

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6930859号
(P6930859)

(45) 発行日 令和3年9月1日(2021.9.1)

(24) 登録日 令和3年8月16日(2021.8.16)

(51) Int.Cl.		F I			
HO 4 B	7/0413	(2017.01)	HO 4 B	7/0413	4 0 0
HO 1 Q	3/26	(2006.01)	HO 1 Q	3/26	Z
HO 4 B	17/309	(2015.01)	HO 4 B	17/309	1 0 0

請求項の数 16 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2017-107009 (P2017-107009)	(73) 特許権者	000003078
(22) 出願日	平成29年5月30日 (2017.5.30)		株式会社東芝
(65) 公開番号	特開2018-207172 (P2018-207172A)		東京都港区芝浦一丁目1番1号
(43) 公開日	平成30年12月27日 (2018.12.27)	(74) 代理人	100091982
審査請求日	令和1年8月23日 (2019.8.23)		弁理士 永井 浩之
		(74) 代理人	100091487
			弁理士 中村 行孝
		(74) 代理人	100082991
			弁理士 佐藤 泰和
		(74) 代理人	100105153
			弁理士 朝倉 悟
		(74) 代理人	100107582
			弁理士 関根 毅
		(74) 代理人	100118876
			弁理士 鈴木 順生

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 アンテナ配置決定装置、アンテナ配置決定方法、無線通信装置および通信システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

アンテナ間の距離を調整可能な複数のアンテナのうちの任意の1つの設置高に応じた間隔で、前記アンテナ間の前記距離の候補値を生成する候補値生成部と、

前記アンテナ間の前記距離を前記候補値に設定した場合の通信品質を算出する算出部と、

前記通信品質に基づき、前記候補値の中から前記アンテナ間の前記距離の設定値を決定するアンテナ配置決定部と、

を備え、

前記複数の候補値の前記間隔は、前記設置高が大きいほど小さい

アンテナ配置決定装置。

【請求項 2】

前記複数の候補値の前記間隔は、使用波長に依存する

請求項 1 に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 3】

前記候補値生成部は、前記設置高に応じた大きさの範囲内で前記候補値を生成する

請求項 1 又は 2 に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 4】

前記範囲の大きさは、前記設置高が大きいほど小さい

請求項 3 に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 5】

前記算出部は、前記アンテナ間の前記距離が前記候補値に設定された場合の前記複数のアンテナと他の無線通信装置との間のチャンネル状態を推定し、推定したチャンネル状態に基づき、前記通信品質である空間相関を計算する

請求項 1 ないし 4 のいずれか一項に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 6】

前記算出部は、前記アンテナ間の前記距離が前記候補値に設定された場合の他の無線通信装置とのデータの伝送レート又は誤り率を前記通信品質として算出する

請求項 1 ないし 4 のいずれか一項に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 7】

前記候補値に基づき前記アンテナ間の前記距離を調整する調整部をさらに備え、
前記算出部は、前記アンテナ間の前記距離が前記候補値に調整された前記複数のアンテナを用いて、前記通信品質を実測により算出する

請求項 1 ないし 6 のいずれか一項に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 8】

前記算出部は、前記通信品質をシミュレーションにより算出する

請求項 1 ないし 7 のいずれか一項に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 9】

前記複数のアンテナ間の前記距離の前記設定値に従って、前記複数のアンテナ間の距離を調整する調整部

をさらに備えた請求項 1 ないし 8 のいずれか一項に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 10】

前記アンテナ間の前記距離が前記設定値に設定された前記アンテナを介して、MIMO通信を行う送受信部

をさらに備えた請求項 1 ないし 9 のいずれか一項に記載のアンテナ配置決定装置。

【請求項 11】

アンテナ間の距離を調整可能な複数のアンテナのうちの任意の 1 つの設置高に応じて前記アンテナ間の前記距離の候補範囲を決定し、前記候補範囲内から前記アンテナ間の距離の設定値を決定するアンテナ配置決定部

を備えたアンテナ配置決定装置。

【請求項 12】

請求項 1 ないし 11 のいずれか一項に係るアンテナ配置決定装置と、

前記複数のアンテナと

を備えた無線通信装置。

【請求項 13】

アンテナ間の距離を調整可能な複数のアンテナのうちの任意の 1 つの設置高に応じた間隔で、前記アンテナ間の前記距離の候補値を生成し、

前記アンテナ間の前記距離を前記候補値に設定した場合の通信品質を算出し、

前記通信品質に基づき、前記候補値の中から前記アンテナ間の前記距離の設定値を決定する

アンテナ配置決定方法。

【請求項 14】

請求項 13 のアンテナ配置決定方法によってアンテナ間の距離が決定された複数のアンテナを備える無線通信装置。

【請求項 15】

アンテナ間の距離を調整可能な複数のアンテナと、

前記複数のアンテナのうちの任意の 1 つの設置高に応じた間隔で、前記アンテナ間の前記距離の候補値を生成する候補値生成部と、

前記アンテナ間の前記距離を前記候補値に設定した場合の通信品質を算出する算出部と

前記通信品質に基づき、前記候補値の中から前記アンテナ間の前記距離の設定値を決定するアンテナ配置決定部と、

を備え、

前記複数の候補値の前記間隔は、前記設置高が大きいほど小さい通信システム。

【請求項16】

アンテナ間の距離を調整可能な複数のアンテナのうちの任意の1つの設置高に応じた間隔で、前記アンテナ間の前記距離の候補値を生成する候補値生成部と、

前記アンテナ間の前記距離を前記候補値に設定した場合の通信品質を算出する算出部と、

前記通信品質に基づき、前記候補値の中から前記アンテナ間の前記距離の設定値を決定するアンテナ配置決定部と、

を備え、

前記複数の候補値の前記間隔は、使用波長に依存するアンテナ配置決定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態はアンテナ配置決定装置、アンテナ配置決定方法および無線通信装置に関する。

【背景技術】

【0002】

MIMO (Multiple Input, Multiple Output: MIMO) は、送信側及び受信側の双方で複数のアンテナを同時に用いて、同一の周波数帯で無線通信を行うことで、伝送容量を増やすマルチストリーム伝送を実現する。MIMOにおいては、送信側のアンテナ(送信アンテナ)より送信された電波は複数の通信路を經由して、受信側のアンテナ(受信アンテナ)に到達するため、それぞれの受信アンテナの受信信号は複数の送信アンテナの送信信号の合成波となる。従ってMIMOにおいては受信側で送信信号の分離・検出処理を行うことが必要となる。

【0003】

これまで移動体通信のMIMO通信システムでは、散乱電波伝搬環境が存在する見通し外(Non-line-of-sight: NLOS)の通信が想定されていた。すなわち、送信された電波は通信路に存在する障害物等の存在により反射や散乱を受け、電波は互いに相関のない一群の素波として受信機に到達するとされていた。このため、確率論的なモデルを用いて受信信号の分離・検出を行っていた。

