもよい。この動作ＳＮＲは、技術的に知られているようにデータと共に送信されたパイロットに基づいて推定されてもよい。

【 0 0 9 0 】

その後、特定の送信方式が、決定された動作状態に基づいて複数の送信方式の中から選択される（ステップ214）。上述したように、任意の数の送信方式がＭＩＭＯシステムによってサポートされることができる。データ送信に使用される特定の送信方式は、この動作ＳＮＲを１以上のしきい値ＳＮＲと比較することによって決定されてもよい。ＭＩＭＯシステムが部分的ＣＳＩおよびビーム形成送信方式だけをサポートしている場合、部分的ＣＳＩ方式は、動作ＳＮＲがしきい値ＳＮＲ_{yth}以上である場合に選択されることができ、また、ビーム形成送信方式は、動作ＳＮＲがしきい値ＳＮＲより小さい場合に選択されることができる。

【 0 0 9 1 】

その後、送信されるべきデータ流の数が決定され、その数は、選択された送信方式に依存する（ステップ216）。たとえば、ビーム形成送信方式では最高の固有値に対応した単一の固有モードで単一のデータ流が送信されることができ、部分的ＣＳＩ送信方式では N_T 個の送信アンテナで N_T 個のデータ流が送信されることができる。その後、システムで利用可能な全送信パワー P_{tot} が選択された送信方式に基づいてその１以上のデータ流に割り当てられる（ステップ218）。その後、選択された送信方式に基づくと共に割り当てられた送信パワーおよび利用可能なＣＳＩにしたがってこの１以上のデータ流が処理される（ステップ220）。図２に示されているプロセスは、スケジューリングインターバルに対応していてもよい各送信インターバルで行われることができる。

【 0 0 9 2 】

この明細書に記載されている送信技術はまた、ＯＦＤＮシステム、ＭＩＭＯ－ＤＦＤＭシステム等のような別の多重チャンネル通信システムに使用されてもよい。

【 0 0 9 3 】

ＯＦＤＮシステムはシステム帯域幅を、一般に周波数ビンまたはサブバンドと呼ばれるいくつかの（ N_F 個の）周波数サブチャンネルに実効的に分割する。各周波数サブチャンネルは、データが変調された各サブキャリア（または周波数トーン）と関連付けられる。周波数サブチャンネルの帯域幅に依存してもよいある特定の時間インターバルである各時間スロットで、変調シンボルが N_F 個の周波数サブチャンネルのそれぞれで送信されてもよい。ＯＦＤＮシステムでは、各周波数サブチャンネルは伝送チャンネルと呼ばれてもよく、このＯＦＤＮシステムに対して $N_C = N_F$ 個の伝送チャンネルが存在する。

【 0 0 9 4 】

ＯＦＤＮシステムの周波数サブチャンネルは、周波数選択性フェーディング（すなわち、異なった周波数サブチャンネルに対する異なった量の減衰）を経験してもよい。周波数サブチャンネルに対する特定の応答特性は、送信アンテナと受信アンテナとの間の伝播路の特性（たとえば、フェーディングおよびマルチパス効果）に依存する。その結果、ある

10

20

30

40

50

所定の量の送信パワーに対する種々の周波数サブチャンネルに対して種々の実効 S/N が得られることがある。この場合、ある特定の送信方式が選択されて、固有モードについて上述した同じ方法で N_F 個の周波数サブチャンネルに対して使用されてもよい。

【0095】

MIMO-OFDMシステムは、 N_S 個の固有モードのそれぞれに対して N_F 個の周波数サブチャンネルを含んでいる。各固有モードの各周波数サブチャンネルは伝送チャンネルと呼ばれており、このMIMO-OFDMシステムに対して $N_C = N_F \cdot N_S$ 個の伝送チャンネルが存在する。MIMO-OFDMシステムにおける各固有モードの周波数サブチャンネルは同様に、異なったチャンネル状態を経験してもよく、所定の量の送信パワーに対して異なった S/N を達成してもよい。この場合、上述したものと同様に、ある特定の送信方式が選択され、 N_F 個の周波数サブチャンネルのそれぞれに対して使用されてもよい。しかしながら、各送信アンテナは P_{max} のピーク送信パワーにより制限されているので、ある所定の送信アンテナの全ての周波数サブチャンネルに対して使用される全送信パワーは P_{max} に制限される。

