(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2012-257154
(P2012-257154A)
(43)公開日　平成24年12月27日(2012.12.27)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
H04J 99/00	(2009.01)	H04J	15/00		5K067
H04B 7/04	(2006.01)	H04B	7/04		5K159
H04W 16/28	(2009.01)	H04Q	7/00	234	

審査請求 未請求　請求項の数 8　ＯＬ　（全 22 頁）

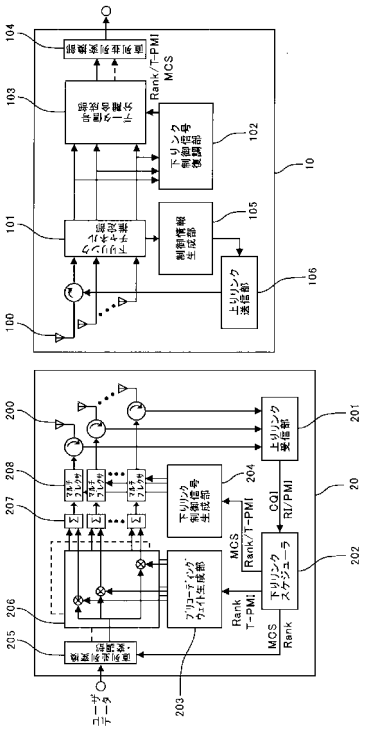
(21)出願番号　特願2011-130132 (P2011-130132)
(22)出願日　平成23年6月10日 (2011.6.10)

(71)出願人　501440684
ソフトバンクモバイル株式会社
東京都港区東新橋一丁目９番１号
(74)代理人　100098626
弁理士　黒田　壽
(74)代理人　100128691
弁理士　中村　弘通
(72)発明者　三上　学
東京都港区東新橋一丁目９番１号　ソフトバンクモバイル株式会社内
(72)発明者　宮下　真行
東京都港区東新橋一丁目９番１号　ソフトバンクモバイル株式会社内

Ｆターム(参考)　5K067 HH22　KK03
5K159 EE02

(54)【発明の名称】無線通信装置、無線伝送システム及び無線伝送方法

(57)【要約】
【課題】受信アルゴリズムの種類に依存する無線伝送特性の差異を吸収して最適なランク情報を簡易に生成することができる無線通信装置、無線伝送システム及び無線伝送制御方法を提供する。
【解決手段】ユーザ装置１０と無線基地局２０との間で送受信される参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ユーザ装置と無線基地局との間におけるＭＩＭＯチャネルの無線伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値λを算出する。また、参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルσ^2を推定し、その干渉雑音レベルσ^2の推定結果に基づいて閾値βを設定し、前記複数の固有値λと閾値βとの比較結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報ＲＩを生成する。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
複数の無線通信装置の間で複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送システムであって、
前記複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出する算出手段と、
前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定する干渉雑音レベル推定手段と、
前記干渉雑音レベルの推定結果に基づいて閾値を設定する閾値設定手段と、
前記複数の特異値又は前記複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するランク情報生成手段と、
を備えることを特徴とする無線伝送システム。
【請求項２】
請求項１の無線伝送システムにおいて、
前記ランク情報生成手段は、前記ＭＩＭＯチャネルの最大送信レイヤ数が２のとき、前記複数の特異値を二乗した値又は前記複数の固有値について最小値を求め、その最小値が前記閾値以上又は前記閾値よりも大きい場合に前記最適な送信レイヤ数を２にすることを特徴とする無線伝送システム。
【請求項３】
請求項１又は２の無線伝送システムにおいて、
前記閾値は、前記干渉雑音レベルを予め設定したオフセット量だけオフセットし、前記パイロット信号の総送信電力で正規化したものであることを特徴とする無線伝送システム。
【請求項４】
請求項１、２又は３の無線伝送システムにおいて、
前記複数の無線通信装置の間の送受信は複数のサブキャリアを用いて行われ、
前記算出手段は、前記複数の無線通信装置の間で送受信される前記複数のサブキャリアのそれぞれによる既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値を二乗した値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値のそれぞれについて、前記複数のサブキャリア間の平均値を算出し、
前記干渉雑音レベル推定手段は、前記複数のサブキャリアのそれぞれによる既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定し、
前記ランク情報生成手段は、前記複数の特異値の二乗平均値又は前記複数の固有値の平均値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルのランク情報を生成することを特徴とする無線伝送システム。
【請求項５】
請求項１、２、３又は４の無線伝送システムにおいて、
前記平均値は、前記複数のサブキャリアごとに重み付けを行って平均したものであることを特徴とする無線伝送システム。
【請求項６】
請求項１、２、３、４又は５の無線伝送システムにおいて、
前記複数の無線通信装置は、データを送信するデータ送信側の無線通信装置と、前記データを受信するデータ受信側の無線通信装置とを用いて構成され、
前記データ受信側の無線通信装置は、前記算出手段と前記干渉雑音レベル推定手段と前記閾値設定手段と前記ランク情報生成手段とを備えるとともに、前記ランク情報生成手段で生成された前記ランク情報を前記データ送信側の無線通信装置に送信するランク情報送信

手段を更に備え、
前記データ送信側の無線通信装置は、前記ランク情報を前記データ受信側の無線通信装置から受信するランク情報受信手段と、前記ランク情報受信手段でランク情報に基づいて、そのランク情報で示される数の送信レイヤによってデータを前記データ受信側の無線通信装置に送信するデータ送信手段と、を備えることを特徴とする無線伝送システム。
【請求項７】
複数の無線通信装置の間で複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送システムにおいて前記データを受信するデータ受信側の無線通信装置であって、
前記複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出する算出手段と、
前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定する干渉雑音レベル推定手段と、
前記干渉雑音レベルの推定結果に基づいて閾値を設定する閾値設定手段と、
前記複数の特異値又は前記複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するランク情報生成手段と、
前記ランク情報生成手段で生成された前記ランク情報を前記データ送信側の無線通信装置に送信するランク情報送信手段と、
を備えることを特徴とする無線通信装置。
【請求項８】
複数の無線通信装置の間で複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送方法であって、
前記複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出するステップと、
前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定するステップと、
前記干渉雑音レベルの推定結果に基づいて閾値を設定するステップと、
前記複数の特異値又は前記複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するステップと、
前記ランク情報で示される数の送信レイヤによって前記複数の無線通信装置の間のデータの送受信を行うステップと、
を含むことを特徴とする無線伝送方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、無線通信装置、無線伝送システム及び無線伝送制御方法に関するものである。
【背景技術】
【０００２】
従来、複数のアンテナでデータの送受信を行なうＭＩＭＯ（Multi Input Multi Output）無線伝送方式が知られている。このＭＩＭＯ無線伝送方式は、第３世代（３Ｇ）移動体通信システムの標準化プロジェクトである３ＧＰＰ（Third Generation Partnership Project）で規定されているＬＴＥ（Long Term Evolution）の通信規格で採用され、またＬＴＥ－Ａｄｖａｎｃｅｄの通信規格でも採用が検討されている。ＭＩＭＯ無線伝送方式を採用した移動体通信システムでは、データ送受信を行う複数の無線通信装置のうち一方の

無線通信装置である基地局装置（ｅＮｏｄｅ－Ｂ）と他方の無線通信装置である移動局（ＵＥ：ユーザ装置）との間で、複数のアンテナを用いた複数の異なる送信レイヤ（ストリーム）によるデータの送受信を行うことにより、ＭＩＭＯ空間多重方式やＭＩＭＯダイバーシティ方式による無線伝送を行うことができる。ＭＩＭＯ空間多重方式は、同じ無線リソース（周波数及び時間）を用いて複数のアンテナから異なる信号を並列に送信する方式であり、ＭＩＭＯダイバーシティ方式は、複数のアンテナから同一の信号を空間－時間（又は、空間－周波数）符号化により送信する方式である。また、ＬＴＥ/ＬＴＥ－Ａｄｖａｎｃｅｄでは、ＭＩＭＯ空間多重方式およびＭＩＭＯダイバーシティ方式共に、送信側でプリコーディングが適用されるが、受信側からのフィードバック制御を用いない開ループ型(Open-Loop MIMO)と受信側からのフィードバック情報を用いる閉ループ型(Closed-Loop MIMO)がある（非特許文献１、非特許文献２、非特許文献３参照）。

【０００３】

上記ＭＩＭＯ無線伝送方式では、受信ＳＩＮＲ（Signal-to-Interference and Noise power Ratio）及びアンテナ間のフェージング相関などのチャネル状態に応じて送信レイヤ数（「空間多重数」又は「ランク」とも呼ばれる）を適応制御するランクアダプテーション制御が適用される。送信レイヤ数が１の場合は、ＭＩＭＯダイバーシティ方式に対応し，送信レイヤ数が２以上の場合はＭＩＭＯ空間多重方式に対応する。従って、ランクアダプテーション制御は、ＭＩＭＯダイバーシティ方式とＭＩＭＯ空間多重方式をチャネル状態によって適応的に切替える制御に対応する。このランクアダプテーション制御を適用するために、受信側の移動局（ＵＥ）は送信側の基地局（ｅＮｏｄｅ－Ｂ）に対して、チャネル品質情報（ＣＱＩ：Channel Quality Indicator）に加えて、適切な送信レイヤ数に関するランク情報（ＲＩ：Rank Indicator）をフィードバックすることにより、基地局が動的な送信レイヤ数の制御を行う（非特許文献４　参照）。

【０００４】

また、例えば特許文献１には、ＬＴＥの下りリンクを対象とし、移動局（ＵＥ、受信側）によって決定されたランク情報ＲＩを基地局（ｅＮｏｄｅ－Ｂ、送信側）が上りリンクを用いたフィードバックにより取得し、この取得したランク情報ＲＩを移動局に固有のオフセット値を用いて調整し、調整されたランク情報ＲＩに基づいて、移動局への同時送信に使用するストリーム数（送信レイヤ数）を決定する基地局装置が開示されている。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００５】