【0004】

一方、固定マイクロ波通信システムのような見通し内の固定地点間通信でも相関を低く保つようにMIMOを行うことで、伝送容量の増大をはかるLOS (Line-of-Sight) - MIMOが知られている。LOS - MIMOでは送信アンテナ及び受信アンテナの幾何学的配置を調整することにより、伝送容量の増大をはかることができる。

【0005】

例えば、送信アンテナ及び受信アンテナがそれぞれ2つずつ存在する2×2のMIMOを行うLOS - MIMO通信システムにおいては、受信アンテナには複数の通信路をたどった電波が到達する。ある通信路を經由した電波と、もう一方の通信路を經由した電波の位相差が90度(/ 2ラジアン)であれば、伝送容量が最大となることが知られている。このような直交性もしくは低い空間相関を得るためのアンテナ配置(アンテナ間の距離など)の条件式が知られているが、この条件式から特定されるアンテナ配置では、設置高が高いなどの理由で、設置環境等の制約により、必ずしもその位置にアンテナを配置できない場合もある。想定される全てのアンテナ配置について空間相関を算出することで、低い空間相関でなおかつ実際の設置も可能なアンテナ配置を見つけることも考えられるが、

10

20

30

40

50

演算量が膨大になるため現実的ではない。また、実際の通信環境では、条件式を満たしても、空間相関はゼロにはならず、より空間相関が低いアンテナ配置が存在する場合もある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】国際公開第2009-017230号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

本発明の実施形態は、高品質な通信が可能なアンテナ配置を効率的に特定することを可能としたアンテナ配置決定装置、通信局、アンテナ配置決定方法および無線通信装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の実施形態としてのアンテナ配置決定装置は、アンテナ間の距離を調整可能な複数のアンテナのうちの任意の1つの設置高に応じた間隔で、前記アンテナ間の前記距離の候補値を生成する候補値生成部と、前記アンテナ間の前記距離を前記候補値に設定した場合の通信品質を算出する算出部と、前記通信品質に基づき、前記候補値の中から前記アンテナ間の前記距離の設定値を決定するアンテナ配置決定部と、を備える。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】第1の実施形態に係る無線通信システムの全体を示す図。

【図2】第1の実施形態に係る無線通信システムの直接波に係る通信路を示す図。

【図3】第1の実施形態に係る無線通信システムの大地反射波に係る通信路を示す図。

【図4】アンテナ設置高と空間相関の関係を示す図。

【図5】第1の実施形態に係る送信側のアンテナ配置決定装置のブロック図。

【図6】第1の実施形態に係る受信側のアンテナ配置決定装置のブロック図。

【図7】アンテナ設置高及びアンテナ間隔と空間相関の関係をシミュレーションした結果を示す空間相関マップの図。

【図8】図7のシミュレーション結果の一部を拡大した場合を示す図。

【図9】図7の空間相関マップのうち空間相関が小さい部分を取り出して示した図。

【図10】図8の一部拡大空間相関マップにおいて空間相関が小さい部分を取り出して示した図。

【図11】第1の実施形態に係るアンテナ間隔の候補値の選定方法を示す図。

【図12】第1の実施形態に係るアンテナ間隔の候補値の選定の処理において、複数の異なるサンプル間隔の値を適用した場合に得られる空間相関を比較した図。

【図13】図12のデータから作成した累積確率分布を示す図。

【図14】第1の実施形態に係るアンテナ配置決定装置の処理フローを示す図。

【図15】候補値を順次選択する例を示す図。

【図16】第1の実施形態に係る空間相関テーブルの例を示す図。

【図17】第1の実施形態に係る空間相関テーブルの他の例を示す図。

【図18】第2の実施形態に係る受信側のアンテナ配置決定装置のブロック図。

【図19】第2の実施形態に係る伝送レートテーブルを示す図。

【図20】第2の実施形態に係るアンテナ配置決定装置の処理フローを示す図。

【図21】第3の実施形態に係る送信側及び受信側のアンテナの位置関係を示す図。

【図22】第3の実施形態に係る反射経路を説明するための図。

【図23】第4の実施形態において周波数選択フェージングを考慮する例を説明する図。

【図24】第5の実施形態においてアンテナの個数が3つ以上の場合を説明する図。

【図25】アンテナ設置高ごとに計算した最小空間相関の点を結んだグラフを示す図。

10

20

30

40

50

【図26】図25のグラフを2次関数で近似する例を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、図面を参照しながら、本発明の実施形態について説明する。また、図面において同一の構成要素は、同じ番号を付し、説明は、適宜省略する。

(第1の実施形態)

【0011】

図1は、第1の実施形態に係るLOS(Line-of-Sight)-MIMO(Multiple Input, Multiple Output: MIMO)システムの全体構成を模式的に示す図である。このMIMO通信システムは、通信局である送信局と、通信局である受信局とを備えている。送信局は、アレイアンテナ装置(以下、アンテナ装置)100とアンテナ配置決定装置1とを備えている。受信局は、アンテナ装置200とアンテナ配置決定装置2とを備えている。送信局は、任意の設置ベース3上に設置され、受信局は任意の設置ベース4上に設置されている。設置ベース3、4の例として、ビルの屋上、丘の頂上又は山脈の稜線などの大地7よりも高い位置がある。ただし、設置ベース3、4が大地であってもかまわない。高い位置に配置することで、アンテナ装置100及び200は互いに見通しが確保され、周囲の構造物又は大地の凹凸等により、電波が遮られることを防止する。

【0012】

アンテナ装置100とアンテナ装置200は、見通し内環境において互いに対向するように配置されている。送信側のアンテナ装置100は、電波を送受信する2つのアンテナ101、102を含み、アンテナ101、102は、大地に対し、垂直方向に、互いに間隔を開けて並べられたアレイアンテナである。アンテナ101、102はそれぞれ大地に対し垂直方向に、それぞれ予め定められた範囲で移動可能に構成される。これによりアンテナ101、102の相対位置は移動可能である。受信側のアンテナ装置200は、電波を送受信する2つのアンテナ201、202を含み、アンテナ201、202は、大地に対し、垂直方向に、互いに間隔を開けて並べられたアレイアンテナである。アンテナ201、202はそれぞれ大地に対し垂直方向に、それぞれ予め定められた範囲で移動可能に構成される。これによりアンテナ101、102の相対位置は移動可能である。図では、アンテナとしてパラボラアンテナが示されているが、これは一例に過ぎず、例えばホーンアンテナなどその他の種類のアンテナであってもよい。更に異なる種類のアンテナを複数組み合わせた構成も排除されない。