【0096】

MIMO-OFDMシステムに関して、データ送信に使用すべき特定の送信方式を決定するときに、全ての伝送チャンネル（すなわち、空間および周波数の両ディメンションに対する）が考慮されることができる。その代り、送信方式の選択は、一方のディメンションだけに対する伝送チャンネルが任意の所定の時間に考慮されるように行われてもよい。

【0097】

ここに記載されている技術は、伝送チャンネルのグループに対しても使用されることができる。各グループは任意の数の伝送チャンネルを含んでいてもよく、各動作ポイントと関連付けられていてもよい。各グループは、たとえば、ある特定のデータレートならびにある特定の符号化および変調方式と関連付けられていてもよい独立したデータ流に対して使用されるべき伝送チャンネルを含んでいてもよい。多元アクセス通信システムに関して、各グループは異なった受信機に割当てられる伝送チャンネルと関連付けられてもよい。

【0098】

周波数選択性フェーディングを経験してもよい広帯域MIMOシステムに対しては、動作帯域幅は、各帯域が平坦フェーディングチャンネルとして考慮されることができるよう、いくつかの（等しいまたは等しくない）周波数帯域に分割されることができる。その場合、チャンネル応答特性マトリックス H の各要素は、スカラーではなく線形伝達関数として動作し、各送信・受信アンテナ対の間の結合 $h_{i,j}$ は、各周波数帯域に対して1つのスカラー値の N_F 個のスカラー値のベクトルにより表されてもよい。種々の送信方式が広帯域MIMOシステムに対して使用されてもよく、その中のいくつかを以下に説明する。

【0099】

広帯域MIMOシステムに対する第1の送信方式において、ビーム形成が各周波数帯域に対して使用される。この第1の送信方式の1形態では、最初に各周波数帯域に対して最大固有値が決定され、この固有値に対応した固有モードが選択され、使用される。その後、 N_T 個の送信アンテナの全てに対して送信機で利用可能な全送信パワー P_{tot} に基づいて、これらの固有モードに対する“最適”パワー割当てが決定されることができる。このパワー割当ては、米国特許出願第 09/978,337号明細書に記載されているように、ウォータフーリングを使用して行われてもよい。その後、 N_F 個のデータ流が処理され、 N_F 個の周波数帯域の N_F 個の選択された固有モードで送信される。

【0100】

チャンネル応答特性マトリックス H および雑音分散 σ^2 に応じて、 N_F 個の選択された固有モードで送信された各データ流は種々の事後検出 S/N を達成することができる。1実施形態において、各データ流は、そのデータ流に対してその事後検出 S/N に基づいて選択された各符号化および変調方式に基づいて符号化されて変調される。別の実施形態において、全送信パワー P_{tot} は、全てのデータ流に対してほぼ同じ事後検出 S/N が得られるように割当てられる。この実施形態に関して、全てのデータ流に対して1つの共通した

10

20

30

40

50

符号化および変調方式が使用されることができ、それによって送信機および受信機の両者における処理を簡単なものにすることができる。

【 0 1 0 1 】

類似した事後検出 S/N_R を得るために送信パワーを割当てる技術は、米国特許出願第 09/860,274号明細書、同第 09/881,610号明細書および同第 09/892,379号明細書に記載されている。広帯域 MIMO システムに対して送信機および受信機の両者においてデータを処理する技術は、米国特許出願第 09/993,087号明細書および同第 10/017,308号明細書（“Time-Domain Transmit and Receive Processing with Channel Eigen-mode Decomposition with MIMO System,” 2001年12月7日出願）に記載されている。これらの特許出願明細書は全て、その権利が本出願人に譲渡され、ここにおいて参考文献とされている。