上記ランク情報ＲＩは、受信側における受信ＳＩＮＲや送信アンテナ間および受信アンテナ間のフェージング相関といった無線伝送路の状態に応じて生成するのが好ましい。例えば、受信ＳＩＮＲが高くかつ送信アンテナ間および受信アンテナ間のフェージング相関が低い場合には、ＭＩＭＯ無線伝送方式に適しているため送信レイヤ数を増やし、それ以外の場合には送信レイヤ数を減らすように、ランク情報ＲＩを生成する。ところで、ＭＩＭＯ無線伝送方式の無線伝送特性（スループット特性）は、一般に無線伝搬路の状態だけでなく、チャネル推定や複数信号分離等の受信アルゴリズムにも依存し、特にＭＩＭＯ空間多重においてその影響が顕著であり、一方ＭＩＭＯダイバーシティではその影響は比較的少ないことが知られている。例えば、ＭＩＭＯ空間多重方式において、最適な複数信号分離法として知られる最尤推定検出（ＭＬＤ：Maximum Likelihood Detection）は、低受信ＳＩＮＲおよび高いフェージング相関を持つ伝搬環境に対しても良好な信号分離精度が得られるため、ＭＩＭＯダイバーシティよりも高いスループットが得られる場所が比較的多い。これに対し、複数信号分離として最も一般的な最小平均二乗誤差検出（ＭＭＭＳＥ：Minimum Mean Square Error）では、低受信ＳＩＮＲまたは高いフェージング相関を持つ伝搬環境における信号分離精度の劣化が著しい。このような環境では、複数信号分離にＭＭＳＥを用いるＭＩＭＯ空間多重よりも、ＭＩＭＯダイバーシティの方が高いスループットが得られることが多い。従って、最適な送信レイヤ数は、無線伝搬路の状態だけでなく、チャネル推定や複数信号分離等の受信アルゴリズムに依存する。一般に、送信レイヤ

数は、受信側からフィードバックされるランク情報ＲＩに従って決定される。従って、ランクアダプテーション制御を適用するＭＩＭＯ無線伝送方式において、スループットを最大化するためには最適なＲＩを生成する必要がある。そのためには、受信アルゴリズムの種類によって無線伝送特性が大きく異なることを考慮してランク情報ＲＩを生成する必要がある。

上記特許文献１で開示された基地局装置では、移動局（ＵＥ）における無線伝送路状態の測定誤差に起因するランクアダプテーション制御における所望の無線伝送特性の劣化を低減するため、受信側となる移動局（ＵＥ）側において生成されたランク情報ＲＩを送信側となる基地局側で実際の伝送誤り率の測定結果に基づき、ランク情報ＲＩを補正する方法が示されているが、移動局（ＵＥ）側における具体的なランク情報ＲＩの最適値の生成法については示されていない。このため、最適なランク情報ＲＩを生成できないため、無線伝送特性（スループット特性）が劣化するおそれがある。

【０００６】

本発明は以上の問題点に鑑みなされたものであり、その目的は、受信アルゴリズムの種類に依存する無線伝送特性の差異を吸収して最適なランク情報を簡易に生成することができる無線通信装置、無線伝送システム及び無線伝送制御方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【０００７】

上記目的を達成するために、請求項１の発明は、複数の無線通信装置の間で複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送システムであって、前記複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出する算出手段と、前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定する干渉雑音レベル推定手段と、前記干渉雑音レベルの推定結果に基づいて閾値を設定する閾値設定手段と、前記複数の特異値又は前記複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するランク情報生成手段と、を備えることを特徴とするものである。

また、請求項２の発明は、請求項１の無線伝送システムにおいて、前記ランク情報生成手段は、前記ＭＩＭＯチャネルの最大送信レイヤ数が２のとき、前記複数の特異値を二乗した値又は前記複数の固有値について最小値を求め、その最小値が前記閾値以上又は前記閾値よりも大きい場合に前記最適な送信レイヤ数を２にすることを特徴とするものである。

また、請求項３の発明は、請求項１又は２の無線伝送システムにおいて、前記閾値は、前記干渉雑音レベルを予め設定したオフセット量だけオフセットし、前記パイロット信号の総送信電力で正規化したものであることを特徴とするものである。

また、請求項４の発明は、請求項１、２又は３の無線伝送システムにおいて、前記複数の無線通信装置の間の送受信は複数のサブキャリアを用いて行われ、前記算出手段は、前記複数の無線通信装置の間で送受信される前記複数のサブキャリアのそれぞれによる既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値を二乗した値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値のそれぞれについて、前記複数のサブキャリア間の平均値を算出し、前記干渉雑音レベル推定手段は、前記複数のサブキャリアのそれぞれによる既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定し、前記ランク情報生成手段は、前記複数の特異値の二乗平均値又は前記複数の固有値の平均値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルのランク情報を生成することを特徴とするものである。

また、請求項５の発明は、請求項１、２、３又は４の無線伝送システムにおいて、前記平均値は、前記複数のサブキャリアごとに重み付けを行って平均したものであることを特徴とするものである。

また、請求項６の発明は、請求項１、２、３、４又は５の無線伝送システムにおいて、前記複数の無線通信装置は、データを送信するデータ送信側の無線通信装置と、前記データを受信するデータ受信側の無線通信装置とを用いて構成され、前記データ受信側の無線通信装置は、前記算出手段と前記干渉雑音レベル推定手段と前記閾値設定手段と前記ランク情報生成手段とを備えるとともに、前記ランク情報生成手段で生成された前記ランク情報を前記データ送信側の無線通信装置に送信するランク情報送信手段を更に備え、前記データ送信側の無線通信装置は、前記ランク情報を前記データ受信側の無線通信装置から受信するランク情報受信手段と、前記ランク情報受信手段でランク情報に基づいて、そのランク情報で示される数の送信レイヤによってデータを前記データ受信側の無線通信装置に送信するデータ送信手段と、を備えることを特徴とするものである。

また、請求項７の発明は、複数の無線通信装置の間で複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送システムにおいて前記データを受信するデータ受信側の無線通信装置であって、前記複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出する算出手段と、前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定する干渉雑音レベル推定手段と、前記干渉雑音レベル推定手段で推定した干渉雑音レベルを所定のオフセット量だけオフセットし、そのオフセットした後の干渉雑音レベルに基づいて閾値を設定する閾値設定手段と、前記複数の特異値又は前記複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するランク情報生成手段と、前記ランク情報生成手段で生成された前記ランク情報を前記データ送信側の無線通信装置に送信するランク情報送信手段と、を備えることを特徴とするものである。

また、請求項８の発明は、複数の無線通信装置の間で複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送方法であって、前記複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出するステップと、前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定するステップと、前記推定した干渉雑音レベルを所定のオフセット量だけオフセットし、そのオフセットした後の干渉雑音レベルに基づいて閾値を設定するステップと、前記複数の特異値又は前記複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するステップと、前記ランク情報で示される数の送信レイヤによって前記複数の無線通信装置の間のデータの送受信を行うステップと、を含むことを特徴とするものである。

【発明の効果】

【０００８】

本発明においては、複数の無線通信装置の間で送受信される既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記複数の無線通信装置の間におけるＭＩＭＯチャネルの伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値又は前記ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出する。この算出した複数の固有値又は複数の特異値の個数は、前記ＭＩＭＯチャネルを互いに独立で並列の関係にあるように分解した仮想的なＳＩＳＯ（Single Input Single Output）チャネルの最大個数、すなわち互いに独立にデータを送信可能な送信レイヤの最大個数に対応する。また、前記算出した複数の固有値又は複数の特異値のそれぞれの大きさは、前記ＳＩＳＯチャネルすなわち送信レイヤに形成される伝送路の伝送利得に対応する。ここで、ある所定の閾値よりも大きな値を有する固有値又は特異値を選択し、その選択した固有値又は特異値に対応する送信レイヤを使用すれば、所定の伝送利得を有する送信レイヤのみでデータを送信することになるので、当該ＭＩＭＯチャネルで送信可能なデータ容量を理論的な容量限界（シャノン容量）に近づけることができる。

したがって、前記複数の固有値又は前記複数の特異値とある所定の閾値との比較結果に基づいて、当該ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成することにより、当該ＭＩＭＯチャネルで送受信可能なデータ容量を理論的な容量限界（シャノン容量）に近づけることができる最適なランク情報を生成することができる。

しかも、本発明においては、前記既知のパイロット信号の受信結果に基づいて、前記ＭＩＭＯチャネルにおける無線伝送路の状態を反映した干渉雑音レベルを推定し、その干渉雑音レベルの推定結果に基づいて、上記複数の固有値又は前記複数の特異値と比較する閾値を設定している。この閾値は、当該ＭＩＭＯチャネルにおける無線伝送路の状態を反映したものであるとともに、受信アルゴリズムの種類に応じて変更するなどの簡易な処理で任意に調整することができる。そして、このように設定した閾値と、前記複数の固有値又は前記複数の特異値とを比較し、その比較結果に基づいて前記ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成している。よって、受信ＳＩＮＲやフェージング相関等の無線伝送路の状態の変動に適応できるだけでなく、受信アルゴリズムの種類に依存する無線伝送特性（スループット特性）の差異を吸収してランク情報を生成することができる。

以上のように、本発明によれば、受信アルゴリズムの種類に依存する無線伝送特性の差異を吸収して最適なランク情報を簡易に生成す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】本発明を適用可能な一実施形態に係る閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムの下りリンクにおける無線基地局及びユーザ装置の概略構成の一例を示す機能ブロック図。

【図２】本発明を適用可能な他の実施形態に係る開ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムの下りリンクにおける無線基地局及びユーザ装置の概略構成の一例を示す機能ブロック図。

【図３】本発明を適用可能な更に他の実施形態に係る閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムの上りリンクにおける無線基地局及びユーザ装置の概略構成の一例を示す機能ブロック図。

【図４】無線基地局とユーザ装置との間の伝送路を等価変換したＭＩＭＯチャネル行列の各要素を示す模式図。

【図５】ＭＩＭＯチャネル行列の等価変換におけるＭＩＭＯチャネル行列の等価回路を示す模式図。

【図６】ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送モデルにおけるチャネル行列の表記を示す模式図。