【0013】

送信側のアンテナ装置100及び受信側のアンテナ装置200間の距離はDである。この距離を送受信距離Dと呼ぶ。送信側のアンテナ101、102及び受信側のアンテナ201、201はデータ送受信時には、大地に対して垂直な対称軸について、互いに線対称の関係となすよう配置される。ただし、このような線対称の配置は必須の要件ではない。

【0014】

アンテナ102は大地に対し高さL2で配置されている。アンテナ102と対向するアンテナ202も大地に対する高さはL2である。以降では、この高さL2を特にアンテナ設置高L2と呼ぶ。アンテナ101は大地に対し高さL1に配置されている。アンテナ101と対向するアンテナ201も大地に対し高さL1で配置される。以降では、この高さL1を特にアンテナ設置高L1と呼ぶ。アンテナ101とアンテナ102との距離(間隔)はsである。アンテナ101と102は大地に対して垂直に配置されているため、距離(間隔)sは、 $|L2 - L1|$ である。以下、距離(間隔)sをアンテナ間隔sと呼ぶ。ここでは線対称な配置のため、アンテナ201とアンテナ202とのアンテナ間隔も、送信側と同じアンテナ間隔sである。ここでは大地が平坦であるとみなしているが、これに限られない。送信局と受信局が大地の異なる高さに配置されている場合に、それぞれが設置されている大地の高さの平均の高さを、アンテナの設置高の基準にしてもよい。

【0015】

10

20

30

40

50

アンテナ 101 及びアンテナ 102 はアンテナ配置決定装置 1 と電氣的に接続されている。本発明の実施形態に係るアンテナ配置決定装置 1 は無線によるデータ通信を行う機能も備えているため、アンテナ配置決定装置 1 は MIMO 送信用に生成した 2 つの送信信号の一方を、アンテナ 101 に、他方をアンテナ 2 に送り、アンテナ 101 とアンテナ 102 から同一の波長、すなわち同一の周波数の電波が放射される。なお、波長及び周波数 f は、 c を光速度とすると、 $c = \lambda f$ の関係がある。

【0016】

送信局は、アンテナ 101 及びアンテナ 102 のそれぞれに対して配置された駆動部 11A、11B を有する。駆動部 11A、11B は、アンテナ 101 及びアンテナ 102 のうち対応するアンテナを、大地に対して垂直方向に一定の範囲で移動させる。駆動部 11A、11B による移動機構の実現方法としては、電動アクチュエータ、空圧アクチュエータ、油圧アクチュエータ又はワイヤ・ベルト・チェーン・ギア・車輪及びレール等と動力機械を組み合わせたものが想定されるが、直進運動が可能であれば用いる方法については特に問わない。図 1 では駆動部 11A、11B がアンテナ 101 とアンテナ 102 の後背部に配置されているが、駆動部 11A、11B の位置及び構成についてはこれに限定されない。例えば、駆動部 11A、11B がアンテナ装置 100 の基部に配置される構成であってもよい。また、図 1 ではアンテナ 101、102 の両方の位置を移動可能であるが、いずれか一方のみが移動可能でも良い。その場合、駆動部 11A、11B の一方は不要である。

【0017】

受信側でもアンテナ 201 及びアンテナ 202 のそれぞれに対して駆動部 21A、21B が配置されている。駆動部 21A、21B は、アンテナ 201 及びアンテナ 202 のうち対応するアンテナを一定の範囲で移動させる。駆動部 21A、21B の位置及び構成例は、駆動部 11A、11B と同様である。

【0018】

図 2 はアンテナ装置 100 が送信し、アンテナ装置 200 が受信する直接波の決定論的通信路を示す。図 3 はアンテナ装置 100 が送信し、アンテナ装置 200 が受信する大地反射波の決定論的通信路を示す。図 3 では、大地反射波の経路を算出するために、アンテナ 101、102 に関して大地に対して対称な位置に配置した仮想的なアンテナ 901、902 も示されている。図 2 及び図 3 に示した通信路は、アンテナ装置 100 及びアンテナ装置 200 の送信側・受信側の関係が入れ替わった場合にも成立する。これらの決定論的通信路を想定した場合、アンテナ装置 100 及び 200 のそれぞれにおけるアンテナ間隔 s が、一例として、 $(D/2)$ に設定されると、通信路の直交性を確保して空間相関を抑制できることが関連技術として知られている。以下では、まずこのことについて詳細に説明する。

【0019】

図 2 のように、直接波の決定論的に決まるパスを考慮し、パス長をそれぞれ d_{ij} と置く。 d_{ij} は、送信側のアンテナ j から受信側のアンテナ i への直接波のパスの長さを表す。また、図 3 のように、大地反射波の決定論的に決まるパスを考慮し、パス長をそれぞれ d_{ijr} と置く。 d_{ijr} は、送信側のアンテナ j から受信側のアンテナ i への大地反射波のパスの長さを表す。なお、アンテナ装置 100 及び 200 のそれぞれにおけるアンテナ間隔 s が送受信距離 D に比べて十分に小さい場合、受信側のアンテナ間で受信信号の振幅の違いは無視することができる。

【0020】

ここで、送信側のアンテナ（送信アンテナ）の本数を N_{t_x} 、受信側のアンテナ（受信アンテナ）の本数を N_{r_x} とした MIMO システムモデルを考える。 j 番目の送信アンテナから i 番目の受信アンテナへの伝送路応答（チャンネル情報）を h_{ij} により表すと

【数 1】

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_{N_r}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & \cdots & h_{N_rN_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_{N_t}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1(t) \\ \vdots \\ z_{N_r}(t) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

と書き表すことができる。この要素 h_{ij} は、該当するチャネル（通信路）の振幅減衰量及び位相回転を情報として含む。ここで $x_i(t)$ は、送信アンテナ N_i の送信信号、 $y_i(t)$ は受信アンテナ N_i の受信信号、 $z_i(t)$ は、受信アンテナ N_i で受信されるノイズを表す。

要素 h_{ij} からなる $N_r \times N_t$ 次元の行列をチャネル行列 \mathbf{H} とすると式 (1) は下記のように定式化される。

【数 2】

$$y(t) = \mathbf{H}x(t) + z(t) \quad (2)$$

【0021】

本実施形態では、送信側及び受信側とも 2 本のアンテナを有するため、 2×2 MIMO システムモデルが適用される。このため、チャネル行列 \mathbf{H} は 2×2 次元となる。チャネル行列 \mathbf{H} の各要素は、下記のような直接波と大地反射波の位相成分の足し合わせで表現される。