10

【 0 1 0 2 】

広帯域 MIMO システムに対する第 2 の送信方式において、部分的 CSI 送信方式が各周波数帯域に対して使用される。この第 2 の送信方式の 1 形態においては、各送信アンテナに対するピーク送信パワー P_{max} が N_F 個の周波数帯域の間で等しく分割される。その後、 N_S 個のデータ流が処理され、 N_F 個の周波数帯域のそれぞれで送信される。1 実施形態において、各データ流はその達成可能な事後検出 S/N_R に基づいて符号化されて変調されることができる。別の実施形態において、送信機および受信機の両者における符号化および変調を簡単なものにするために、送信パワーは、(1) 各周波数帯域に対する N_S 個のデータ流の全てに対して、(2) 各空間サブチャンネルに対する N_S 個のデータ流の全てに対して、(3) $N_S \cdot N_F$ 個の伝送チャンネルに対するデータ流の全てに対して、あるいは (4) 周波数 / 空間サブチャンネルの任意の組合せを含んでいてもよい各伝送チャンネルグループに対するデータ流の全てに対して、ある共通の符号化および変調方式が使用されることができるように不均一に割当てられてもよい。

20

【 0 1 0 3 】

広帯域 MIMO システムにおいて使用するために選択された各送信方式に関して、送信機は、送信前にデータを適切に処理するのに必要な情報を提供される。たとえば、 N_F 個の周波数帯域のそれぞれに対してビーム形成を使用する第 1 の送信方式に関して、送信機は (1) これら N_F 個の周波数帯域に対する N_F 個の特異ベクトルと、(2) N_F 個の選択された固有モードのそれぞれに対する事後検出 S/N_R または各データ流に対して使用されるべき符号化および変調方式を示す情報とを提供されることができる。 N_F 個の周波数帯域のそれぞれに対して部分的 CSI 送信方式を使用する第 2 の送信方式に対して、送信機は (1) 各データ流または各データ流グループに対する事後検出 S/N_R を提供されることができる。

30

【 0 1 0 4 】

全 CSI または部分的 CSI に基づくことのできる別の送信方式もまた、広帯域 MIMO システムに対して使用されることが可能であり、これは本発明の技術的範囲内にある。これら種々の送信方式により、広帯域 MIMO システムは、データ送信用の個々の周波数帯域のチャンネル応答特性を考慮することが可能となる。

【 0 1 0 5 】

1 実施形態において、1 つの全 CSI または部分的 CSI ベースの送信方式が選択され、第 1 および第 2 の送信方式に関して上述されたように、広帯域 MIMO システムの全ての周波数帯域に対して使用される。これは、送信機および受信機の両者における処理を簡単なものにする。別の実施形態において、各周波数帯域は独立に処理されてもよく、ある所定の送信アンテナの全ての周波数帯域に対して使用される全送信パワーをピーク送信パワー P_{max} 内に維持するように、ある制約を条件として、異なった全 CSI または部分的 CSI ベースの送信方式が選択されて各周波数帯域に対して使用されてもよい。

40

【 0 1 0 6 】

広帯域 MIMO システムに関して、チャンネル応答特性における周波数選択性フェーディングを等化するために、ある等化装置が受信機において使用されてもよい。この場合、狭帯域 MIMO システムに対して利用可能な送信方式が広帯域 MIMO システムに使用さ

50

れることができる。

【 0 1 0 7 】

一般に、送信機および受信機の両方における処理を簡単化することが望ましい。これは、データを送信するために可能な限り少ない符号化および変調方式（たとえば、1つの符号化および変調方式）を使用することにより達成される。これを行う1つの方法は、伝送チャンネルに対して類似した事後検出 SNR が達成されるように、選択的チャンネル反転を使用して送信パワーを不均一に割当てることである。その後、独立したデータ流が処理され（たとえば、ある共通の符号化および変調方式に基づいて）、これらの伝送チャンネルのそれぞれで送信されてもよい。その代りに、1つのデータ流が処理され（たとえば、その共通の符号化および変調方式に基づいて）、デマルチプレクスされてこれらの多数の伝送チャンネルによって送信されてもよい。たとえば、選択的チャンネル反転が上述の第1の送信方式と共に適用されてもよく、1つのデータ流が処理され、 N_F 個の周波数帯域の N_F 個の選択された固有モードによって送信されてもよい。