【図７】ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送等価モデルにおけるチャネル行列の表記を示す模式図。

【図８】等価伝送路数Ｍが任意の個数の場合における平均固有値と閾値βとに基づくランク情報ＲＩの設定の説明図。

【図９】等価伝送路数Ｍが２個の場合における平均固有値と閾値βとに基づくランク情報ＲＩの設定の説明図。

【発明を実施するための形態】

【００１０】

以下、図面を参照して、本発明の実施形態を説明する。

まず、本発明を適用可能なＭＩＭＯ無線伝送システムの全体構成について説明する。

図１は、本発明を適用可能な一実施形態に係る閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムの下りリンクにおける無線基地局及びユーザ装置の概略構成の一例を示す機能ブロック図である。図１に示すＭＩＭＯ無線伝送システムは、ユーザ装置１０からフィードバックされる最適な送信アンテナウェイト行列の候補データテーブル（コードブック）のインデックスである制御情報（ＰＭＩ：Precoding Matrix Indicator）に基づき、送信レイヤ（ストリーム）ごとに異なる送信アンテナウェイトを送信信号に乗算する、閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムである。

なお、本実施形態の閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システム(Closed-Loop MIMO)では、

ＬＴＥの通信規格に準拠した２－送信レイヤ（ランク数が２）の構成の場合について例示するが、本発明は、この構成に限定されるものではない。

【００１１】

図１において、ユーザ装置１０は、ユーザが各種通信サービスを利用する際に使用可能な無線通信装置であり、「通信端末」や「端末」と呼ばれたり、移動可能なものであるため「移動局」と呼ばれる場合もあり、また、「無線機」と呼ばれる場合もある。ユーザ装置１０は、携帯電話機等の移動通信端末であってもよい。図１に示すように、ユーザ装置１０は、複数のアンテナ１００と、下りリンクチャネル推定部１０１と、下りリンク制御信号復調部１０２と、データ信号分離合成部１０３と、直列並列変換部（Ｓ／Ｐ）１０４と、制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５と、上りリンク送信部１０６とを備えている。

【００１２】

なお、図１の例では、ユーザ装置１０が複数のアンテナ１００を備えた場合を示しているが、ユーザ装置１０が有するアンテナ１００の数は特定の数に限定されるものではない。例えば、ユーザ装置１０は、１本のアンテナ１００を備えるものでもよいし、２本又は４本等の複数本のアンテナ１００を備えるものであってもよい。また、ユーザ装置１０は、複数のアンテナ１００を備える場合、実際のＭＩＭＯ通信時に使用されるアンテナの本数を切り換えることができるものであってもよい。

【００１３】

また、ユーザ装置１０の下りリンクチャネル推定部１０１において、基地局装置２０の各アンテナ２００～ユーザ装置１０の各アンテナ間の無線伝搬路応答をそれぞれ推定し、ＭＩＭＯチャネル応答を取得するため、無線基地局２０のマルチプレクサ２０８において、既定のパイロット信号である参照信号ＲＳが多重されるが、本図では図示していない。ここで、参照信号ＲＳは、セルに固有の信号であるため、セル固有参照信号（ＣＳＲＳ：Cell-Specific Reference Signal）とも呼ばれる。

【００１４】

下りリンクチャネル推定部１０１は、まず、各アンテナ１００からの受信信号を参照信号ＲＳ部分、データ信号部分、下り制御信号部分の受信信号にそれぞれ分割する。次に参照信号ＲＳ部分の受信信号と既定の参照信号ＲＳの送信系列にもとづきＭＩＭＯチャネル応答を推定する。そして、そのＭＩＭＯチャネル応答の推定結果であるチャネル推定値をデータ信号部分および下り制御信号部分の受信信号ともに、データ信号分離部１０３および下り制御信号復調部にそれぞれ出力する。さらに、上記チャネル推定値を制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５に出力する。

【００１５】

下りリンク制御信号復調部１０２は、下りリンクチャネル推定部１０１から受けた受信信号から制御信号を復調し、ユーザデータを復調および復号するために必要な送信方式の情報であるＭＣＳ（Modulation and Coding Scheme）、ランク（Ｒａｎｋ）及びＴ－ＰＭＩ（Transmit-Precoding Matrix Indicator）の制御情報として取得し、データ信号分離合成部１０３に出力する。

【００１６】

データ信号分離合成部１０３は、下りリンク制御信号復調部１０２から受けた制御情報に基づいて、下りリンクチャネル推定部１０１から受信したユーザデータの受信信号を分離及び／又は合成し、所定数のコードワードからなるデータとして直列並列変換部（Ｓ／Ｐ）１０４に出力する。

【００１７】

直列並列変換部（Ｓ／Ｐ）１０４は、下りリンクのランク数に応じて、データ信号分離合成部１０３から受けた所定数のコードワードからなるデータを、ユーザが利用可能な受信データ（ユーザデータ）に変換する。

【００１８】

制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５は、下りリンクチャネル推定部１０１

から受けたチャネル推定値に基づいて、データレートを最大化するランクを決定し、このランクをランク情報（ＲＩ：Rank Indicator）として生成して出力する。また、制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５は、上記チャネル推定値に基づいて、下りリンクのデータ送信に適したプリコーディングマトリクスを決定し、このプリコーディングマトリクスを示すＰＭＩ（Precoding Matrix Indicator）を候補データテーブル（コードブック）の中から選択して出力する。さらに、制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５は、上記チャネル推定値に基づいて、チャネル品質情報としてのＣＱＩ（Channel Quality Indicator）を測定して出力する。この制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５から出力されたランク情報ＲＩ、ＰＭＩ及びＣＱＩはそれぞれ、制御情報として上りリンク送信部１０６に出力され、上りリンクの制御チャネル（ＰＵＣＣＨまたはＰＵＳＣＨ）を介して、アンテナ１００から無線基地局２０に送信される。

【００１９】

特に、上記下りリンクチャネル推定部１０１及び制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５は、次の（１）～（４）の各手段としても機能する。

（１）ユーザ装置１０と無線基地局２０との間で送受信される既知のパイロット信号である参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ユーザ装置１０と無線基地局２０との間におけるＭＩＭＯチャネルの間の相関を示すＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値を算出する算出手段。

（２）前記既知のパイロット信号である参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルを推定する干渉雑音レベル推定手段。

（３）前記干渉雑音レベルの推定結果に基づいて閾値を設定する閾値設定手段。

（４）前記算出した複数の固有値と、前記閾値との比較結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成するランク情報生成手段。

【００２０】

また、上りリンク送信部１０６は、制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部１０５で生成されたランク情報ＲＩを無線基地局２０に送信するランク情報送信手段としても機能する。

【００２１】

図１の構成のユーザ装置１０は、下りリンクの既知のパイロット信号である参照信号ＲＳの受信結果に基づいてＭＩＭＯチャネル応答を推定してチャネル推定値を求め、そのチャネル推定値から最適なランク情報ＲＩを決定し、そのランク情報ＲＩの値を最適なＰＭＩ／ＣＱＩとともに無線基地局２０にフィードバックする。

なお、３ＧＰＰ　ＬＴＥ（Long Term Evolution）の仕様にあるように、ランク情報ＲＩの送信タイミングと、他の制御情報であるＰＭＩやＣＱＩの送信タイミングとが重なった場合、ランク情報ＲＩの送信が優先される。

【００２２】

また、図１において、無線基地局２０は、通信ネットワーク側とユーザ端末装置１０との無線通信を中継する無線通信装置であり、「基地局装置」と呼ばれたり、単に「基地局」と呼ばれたりする場合もある。また、無線基地局２０は、３ＧＰＰ、ＬＴＥの仕様では「ｅＮｏｄｅＢ（evolved Node B）」と呼ばれたりする場合がある。

【００２３】

図１に示すように、無線基地局２０は、複数のアンテナ２００と、上りリンク受信部２０１と、下りリンクスケジューラ２０２と、プリコーディングウェイト生成部２０３と、下りリンク制御信号生成部２０４と、直列並列変換・変調部２０５と、乗算器２０６と、加算処理部（Σ）２０７と、マルチプレクサ２０８とを備えている。

【００２４】

なお、図１の例では、無線基地局２０が複数のアンテナ２００を備えた場合を示しているが、無線基地局２０が有するアンテナ２００の数は特定の数に限定されるものではない。例えば、無線基地局２０は、１本のアンテナ２００を備えるものでもよいし、２本又は

４本等の複数本のアンテナ２００を備えるものであってもよい。また、無線基地局２０は、複数のアンテナ２００を備える場合、実際のＭＩＭＯ通信時に使用されるアンテナの本数を切り換えることができるものであってもよい。

【００２５】

上りリンク受信部２０１は、上りリンクの制御チャネル（ＰＵＣＣＨ）を介して、ユーザ装置１０から制御情報（ＲＩ、ＣＱＩ、ＰＭＩ）を受信し、下りリンクスケジューラ２０２に送る。

【００２６】

下りリンクスケジューラ２０２は、上りリンク受信部２０１から受信した制御情報（ＲＩ、ＣＱＩ、ＰＭＩ）に基づいて、ユーザ装置１０との間の下りリンクで用いる各種制御パラメータを決定する。例えば、下りリンクスケジューラ２０２は、空間多重の送信レイヤ数を示すランク数（Ｒａｎｋ）と、送信プリコーディング行列を指定するＴ－ＰＭＩと、変調及び符号化の方式を指定するＭＣＳとを決定する。そして、下りリンクスケジューラ２０２は、上記決定したＭＣＳ及びＲａｎｋの信号を直列並列変換・変調部２０５に送り、上記Ｒａｎｋ及びＴ－ＰＭＩの信号をプリコーディングウェイト生成部２０３に送り、上記ＭＣＳ、Ｒａｎｋ及びＴ－ＰＭＩの信号を下りリンク制御信号生成部２０４に送る。