【数 3】

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{-jkd_{11}} + Ae^{-jkd_{11r}} & e^{-jkd_{12}} + Ae^{-jkd_{12r}} \\ e^{-jkd_{21}} + Ae^{-jkd_{21r}} & e^{-jkd_{22}} + Ae^{-jkd_{22r}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで A は大地反射波の反射係数、 j は虚数単位、 k は波数 ($2\pi/\lambda$) である。

【0022】

式 (3) の空間相関行列を用いて

【数 4】

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^H = \begin{bmatrix} e^{-jkd_{11}} + Ae^{-jkd_{11r}} & e^{-jkd_{12}} + Ae^{-jkd_{12r}} \\ e^{-jkd_{21}} + Ae^{-jkd_{21r}} & e^{-jkd_{22}} + Ae^{-jkd_{22r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{jkd_{11}} + Ae^{jkd_{11r}} & e^{jkd_{21}} + Ae^{jkd_{21r}} \\ e^{jkd_{12}} + Ae^{jkd_{12r}} & e^{jkd_{22}} + Ae^{jkd_{22r}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

を定義できる。 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ は 2×2 の行列である。チャネルの直交条件として、 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ における 2 つの非対角要素がそれぞれ 0 に一致するとの式を設定する。これらの式を解くと、下記に示す関係式 (5) 乃至 (12) が導出される。

10

20

30

【数5】

$$(d_{11} - d_{21}) - (d_{12} - d_{22}) = -\frac{\lambda}{2}(2p_1 + 1) \quad (5)$$

$$(d_{22r} - d_{21r}) - (d_{12} - d_{11}) = -\frac{\lambda}{2}(2p_2 + 1) \quad (6)$$

$$(d_{11r} - d_{12r}) - (d_{21} - d_{22}) = -\frac{\lambda}{2}(2p_3 + 1) \quad (7)$$

$$(d_{11r} - d_{21r}) - (d_{12r} - d_{22r}) = -\frac{\lambda}{2}(2p_4 + 1) \quad (8)$$

$$(d_{21} - d_{21r}) - (d_{11} - d_{11r}) = \frac{\lambda}{2} \times 2p_5 \quad (9)$$

$$(d_{21} - d_{21r}) - (d_{11} - d_{11r}) = \frac{\lambda}{2} \times 2p_6 \quad (10)$$

$$(d_{22} - d_{22r}) - (d_{12} - d_{12r}) = \frac{\lambda}{2} \times 2p_7 \quad (11)$$

$$(d_{22} - d_{22r}) - (d_{12} - d_{12r}) = \frac{\lambda}{2} \times 2p_8 \quad (12)$$

p_i は正又は負の任意の整数を表す。式(5)は

【数6】

$$e^{jk(d_{11}-d_{21})}$$

と

【数7】

$$e^{jk(d_{12}-d_{22})}$$

の項が互いに打消し合い0になるためには、複素空間上における偏角の差が $\pm 2n$ (n は正の整数)となる関係より導かれる。式(6)から(12)も同様の関係より導かれる。

式(5)が直接波の直交条件、式(8)が大地反射波の直交条件、式(6)、(7)、式(9) - (12)が直接波と反射波間の直交条件となる。

【0023】

図3に示した位置関係より d_{ijr} はアンテナ設置高 L_1 、 L_2 及び送受信距離 D を用いて下記の式(13)乃至(15)のように書き表すことができる。

10

20

30

40

【数 8】

$$d_{11r} = \sqrt{D^2 + (2 \cdot L1)^2} = D \left\{ 1 + \left(\frac{2 \cdot L1}{D} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

$$d_{22r} = \sqrt{D^2 + (2 \cdot L2)^2} = D \left\{ 1 + \left(\frac{2 \cdot L2}{D} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (14)$$

$$d_{12r} = d_{21r} = \sqrt{D^2 + (L1 + L2)^2} = D \left\{ 1 + \left(\frac{L1 + L2}{D} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (15)$$

【0024】

式(13)においては、送受信距離DがL1と比べて十分に長いと仮定すると $1 + (2 \times L1 / D)^2$ であるから次の近似式が成り立つ。

【数 9】

$$d_{11r} \approx D \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2 \cdot L1}{D} \right)^2 \right\} = D + \frac{1}{2} \frac{(2 \cdot L1)^2}{D} \quad (16)$$

同様の仮定をすると式(14)においては $1 + (2 \times L2 / D)^2$ 、式(15)においては $1 + \{ (L1 + L2) / D \}^2$ であるから次の近似式が成り立つ。

【数 10】

$$d_{22r} \approx D \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2 \cdot L2}{D} \right)^2 \right\} = D + \frac{1}{2} \frac{(2 \cdot L2)^2}{D} \quad (17)$$

$$d_{12r} = d_{21r} \approx D \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{L1 + L2}{D} \right)^2 \right\} = D + \frac{1}{2} \frac{(L1 + L2)^2}{D} \quad (18)$$

【0025】

大地反射波の直交条件である式(8)に上記式(16)乃至(18)を代入すると、

【数 11】

$$\frac{(L2 - L1)^2}{D} = -\frac{\lambda}{2} (2p_4 + 1) \quad (19)$$

が得られる。ここで、 $p_4 = -1$ を選ぶと、下記の式(20)が導かれる。

【数 12】

$$s = L2 - L1 = \pm \sqrt{\frac{\lambda D}{2}} \quad (20)$$

10

20

30

40

50

式(20)は、大地反射波について直交条件が満たされるアンテナ間隔 s を表す。ここでは $L_2 > L_1$ ($L_2 - L_1 > 0$) であるから、 $s = (D/2)$ である。

【0026】

また、送受信距離 D がアンテナ間隔 s に比べ十分に長いと仮定すると、直接波の通信路について、下記の式(21)が得られる。

【数13】

$$d_{12} = d_{21} = \sqrt{D^2 + s^2} = D \left\{ 1 + \left(\frac{s}{D} \right)^2 \right\}^{1/2} \approx D + \frac{1}{2} \frac{s^2}{D} \quad (21)$$

10

直接波の直交条件である式(5)に、上記の式(21)を代入すると、下記の式(22)が得られる。

【数14】

$$-D = -\frac{\lambda}{2}(2p_1 + 1) \quad (22)$$

ここで $p_1 = 0$ を選ぶと、直接波の直交条件が満たされるアンテナ間隔 $s = (D/2)$ の関係式が導出される。これは、式(20)で算出した大地反射波の直交条件が満たされるアンテナ間隔の関係式と同じである。

20

【0027】

次に直接波及び大地反射波間の直交条件を含む式(9)に、近似式(16)、(18)及び(21)を代入すると、次の式(23)が得られる。

【数15】

$$-L_1 \cdot s = \frac{\lambda D}{2} p_6 \quad (23)$$

30

前述したように、直接波の直交条件及び大地反射波の直交条件が満たされている場合、アンテナ間隔について $s = (D/2)$ の関係が成立するから、この s を式(23)に代入すると、