10

【 0 1 0 8 】

チャンネル状態情報の量子化

全 CSI （たとえば、チャンネル応答特性マトリックス）の代りに量を減少された CSI （たとえば、事後処理 SNR および特異ベクトル）に依存する送信方式を使用することにより、受信機から送信機に報告されることが必要なチャンネル情報の量が大幅に減少されることができる。全 CSI に依存する送信方式では、 $N_R \cdot N_F$ 個の複素数チャンネル利得プラス雑音分散、あるいは等価な情報が送信機に報告される必要がある。反対に、部分的 CSI 送信方式は N_S 個の SNR 値があればよく、ここで $N_S = \min\{N_T, N_R\}$ である。各 SNR 値はマップされ、 $MIMO$ システムによりサポートされている特定の“レート”で表されてもよい。このレートは、対応した送信アンテナでのデータ流に使用されるべき特定のデータレートならびに符号化および変調方式を示している。

20

【 0 1 0 9 】

ビーム形成送信方式は、選択された固有モード（または1つのレート値）およびこの選択された固有モードでのデータ送信をビーム形成するために使用される特異ベクトル $\underline{v}$ に対してただ1つの SNR 値があればよい。特異ベクトルは、各送信アンテナに対して1つずつである N_T 個の複素数チャンネル利得から構成されている。各複素数チャンネル利得の各実数または虚数ディメンションを量子化するために使用されるビットの数を Q で表した場合、特異ベクトルを符号化するために必要とされるビットの総数は、 $2 N_T Q$ である。

30

【 0 1 1 0 】

N_T 個の送信アンテナおよび M 個の可能なレートを有する $MIMO$ システムに対する部分的 CSI およびビーム形成送信方式に対する異なったタイプの CSI を表すために必要とされるビットの数をリストにする。表1において、

【表 1】

シンボル“ $\lceil \cdot \rceil$ ”は、括弧内の量の2番目に高い整数値を表す。

表 1

	部分的CSI	ビーム形成
符号化／変調	$N_T \lceil \log_2(M) \rceil$	$\lceil \log_2(M) \rceil$
特異ベクトル	0	$2N_T Q$

10

【0 1 1 1】

一般に、特異ベクトルに対する複素数チャンネル利得を可能な限り少ないビットに量子化して、送信機に報告される情報の量を減少させることが望ましい。しかしながら、この量子化は性能を著しく劣化させてはならない。

【0 1 1 2】

20

表 2 は、特異ベクトルの複素数チャンネル利得の各ディメンションを表すために使用された種々の数の量子化ビット Q に対する SNR の劣化を (dB で) 示している。表 2 に示されている劣化は、ビーム形成モードで動作する 4×4 MIMO システムに基づいて得られたものである。量子化による SNR の劣化は、量子化ビットの数だけの関数であり、動作 SNR の関数ではない。この劣化は、2 から 5 までの範囲の Q の種々の値に対して示されている。

【0 1 1 3】

表 2

ビットの数 (Q)	2	3	4	5
SNR の劣化 (dB)	6.12	2.7	1.25	0.6

30

表 2 に示されているように、低い 4 ビット / ディメンション (すなわち、 $Q = 4$)、あるいは 8 ビット / 複素数チャンネル利得が特異ベクトルを符号化するために使用されてもよい。5 ビット / ディメンション (すなわち、 $Q = 5$)、あるいは 10 ビット / 複素数チャンネル利得値はさらに良好な性能を提供する。各複素数チャンネル利得を適切に表すために必要とされるビットの数はまた、MIMO システムのディメンションの関数であってもよい。たとえば、 3×3 または 2×2 MIMO システムは、複素数チャンネル利得の (実数または虚数) ディメンション当り 4 または 5 より少ないビットを必要とする。

【0 1 1 4】

システム

図 3 は、この明細書に記載されている種々の特徴および実施形態を実施することのできる送信システム 310 および受信システム 350 の 1 実施形態のブロック図である。