【００２７】

プリコーディングウェイト生成部２０３は、下りリンクスケジューラ２０２から受けたＲａｎｋ及びＴ－ＰＭＩの信号に基づいて、ユーザ装置１０に割り当てたリソースブロックでの上りリンクの受信品質から、複数のアンテナ２００ごとに送信信号の位相及び／又は振幅を制御するためのプリコーディングウェイトを生成し、乗算器２０６に送る。

【００２８】

下りリンク制御信号生成部２０４は、下りリンクスケジューラ２０２から受けたＭＣＳ、Ｒａｎｋ及びＴ－ＰＭＩの信号に基づいて、下りリンクで用いる参照信号ＲＳと、制御信号とを生成し、マルチプレクサ２０８に送る。

【００２９】

直列並列変換・変調部２０５は、下りリンクスケジューラ２０２から受けたランク数（Ｒａｎｋ）に基づいて、送信対象のユーザデータを送信レイヤ数分に分配する。また、乗算器２０６は、３本のアンテナ２００に対応する３系統の乗算器２０６ａ、２０６ｂ、２０６ｃで構成されている。ユーザデータが入力されると、直列並列変換・変調部２０５で下りリンクスケジューラ２０２から受けたデータを、乗算器２０６ａ、２０６ｂ、２０６ｃによって送信データにプリコーディングウェイトが乗算され、位相・振幅がそれぞれ制御（シフト）されることにより、複数のアンテナ２００ごとに送信信号が生成される。そして、複数の送信レイヤ（図１の例では２レイヤ）に分配されて生成された送信信号は、その送信レイヤごとに加算器（Σ）２０７で加算された後、マルチプレクサ２０８で参照信号ＲＳ及び制御信号が更に多重され、３本のアンテナ２００それぞれから送信される。

【００３０】

上記図１の構成のＭＩＭＯ無線伝送システムでは、上記ランク数Ｒａｎｋは、上述したようにユーザ装置１０からフィードバックされたランク情報ＲＩに基づいて、無線基地局２０側が決定する。例えば、ランク情報ＲＩ＝１のときにランク数Ｒａｎｋ＝１、ランク情報ＲＩ＝２のときにランク数Ｒａｎｋ＝２のように通常選択される。そして、ランク数Ｒａｎｋ＝１のとき単一送信ビームフォーミング、ランク数Ｒａｎｋ≧２のときマルチビーム送信空間多重となる。

なお、３ＧＰＰの仕様にあるように、ランク数Ｒａｎｋの最終決定権は無線基地局２０側が持っているので、無線基地局２０側でランク数Ｒａｎｋを決定する際に、ユーザ装置１０のランク情報ＲＩの値に必ずしも従わなくてもよい。

【００３１】

図２は、本発明を適用可能な他の実施形態に係る開ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システム(Open-Loop MIMO)の下りリンクにおける無線基地局及びユーザ装置の概略構成の一例を

示す機能ブロック図である。
図２のＭＩＭＯ無線伝送システムは、ランク情報ＲＩとＣＱＩとをユーザ装置１０から無線基地局２０にフィードバックするがＰＭＩをフィードバックしない開ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムである。なお、上記図１と同様の構成については同じ符号を付して詳細な説明を省略する。
【００３２】
図２において、ユーザ装置１０の制御情報（ＲＩ／ＣＱＩ）生成部１１５は、下りリンクチャネル推定部１０１から受けたチャネル推定値に基づいて、データレートを最大化するランクを決定し、このランクをランク情報ＲＩとして生成して出力する。また、制御情報（ＲＩ／ＣＱＩ）生成部１１５は、下りリンクチャネル推定部１０１から受けたチャネル推定値に基づいて、チャネル品質情報としてのＣＱＩを測定して出力する。この制御情報（ＲＩ／ＣＱＩ）生成部１１５から出力されたランク情報ＲＩ及びＣＱＩは、制御情報として上りリンク送信部１０６に出力され、アンテナ１００を介して無線基地局２０に送信される。なお、上記図１の構成と異なり、ＰＭＩの決定及び送信は行われない。
【００３３】
このように、図２の構成のユーザ装置１０は、下りリンクの既知のパイロット信号である参照信号ＲＳの受信結果に基づいてＭＩＭＯチャネル応答を推定してチャネル推定値を求め、そのチャネル推定値からランク情報ＲＩを決定し、そのランク情報ＲＩの値を最適なＣＱＩとともに、上りリンクの制御チャネル（ＰＵＣＣＨまたはＰＵＳＣＨ）を介して無線基地局２０に送信してフィードバックする。
なお、３ＧＰＰの仕様にあるように、ランク情報ＲＩの送信タイミングと、他の制御情報であるＣＱＩの送信タイミングとが重なった場合、ランク情報ＲＩの送信が優先される。
【００３４】
また、図２において、無線基地局２０の下りリンクスケジューラ２０２は、上りリンク受信部２０１から受信した制御情報（ＲＩ、ＣＱＩ）に基づいて、ユーザ装置１０との間の下りリンクで用いる各種制御パラメータを決定する。例えば、下りリンクスケジューラ２０２は、空間多重の送信レイヤ数を示すランク数（Ｒａｎｋ）と、変調及び符号化の方式を指定するＭＣＳとを決定する。そして、下りリンクスケジューラ２０２は、上記決定したＭＣＳ及びＲａｎｋの信号を直列並列変換・変調部２０５に送り、上記Ｒａｎｋの信号をプリコーディングウェイト生成部２０３に送り、上記ＭＣＳ及びＲａｎｋの信号を下りリンク制御信号生成部２０４に送信する。
なお、図２の構成の無線基地局２０では、ユーザ装置１０からのＰＭＩの受信と、そのＰＭＩの受信結果に基づくＴ－ＰＭＩの生成とは行われない。プリコーディングウェイト生成部２０３及び下りリンク制御信号生成部２０４では、ユーザ装置１０からのＰＭＩを用いないであらかじめ仕様で既定されたプリコーディング方式が用いられる。
【００３５】
上記図２の構成のＭＩＭＯ無線伝送システムでは、上記ランク数Ｒａｎｋは、上述したようにユーザ装置１０からフィードバックされたランク情報ＲＩに基づいて、無線基地局２０側が決定する。例えば、情報ＲＩ＝１のときにランク数Ｒａｎｋ＝１、ランク情報ＲＩ＝２のときにランク数Ｒａｎｋ＝２のように通常選択される。そして、ランク数Ｒａｎｋ＝１のときＳＦＢＣ（空間周波数ブロック符号化）を用いた送信ダイバーシティ、ランク数Ｒａｎｋ≧２のときＣＤＤ（Code Division Duplex）を併用した空間多重となる。
なお、図２の構成のＭＩＭＯ無線伝送システムにおいても、３ＧＰＰの仕様にあるように、ランク数Ｒａｎｋの最終決定権は無線基地局２０側が持っているので、無線基地局２０側でランク数Ｒａｎｋを決定する際に、ユーザ装置１０のランク情報ＲＩの値に従わなくてもよい。
【００３６】
上記図１及び図２のＭＩＭＯ無線伝送システムでは、無線基地局２０からユーザ装置１０への下りリンクについて、最適な送信レイヤ数の決定について説明したが、本発明はユ

ーザ装置１０から無線基地局２０へデータを送信する上りリンクの場合についても適用することができる。

【００３７】

図３は、本発明を適用可能な更に他の実施形態に係る閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムの上りリンクにおける無線基地局及びユーザ装置の概略構成の一例を示す機能ブロック図である。なお、本実施形態の閉ループ型のＭＩＭＯ無線伝送システムでは、ＬＴＥ－Ａｄｖａｎｃｅｄの通信規格に準拠した２－送信レイヤ（ランク数が２）の構成の場合について例示するが、本発明は、この構成に限定されるものではない。また、上記図１と同様の構成については詳細な説明を省略する。

【００３８】

図３に示すように、ユーザ装置３０は、複数のアンテナ３００と、下りリンク受信部３０１と、プリコーディングウェイト生成部３０２と、直列並列変換・変調部３０３と、乗算器３０４と、加算器（Σ）３０５と、マルチプレクサ３０６と、上りリンク参照信号生成部３０７と、を備えている。

【００３９】

なお、図３の例では、ユーザ装置３０が複数のアンテナ３００を備えた場合を示しているが、ユーザ装置３０が有するアンテナ３００の数は特定の数に限定されるものではない。例えば、ユーザ装置３０は、１本のアンテナ３００を備えるものでもよいし、２本又は４本等の複数本のアンテナ３００を備えるものであってもよい。また、ユーザ装置３０は、複数のアンテナ３００を備える場合、実際のＭＩＭＯ通信時に使用されるアンテナの本数を切り換えることができるものであってもよい。

【００４０】

ユーザ装置３０では、上りリンク参照信号生成部３０７で生成された参照信号ＲＳが、マルチプレクサ３０６で他の制御信号が多重されて、複数のアンテナ３００から送信される。

【００４１】

また、ユーザ装置３０は、無線基地局４０から受信した下りリンクの制御チャネルに含まれる制御情報（ＲＩ、ＭＣＳ、ＰＭＩ）を下りリンク受信部３０１で分離し、ＰＭＩをプリコーディングウェイト生成部３０２に出力し、ＲＩ及びＭＣＳを直列並列変換・変調部３０３に出力する。これにより、ユーザ装置３０は、受信した下りリンク制御チャネルに含まれるＲＩ、ＭＣＳ、ＰＭＩに従い、上りリンクデータチャネルでユーザデータの送信を行う。

【００４２】

また、図３に示すように、無線基地局４０は、複数（本例では３本）のアンテナ４００と、上りリンクチャネル推定部４０１と、データ信号分離合成部４０２と、直列並列変換部（Ｓ／Ｐ）４０３と、上りリンクスケジューラ４０４と、下りリンク送信部４０５とを備えている。

