

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5243411号
(P5243411)

(45) 発行日 平成25年7月24日 (2013. 7. 24)

(24) 登録日 平成25年4月12日 (2013. 4. 12)

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

請求項の数 15 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2009-509499 (P2009-509499)	(73) 特許権者	503231882
(86) (22) 出願日	平成19年5月3日 (2007. 5. 3)		エージェンシー フォー サイエンス、テ
(65) 公表番号	特表2009-535971 (P2009-535971A)		クノロジー アンド リサーチ
(43) 公表日	平成21年10月1日 (2009. 10. 1)		シンガポール、シンガポール 1 3 8 6
(86) 国際出願番号	PCT/SG2007/000126		3 2, ナンバー 2 0 - 1 0 コネクシス
(87) 国際公開番号	W02007/129990		, フージョノポリス ウエイ 1
(87) 国際公開日	平成19年11月15日 (2007. 11. 15)	(73) 特許権者	392026693
審査請求日	平成22年4月6日 (2010. 4. 6)		株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ
(31) 優先権主張番号	60/797, 509		東京都千代田区永田町二丁目 1 1 番 1 号
(32) 優先日	平成18年5月4日 (2006. 5. 4)	(74) 代理人	100107766
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 伊東 忠重
		(74) 代理人	100070150
			弁理士 伊東 忠彦
		(74) 代理人	100091214
			弁理士 大貫 進介

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 信号ベクトルを決定する方法、システム及びコンピュータプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

受信した信号ベクトルから、送信機が送信した複数の成分を含む信号ベクトルを決定する方法であって、

前記受信した信号ベクトルが経由した通信チャネルを表すチャネル行列についてQR分解を行う段階であって、前記チャネル行列は、前記通信チャネル上でのノイズに関する分散情報によって拡張されている、段階と、

拡張されたチャネル行列の前記QR分解を用いて複数の決定ステップを実行する段階であって、各決定ステップにおいて、前記信号ベクトルの可能性のあるサブベクトルの集合は、前記集合内の可能性のあるサブベクトルの数が所定の最大数よりも少なくなるように決定され、前記可能性のあるサブベクトルは、前記送信機が送信した可能性のある信号ベクトルのサブベクトルであり、最初の決定ステップ以降の各決定ステップでは、前記サブベクトルの集合に属するサブベクトルの各々が、前の決定ステップで決定されかつ前記信号ベクトルの或る成分について1つの可能性のあるシンボルによって拡張されたサブベクトルの集合に属するサブベクトルであり、前記前の決定ステップにおけるサブベクトルは前記可能性のあるシンボルを含んでいない、段階と、

前記複数の決定ステップの最後の決定ステップで決定された前記可能性のあるサブベクトルの集合の中から1つのベクトルを前記信号ベクトルとして選択する段階と

を含み、前記最初の決定ステップにおいて、前記信号ベクトルの成分及び前記信号ベクトルの推定された成分の間の差分と前記QR分解に使用される三角行列の対角成分との積

10

20

の大きさが所定値以下である成分により、前記可能性のあるサブベクトルが形成されている、方法。

【請求項 2】

前記信号ベクトルは送信機によって送信されており、前記最大数は、前記送信機によって送信可能なすべての信号ベクトルの数よりも少ない、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記信号ベクトルの成分各々について、可能性のあるいくつかの成分値が前記送信機によって送信可能であり、前記所定の最大数は、前記可能性のある成分値の数よりも前記信号ベクトルの成分数の累乗だけ少ない、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

或る決定ステップで決定された可能性のあるサブベクトルの集合に属するすべてのサブベクトルが、同じ次元を有する、請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】

実行される前記複数の決定ステップの数が、前記信号ベクトルの成分の数である、請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】

前記信号ベクトルが、前記拡張されたチャネル行列に基づく Q R D - M アルゴリズムを用いて決定される、請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 7】

M M S E フィルタリング行列を使用して前記受信した信号ベクトルをプレフィルタリングする段階をさらに含む、請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

前記サブベクトルの集合が、Q R D - M アルゴリズムを使用して前記プレフィルタリングされた受信ベクトルに基づいて決定される、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記信号ベクトルの最小平均二乗推定値を決定する段階と、
Q R D - M アルゴリズムを使用して前記最小平均二乗推定値に基づいて前記信号ベクトルを決定する段階と

をさらに含む請求項 1 ~ 8 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 10】

前記複数の決定ステップの最初の決定ステップで、前記信号ベクトルの第 1 の成分に関する可能性のあるシンボルの集合が決定される、請求項 1 ~ 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 11】

前記サブベクトルが決定ステップごとに拡張される際に従う前記信号ベクトルの前記成分の順序が、Q R 分解の行列 R、前記拡張されたチャネル行列の列ノルム又は行ノルムに基づく、或いは V - B L A S T 順序付けに基づく、請求項 1 ~ 10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

前記信号ベクトルが、複数の送信アンテナを使用して送信され、複数の受信アンテナによって受信される、請求項 1 ~ 11 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 13】

前記チャネル行列の各成分が、前記送信アンテナの 1 つから前記受信アンテナの 1 つへのチャネル利得を特徴付ける、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

受信した信号ベクトルから、送信機が送信した複数の成分を含む信号ベクトルを決定するシステムであって、

前記受信した信号ベクトルが経由した通信チャネルを表すチャネル行列について Q R 分解を行う分解回路であって、前記チャネル行列は、前記通信チャネル上でのノイズに関する分散情報によって拡張されている、分解回路と、

10

20

30

40

50

拡張されたチャネル行列の前記QR分解を用いて複数の決定ステップを実行する決定回路であって、各決定ステップにおいて、前記信号ベクトルの可能性のあるサブベクトルの集合は、前記集合内の可能性のあるサブベクトルの数が所定の最大数よりも少なくなるように決定され、前記可能性のあるサブベクトルは、前記送信機が送信した可能性のある信号ベクトルのサブベクトルであり、最初の決定ステップ以降の各決定ステップでは、前記サブベクトルの集合に属するサブベクトルの各々が、前の決定ステップで決定されかつ前記信号ベクトルの或る成分について1つの可能性のあるシンボルによって拡張されたサブベクトルの集合に属するサブベクトルであり、前記前の決定ステップにおけるサブベクトルは前記可能性のあるシンボルを含んでいない、決定回路と、