40

【0 1 1 5】

送信システム 310 において、トラフィックデータはデータソース 312 から送信 (TX) データプロセッサ 314 に供給され、この TX データプロセッサ 314 が 1 以上の符号化方式に基づいてトラフィックデータをフォーマット化し、符号化してインターリーブし、符号化されたデータを出力する。その後、この符号化されたデータは、たとえば、データ送信に使用される伝送チャンネルの全てまたはサブセットにおいて時分割多重方式 (TDM) または符号分割多重方式 (CDM) 等を使用してパイロットデータと多重化されてもよい。パイロットデータは、それが存在するならば、典型的に既知の方法で処理された既知のデータパターンである。その後、多重化されたパイロットおよび符号化されたトラフィックデ

50

ータは1以上の変調方式(たとえば、BPSK、QPSK、M-PSKまたはM-QAM等)に基づいて変調され(すなわち、シンボルマップされ)、変調シンボルを提供する。各伝送チャンネルまたは各伝送チャンネルグループに対するデータレート、符号化、インターリーブおよび変調は、制御装置330により与えられる種々の制御信号によって決定されてもよい。

【0116】

TX MIMOプロセッサ320は、送信システム310の現在の動作モードに対応した処理方式にしたがって変調シンボルをさらに処理することができる。各送信方式は、各動作モードと関連付けられてもよく、各動作モードは変調シンボルに対する特定の処理方式に対応していてもよい。各部分的CSI送信方式に対しては、TX MIMOプロセッサ320は各データ流に対する変調シンボル流を各送信機(TMT)322に送るだけである。ビーム形成送信方式に関しては、TX MIMOプロセッサ320は選択された固有モードに対する単一の変調シンボル流を、この固有モードに関連した特異ベクトル $\underline{v}$ に基づいて予備調整する。予備調整はその特異ベクトルに対する N_T 個のエントリのそれぞれと各変調シンボルを乗算することにより行われ、 N_T 個のスケールされたシンボルを提供することができる。したがって、特異ベクトルの N_T 個のエントリに対して N_T 個のスケールされたシンボル流が提供される。特異ベクトルに関する予備調整は、データ流に対してビーム形成を効率的に行う。いずれの場合も、 N_T 個のスケールされたあるいはスケールされない変調シンボル流が送信機322a乃至322tに提供される。

【0117】

各送信機322は各シンボル流を受信して処理する。OFDMシステムでは、各送信機はシンボルを変換して(たとえば、逆高速フーリエ変換(IFFT)を使用して)、OFDMシンボルを形成し、さらに巡回プレフィックスを各OFDMシンボルに付加して対応した伝送シンボルを形成してもよい。各送信機322aは、シンボル流を1以上のアナログ信号に変換し、そのアナログ信号をさらに調整して(たとえば、増幅し、濾波し、変調して)、MIMOチャンネルによる送信に適した変調された信号を生成する。その後、送信機322a乃至322tからの N_T 個の変調された信号は N_T 個のアンテナ324a乃至324tからそれぞれ送信される。

【0118】

受信システム350において、送信された変調された信号は N_R 個のアンテナ352a乃至352rによって受信され、各アンテナ352から受信された信号は各受信機(RCV)354に供給される。各受信機354は受信された信号を調整して(たとえば、濾波し、増幅し、下方変換して)、各サンプル流を提供する。各サンプル流はさらに処理され(再生されたパイロットにより復調され)、対応した受信されたシンボル流($\underline{y}$ として示される)を得ることができる。

【0119】

その後、RX MIMOプロセッサ360が N_R 個のシンボル流を受信し、受信されたシンボル流をいくつかの空間的処理技術の1つに基づいて処理し、 N_T 個の再生されたシンボル流($\underline{r}$ として示される)を提供する。たとえば、RX MIMOプロセッサ360はCCMI、CCMI-SC、MMSE、MMSE-SCまたはその他の受信機処理技術を行ってもよい。これらの種々の受信機処理技術は、上述した米国特許出願第09/993,087号明細書に詳細に記載されている。

【0120】

その後、受信(RX)データプロセッサ362は再生されたシンボルを復調し、デインターリーブし、復号して送信されたトラフィックデータを提供する。RX MIMOプロセッサ360およびRXデータプロセッサ362による処理は、送信機310においてTX MIMOプロセッサ320およびTXデータプロセッサ314より行われた処理とそれぞれ相補的なものである。