【００４３】

無線基地局４０では、複数のアンテナ４００で受信された信号が、上りリンクチャネル推定部４０１に送られる。上りリンクチャネル推定部４０１は、各アンテナ４００からの信号の歪み補正を行い、その歪み補正後の受信信号をデータ信号分離合成部４０２に出力する。また、上りリンクチャネル推定部４０１は、ユーザ装置３０から受信した既定のパイロット信号としての参照信号ＲＳに基づいてＭＩＭＯチャネル応答を推定し、そのＭＩＭＯチャネル応答の推定結果であるチャネル推定値を上りリンクスケジューラ４０４に出力する。

【００４４】

上りリンクスケジューラ４０４は、上りリンクチャネル推定部４０１から受けたチャネル推定値に基づいて、ユーザ装置１０との間の上りリンクで用いる各種制御パラメータを決定する。例えば、上りリンクスケジューラ４０４は、上りリンクにおけるデータレートを最大化する空間多重の送信レイヤ数を示すランク情報ＲＩを生成して出力する。また、

上りリンクスケジューラ４０４は、上りリンクのデータ送受信に適したプリコーディングマトリクスを決定し、このプリコーディングマトリクスを示すＰＭＩをコードブックの中から選択して出力する。また、上りリンクスケジューラ４０４は、変調及び符号化の方式を指定するＭＣＳを決定して出力する。そして、上りリンクスケジューラ４０４は、上記ランク情報ＲＩを直列並列変換部（Ｓ／Ｐ）４０３に送り、上記ＲＩ情報、ＭＣＳ及びＰＭＩをデータ信号分離合成部４０２と下りリンク送信部４０５に送信する。下りリンク送信部４０５は、上りリンクスケジューラ４０４から受けたランク情報ＲＩを、下りリンクの制御チャネル（ＰＤＣＣＨ）を介して、ユーザ装置３０に送信してフィードバックする。

【００４５】

なお、ＬＴＥ－Ａｄｖａｎｃｅｄでは、下りリンク、上りリンクともにユーザ装置３０の送信方法の決定権は無線基地局４０側にあるので、無線基地局４０の上りリンクスケジューラ４０４が算出したランク情報ＲＩがそのまま、上りリンクのランク数Ｒａｎｋとなる。

【００４６】

上記図３の上りリンクの構成において、上りリンクチャネル推定部４０１及び上りリンクスケジューラ４０４は、前述の算出手段、干渉雑音レベル推定手段、閾値設定手段及びランク情報生成手段としても機能する。また、下りリンク送信部４０５は、上りリンクスケジューラ４０４で生成されたランク情報ＲＩをユーザ装置３０に送信するランク情報送信手段としても機能する。

【００４７】

次に、上記図１～３のＭＩＭＯ無線伝送システムにおけるランク情報（ＲＩ）の生成について説明する。本実施形態におけるユーザ装置１０、３０や無線基地局４０におけるランク情報ＲＩの生成は、以下に示すＭＩＭＯチャネル行列を使ったモデルで説明することができる。なお、以下の説明では、ユーザ装置と無線基地局との間のデータ通信は複数のサブキャリアを使って行われる。サブキャリアの数はＮｓｃ個であり、ｋはサブキャリア番号を示す。

【００４８】

図４は、無線基地局とユーザ装置との間の伝送路を等価変換したＭＩＭＯチャネル行列の各要素を示す模式図である。また、図４に示すＭＩＭＯチャネル行列は、次式のように表される。

【数１】

$$\mathbf{H}(k)=\begin{bmatrix} h_{1,1}(k) & h_{1,2}(k) & \cdots & h_{1,N_t}(k) \\ h_{2,1}(k) & h_{2,2}(k) & \cdots & h_{2,N_t}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}(k) & h_{N_r,2}(k) & \cdots & h_{N_r,N_t}(k) \end{bmatrix}$$

【００４９】

また、上記数１の式の行列Ｈ（ｋ）は、一般的なＳＶＤ（Singular Value Decomposition）の手法を使って、次式のように３つの行列Ｕ（ｋ）、Σ（ｋ）、Ｖ（ｋ）を用いた積の形に分解できる。

【数２】

$$\mathbf{H}(k)=\mathbf{U}(k)\mathbf{\Sigma}(k)\mathbf{V}^{H}(k)$$

【００５０】

ただし、Ｕ（ｋ）は左特異ベクトル行列、Σ（ｋ）は特異値行列、Ｖ（ｋ）は右特異ベクトル行列と呼ばれ、それぞれ次の数３～数５の式で表される。

【数３】

$$\mathbf{U}(k)=[\mathbf{u}_1(k)\ \ \mathbf{u}_2(k)\ \ \cdots\ \ \mathbf{u}_M(k)]=\begin{bmatrix} u_{1,1}(k) & u_{1,2}(k) & \cdots & u_{1,M}(k) \\ u_{2,1}(k) & u_{2,2}(k) & \cdots & u_{2,M}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N_r,1}(k) & u_{N_r,2}(k) & \cdots & u_{N_r,M}(k) \end{bmatrix}$$

【数４】

$$\mathbf{\Sigma}(k)=\mathrm{diag}\left[\sqrt{\lambda_1(k)}\ \ \sqrt{\lambda_2(k)}\ \ \cdots\ \ \sqrt{\lambda_M(k)}\right]=\begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1(k)} & & & \mathbf{0} \\ & \sqrt{\lambda_2(k)} & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \sqrt{\lambda_M(k)} \end{bmatrix}$$

【数５】

$$\mathbf{V}(k)=[\mathbf{v}_1(k)\ \ \mathbf{v}_2(k)\ \ \cdots\ \ \mathbf{v}_M(k)]=\begin{bmatrix} v_{1,1}(k) & v_{1,2}(k) & \cdots & v_{1,M}(k) \\ v_{2,1}(k) & v_{2,2}(k) & \cdots & v_{2,M}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N_t,1}(k) & v_{N_t,2}(k) & \cdots & v_{N_t,M}(k) \end{bmatrix}$$

【００５１】

また、上記数４の式の行列Σ（ｋ）の対角要素は、上記数２の式の行列Ｈ（ｋ）の特異値を示している。

【００５２】

図５は、ＭＩＭＯチャネル行列の等価変換におけるＭＩＭＯチャネル行列の等価回路を示す模式図である。ここで、図５のＭＩＭＯチャネル行列の等価回路において、実際に信号を伝送できる等価伝送路の数（以下「等価伝送路数」という。）は、次式に示すように最大Ｍ＝ｍｉｎ（Ｎ$_r$，Ｎ$_t$）本までである。

【数６】

$$M=\min(N_r,N_t)$$

【００５３】

また、行列Ｈ（ｋ）の各特異値を二乗した値λ$_1$（ｋ）～λ$_M$（ｋ）は、Ｈ（ｋ）Ｈ^H（ｋ）またはＨ（ｋ）^{H}Ｈ（ｋ）の固有値と一致し、次の数７に示すように全て０以上の実数となる。

【数７】

$$\lambda_1(k)\geq\lambda_2(k)\geq\cdots\geq\lambda_M(k)\geq 0$$

【００５４】

また、数２の式の左特異ベクトル行列Ｕ（ｋ）及び右特異ベクトル行列Ｖ（ｋ）は、それぞれＨ（ｋ）Ｈ^H（ｋ）の固有ベクトルから構成される行列及びＨ^H（ｋ）Ｈ（ｋ）の固有ベクトルから構成される行列であり、いずれも次の数８及び数９に示すようにユニタリ行列の性質を持つ。ただし、Ｉは単位行列、上付き文字Ｈは行列またはベクトルの複素

共役転置をそれぞれ表している。

【数８】

$$\mathbf{U}(k)\mathbf{U}^{H}(k)=\mathbf{U}(k)^{H}\mathbf{U}(k)=\mathbf{I}$$

【数９】

$$\mathbf{V}(k)\mathbf{V}^{H}(k)=\mathbf{V}(k)^{H}\mathbf{V}(k)=\mathbf{I}$$

【００５５】

図６は、ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送モデルにおけるチャネル行列の表記を示す模式図である。また、図６中の各行列式は次式で表される。

【数１０】

$$\mathbf{s}(k)=[s_1(k)\ s_2(k)\ \cdots\ s_{N_t}(k)]^T$$
$$\mathbf{x}(k)=[x_1(k)\ x_2(k)\ \cdots\ x_{N_r}(k)]^T$$
$$\mathbf{n}(k)=[n_1(k)\ n_2(k)\ \cdots\ n_{N_r}(k)]^T$$
$$\mathbf{y}(k)=[y_1(k)\ y_2(k)\ \cdots\ y_M(k)]^T$$
$$E[\mathbf{n}(k)\mathbf{n}^H(k)]=E[\mathbf{n}'(k)\mathbf{n}'^H(k)]=\sigma^2\mathbf{I}$$
$$\mathbf{d}(k)=[d_1(k)\ d_2(k)\ \cdots\ d_M(k)]^T$$
$$\mathbf{y}(k)=\mathbf{U}^H(k)\mathbf{x}(k)=\mathbf{U}^H(k)\{\mathbf{H}(k)\mathbf{s}(k)+\mathbf{n}(k)\}=\mathbf{U}^H(k)\mathbf{U}(k)\mathbf{\Sigma}(k)\mathbf{V}^H(k)\mathbf{V}(k)\mathbf{d}(k)+\mathbf{U}^H(k)\mathbf{n}(k)$$
$$=\mathbf{\Sigma}(k)\mathbf{d}(k)+\mathbf{n}'(k)\quad\Rightarrow\quad\hat{\mathbf{d}}(k)=\mathbf{\Sigma}^{-1}(k)\mathbf{y}(k)$$

【００５６】

上記数１０の式中ｙ（ｋ）は、送信側のプリコーディングとして、Ｖ（ｋ）を用い、受信側の空間フィルタリングとして、U^{H}（ｋ）を用いた場合の受信信号を表している。ｙ（ｋ）の式中に含まれるΣの項は、特異値の対角行列となっているため、各サブストリーム（送信レイヤ）間が存在しない。このことは、送信側のプリコーディングとして、Ｖ（ｋ）を用い、受信側の空間フィルタリングとして、U^{H}（ｋ）を用いることにより、各サブストリーム（送信レイヤ）間の干渉を除去でき、空間多重伝送を実現することが可能であることを示す。