前記複数の決定ステップの最後の決定ステップで決定された前記可能性のあるサブベクトルの集合の中から1つのベクトルを前記信号ベクトルとして選択する選択回路と

を備え、前記最初の決定ステップにおいて、前記信号ベクトルの成分及び前記信号ベクトルの推定された成分の間の差分と前記QR分解に使用される三角行列の対角成分との積の大きさが所定値以下である成分により、前記可能性のあるサブベクトルが形成されている、システム。

【請求項15】

受信した信号ベクトルから、送信機が送信した複数の成分を含む信号ベクトルを決定する方法を受信機に実行させるコンピュータプログラムであって、前記方法は、

前記受信した信号ベクトルが経由した通信チャネルを表すチャネル行列についてQR分解を行う段階であって、前記チャネル行列は、前記通信チャネル上でのノイズに関する分散情報によって拡張されている、段階と、

拡張されたチャネル行列の前記QR分解を用いて複数の決定ステップを実行する段階であって、各決定ステップにおいて、前記信号ベクトルの可能性のあるサブベクトルの集合は、前記集合内の可能性のあるサブベクトルの数が所定の最大数よりも少なくなるように決定され、前記可能性のあるサブベクトルは、前記送信機が送信した可能性のある信号ベクトルのサブベクトルであり、最初の決定ステップ以降の各決定ステップでは、前記サブベクトルの集合に属するサブベクトルの各々が、前の決定ステップで決定されかつ前記信号ベクトルの或る成分について1つの可能性のあるシンボルによって拡張されたサブベクトルの集合に属するサブベクトルであり、前記前の決定ステップにおけるサブベクトルは前記可能性のあるシンボルを含んでいない、段階と、

前記複数の決定ステップの最後の決定ステップで決定された前記可能性のあるサブベクトルの集合の中から1つのベクトルを前記信号ベクトルとして選択する段階と

を含み、前記最初の決定ステップにおいて、前記信号ベクトルの成分及び前記信号ベクトルの推定された成分の間の差分と前記QR分解に使用される三角行列の対角成分との積の大きさが所定値以下である成分により、前記可能性のあるサブベクトルが形成されている、コンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】

【関連出願の相互参照】

【0001】

本出願は、2006年5月4日に提出された米国特許仮出願第60/797509号の利益を主張するものであり、その内容全体が、参照により本明細書に組み込まれている。

【発明の分野】

【0002】

本発明は、信号ベクトルを決定する方法及びシステムに関する。

【発明の背景】

【0003】

多入力及び多出力(MIMO)システムは、多重送信及び受信アンテナの使用がシステム容量を劇的に増大させるという事実により次世代の通信システムの有望な候補としてみなされ、関心を呼んでいる。最適な最高確率(ML)の検出は指数関数的な複雑さを伴い、したがって実際の使用には適していないため、通常は準最適な検出アルゴリズムが使用さ

10

20

30

40

50

れる。しかし、一例として、複雑性が低い無効化プラス消去アルゴリズム（下記〔1〕を参照）は、著しいダイバーシティ損失及び電力損失をこうむる。

【0004】

複雑性は低いが最高確率の検出の性能に近いアルゴリズムの研究に多大な労力が費やされており、中でも球内復号（下記〔2〕～〔8〕を参照）、及びいわゆるMアルゴリズム（QRD-M）と組み合わせたQR分解（QRD）下記〔9〕は、最も魅力あるアルゴリズムである。双方のアルゴリズムとも、木探索をベースにしたアルゴリズムであり、そのうちの球内復号は深さ優先探索であり、QRD-Mは幅優先探索である。球内復号は、超球面内にある候補のみを探索することによって複雑性を低減し、QRD-Mアルゴリズムは、各ステップで最小の累積メトリック値を有する候補のみを保存することによって複雑性を低減する。平均すれば、球内復号はQRD-Mアルゴリズムよりも複雑性が低いが、その最悪の場合の複雑性は大幅に高い。

10

【0005】

本発明の目的は、従来の検出方法と比較して性能が向上した検出方法を提供することである。

【発明の概要】

【0006】

受信された信号ベクトルから、複数の成分を含む信号ベクトルを決定する方法であって、信号ベクトルが受信された際に経由した通信チャネルを特徴付け、通信チャネル上でのノイズに関する分散情報によって拡張されるチャネル行列のQR分解を行うステップと、拡張されたチャネル行列のQR分解を用いて複数の決定ステップを実行するステップであって、各ステップでは、信号ベクトルの可能性のあるサブベクトルの集合（セット：set）が決定され、各ステップにおいて、その集合中の可能性のあるサブベクトルの数が所定の最大数よりも少ないステップと、複数の決定ステップの最後のステップで決定された可能性のあるサブベクトルの集合のうちの1つのベクトルを信号ベクトルとして選択するステップとを含む方法が提供される。

20

【0007】

他の実施形態では、信号ベクトルを決定する方法によるシステム及びコンピュータプログラム製品が提供される。

【0008】

以降では、図面を参照して本発明の例示的な実施形態について説明する。

30

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本発明の一実施形態による通信システムを示す図である。

【図2】本発明の一実施形態による流れ図である。

【詳細な説明】

【0010】

例示として、一実施形態では、検出のためにQRD-Mアルゴリズムが実行されるが、このアルゴリズムは、ゼロフォーシングに基づくものではなく、信号ベクトルのMMSE（最小平均二乗誤差）に基づいている。QRD-Mアルゴリズムの最高確立に近い性能を保持することができる一方で、全体的な複雑性は、従来のQRD-Mと比較して50%低減させることができる。MMSE推定値に基づくQRD-Mの方法は、MMSEフィルタリング原理に基づくプレフィルタリングされたQRD-Mアルゴリズムとみなすこともできる。