【数16】

$$L_1 = -\sqrt{\frac{\lambda D}{2}} p_6 \quad (24)$$

になる。

40

また、式(24)と、 $s = (D/2)$ と、 $L_2 = L_1 + s$ とから、以下の式が得られる。

【数17】

$$L_2 = \sqrt{\frac{\lambda D}{2}} - \sqrt{\frac{\lambda D}{2}} p_6 \quad (25)$$

p_6 は正又は負の任意の整数であり、 L_2 は正であるから、アンテナ102、202の設置高 L_2 の候補は、式(25)のように、 $(D/2)$ に、 $(D/2)$ の整数倍を

50

加算した値である必要がある。また、アンテナ101、201の設置高L1の候補は、 $(D/2)$ の整数倍である必要がある。つまり、設置高L2の候補は、 $(D/2)$ 間隔であり、設置高L1の候補も、 $(D/2)$ 間隔である。式(25)が満たされる設置高L2では、直接波どうしの直交関係、大地波どうしの直交関係の充足に加え、直交波及び大地波が互いに直交する条件が満たされる。すなわち、式(25)を満たす場合、通信路の直交性が確保され(空間相関がゼロもしくは抑制される)ことが計算上導かれる。

【0028】

図4は、本発明者らがシミュレーションにより作成したアンテナ設置高L1と空間相関(Spatial Correlation)との関係を示す。なお、空間相関の定義については後述する。 $D = 5000\text{m}$ 、 $f = 80\text{GHz}$ とし、フリスの伝搬公式に基づいて直接波と反射波との2波により構成されるチャンネルを生成した。 $s = (D/2)$ とした。実線のグラフは、予め定めた範囲内の各アンテナ設置高L2についてシミュレーションで算出した空間相関を表す点を結合したグラフである。図の各丸は、式(25)を満たす場合のアンテナ設置高(最適化された高さ)L2とそのときの空間相関を表す。0より大きいL2について、空間相関の値が小さく抑えられている(ただし、シミュレーションでは反射波の反射係数による影響などにより、式(25)を満たす場合も空間相関は0にはならない)。グラフにより示されるように、式(25)が満たされていないアンテナ設置高L2では、空間相関の値が0.0と1.0の間で安定していない。一方、式(25)を満たすアンテナ設置高L2では、空間相関を小さく抑制できる。ただし、そのような設置高L2の間隔は大きい。このことは、アンテナ装置を設置するビルの高さや、設置後の設置高L2の調整に制約を与えることになる。式(25)を満たすアンテナ設置高L2以外でも、空間相関を低減することが要求される。また、式(25)を満たすアンテナ設置高L2の設置が可能な場合であっても、実際の通信ではこれと異なるアンテナ設置高L2(式(25)を満たすアンテナ設置高L2よりより若干低いアンテナ設置高)で、より低い空間相関が得られる場合もある。

【0029】

そこで、本実施形態では、式(25)を満たすアンテナ設置高L2又はL1以外でも、空間相関を低減可能なアンテナ設置高L2又はL1を効率的に見つける。

【0030】

以下、図1の送信局(アンテナ配置決定装置1及びアンテナ装置100)並びに受信局(アンテナ配置決定装置2及びアンテナ装置200)についてさらに詳細に説明する。図5は第1の実施形態に係る送信局の詳細ブロック図である。図6は第1の実施形態に係る受信局の詳細ブロック図である。

【0031】

図5の送信局は、アンテナ配置決定装置1とアンテナ装置100とを備える。アンテナ配置決定装置1は、アンテナ位置調整部11と、送受調整同期部12と、環境値設定部13と、空間相関算出部14と、空間相関記憶部15と、チャンネル推定部16と、アンテナ配置決定部17と、送受信部18と、候補値生成部19とを備える。アンテナ装置100は、アンテナ101、102と、アンテナ101、102を移動させる駆動部11A、11Bとを備える。各部11~14、16~19の全部又は一部は、CPU等のプロセッサにプログラムを実行させることによりソフトウェアで実現してもよいし、専用のハードウェア回路又はプログラム可能な回路によって実現してもよいし、これらの両方によって実現してもよい。

【0032】

図6の受信局は、アンテナ配置決定装置2とアンテナ装置200とを備える。アンテナ配置決定装置2は、アンテナ位置調整部21と、送受調整同期部22と、環境値設定部23と、空間相関算出部24と、空間相関記憶部25と、チャンネル推定部26と、アンテナ配置決定部27と、送受信部28と、候補値生成部29とを備える。アンテナ装置200は、アンテナ201、202と、アンテナ201、202を移動させる駆動部21A、2

1 Bとを備える。各部 2 1 ~ 2 4、2 6 ~ 2 9の全部又は一部は、CPU等のプロセッサにプログラムを実行させることによりソフトウェアで実現してもよいし、専用のハードウェア回路又はプログラム可能な回路によって実現してもよいし、これらの両方によって実現してもよい。

【0033】

本発明の実施形態に係るアンテナ位置決定装置の構成は一例であり、これとは異なる構成を用いることができる。アンテナ配置決定装置は、少なくとも空間相関算出部など通信品質の算出を行う構成要素と、候補値生成部と、アンテナ配置決定部を含むものとする。従ってアンテナ配置決定装置は無線通信装置とは独立した計算機などの情報処理装置により実現されていてもよい。アンテナ配置決定装置は、更にアンテナ位置調整部などアンテナ位置を決定した配置に変更する機能を備えることもできる。このような場合は、アンテナ配置決定装置を、既存の無線通信装置及びアンテナ装置と組み合わせて、高品質な通信が可能なMIMO通信システムを構築することが可能となる。また、本発明の実施形態のように、アンテナ配置決定装置はチャンネル推定部、送受信部など無線データ通信のための構成要素も含むことで、無線通信装置と一体化した構成をとってもよい。この場合、無線通信装置が、アンテナ配置決定装置を兼ねるといえる。送信局と受信局に係るアンテナ位置決定装置の構成が同一である必要はなく、それぞれ異なった構成であってもよい。

10

【0034】

送受信部 1 8 及び送受信部 2 8 は互いに無線通信を行う。送受信部 1 8 及び送受信部 2 8 は、送信時においては、MIMO変調等の変調、DA変換、無線周波数へのアップコンバート、増幅等を行う。送受信部 1 8 及び送受信部 2 8 は、受信時においては、増幅、ダウンコンバート、AD変換、MIMO復調等の復調を行う。使用する通信方式は、任意でよい。