【００５７】

図７は、ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送等価モデルにおけるチャネル行列の表記を示す模式図である。

図７において、送信側で完全なＭＩＭＯチャネル行列又は最適送信ウェイトベクトルＶ（ｋ）を取得できれば、Ｍ本の独立なＳＩＳＯ（Single Input Single Output）チャネルに分解可能である。また、ｍ番目のＳＩＳＯチャネルの伝搬路利得はλ_m（ｋ）で表される。

【００５８】

ここで、平均干渉雑音レベルをσ^2、信号の平均強さを$P_m^{(s)}\lambda_m(k)$としたときに、通信路容量Ｃ（ｋ）は次式で表される。

【数１１】

$$C(k)=\sum_{m=1}^{M}\log_2\left\{1+\frac{P_m^{(s)}}{\sigma^2}\lambda_m(k)\right\}\quad[\text{bits/s/Hz}]$$

【００５９】

なお、上記数１１の式で示す通信路容量Ｃ（ｋ）は、いわゆるシャノン容量であり、通信伝送路で送信可能な理論的なデータ容量（チャネル容量）の限界に相当する。従来のＳ

ＶＤ－ＭＩＭＯ伝送方式における「注水定理」と呼ばれる手法では、次の数１２の式に示すように、ＭＩＭＯチャネルで送信される総送信電力P_{total}が一定の下で上記シャノン容量を最大にするように各送信レイヤに対する最適電力配分を行う。ここで、数１２の式中のαは、下記の数１３の式を満足するための係数である。

【数１２】

$$P_m^{(s)} = \max\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\sigma^2}{\lambda_m},\ 0\right)$$

【数１３】

$$P_{total} = \sum_{m=1}^{M} P_m^{(s)}$$

【００６０】

しかしながら、以下に示すようにＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送方式における注水定理は現実的な変調方式および誤り訂正符号化方式を考慮した場合、最適な手法ではない。ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送方式における注水定理は、信号受信レベルが干渉雑音レベルに近いサブチャネルに対し送信電力配分を行わないことにより、チャネル容量の最大化を図っている。また、ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送方式は、送信側で完全なチャネル情報が得られる場合、又は、理想的な送信ウェイトベクトルＶ（ｋ）が送信側に得られる場合にのみ実現できる。

【００６１】

実際のシステムでは、制御遅延が存在し、さらにＦＤＤ（Frequency Division Duplex：周波数分割複信）ではフィードバック情報量の制約がある。例えば、ＬＴＥでは平均受信ＳＩＮＲに対応する情報として、数ビット程度で表現される離散的なＣＱＩ、ＰＭＩまたはＭＣＳが送信側にフィードバックされる。ＬＴＥ／ＬＴＥ－Ａｄｖａｎｃｅｄではチャネル情報フィードバック量が制限されている中で効率よくシャノン限界に近づく性能を得るため、品質の悪いサブチャネルに送信電力を割り当てない目的でランク情報ＲＩを用いたランクアダプテーションが導入されたと考えることもできる。

【００６２】

また、周波数方向に誤り訂正符号化されたＯＦＤＭ（Orthogonal Frequency Division Multiple：直交波周波数分割多重）においては，サブキャリア単位で送信レイヤ数を制御することはトランスポートブロックサイズの候補数が増大するため現実的ではない。そのため、ＬＴＥ／ＬＴＥ－Ａｄｖａｎｃｅｄでは、誤り訂正符号化の単位で送信レイヤ数（ランク）を制御している。このため、サブキャリア間の平均的な特性に基づき送信レイヤ数を制御する必要がある。特に、ＬＴＥでは送信側で適用可能なプリコーディングマトリックスが離散的になっていることから、注水定理により送信電力配分することは最適ではない。さらに不完全なチャネル情報に基づきプリコーディングされたＭＩＭＯでは、伝送性能が受信アルゴリズムに依存する。

上記の理由により、ＯＦＤＭを用いるＭＩＭＯ無線伝送システムにおいて、最適なランク情報ＲＩを理論的に決定することは困難であり、試行錯誤的な決定法とならざるを得ない。

【００６３】

そこで、上記図１～図３に示した本実施形態に係るＭＩＭＯ無線伝送システムでは、次の（１）～（３）の点に留意して最適なランク情報ＲＩの生成を行う。

（１）受信ＳＩＮＲが低くなる、又は、フェージング相関が高くなるにしたがって、低いランクの送信が望ましいので、それに適応したランク情報の生成ができる点。

（２）現実的なスループットは、理論的な容量限界（シャノン容量）と乖離している点。

（３）受信アルゴリズムによって、最適な送信レイヤ数は異なると考えられるので、簡単

なパラメータ調整でチューニングできる点。

【００６４】

上記（１）～（３）の点に留意し、本実施形態における最適なランク情報ＲＩの生成は、例えば次のように行う。

まず、ＭＩＭＯチャネルの相関行列Ｈ（ｋ）H^{H}（ｋ）またはH^{H}（ｋ）Ｈ（ｋ）の固有値のサブキャリア間の平均（以下、適宜「平均固有値」という。）を、次式により求める。なお、次式中のN_{SC}はサブキャリアの総数である。

【数１４】

$$\bar{\lambda}_m = \frac{1}{N_{SC}} \sum_{k=1}^{N_{SC}} \lambda_m(k)$$

【００６５】

ＭＩＭＯチャネル行列として、参照信号ＲＳの受信信号に基づいて推定したＭＩＭＯチャネル応答のチャネル推定結果を利用する。ここで、上記固有値のサブキャリア間の平均化の方法は、全サブキャリアで行う方法でもよいし、参照信号ＲＳを多重するサブキャリア等の一部のサブキャリアで行う方法等であってもよい。

【００６６】

次に、参照信号ＲＳの受信信号に基づいて平均干渉雑音レベルσ^2を推定する。ここで、干渉雑音レベルの平均化の方法は、全サブキャリアで行う方法でもよいし、参照信号ＲＳを多重するサブキャリア等の一部のサブキャリアで行う方法等であってもよい。

【００６７】

平均干渉雑音レベルσ^2を推定する方法としては、例えば、参照信号ＲＳの受信信号から１次チャネル推定値を求め、この１次チャネル推定値から干渉雑音電力推定値を求める方法を用いることができる（例えば、非特許文献５参照）が、この方法に限定されるものではない。

【００６８】

次に、上記推定した平均干渉雑音レベルσ^2に基づいて、ＲＩ生成用のパメータである閾値βを決定する。具体的には、次の数１５の式に示すように、上記推定した平均干渉雑音レベルσ^2を所定のオフセット量Δ[dB]だけオフセットし、総送信電力P_{total}で正規化した値を、上記閾値βとして決定する。

【数１５】

$$\beta = 10^{\Delta/10} \cdot \sigma^2 / P_{total}$$

【００６９】

なお、上記閾値βを決定するときに用いるオフセット量Δは、実際のＭＩＭＯ送信法（Open Loop-MIMO,Closed-Loop MIMO）におけるチャネル推定および信号分離アルゴリズムを考慮した計算機シミュレーション、実験等により最適な値を決定する。

【００７０】

次に、上記閾値βを越える平均固有値の数（ＭＩＭＯチャネルの実効ランク）を算出し、その算出結果に基づいてランク情報ＲＩを生成する。ここで、上記算出した実効ランクが０のときは、ランク情報ＲＩ＝１と設定する。それ以外の場合には、実効ランクの値をランク情報ＲＩの値に設定する。

【００７１】

図８は、上記ＳＶＤ－ＭＩＭＯ伝送等価モデルにおける等価伝送路数Ｍが任意の個数の場合における平均固有値と閾値βとに基づくランク情報ＲＩの設定の説明図である。ランク情報ＲＩは、図８及び次式に示すように設定される。

【数１６】

$$\mathrm{RI}=\begin{cases}1 & \bar{\lambda}_1 \le \beta \\ m & \bar{\lambda}_{m+1} \le \beta < \bar{\lambda}_m, m=1,\cdots,M-1 \\ M & \bar{\lambda}_M > \beta \end{cases}$$

【００７２】

例えば、閾値βを超える平均固有値の数が０個のとき又は最大の平均固有値が閾値βと等しいときは、ランク情報ＲＩ＝１と設定する。また、閾値βを超える平均固有値の数がｍ個のときは、ランク情報ＲＩ＝ｍと設定する。そして、Ｍ個すべての平均固有値が閾値βを超えるとき又は最小の平均固有値が閾値βと等しいときは、ランク情報ＲＩ＝Ｍと設定する。つまり、Ｍ個の平均固有値と閾値βとを比較するという簡単な比較演算処理でランク情報ＲＩを設定することができる。

【００７３】

図９は、上記等価伝送路数Ｍが２個の場合における平均固有値と閾値βとに基づくランク情報ＲＩの設定の説明図である。

図９において、２個の平均固有値λ_1、λ_2のいずれも閾値βを超えないとき、すなわち、最小の平均固有値λ_2が閾値β以下のときは、ランク情報ＲＩ＝１と設定する。また、最大の平均固有値λ_1が閾値βを超え、かつ、最小の平均固有値λ_2が閾値β以下のときも、ランク情報ＲＩ＝１と設定する。そして、２個の平均固有値λ_1、λ_2がいずれも閾値βを超えたとき、すなわち最小の平均固有値λ_2が閾値βを超えたときは、ランク情報ＲＩ＝２と設定する。つまり、図９の例では、最小の平均固有値λ２と閾値βとを比較するというより簡単な比較演算処理でランク情報ＲＩを設定することができる。