40

【0011】

信号ベクトルを決定する方法というコンテキストで記載される実施形態は、システム及びコンピュータプログラム製品に対しても同様に有効である。

【0012】

決定される信号ベクトルは、例えば送信機によって送信され、その最大数は、送信機により送信可能な全信号ベクトル数よりも少ない。信号ベクトルは、複数の送信機によって

50

、例えばマルチユーザMIMOに基づいて、又はCDMAに基づいて送信することもできる。

【0013】

これは、可能性のあるサブベクトルが決定プロセスですべて考慮されるわけではないことを意味しており、その結果、複雑性が低減される。サブベクトルが最高確率検索に基づいて決定される場合、このことは、その探索が網羅的ではないことを意味している。

【0014】

例えば、信号ベクトルのそれぞれの成分ごとに、可能性のあるいくつかの成分値を送信機によって送信することができ、予め規定された最大数は、可能性のある成分値の数よりも信号ベクトルの成分数の累乗だけ少なくてもよい。

10

【0015】

一実施形態では、1つのステップで決定された可能性のあるサブベクトルの集合中のすべてのサブベクトルが、同じ次元を有している。しかし、これは必ずしも必要ではなく、サブベクトルどうしは、異なる次元を有していてもよい。実行される決定ステップの数は、信号ベクトルの成分の数でよい。

【0016】

一実施形態では、信号ベクトルは、拡張されたチャネル行列に基づくQRD-Mアルゴリズムを使用して決定される。

【0017】

この方法はさらに、MMSEフィルタリング行列を使用して、受信された信号ベクトルをプレフィルタリングするステップを含むことができる。次いで、QRD-Mアルゴリズムを使用して、プレフィルタリングされた受信ベクトルに基づいてサブベクトルの集合を決定することができる。

20

【0018】

前述のように、一実施形態では、信号ベクトルの最小平均二乗誤差の推定値が決定され、QRD-Mアルゴリズムを使用して最小平均二乗推定値に基づいて信号ベクトルが決定される。

【0019】

例えば、複数の決定ステップの最初のステップで、信号ベクトルの第1の成分に関する可能性のあるシンボルの集合が決定される。さらに、最初のステップ以外の各決定ステップで、前のステップでのサブベクトルの集合に基づいてサブベクトルの集合を決定することができる。

30

【0020】

一実施形態では、最初のステップ以外の各ステップで、サブベクトルの集合のサブベクトルの次元は、前のステップで決定されたサブベクトルの集合のサブベクトルの次元よりも1だけ大きい。

【0021】

一実施形態では、最初のステップ以外の各ステップで、サブベクトルの集合の各サブベクトルは、前のステップで決定されたサブベクトルの集合のサブベクトルが、前のステップでのサブベクトルが可能性のあるシンボルを含まない信号ベクトルの成分ごとに可能性のある1つのシンボルによって拡張されたサブベクトルである。

40

【0022】

一実施形態では、サブベクトルがステップごとに拡張される際に従う信号ベクトルの成分の順序は、QR分解の行列R、拡張されたチャネル行列の列ノルム又は行ノルムに基づき、或いはフィルタリング後の信号対ノイズ比に基づく。

【0023】

信号ベクトルは、例えば複数の送信アンテナを使用して送信され、例えば複数の受信アンテナによって受信される。チャネル行列の各成分は、送信アンテナの1つから受信アンテナの1つへのチャネル利得を特徴付けることができる。

【0024】

50

本発明の実施形態で、例えば受信機で使用される回路は、それぞれの機能向けに設計されたハードウェア回路とすることもでき、或いはそれぞれの機能向けにプログラムされたプロセッサなどのプログラマブルユニットとすることもできる。

【0025】

図1は、本発明の実施形態による通信システム100を示している。

【0026】

通信システム100は、送信機101と受信機102とを有している。送信機101は、複数の送信アンテナ103を備え、各送信アンテナ103は、それぞれの送信ユニット104に結合されている。

【0027】

各送信ユニット104には、信号ベクトル

【数1】

$$\underline{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{N_t}]^T$$

の成分が提供され、ここでの N_t は、送信アンテナ103の数である。各送信ユニット104は、それぞれのアンテナ103を使用して信号ベクトル \underline{s} のそれぞれの成分を送信し、それによって全体としては、信号ベクトル \underline{s} が送信される。送信された信号ベクトルは、複数の受信アンテナ105により送信器102によって受信され、各受信アンテナ105は、受信された信号ベクトル

【数2】

$$\underline{r} = [r_1, r_2, \dots, r_{N_r}]^T$$

の形態で通信チャネル108を介してそれぞれの受信ユニット106に結合されている（ T は、転置を示している）。 N_r は、受信アンテナ105の数を示しており、 $N_t = N_r$ である。

【0028】

N_r 及び N_t は、両方とも1を超えるものと仮定されているため、通信システム100は、MIMO（多入力多出力）システム、例えば $N_t = N_r = 4$ 又は8の状態ではシステム30の帯域幅が20MHzで5GHzの中心周波数で動作するMIMO-OFDM（直交周波数分割多重化）システムである。変調は、例えばQPSK（4相位相変調）又は16QAM（直交振幅変調）によって行われる。送信機101は、送信されるデータを（例えば3GPPによって）ターボ符号化するための回路を備えることもでき、またビットインターリーブを備えることもできる。変調用にグレーマッピングを使用することができる。受信機102は、それぞれの逆動作、例えば逆ビットインターリーブ及びターボ復号を実行する。

【0029】

各受信アンテナ105は、受信された信号ベクトル \underline{r} の1つの成分を受信し、それぞれの成分は、アンテナに結合された受信ユニット106によって出力され、検出器107に40送られる。

【0030】

通信チャネル108は、準静的な平坦フェージングチャネルであると仮定されている。送信アンテナ103と受信アンテナ105との間の通信チャネル108の送信特性は、複素チャネル行列 \underline{H} によってモデリング可能である。 \underline{H} の成分 H_{ji} は、 i 番目の送信アンテナ103から j 番目の受信アンテナ105への経路利得を特徴付ける。チャネル行列 \underline{H} は、例えば信号ベクトル \underline{s} を送信する前に実行されるチャネル推定によって受信機102に知られているものと仮定する。