20

【0035】

送信局 1 の送受信部 1 8 は、送信用の信号に基づき搬送波を変調することにより、変調信号を生成する。変調信号をDA変換、無線周波数へのアップコンバート、増幅等し、1つ又は複数のアンテナを介して送信する。なお、変調方式はASK (amplitude shift keying)、PSK (phase shift keying)、FSK (frequency shift keying) 又はQAM (quadrature amplitude modulation) のような任意のデジタル変調方式を用いればよい。なお、デジタル変調方式ではなく、振幅変調 (AM)、周波数変調 (FM) 又は位相変調 (PM) などのアナログ変調方式を用いることも可能である。また、送受信部 1 8 は、MIMOを実行する機能を有する。送受信部 1 8 は、MIMOを行う場合は、データを分割して複数のストリームを生成し、複数のストリームにMIMO変調を行った後、変調後のストリームを、複数のアンテナから送信する。

30

【0036】

更に必要に応じて、送受信部 1 8 は2次変調を行ってもよい。2次変調方式としてはDS (direct sequence)、FH (frequency hopping)、TDMA (time division multiple access)、FDMA (frequency division multiple access)、CDMA (code division multiple access) 又はOFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) など、いずれの方式を用いてもよい。また、送受信部 1 8 は、時分割多重、周波数分割多重、符号分割多重又はこれらの組み合わせなど、任意の多重方式で通信を行ってもよい。

40

【0037】

受信局 2 の送受信部 2 8 は、1つ又は複数のアンテナを介して、送信局から送信された電波を受信し、受信した電波の信号に低雑音増幅、ダウンコンバート、AD変換、復調を行う。MIMOの場合、送受信部 2 8 は、送信局 1 から送信された電波を複数のアンテナで受信し、複数のアンテナで受信された信号をMIMO復調することにより複数のストリ

50

ームに分離する。MIMO復調処理における信号分離アルゴリズムには、ZF法(Zero-Forcing method)、MMSE法(Minimum Mean Square Error method)、BLAST法(Bell Laboratories Layered Space-Time method)、MLD法(Maximum Likelihood Detection method)又はMLD法の派生形など複数の方式があるが、それらのいずれの方式を用いてもよい。

【0038】

送信局と受信局の役割を互いに入れ替えることが可能である。この場合、送信局1の送受信部18は、前述の受信局2の送受信部28と同様の処理を実行する。一方、受信局2の送受信部28は前述の送信局1の送受信部18と同様の処理を実行する。送信局1及び受信局2はいずれも送信と受信の双方の機能を兼ね備えた送受信局として機能することができる。

10

【0039】

アンテナ位置調整部11は、駆動部11A、11Bを制御することで、アンテナ101、102の位置を調整する。アンテナ位置調整部11は、調整後の位置にアンテナを固定する。固定することで、屋外使用時に発生する風・気温の変動・振動などがあっても、アンテナ101及びアンテナ102の位置ずれが抑制される。アンテナ位置調整部11は、一例として、アンテナ101及びアンテナ102の位置調整を、アンテナ間隔 s 、アンテナ設置高 L_1 及び L_2 の少なくとも1つに基づいて行う。これらの値は、アンテナ配置決定部17から提供される。

20

【0040】

受信局2のアンテナ位置調整部21も、同様にアンテナ間隔 s 、アンテナ設置高 L_1 及び L_2 の少なくとも1つに基づいて、アンテナ201及びアンテナ202を制御することで、アンテナ201及びアンテナ202の位置を調整する。アンテナ位置調整部21は、調整後の位置にアンテナを固定する。

【0041】

送受調整同期部12は、受信側の送受調整同期部22との間で、アンテナ間隔 s の設定及びアンテナ設置高 L_1 、 L_2 の設定の同期処理を行う。この同期処理は、受信局2のアンテナ位置調整部21によって用いられるアンテナ間隔 s 及びアンテナ設置高 L_1 、 L_2 が、送信局1のアンテナ位置調整部11によって用いられている値と同一になるよう設定を行うものである。受信局2の送受調整同期部22についても、送信側の送受調整同期部12との間で同期処理を行うことで、送信側で用いられるアンテナ間隔 s 及びアンテナ設置高 L_1 、 L_2 を、受信側で用いられている値と同一になるよう設定できる。

30

【0042】

送受調整同期部12、22は、同期処理を、送受信部18、28を介した無線通信により行ってもよいし、送信局1と受信局2の間を接続する有線ネットワークが存在する場合は、当該有線ネットワークを用いた有線通信により行ってもよい。

【0043】

環境値設定部13は、パラメータを保持する。パラメータには、送受信距離 D 、電波の波長又は周波数 f 、アンテナ101の設置高 L_1 の範囲 $[L_l, L_h]$ 、アンテナ102の設置高 L_2 の範囲 $[N_l, N_h]$ 、アンテナ間隔の範囲 $[s_l, s_h]$ の全部又は一部が含まれる。環境値設定部13は、これらのパラメータを内部に保持するためのバッファを有していてもよい。バッファは、例えばNANDフラッシュメモリ、NORフラッシュメモリ、MRAM、ReRAM、ハードディスク、光ディスクなどの不揮発記憶デバイス又はDRAMなどの記憶デバイスのいずれか又はそれらの組み合わせから構成される。

40

【0044】

パラメータを取得する方法については特に限定しない。事前に外部から環境値設定部13に静的にパラメータを登録してもよいし、環境値設定部13が計測によりパラメータを算出し、算出したパラメータを内部に保持してもよい。

【0045】

50

計測によりパラメータを算出する例を説明する。送受信距離 D については送信局と受信局間で計測を行い、送受信距離 D の値を求める方法がある。例えば、GPS (Global Positioning System) のような測位方法を用いて送信局及び受信局の位置を求め、その間の距離を算出し、送受信距離 D として用いることができる。Time-of-Flight (TOF) のように光が送信局及び受信局の間を往復する時間を計測し、計測した時間と光速とから距離を算出し、それを送受信距離 D として用いてもよい。

【0046】

アンテナ設置高 L_1 又は L_2 については、気圧センサから設置高度を求める方法、アンテナ装置の設置されるビルの高さに関する情報から求める方法、高度が既知である地点との間で Time-of-Flight (TOF) による計測を行い、その差分からアンテナ設置高を算出する方法などがある。

10

【0047】

外部からパラメータを設定する方法としては、作業員等のユーザが入力した値を環境値設定部 23 に登録してもよい。または、図示しない管理サーバから配信された値を取得し、パラメータとして環境値設定部 23 に登録してもよい。これらの場合にアンテナ配置決定装置 1、2 に値又は指示を入力するために用いられるインタフェースは、入力キー又はタッチパネル付のコンソール等の物理的な端末であっても、ブラウザから操作可能なウェブインタフェースであっても、ソフトウェアにより実現される API (Application Programming Interface) であってもよい。また、実際の入力操作が行われる場所については、送信局 1 又は受信局 2 の所在地でも、送信局 1 又は受信局 2 の設置場所から離れたリモート環境でもよい。リモート環境からの入力が行われる場合には、端末と送信局又は受信局との間に電気通信回線及び管理サーバ等を介して伝達される形態でもよい。