【００７４】

以上、本実施形態によれば、複数の無線通信装置としてのユーザ装置１０（３０）と無線基地局２０（４０）との間で複数のアンテナを用いた複数の異なる送信レイヤによるデータの送受信を行う無線伝送システムにおいて、ユーザ装置１０（３０）と無線基地局２０（４０）との間で送受信される既知のパイロット信号としての参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ユーザ装置と無線基地局との間におけるＭＩＭＯチャネルの無線伝送特性を示すＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の複数の固有値λを算出する。また、前記既知の参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルσ^2を推定し、その干渉雑音レベルσ^2の推定結果に基づいて閾値βを設定する。そして、前記複数の固有値λと閾値βとの比較結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報ＲＩを生成する。上記算出した複数の固有値λの個数は、ＭＩＭＯチャネルを互いに独立で並列の関係にあるように分解した仮想的なＳＩＳＯ（Single Input Single Output）チャネルの最大個数、すなわち互いに独立にデータを送信可能な送信レイヤの最大個数Ｍに対応する。また、複数の固有値λそれぞれの大きさは、ＳＩＳＯチャネルすなわち送信レイヤに形成される伝送路の伝送利得に対応する。ここで、ある所定の閾値βよりも大きな値を有する固有値λを選択し、その選択した固有値λに対応する送信レイヤを使用すれば、所定の伝送利得を有する送信レイヤのみでデータを送信することになるので、当該ＭＩＭＯチャネルで送受信可能なデータ容量を理論的な容量限界（シャノン容量）に近づけることができる。したがって、複数の固有値λとある所定の閾値βとの比較結果に基づいて、当該ＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報を生成することにより、当該ＭＩＭＯチャネルで送受信可能なデータ容量を理論的な容量限界（シャノン容量）に近づけることができる最適なランク情報ＲＩを生成することができる。

しかも、本実施形態においては、前記既知の参照信号ＲＳの受信結果に基づいて推定した干渉雑音レベルσ^2は、特に複数の基地局装置を面的に展開するセルラ環境の場合、周辺セルにおける他ユーザの通信状況等によって増減し、ＭＩＭＯチャネルにおける無線伝

送路の状態を反映したものである。このようにＭＩＭＯチャネルにおける無線伝送路の状態を反映した干渉雑音レベルσ^2を推定し、その干渉雑音レベルσ^2の推定結果に基づいて、上記複数の固有値λと比較する閾値βを設定している。この閾値βは、当該ＭＩＭＯチャネルにおける無線伝送路の状態を反映したものであるとともに、受信アルゴリズムの種類に応じて変更するなどの簡易な処理で任意に調整することができる。そして、このように設定した閾値βと複数の固有値λとを比較し、その比較結果に基づいてＭＩＭＯチャネルにおけるデータ送受信に用いる送信レイヤ数を示すランク情報ＲＩを生成することにより、受信ＳＩＮＲやフェージング相関等の無線伝送路の状態の変動に適応できるだけでなく、受信アルゴリズムの種類に依存する無線伝送特性（スループット特性）の差異を吸収してランク情報を生成することができる。

また、本実施形態によれば、前記ＭＩＭＯチャネルの最大送信レイヤ数Ｍが２のとき、前記複数の固有値λについて最小値を求め、その最小値が閾値β以上又は閾値βよりも大きい場合に最適なランク情報ＲＩ（送信レイヤ数）を２にする。このように最大送信レイヤ数Ｍが２の場合、複数の固有値λの最小値が閾値β以上又は閾値βよりも大きければ、他の固有値も閾値β以上又は閾値βよりも大きいので、最小値のみ閾値βと比較すればよい。この固有値の最小値が閾値β以上又は閾値βよりも大きい場合にランク情報ＲＩを２とし、それ以外の場合には、ランク情報ＲＩを１とする。よって、ランク情報ＲＩを算出して設定する処理が容易となる。

また、本実施形態によれば、前記閾値βは、干渉雑音レベルσ^2を予め設定したオフセット量Δだけオフセットし、参照信号ＲＳの総送信電力で正規化したものである。これにより、干渉雑音レベルσ^2を所定のオフセット量Δだけオフセットさせるという簡易な処理で、上記受信アルゴリズムの種類などに依存する無線伝送特性の差異を考慮した閾値βの調整が可能になるだけでなく、しかも、その閾値βに基づいて生成されるランク情報ＲＩに対する送信電力の影響を小さくすることができる。

また、本実施形態によれば、ユーザ装置１０（３０）と無線基地局２０（４０）との間の送受信は複数のサブキャリアを用いて行われ、ユーザ装置と無線基地局との間で送受信される複数のサブキャリアのそれぞれによる既知の参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネル行列の複数の固有値λそれぞれについて複数のサブキャリア間の平均値を算出する。また、複数のサブキャリアのそれぞれによる既知の参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルにおける干渉雑音レベルσ^2を推定し、前記複数の固有値λの平均値と閾値βとの比較結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルのランク情報ＲＩを生成する。これにより複数のサブキャリアを用いたデータ送受信においても最適なランク情報ＲＩを生成することが可能となる。

また、本実施形態によれば、前記固有値λの平均値は、複数のサブキャリアごとに重み付けを行って平均したものである。これにより、ランク情報ＲＩの生成に用いる固有値λの平均値の精度を高めることができる。

【００７５】

なお、上記各実施形態では、ランク情報ＲＩの生成に、ＭＩＭＯチャネル行列の相関行列の固有値（λ）を用いているが、ＭＩＭＯチャネル行列の特異値（$(\lambda)^{1/2}$）を用いてもよい。この場合は、例えば、複数のユーザ装置１０（３０）の間で送受信される複数のサブキャリアのそれぞれによる参照信号ＲＳの受信結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネル行列の複数の特異値を二乗した値それぞれについて前記複数のサブキャリア間の平均値を算出し、その複数の特異値の二乗平均値と閾値βとの比較結果に基づいて、ＭＩＭＯチャネルのランク情報ＲＩを生成する。

【符号の説明】

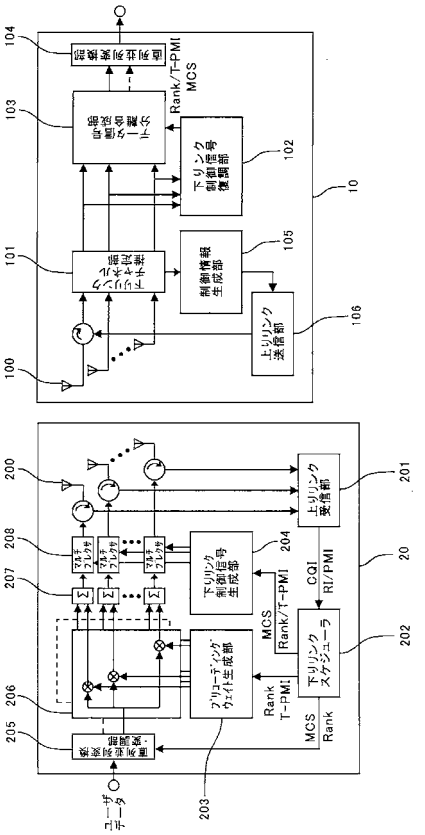
【００７６】

１０、３０　ユーザ装置
２０、４０　無線基地局
１０１　下りリンクチャネル推定部
１０２　下りリンク制御信号復調部

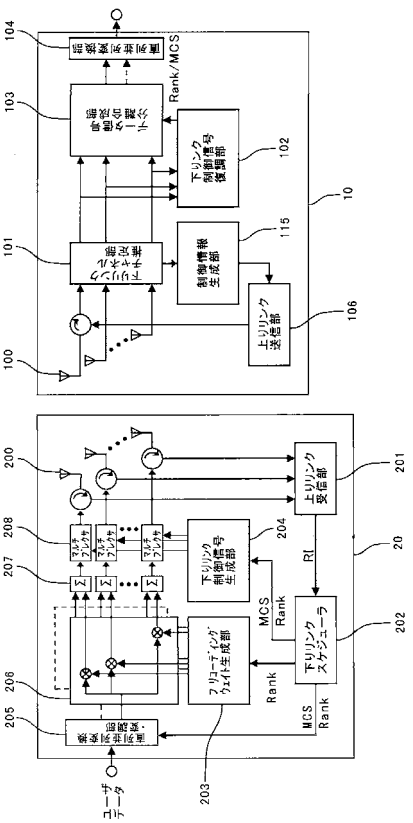
１０３　データ信号分離合成部
１０４　直列並列変換部
１０５　制御情報（ＲＩ／ＰＭＩ／ＣＱＩ）生成部
１０６　上りリンク送信部
２０１　上りリンク受信部
２０２　下りリンクスケジューラ
２０３　プリコーディングウェイト生成部
２０４　下りリンク制御信号生成部
２０５　直列並列変換・変調部
２０６　乗算器
２０８　マルチプレクサ
３０１　下りリンク受信部
３０２　プリコーディングウェイト生成部
３０３　直列並列変換・変調部
３０４　乗算器
３０７　上りリンク参照信号生成部
４０１　上りリンクチャネル推定部
４０４　上りリンクスケジューラ
４０５　下りリンク送信部

【先行技術文献】
【特許文献】
【００７７】
【特許文献１】特開２０１０－１４８００４号公報
【非特許文献】
【００７８】
【非特許文献１】3GPP TS36.211 V10.1.0,"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 10),"March 2011.
【非特許文献２】3GPP TS36.212 V10.1.0,"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 10),"March 2011.
【非特許文献３】3GPP TS36.213 V10.1.0,"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 10),"March 2011.
【非特許文献４】H. Taoka, S. Nagata, K Takeda, Y. Kakishima, X. She, and K. Kusume, "MIMO and CoMP in LTE-Advanced," NTT DoCoMo Technical Journal (English Edition), vol.12, no.2, pp.20-28, Sept. 2010.
【非特許文献５】S. Boumard, "Novel noise variance and SNR estimation algorithm for wireless MIMO OFDM systems," Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference 2003, vol.3, pp.1330-1334, San Francisco, USA, Dec. 2003.