【0031】

受信された信号ベクトル \underline{r} は、

10

20

30

40

50

$$\underline{r} = \underline{H} \cdot \underline{s} + \underline{\eta} \quad (1)$$

で表すことができる。ただし

【数 3】

$$\underline{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{N_r}]^T$$

は、その j 番目の成分が、 j 番目の受信アンテナでの分散が N_r である付加的白色ガウスノイズ (AWGN) を表すベクトルである。

【0032】

通信システム 100 は、例えば V-BLAST アーキテクチャによって形成することができる。

10

【0033】

信号ベクトル \underline{s} は、送信機 101 内で N_t のサブストリームへと逆多重化される単一のデータストリームから生成される。各サブストリームは、シンボルへと符号化され、サブストリームの 1 つのシンボルは、信号ベクトル \underline{s} の 1 つの成分に対応する。

【0034】

検出器 107 は、当初送信された信号ベクトル \underline{s} の推定値である推定された信号ベクトル

【数 4】

$$\underline{\hat{s}}$$

20

を生成するために、受信された信号ベクトル \underline{r} を使用する。

【0035】

以降では、推定された信号ベクトル

【数 5】

$$\underline{\hat{s}}$$

を決定するために検出器 107 によって使用可能であるいくつかの検出方法について記載する。

30

【0036】

推定値

【数 6】

$$\underline{\hat{s}}$$

は、

【数 7】

$$\hat{s}_{MLD} = \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \|\underline{r} - \underline{H}\underline{s}\|^2 \quad (2)$$

40

により与えられる最高確率の検出の解として決定することができ、ここでの \hat{s}_{MLD} は、変調サイズを表し、即ちすべての i について S_i である。

【0037】

最高確率の検出によって、

【数 8】

$$\hat{s}_{MLD}$$

50

のための $\|\underline{s}\|^{N_t}$ の候補のベクトルにわたって網羅的な探索が実行される。したがって、複雑性は高い。

【0038】

$\underline{H} = \underline{Q} \underline{R}$ になるように \underline{H} に QR 分解を適用し (ここでの \underline{Q} は、直交行列であり、 \underline{R} は、 $R_{i,j}$ 、 $j \geq i$ がその非ゼロ要素であり、 $R_{i,i}$ がそれぞれの i ごとの正の実数である上三角行列である)、 $N_r = N_t$ であると仮定すると、方程式 (2) を下記のように再定式化することができる。

【0039】

【数9】

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}}_{\text{MLD}} &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \|\underline{y} - \underline{R}\underline{s}\|^2 \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \left\{ \sum_{j=1}^{N_t} \left| y_j - \sum_{i=j}^{N_t} R_{j,i} s_i \right|^2 + \sum_{k=N_t+1}^{N_r} |y_k|^2 \right\} \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \left\{ \|\underline{R}(\hat{\underline{s}} - \underline{s})\|^2 + \|(I - \underline{R}\underline{R}^\dagger)\underline{y}\|^2 \right\} \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \left\{ \sum_{j=1}^{N_t} \left| R_{j,j}(\hat{s}_j - s_j) + \sum_{i=j+1}^{N_t} R_{j,i}(\hat{s}_i - s_i) \right|^2 + \sum_{k=N_t-1}^{N_r} |y_k|^2 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $\underline{y} = \underline{Q}^H \underline{r}$ であり、

【数10】

$$\hat{\underline{s}} = \underline{H}^\dagger \underline{r} = \underline{R}^\dagger \underline{y}$$

はゼロフォーシング解であり、 † はそれぞれの行列の擬似逆行列を表している。第2項は、送信された信号ベクトル \underline{s} から独立しており、したがって最小化プロセスでは無視できることがわかる。

【0040】

極めて高い複雑性をもたらすことがある網羅的探索は、検出のために球内復号を使用することによって避けることができる。

【0041】

球内復号器は、推定値

【数11】

$$\hat{\underline{s}}$$

用の候補ベクトル、即ち下記の式を満たすベクトル \underline{s} として、半径 d を有する超球内にあるポイントのみを吟味する。

【数12】

$$\sum_{j=1}^{N_t} \left| R_{j,j}(\hat{s}_j - s_j) + \sum_{i=j+1}^{N_t} R_{j,i}(\hat{s}_i - s_i) \right|^2 \leq d^2. \quad (4)$$

【0042】

どのポイント \underline{s} が超球内にあるかを見分けるために、ますます厳密な必要条件が、各ステップにおいて球の検出に適用される。例えば最初のステップでは、

10

20

30

40

50

【数 1 3】

$$|R_{N_t, N_t} (\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2 \leq d^2$$

を用いて、超球内のベクトルの成分

【数 1 4】

$$\tilde{s}_{N_t}$$

が割り出され、第 2 のステップでは、

【数 1 5】

$$|R_{N_t, N_t} (\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2 + |R_{N_t-1, N_t-1} (\hat{s}_{N_t-1} - s_{N_t-1}) + R_{N_t-1, N_t} (\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2 \leq d^2$$

を用いて、所与の

【数 1 6】

$$\tilde{s}_{N_t}$$

での成分

【数 1 7】

$$\tilde{s}_{N_t-1}$$

が割り出される。このように進行することで、下記の [5] 及び [7] に示されているように、最終的にすべてのポイントを見つけることができる。

【0 0 4 3】

球内復号によって、 N_t 次元の共同探索は、後続の段階が前のすべての段階と相関された状態で、 N_t 次元探索に縮小され、これは、基本的に深さ優先の木探索である。超球内の 1 つのポイントが見つかり、半径は、即座に新たなより小さい値に縮小され、探索プロセスは、最高確率推定値が発見されるまで再び実行される。

【0 0 4 4】

球内復号の複雑性は、初期半径 d の選択によって大きく左右される。大きすぎる d が選択されると、多すぎるポイントが見つかり、小さすぎると、ポイントは見つからず、半径を増大させなければならず、探索を繰り返さなければならない。下記の [7] で指摘されているように、 d の値を得るために下記の規則を用いることができる。

【数 1 8】

$$\| \underline{r} - \underline{Hs} \|^2 = \| \underline{\eta} \|^2 \approx N_o E \{ \chi_{2N_r}^2 \} = N_o N_r \leq d^2 \quad (5)$$