20

【0048】

受信局のチャンネル推定部 24 は、式 (2) のチャンネル行列 H を求める (チャンネル推定)。チャンネル推定部 24 は、送信局から受信された信号に基づきチャンネル推定を行う。ただし、送信局 1 及び受信局 2 間で通信路の対称性を仮定することで、送信局のチャンネル推定部 14 が、受信局から受信した信号に基づき、チャンネル推定を行ってもよい。送信局が受信局として動作し、受信局が送信局として動作する場合も同様にしてチャンネル推定を行うことが可能である。

30

【0049】

ここで、チャンネル推定部 24 の動作について説明する。まず送信局の送受信部 18 はアンテナ装置 100 のアンテナ 101 及び 102 を用いて、チャンネル推定用の信号であるパイロット信号をアンテナ装置 200 に向けて送信する。パイロット信号は、時間と周波数に対して離散的に配置された信号を含み、パイロット信号のパターンは予め送信局 1 及び受信局 2 との間で共有されている。パイロット信号の送信は、受信局がパイロット信号の送信指示信号を送信局に送信することで行ってもよい。受信局は、この動作を、一例としてアンテナ調整処理の開始を決定した場合に行う。アンテナ調整処理は、外部からユーザの指示情報を受信したときに行ってもよいし、定期的に行ってもよいし、通信品質の低下を検知した場合 (たとえば受信エラー率が一定値以上になった場合など) に行ってもよい。

40

【0050】

送信局から送信されたパイロット信号は、アンテナ装置 200 のアンテナ 201 及び 202 を介して、受信局の送受信部 28 により受信される。受信された信号は送受信部 28 からチャンネル推定部 24 に渡される。チャンネル推定部 24 は受信された信号に対し、2次元線形補間、又は2次元離散フーリエ変換を用いた補間などを適用し、チャンネル行列 H の推定を行う。ここで述べたチャンネル推定時の補間方法は例示であり、高速フーリエ変換など他の方法を用いてもよい。

【0051】

50

受信局の空間相関算出部 2 4 は、チャネル推定部 2 4 で求められたチャネル行列 H を使って空間相関を計算する。MIMO 通信においては、大地の凹凸や建築物等障害物が存在しているため、電波の散乱が発生する。このため各々のチャネルは互いに独立しておらず、ある程度相関が生じる。このようなチャネル間の相関を空間相関と呼ぶ。ここでは、下記の式 (26) 及び (27) で定義される受信空間相関

【数 18】

$$\rho_r$$

を計算する。

【数 19】

$$R_r = E[\mathbf{H}\mathbf{H}^H] \quad (26)$$

$$\rho_r = \frac{R_{r,ij}}{\sqrt{R_{r,ii}R_{r,jj}}} \quad (27)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は時間平均操作である。 R_r, ij は、 R_r の ij 成分を表す (なお、ここでの i と j は、前述したアンテナの番号を表す値とは異なる)。受信空間相関 ρ_r の代わりに送信空間相関 ρ_t を計算してもよい。送信空間相関 ρ_t は下記の式 (28) 及び (29) により計算できる。

【数 20】

$$R_t = E[\mathbf{H}^H\mathbf{H}] \quad (28)$$

$$\rho_t = \frac{R_{t,ij}}{\sqrt{R_{t,ii}R_{t,jj}}} \quad (29)$$

【0052】

以下の説明で、空間相関 ρ は、受信空間相関 ρ_r を指す場合を想定するが、送信空間相関 ρ_t を指してもよい。空間相関 ρ は、範囲 $[0, 1]$ の実数値をとる。空間相関 ρ の値が小さいほど空間相関が少なく、符号誤り率も低くなる。このため、伝送容量の確保の観点から、空間相関 ρ の値は小さいことが望ましい。空間相関算出部 1 4 が計算した空間相関の値は、空間相関記憶部 1 5 に格納される。

【0053】

空間相関記憶部 1 5 は空間相関算出部 1 4 より書き込み可能で、アンテナ配置決定部 1 7 より参照可能である。空間相関記憶部 1 6 は、例えば NAND フラッシュメモリ、NOR フラッシュメモリ、MRAM、ReRAM、ハードディスク、光ディスクなどの不揮発記憶デバイス又は DRAM などの記憶デバイスのいずれか又はそれらの組み合わせから構成される。

【0054】

送信局の空間相関算出部 1 4 及び空間相関記憶部 1 5 については、それぞれ受信局の空間相関算出部 2 4 及び空間相関記憶部 2 5 と同様の構成を有する。なお、受信局で推定したチャネル行列 H を、送信局にフィードバックし、送信局の空間相関算出部 1 4 で空間相関を計算してもよい。この場合、計算した空間相関を表す情報を、空間相関記憶部 2 5 に格納してもよい。

【0055】

10

20

30

40

50

アンテナ配置決定部 17 は、それぞれアンテナ配置決定装置 1 内の他のブロックの制御を行うとともに、MIMO通信の空間相関を低く抑えるもしくは直交性を担保するアンテナ装置 100 のアンテナ 101 及びアンテナ 102 の配置（アンテナ 101、102 の間の間隔、及びアンテナ 101 又は 102 の位置）を求める。アンテナ配置決定部 17 は、アンテナ 101 又は 102 の設置高に応じた間隔で、アンテナ間隔の候補値を生成する候補値生成部 19 を備えている。アンテナ配置決定部 17 は、候補値の中から、各候補値にアンテナ間隔を設定した場合の通信品質（空間相関等）に基づき、アンテナ間隔の設定値を決定する。一例として、空間相関が最小又は閾値以下のアンテナ間隔を決定する。アンテナ配置決定部 27 も、アンテナ配置決定部 17 と同様の構成を有する。すなわち、アンテナ配置決定部 27 は、それぞれアンテナ配置決定装置 2 内の他のブロックの制御を行うとともに、MIMO通信の空間相関を低く抑えるもしくは直交性を担保するアンテナ装置 200 のアンテナ 201 及びアンテナ 202 の配置を求める（アンテナ 201、202 の間の間隔、及びアンテナ 101 又は 102 の位置）。アンテナ配置決定部 27 は、アンテナ 201 又は 202 の設置高に応じた間隔で、アンテナ間隔の候補値を生成する候補値生成部 29 を備えている。候補値生成部 29 の動作は、候補値生成部 19 と同様である。