【0121】

RX MIMOプロセッサ360はさらに、伝送チャンネルに対するSNRの推定値、最

高の固有値（または最良の S N R ）を有する固有モードに対応した特異ベクトルに対するチャンネル利得等を導出し、この情報を制御装置370に提供することができる。R X データプロセッサ362はまた、受信された各フレームまたはパケットの状態、復号された結果を示す 1 以上の性能計量、およびおそらくその他の情報を提供する。制御装置370は、R X M I M O プロセッサ360および R X データプロセッサ362から受信された情報の全てまたは一部を含んでいる可能性のある関連した C S I を収集する。その後、この C S I は、T X データプロセッサ378によって処理され、変調装置380によって変調され、送信機354a乃至354rによって調整されて送信システム310に返送される。

【 0 1 2 2 】

送信システム310において、受信システム350からの変調された信号がアンテナ324によって受信され、受信機322によって調整され、復調装置340によって復調され、R X データプロセッサ342によって処理されて、受信システムにより報告された関連した C S I を再生する。その後、報告された C S I は制御装置330に提供されて、送信方式の選択と T X データプロセッサ314および T X M I M O プロセッサ320に対する種々の制御信号の発生のために使用される。

10

【 0 1 2 3 】

制御装置330および370はそれぞれ送信システムおよび受信システムにおける動作を指令する。メモリ332および372は、制御装置330および370によってそれぞれ使用されるプログラムコードおよびデータを記憶する。

【 0 1 2 4 】

20

上述した多重モード送信方式を実施するために、制御装置330は、事後処理された S N R 、特異ベクトルおよび、または M I M O チャンネルの特性または動作状態を記述したある別の情報を含んでいることのできる関連した C S I を受信システム350から受信する。その後、制御装置330は、(1) データを送信するために使用すべき特定の送信方式を選択し、(2) 選択された各伝送チャンネルに対して使用すべきレートを決定する。選択された各伝送チャンネルに対して使用されるレート（すなわち、データレートならびに符号化および変調方式）は、データ流に割当てられた送信パワーの量に部分的に基づいて決定される。パワー割当ておよびレート決定はまた、送信システムにおいてではなく、あるネットワークエンティティによって行われてもよい。

【 0 1 2 5 】

30

この明細書に記載されている多重モード伝送技術は、種々の手段により実施されてもよい。たとえば、これらの技術は、ハードウェア、ソフトウェアまたはその組合せで構成されることができる。ハードウェア構成では、これらの技術を実施するために使用される素子は、1 以上の特定用途向け集積回路（ A S I C ）、デジタル信号プロセッサ（ D S P ）、デジタル信号処理装置（ D S P D ）、プログラム可能な論理装置（ P L D ）、フィールドプログラム可能なゲートアレイ（ F P G A ）、プロセッサ、制御装置、マイクロ制御装置、マイクロプロセッサ、この明細書に記載されている機能を行うように設計された他の電子装置、あるいはその組合せられたものにおいて構成されていてもよい。

【 0 1 2 6 】

ソフトウェア構成に関しては、多重モード伝送技術のある特徴は、この明細書に記載されている機能を行うモジュール（たとえば、手続き、機能等）により実施されることができる。ソフトウェアコードは、メモリ装置（たとえば、図 3 のメモリ332）中に記憶され、プロセッサ（たとえば、制御装置330）によって実行されることができる。メモリ装置はプロセッサ内またはプロセッサの外部に構成されることができ、後者の場合には、技術的に知られている種々の手段によってプロセッサと通信するように結合されることができる。

40

【 0 1 2 7 】

この明細書において、参照のため、およびある章の位置を見つけるのを助けるために見出しが含まれている。これらの見出しはここに示されている概念の範囲を制限するものではなく、また、これらの概念は明細書中の他の章に対しても適用可能なものである。