ここでの $E \{ \cdot \}$ は、期待動作を表す。したがって d は、 $d^2 = K N_o N_r$ に基づいて選択することができ、ここでの $K > 1$ は、スケーリング係数である。試行錯誤によって、良好な K を見つけることができる。

【0 0 4 5】

球内復号器は、指定された超球内にポイントが見つからない場合に半径が増大されれば ML 性能を達成することが保証されているが（即ち、最適な最高確率の解を見つけることが保証されているが）、複雑性が高まるという犠牲を伴う。ML 性能を損なわずに複雑性を低減させるために、下記のようないくつかの順序付け方式を適用することができる。

【 0 0 4 6 】

分岐メトリックに基づく順序付け：球内復号器の欠点の1つは、その複雑性が初期半径の選択に大きく作用されることである。下記の[4]で提案されている順序付け方式は、複雑性を低減させるだけでなく、複雑性が初期半径によって影響されにくくもする。この新規のアルゴリズムは常に、最小の分岐メトリックを有するコンステレーションポイントから探索を開始し、例えば、最初のステップでは、

【数19】

$$|R_{N_t, N_t} (\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2$$

10

を最小化する s_{N_t} が最初に選択され、第2のステップでは、所与の s_{N_t} で

【数20】

$$|R_{N_t-1, N_t-1} (\hat{s}_{N_t-1} - s_{N_t-1}) + R_{N_t-1, N_t} (\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2$$

を最小化する s_{N_t-1} が最初に選択される、といった具合である。チャネルの条件付けが良好になされていれば、このアルゴリズムによって見つかる最初のポイントは、最高確率推定値である可能性が高くなる。したがって、見込まれる複雑性を大幅に低減させることができる。

【 0 0 4 7 】

20

Rに基づく順序付け：各ステップで指定の球内にあるポイント数を減らすために、ひいては複雑性を低減させるために、Rの対角要素を最大化することができる。例えば、最初のステップでは、

【数21】

$$|R_{N_t, N_t} (\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2 \leq d^2$$

を用いて、すべての s_{N_t} を見つける。dが一定である場合、 R_{N_t, N_t} が大きいほど、見つかる s_{N_t} は少なくなる。複雑性の節減は木探索の上位レベルでより重要であるため、 $j > i$ である場合、 $R_{i, i}$ よりも $R_{j, j}$ を最大化することの方が重要である。したがって、 $j = 1$ から $j = N_t$ の場合に、 $R_{j, j}$ に最小から最大まで辞書式順序付け（ダイアグラム順序付け）がなされれば、より多くの複雑性の節減を期待することができる。複雑性をさらに低減するために、この順序付けを分岐メトリックに基づく順序付けと組み合わせることができる。

30

【 0 0 4 8 】

Hに基づく順序付け：球内復号の探索プロセスは、干渉除去を含んでいる。干渉除去に基づく検出方法では、最強の信号を最初に検出することで、より信頼性の高い結果が得られ、より良好な性能が得られる。したがって、V-BLAST検出で以前用いられたすべての順序付け方式、即ち、Hの列ノルムに基づく順序付け（Hノルム順序付け）、 H^\dagger の行ノルムに基づく順序付け（Hinv順序付け）、及びV-BLAST順序付けを球内復号に直接適用することができる（下記[1]を参照）。この順序付けを、分岐メトリックに基づく順序付けと組み合わせることもできる。

40

【 0 0 4 9 】

一実施形態では、検出器107は、QRD-Mアルゴリズムによって

【数22】

$$\tilde{\mathbf{S}}$$

を決定する（下記[9]を参照）。QRD-Mアルゴリズムは、方程式(3)のメトリックを最小化するために、各ステップで最小の累積メトリックを有するMの分岐だけを保存

50

する。これは、

【数 2 3】

$$\underline{\tilde{s}}$$

向けの M の候補ベクトルのみに関して、(それまでに決定された)成分が、下記のステップで考慮されることを意味する。これは、各ステップの後(即ち、可能性のあるさらなる成分

【数 2 4】

$$\underline{\tilde{s}}$$

10

を決定する各ステップの後)、M のベクトルのみが

【数 2 5】

$$\underline{\tilde{s}}$$

のサブベクトルとして保存されることを意味する。

【0050】

例えば、最初のステップでは、可能性のある s_{N_t} から最小の

20

【数 2 6】

$$|R_{N_t, N_t}(\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2$$

を有する M だけが保存される。第 2 のステップでは、 s_{N_t-1} 及び s_{N_t} の M の組合せ(最初のステップからの s_{N_t-1} の M の保存された可能性と s_{N_t} の可能性との積)から最小の累積メトリック

【数 2 7】

$$|R_{N_t, N_t}(\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2 + |R_{N_t-1, N_t-1}(\hat{s}_{N_t-1} - s_{N_t-1}) + R_{N_t, N_t-1}(\hat{s}_{N_t} - s_{N_t})|^2$$

30

を有する M だけが保存される、といった具合である。最後のステップでは、最小の全体的メトリックを有する \underline{s} が、最高確率推定値として選択される。この最高確率は、網羅的探索によって見つかる最適な確率でないことがある。したがって QRD-M アルゴリズムは、本質的に準最適な検出手段であり、 $M = N_t$ である場合のみ、網羅的な最高確率探索になる。M = 1 である場合は、本質的に干渉除去を含むゼロフォーシング検出である。

【0051】

球内復号と比較した QRD-M アルゴリズムの利点は、M が一定であればその複雑性も一定であるということである。球内復号にとって、最良の場合と最悪の場合の複雑性は、大幅に異なる可能性がある。しかし、見込まれる全体的な複雑性は、それでも QRD-M アルゴリズムの複雑性よりも低い可能性がある。

40

【0052】

分岐メトリックに基づく順序付けを除く球内復号のための上記の順序付けは、システムの性能を高めるために検出用に QRD-M アルゴリズムを用いる場合に使用することもできる。 H の列ノルムに基づく順序付けは、例えば下記の [9] に記載されている標準的な QRD-M アルゴリズムに適用される。