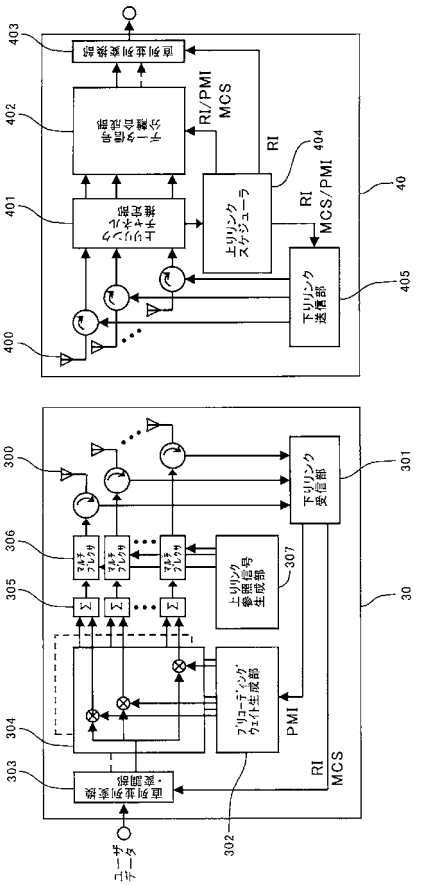
【図１】



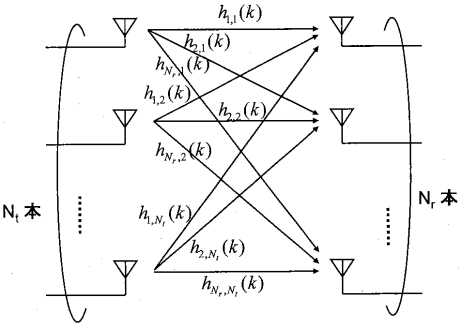
【図２】



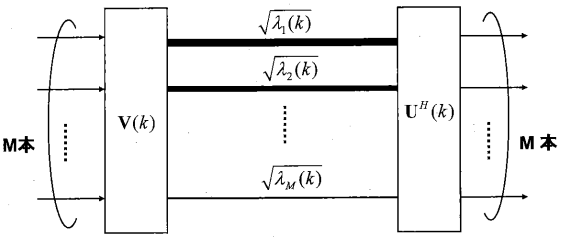
【図３】



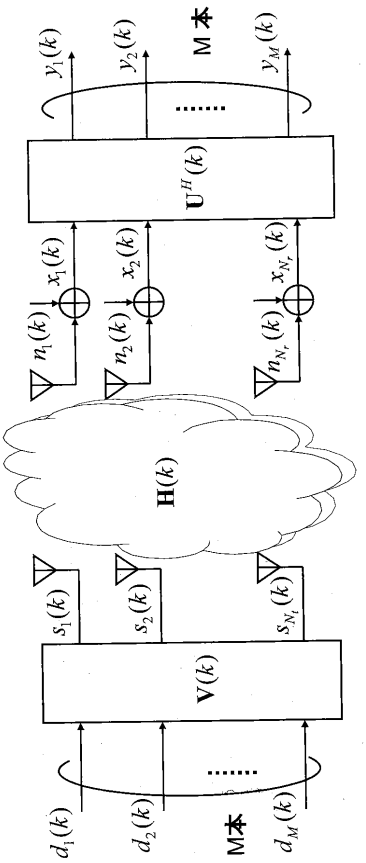
【図４】


$h_{1,1}(k)$
$h_{2,1}(k)$
$h_{N_r,1}(k)$
$h_{1,2}(k)$
$h_{2,2}(k)$
$h_{N_r,2}(k)$
$h_{1,N_t}(k)$
$h_{2,N_t}(k)$
$h_{N_r,N_t}(k)$
N_t 本
N_r 本

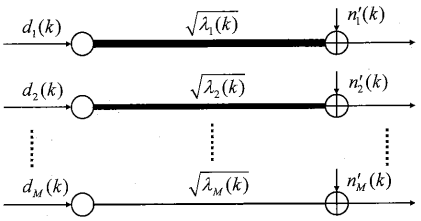
【図５】


$\sqrt{\lambda_1(k)}$
$\sqrt{\lambda_2(k)}$
$\sqrt{\lambda_M(k)}$
$\mathbf{V}(k)$
$\mathbf{U}^H(k)$
M本
M本

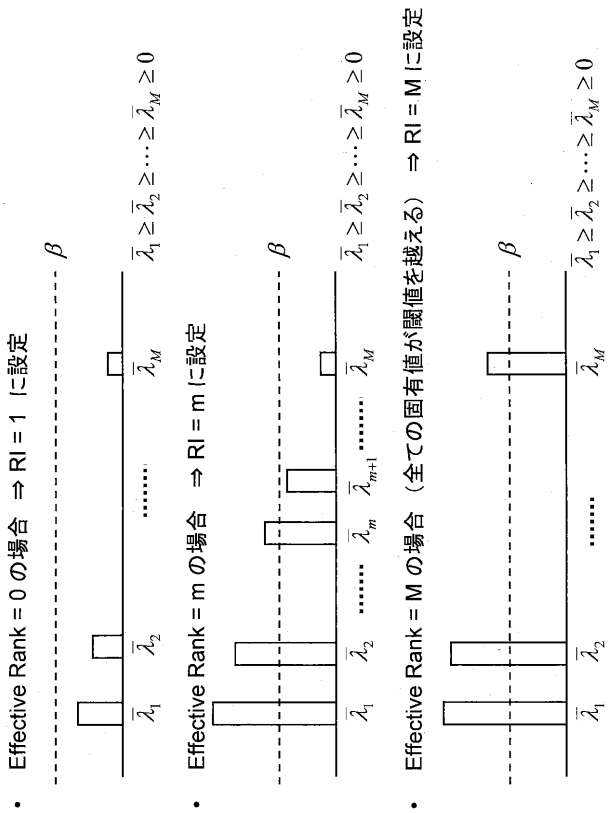
【図６】


$y_1(k)$
$y_2(k)$
M本
$y_M(k)$
$\mathbf{U}^H(k)$
$x_1(k)$
$x_2(k)$
$x_{N_r}(k)$
$n_1(k)$
$n_2(k)$
$n_{N_r}(k)$
$\mathbf{H}(k)$
$s_1(k)$
$s_2(k)$
$s_{N_t}(k)$
$\mathbf{V}(k)$
$d_1(k)$
$d_2(k)$
M本
$d_M(k)$

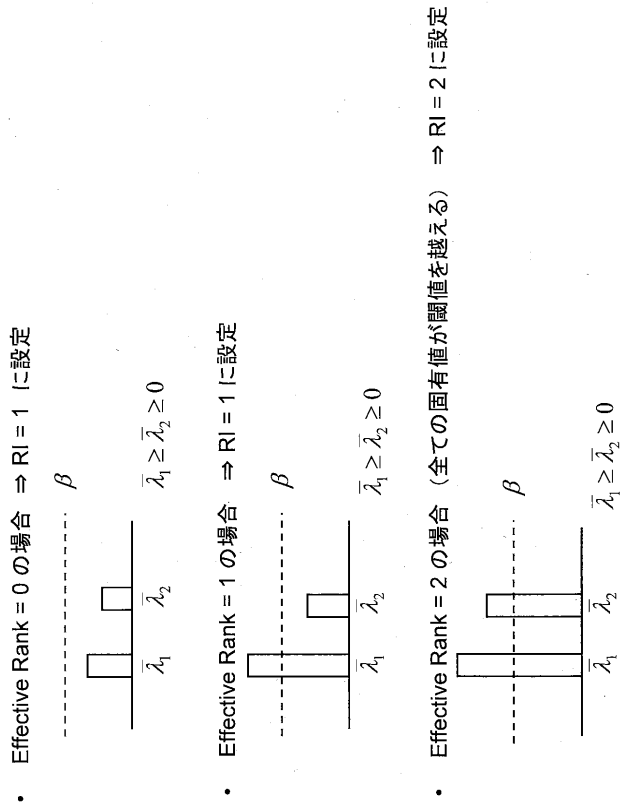
【図７】


$d_1(k)$
$\sqrt{\lambda_1(k)}$
$n_1'(k)$
$d_2(k)$
$\sqrt{\lambda_2(k)}$
$n_2'(k)$
$d_M(k)$
$\sqrt{\lambda_M(k)}$
$n_M'(k)$

【図８】


• Effective Rank = 0 の場合 ⇒ RI = 1 に設定
β
$\bar{\lambda}_1$ $\bar{\lambda}_2$ ..... $\bar{\lambda}_M$
$\bar{\lambda}_1 \geq \bar{\lambda}_2 \geq \cdots \geq \bar{\lambda}_M \geq 0$
• Effective Rank = m の場合 ⇒ RI = m に設定
β
$\bar{\lambda}_1$ $\bar{\lambda}_2$ ..... $\bar{\lambda}_m$ $\bar{\lambda}_{m+1}$ ..... $\bar{\lambda}_M$
$\bar{\lambda}_1 \geq \bar{\lambda}_2 \geq \cdots \geq \bar{\lambda}_M \geq 0$
• Effective Rank = M の場合 （全ての固有値が閾値を越える） ⇒ RI = M に設定
β
$\bar{\lambda}_1$ $\bar{\lambda}_2$ ..... $\bar{\lambda}_M$
$\bar{\lambda}_1 \geq \bar{\lambda}_2 \geq \cdots \geq \bar{\lambda}_M \geq 0$

【図９】


• Effective Rank = 0 の場合 ⇒ RI = 1 に設定
β
$\bar{\lambda}_1$ $\bar{\lambda}_2$
$\bar{\lambda}_1 \geq \bar{\lambda}_2 \geq 0$
• Effective Rank = 1 の場合 ⇒ RI = 1 に設定
β
$\bar{\lambda}_1$ $\bar{\lambda}_2$
$\bar{\lambda}_1 \geq \bar{\lambda}_2 \geq 0$
• Effective Rank = 2 の場合 （全ての固有値が閾値を越える） ⇒ RI = 2 に設定
β
$\bar{\lambda}_1$ $\bar{\lambda}_2$
$\bar{\lambda}_1 \geq \bar{\lambda}_2 \geq 0$