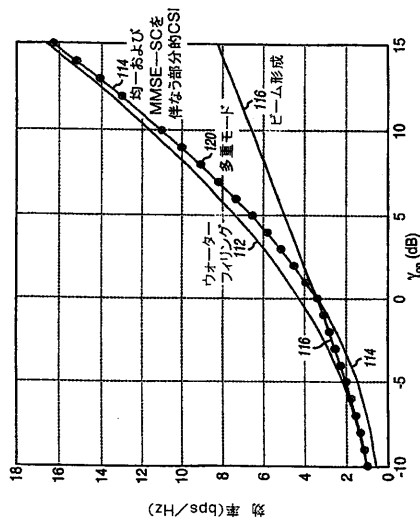
50

【 0 1 2 8 】

上記の開示された実施形態の説明は、当業者が本発明を形成および使用することを可能にするために与えられたものである。これらの実施形態に対して種々の修正は当業者に容易に明らかであり、また、ここに規定されている一般原理は、本発明の技術的範囲を逸脱することなく別の実施形態に適用されることができる。したがって、本発明はここに示されている実施形態に限定されるものではなく、ここに開示されている原理および新しい特徴に一致した広い技術的範囲を与えられている。

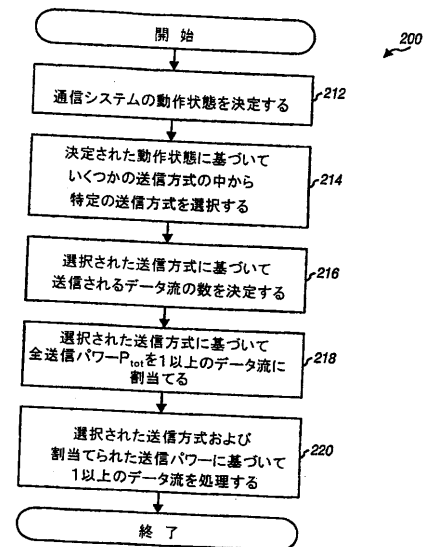
【 図 1 】

図 1



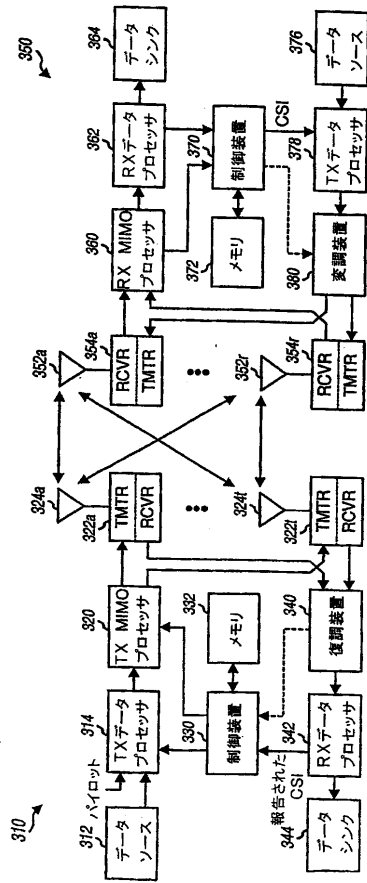
【 図 2 】

図 2



【図 3】

図 3



フロントページの続き

- (74)代理人 100095441
弁理士 白根 俊郎
- (74)代理人 100075672
弁理士 峰 隆司
- (74)代理人 100119976
弁理士 幸長 保次郎
- (74)代理人 100153051
弁理士 河野 直樹
- (74)代理人 100140176
弁理士 砂川 克
- (74)代理人 100158805
弁理士 井関 守三
- (74)代理人 100124394
弁理士 佐藤 立志
- (74)代理人 100112807
弁理士 岡田 貴志
- (74)代理人 100111073
弁理士 堀内 美保子
- (74)代理人 100134290
弁理士 竹内 将訓
- (72)発明者 イリナ・メドベデブ
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州 02144、ソマービル、リバティール・アベニュー 68
、アパートメント・ナンバー2
- (72)発明者 ジェイ・アール・ワルトン
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州 01886、ウェストフォード、レッジウッド・ドライブ
7
- (72)発明者 マーク・ウォーレス
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州 01730、ベッドフォード、マデル・レーン 4

審査官 高野 洋

- (56)参考文献 国際公開第02/005506(WO, A1)
特開2001-352283(JP, A)
特許第4485803(JP, B2)
国際公開第02/001732(WO, A1)
国際公開第01/076110(WO, A1)
国際公開第01/043309(WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04J 99/00
H04B 7/04
H04J 11/00