【0053】

球内復号の場合、ほとんどの通信システムの見込まれる複雑性は、 $O(N_t^3)$ である(下記 [5] を参照)。探索されるノードの数を複雑性の指標として利用してもよく、より正確には、(3) に基づいて実行される実際の乗算の数を利用してよい。1 つのポイ

50

ントが球内にあるか否かをテストする複雑性は無視できると想定してもよい。さらに、チャンネル行列での操作も複雑性の計算では無視できるものとみなしてもよい。 $R_{j,i}$ は、 $j = i$ である場合は実数であり、 $j \neq i$ である場合は複素数であることに留意されたい。

【0054】

符号化されたシステムの場合、動作SNRは、例えば7dBと設定される。SNRが増加すると、典型的には複雑性が低下する。分岐メトリックに基づく順序付け(下記[4]を参照)は、複雑性に最も著しい影響を及ぼし、初期半径には影響されなくなることがシミュレーションからわかる。一方、メトリックを考慮に入れない順序付けの場合は、半径が増大すると、複雑性は増大する。Hノルム順序付け及びDiagR順序付けは、初期半径が適切に選択されていれば、複雑性をやや低減させる上で役立つことができる。

10

【0055】

初期半径が大きすぎる場合は、それらの複雑性は、順序付けがなされない場合よりもいっそう高くなる。DiagRに基づく順序付けでは常に、Hノルムに基づく順序付けよりも複雑性が低くなる。順序付けメトリックアルゴリズムの平均的な複雑性は、DiagR又はHノルム順序付けと組み合わせれば、約25%低減される。

【0056】

例えば動作SNRを15dBに設定して16QAM変調された 4×4 システムの場合、探索されたノードの平均数及び実行された実際の乗算の平均数のそれぞれによって、広範囲の初期半径についてHノルム順序付け及びDiagR順序付けは、順序付けがなされない場合よりも複雑性が低くなることがわかる。例えば 8×8 システムの場合、寸法が増大すると、複雑性の低減は、順序付けが適用された場合よりも顕著になることがある。

20

【0057】

順序付けがなされない場合、分岐メトリックの順序付けを行った場合、及び分岐メトリックの順序付けを行った場合の球内復号どうしの最大の複雑性は、実際の場合には大きく異なることがある。

【0058】

表1及び2には、それぞれQPSK及び16QAM変調された 4×4 システムで最高確率を達成できる方式間における複雑性の比較に関する研究の要約が記載されている。球内復号の場合、Hノルム順序付けと組み合わせたメトリック順序付けが基準として用いられるが、それは、この順序付けが、DiagR順序付けとは異なり、過度の複雑性をもたらさないためである。QRD-Mアルゴリズムの場合、ML性能を達成するために、QPSK用には $M = 4$ が用いられ、16QAM用には $M = 16$ が用いられる。この比較は、硬判定MLの場合のみであることに留意されたい。

30

【表1】

	実際の乗算の平均数	実際の乗算の最大数	平均ノード数	最大ノード数
ML	2272	2272	85 (1+4+16+64)	85
QRD-M (M=4)	304	304	13 (1+4+4+4)	13
球内復号器	150	2052	14	151

40

表1: QPSK変調された 4×4 システムの複雑性の比較

【表 2】

	実際の乗算の 平均数	実際の乗算の 最大数	平均ノード数	最大ノード数
ML	330880	330880	4369 (1+4+256+4096)	4396
QRD-M(M=4)	3520	3520	49 (1+16+16+16)	49
球内復号器	200	8248	19	676

表 2 : 16QAM変調された4×4システムの複雑性の比較

【0059】

10

球内復号は、常に最低の平均複雑性を有し、球内復号の複雑性は、QRD-M及び真のML検出とは異なり、変調サイズによる影響をそれほど受けないため、球内復号の利点は、16QAM変調の場合に、より明白であるということが、表1及び2からわかる。球内復号の問題点は、最悪の場合の複雑性が平均の複雑性よりも大幅に高いことである。この問題点を軽減する1つの方法は、複雑性の上限を単に制限することである。ポイントが見つからない場合は、ゼロフォーシングの解がML推定値であるものとみなされる。しかし、これはシステムの劣化をもたらす。

【0060】

前述のQRD-Mアルゴリズムは、ゼロフォーシングの解に基づく分岐メトリック値の計算であるとみなすことができる。ゼロフォーシングアルゴリズムは、特にチャンネル行列（ひいてはQR分解における対応する上三角行列）が悪条件にある場合には、ノイズが増大しやすいため、一実施形態では、擬似逆行列MMSE（最小平均二乗誤差）アルゴリズムに基づくQRD-Mアルゴリズムが、検出に使用される。一実施形態では、これは、MMSE VALAST無効化及び消去検出用に下記[10]でHassibiにより提案されている擬似逆行列MMSEアルゴリズムの応用である。

20

【0061】

MMSEは、不良チャンネルの影響に対処するにはゼロフォーシングアルゴリズムよりも優れているため、最悪の分岐の性能は、この方法を用いることによって改善されると見込むことができる。したがって、同レベルのBER性能を達成するために分岐数を減らすことができる。

30

【0062】

上記のように、信号モデルは

$$\underline{r} = \underline{H} \cdot \underline{s} + \underline{n} \quad (6)$$

で表される。

【0063】

標準的なMMSEフィルタリング行列は、

$$\underline{W}^H = \underline{H}^H (\underline{H} \underline{H}^H + N_0 \underline{I})^{-1} = (\underline{H}^H \underline{H} + N_0 \underline{I})^{-1} \underline{H}^H$$

として表記することができる。

【0064】

チャンネル行列は、ノイズに関する分散情報を利用して

40

【数28】

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} \underline{H} \\ \sqrt{N_0} \underline{I} \end{bmatrix}$$

として拡張され、ここでの \underline{I} は、 $N_t \times N_t$ の単位行列である。さらに、

【数29】

$$\underline{\tilde{y}} = \begin{bmatrix} \underline{r} \\ \underline{0} \end{bmatrix}$$

50

(ここでの $\underline{0}$ は、 $N_t \times 1$ のゼロ列ベクトルである) とすると、

【数 3 0】

$$\underline{G}^\dagger \underline{\tilde{y}} = \underline{W}^H \underline{r}.$$

となる。すると、ML 検出の問題を

【数 3 1】

$$\begin{aligned} \underline{\tilde{s}}_{ml} &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \|\underline{r} - H\underline{s}\|^2 & 10 \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \left\{ \|\underline{\tilde{y}} - \underline{G}\underline{s}\|^2 - N_0 \|\underline{s}\|^2 \right\} \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \left\{ \|\underline{G}(\underline{\tilde{s}} - \underline{s})\|^2 - N_0 \|\underline{s}\|^2 + \|(\underline{I} - \underline{G}\underline{G}^\dagger)\underline{\tilde{y}}\|^2 \right\} \\ &= \arg \min_{\underline{s} \in \Omega^{N_t}} \left\{ \sum_{j=1}^{N_t} \left| \tilde{r}_{j,j}(\tilde{s}_j - s_j) + \sum_{i=j+1}^{N_t} \tilde{r}_{j,i}(\tilde{s}_i - s_i) \right|^2 - N_0 \|\underline{s}\|^2 + \sum_{k=N_t-1}^{N_r} |y_k|^2 \right\} & 20 \\ & & (7) \end{aligned}$$

として表記することができる。ここでは、

【数 3 2】

$$\underline{\tilde{R}} = \underline{\tilde{Q}}^H \underline{G}$$

とした場合の

【数 3 3】

$$\tilde{R}_{i,j} \tag{30}$$

は、 \underline{R} の成分を表し、

【数 3 4】

$$\underline{\tilde{s}} = \underline{G}^\dagger \underline{\tilde{y}} = \underline{W}^H \underline{r}$$

は、MMSE 推定値である。探索プロセスは、探索プロセスに關与するもう 1 つの項 N_0 。

\underline{s}^2 が存在することを除いて、球内復号又は QRD-M アルゴリズムの場合と同様に行うことができる。例えば QPSK の場合、この項は定数であり、探索プロセスでは無視することができる。 40

【0065】

$M = 4$ とし、H ノルム順序付けを伴う擬似逆行列 MMSE に基づく QRD-M は、 $M = 8$ とし、V-BLAST 順序付けを伴う従来のゼロフォーシングに基づく QRD-M と同様の性能を達成できることが、シミュレーションからわかる。V-BLAST 順序付けが適用される場合、その性能は、ほぼ ML の性能に到達し、ゼロフォーシングに基づくものよりも約 10 dB だけ性能が優れている。

【0066】

プレフィルタリングされた QRD-M 検出方式は、直交周波数及び符号分割多重 (OFCDM) MIMO システムに適用することができる (下記 [11] を参照)。 50

【 0 0 6 7 】

プレフィルタリングされたQRD-M検出方式、即ちMMSE推定に基づくQRD-M検出方法は、図1に示されているようなMIMOシステム、例えばOFCDM(直交周波数及び符号分割)MIMOシステムに適用することができるが、GSTBC(群別空間-時間ブロック符号化)GSTBCシステム、例えばGSTBC-OFDMシステム又はGSTBC-OFCDMシステムの受信機によって使用することもできる([12]を参照)。

【 0 0 6 8 】

記載のプレフィルタリングされたQRD-M検出方式は、マルチユーザ符号分割多重アクセス(CDMA)システムの基地局での検出に使用することもできる。この場合、対応する信号モデルを、

$$\underline{r} = \underline{R} \underline{d} + \underline{\quad} \quad (8)$$

として表記することができる。この場合、 $\underline{r} = (r_1, r_2, \dots, r_K)^T$ であり、 r_j は、j番目の拡張符号に整合するフィルタ出力を表し、 \underline{R} は、実際に使用しているKのユーザの相関行列を表し、 \underline{d} は、送信された信号ベクトルを表し、 $\underline{\quad}$ は、符号列フィルタリングされたAWGNノイズを表している。フィルタリングされたノイズは、ユーザの拡張符号が直交符号でない場合には、もはやAWGNではない。

【 0 0 6 9 】

様々なユーザにとってのチャンネル利得及びマルチパス効果は、すべて相関行列 \underline{R} に組み込まれる。

【 0 0 7 0 】

以降では、図2を参照して本発明の一実施形態による検出方法について説明する。

【 0 0 7 1 】

図2は、本発明の一実施形態による流れ図を示している。

【 0 0 7 2 】

201では、信号ベクトルが、例えばMIMOシステムの受信機によって受信される。

【 0 0 7 3 】

信号ベクトルが受信された際に経由したチャンネルは、チャンネル行列によって特徴付けることができるものと想定される。

【 0 0 7 4 】

202では、チャンネル行列が、通信チャンネルのノイズに関する分散情報によって拡張される。例えば、上で用いられた表記を使用すれば、行列Gは、

【 数 3 5 】

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} \underline{H} \\ \sqrt{N_0} \underline{I} \end{bmatrix}$$

に従ってチャンネル行列Hから生成され、この場合、前述のように、 N_0 は、通信チャンネルでのノイズの分散を表す。

【 0 0 7 5 】

203では、拡張されたチャンネル行列のQR分解が実行される。

【 0 0 7 6 】

204では、拡張されたチャンネル行列のQR分解を用いて複数の決定ステップが実行され、各ステップでは、信号ベクトルの可能性のあるサブベクトルの集合(セット)が決定され、各ステップにおいて、その集合中の可能性のあるサブベクトルの数は、所定の最大数よりも少ない。最後の決定ステップの後、その最後の決定ステップで決定された可能性のあるサブベクトルの集合のうちの1つのベクトルが、信号ベクトルとして選択される。

【 0 0 7 7 】

それらの複数の決定ステップは、例えばQRD-Mアルゴリズムによって実行される。

【 0 0 7 8 】

10

20

30

40

50

チャネルの特徴が急速に変化しない場合には、同じ拡張されたチャネル行列及び同じQR分解を用いて複数の信号ベクトルを決定することができる。

【0079】

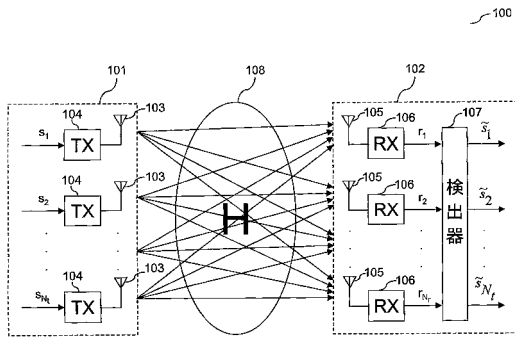
さらに、計算上の複雑性を低減させるために、MMSEに基づくQRD-M方式を下記[11]に記載の適応型トレリス拡張方式と組み合わせることもできる。

【0080】

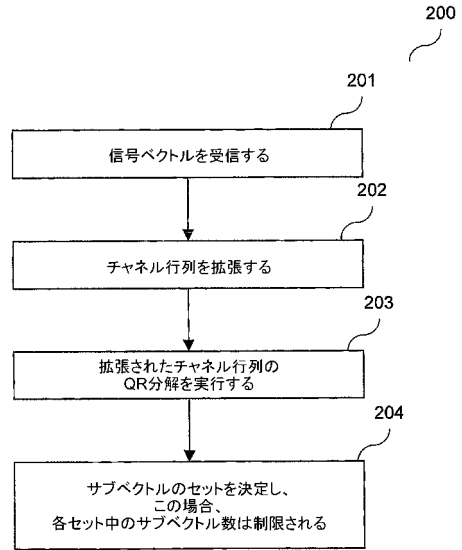
本明細書では、下記の公刊物が参照されている。

- [1] P.W. Wolniansky, G.J. Foschini, G.D. Golden and R.A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in IEEE ISSSE-98, (Pisa, Italy), pp.295-300, Sept.1998. 10
- [2] E. Viterbo and J. Boutros, "A Universal Lattice Decoder for Fading Channels," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.45, no.5, pp.1639-1642, July 1999.
- [3] Oussama Damen, Ammar Chkeif and Jean-Claude Belfiore, "Lattice Code Decoder for Space Time Codes," IEEE Commun. Lett., vol.4, no.5, pp.161-163, May 2000.
- [4] Albert M. Chan and Inkyu Lee, "A New Reduced-Complexity Sphere Decoder for Multiple Antenna Systems," IEEE International Conference on Communications, vol.1, pp.460-464, May 2002.
- [5] Babak Hassibi and Haris Vikalo, "On the expected complexity of integer least-squares problems," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol.2, pp.1497-1500, 2002. 20
- [6] Erik Agrell, Thomas Eriksson, Alexander Vardy and Kenneth Zeger, "Closest Point Search in Lattices," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.48, no.8, pp.2201-2214, Aug. 2002.
- [7] Bertrand M. Hochwald, Stephan ten Brink, "Achieving Near-Capacity on a Multiple-Antenna Channel," IEEE Trans. Commun., vol.51, no.3, pp.389-399, March 2003.
- [8] Mohamed Oussama Damen, Hesham El Gamal and Giuseppe Caire, "On Maximum-Likelihood Detection and the Search for the Closest Lattice Point," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.49, no.10, pp.2389-2402, Oct. 2003.
- [9] Kyeong Jin Kim and Ronald A. Iltis, "Joint Detection and Channel Estimation Algorithms for QSCDMA Signals Over Time-Varying Channels," IEEE Trans. Commun., vol.50, no.5, pp.845-855, May 2002. 30
- [10] Babak Hassibi, "An Efficient Square-Root Algorithm for BLAST," IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol.2, pp.737-740, June 2000.
- [11] Kenichi Higuchi, Hiroyuki Kawai, Noriyuki Maeda, and Mamoru Sawahashi, "Adaptive Selection of Surviving Symbol Replica Candidates Based on Maximum Reliability in QRM-MLD for OFCDMMIMO Multiplexing," in Global Telecommunications Conference, vol.4, pp.2480-2486, 2004.
- [12] Sumei Sun, Yan Wu, Yuan Li, and T. T. Tjhung, "A novel iterative receiver for coded MIMO-OFDM systems," in IEEE International Conference on Communications, vol.4, pp.2473-2477, 2004. 40

【図1】



【図2】



フロントページの続き

- (72)発明者 ダイ, ヨンメイ
シンガポール, シンガポール 119613, ヘン ミュイ ケン テラス 21, インス
ティテュート フォー インフォコム リサーチ, ケアオブ アイピーティーオー
- (72)発明者 サン, スーメイ
シンガポール, シンガポール 119613, ヘン ミュイ ケン テラス 21, インス
ティテュート フォー インフォコム リサーチ, ケアオブ アイピーティーオー
- (72)発明者 レイ, ツォンディン
シンガポール, シンガポール 119613, ヘン ミュイ ケン テラス 21, インス
ティテュート フォー インフォコム リサーチ, ケアオブ アイピーティーオー
- (72)発明者 樋口 健一
神奈川県横須賀市光の丘3 - 5
- (72)発明者 川合 裕之
神奈川県横須賀市光の丘3 - 5

審査官 高野 洋

- (56)参考文献 特開2005-176020(JP, A)
特開2007-300512(JP, A)
三上 学・藤井輝也, MIMOシステムにおけるMMSE規範に基づくQRM-MLDの伝送特性改善, 電子情報
通信学会総合大会講演論文集 2006年_通信(1), 2006年 3月 8日, p.408
三上 学・藤井輝也, シングルユーザ/マルチユーザMIMO伝送方式におけるMMSE拡張を行うQRM-ML
Dの検討, 電子情報通信学会技術研究報告. RCS, 無線通信システム, 2006年 2月22日,
Vol.105, No.623, pp.73-78
Dirk Wuebben et.al., MMSE Extension of V-BLAST based on sorted QR Decomposition, VTC 2
003-FALL, 米国, IEEE, 2003年10月 6日, V1, P508-512
Yongmei Dai et.al., A Comparative study of QRD-M Detection and Sphere Decoding for MIM
O-OFDM Systems, PIMRC 2005, 米国, IEEE, 2005年 9月11日, P186-190

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04J 99/00
H04B 7/04