【0056】

関連技術においては通信路の直交性を確保するためにアンテナの配置が式(25)の要件を満たす必要があり、このことがアンテナ設置に対する制約となっていた。本発明の実施形態では式(25)の要件を満たさなくても、MIMO通信路の空間相関を低く抑えるもしくは直交性を確保できるアンテナ配置が存在する（詳細は後述）ことを利用し、設置の制約を満たすようなアンテナ配置を効率的に求める。これにより、式(25)の要件の元で算出されたアンテナ配置では設置できなかった場所にも、アンテナ装置を設置できる。例えば、式(25)の要件で要求される位置よりも低い位置に、アンテナ装置を設置できる。

【0057】

次に式(25)の要件が満たされていなくても、MIMO通信の空間相関を低く抑えることができるもしくは直交性を確保できるアンテナ配置の存在について詳しく説明する。

図7は直接波と大地反射波を含む2波の電波伝搬モデルを用いて、一定範囲のアンテナ設置高 L_1 及びアンテナ間隔 s についてシミュレーションを行い、空間相関の値を計算した結果を示している。送受信距離 D は 5000 m、周波数 f は 80×10^9 Hz としている。アンテナ設置高 L_1 及びアンテナ間隔 s の範囲についてみると、アンテナ設置高 L_2 の範囲が概ね 3 m から 5.9 m、アンテナ間隔 s の範囲が概ね 1.575 m から 3.25 m である。図8は、図7の分布の一部を拡大表示したものであり、アンテナ設置高 L_1 の範囲が概ね 5.0 ~ 5.01、アンテナ間隔 s の範囲が概ね 1.5 m から 3.25 m となっている。空間相関が低いほど、濃い色になっている。

【0058】

前述した図4で説明したように式(25)を満たすアンテナ設置高 L_1 の位置は離散的であり、これに対応するアンテナ間隔も1つに決まる。図7及び図8の空間相関シミュレーション結果から分かるように、空間相関が低い（たとえば 0.1 付近である）アンテナ設置高 L_1 とアンテナ間隔 s の組み合わせは多数存在する。このように、アンテナ配置が式(25)の条件を満たさなくても、空間相関を低く抑えることができるアンテナ設置高 L_1 及びアンテナ間隔 s の組み合わせが多数存在する。

【0059】

一例として、図7及び図8のシミュレーション結果において、空間相関が 0.1 以下となる範囲 501 の分布を取り出して示したものを図9及び図10にそれぞれ概略的に示す。ここでは空間相関が 0.1 以下の範囲を対象としているが、これは一例に過ぎず、0.1 より大きい値を基準として、これより小さい範囲を対象としてもよいし、0.1 より小さい値を基準として、これより小さい範囲を対象としてもよい。図9及び図10から、アンテナ設置高 L_1 の値を固定し、アンテナ間隔 s の値を変更すると、空間相関が 0.1 以下となる範囲が概ね一定の間隔ごとに繰り返されることがわかる。例えば、図10

の破線 502 で示すアンテナ設置高 L_1 に着目すると、この傾向が確認できる。以降この傾向を「低空間相関部分の周期性」と呼ぶことにする。更に、図 7 をみると、アンテナ設置高 L_1 が大きくなるほど、低空間相関部分の周期（低空間相関部分の出現間隔）が短くなる傾向にあることがわかる。

【0060】

アンテナ配置決定部 17 は、環境値設定部 13 で設定された条件の下でアンテナ間隔の候補値 s_c を複数生成する。ここでいう設定された条件には、一例として、送受信距離 D 、波長 λ 又は周波数 f 、アンテナ設置高 L_2 の範囲 $[N_l, N_h]$ が含まれる。アンテナ設置高 L_1 の範囲 $[L_l, L_h]$ が含まれてもよい。

【0061】

アンテナ間隔の候補値 s_c を生成する方法の一例について、図 11 を用いて説明する。ここでは、アンテナ設置高がある値 L_{1s} （図では 50.5）である場合を想定する。

【0062】

この例では、 $(D/2)$ を初期の候補値（初期値）とし、アンテナ間隔 s が小さくなる方向に、設置高 L_{1s} に応じた間隔で、アンテナ間隔の候補値を生成（サンプリング）する。初期値は、何でもよく、 $(D/2)$ は一例である。初期値を上限値とすることで、アンテナ 102 の設置高 L_2 が $L_1 +$ 初期値より大きくならないように、設定するアンテナ間隔を探索することができる。また、前述したように、アンテナ間隔が $(D/2)$ の場合も空間相関は 0 にはならず、これより良い空間相関が得られるアンテナ間隔が存在する場合もある。アンテナ装置の所望の設置高に応じて初期値を決めてもよい。初期値は外部から指定してもよいし、予め設定しておいてもよい。

【0063】

図の二重丸が、サンプリングされた箇所を模式的に示している。この例では、 $D/2$ L_{1s} の 2 つ分の長さの区間を探索範囲（候補範囲）とし、探索範囲から n 個の候補値（サンプル）を一定の間隔で選択している。前述したように、アンテナ設置高 L_1 （又は L_2 ）が大きくなるほど、アンテナ間隔 s 方向における低空間相関部分の周期（出現間隔）が短くなる傾向がある。そこで、この傾向に合わせてアンテナ設置高 L_1 （又は L_2 ）が大きくなるほど、探索範囲を小さくなるように、分母に L_{1s} を含めている。これによりアンテナ設置高 L_1 （又は L_2 ）に応じた、効率的な探索が可能となる。つまり、探索範囲の大きさが狭すぎると、空間相関の値が最も小さい部分が選択対象から漏れる可能性が高くなり、大きすぎると、演算量が多くなる。そこで、上記の傾向に合わせて設置高 L_1 が大きいほど探索範囲を小さくすることで、このような問題を防止しつつ、効率的な探索を行う。なお、 n 値は、正の整数値であれば任意でよい。例えば、5、10、又は 20 などがある。 n の値が大きいほど、サンプルの間隔が小さくなる。設置高が大きいと探索範囲が小さくなることから、設置高が大きいほど、サンプルの間隔は小さくなる。 n の値を複数用意し、 n の複数の値を対象に処理を行ってもよい。

【0064】

探索範囲の大きさは、 A/L_{1s} 又はこの倍数の範囲としてよいし（ A は任意の実数である）、分母に L_{1s} のべき乗を用いるなど、別の方法で決めてもよい。探索範囲を一定の大きさあるいは別の任意の方法で決定し、設置高が大きいほどサンプルの間隔を小さくしてもよい。

【0065】

図 11 に示した方法においては、アンテナ 102 及び 202 の高さが $L_{1s} + (D/2)$ 以下の範囲に収まり、それより高くないよう、アンテナ間隔の候補値 s_c を $s_c <= (D/2)$ の範囲内で生成している。ただし、アンテナ装置 102 及び 202 の高さ L_1 を $L + (D/2)$ より高くしてもよい場合は、アンテナ間隔の候補値 s_c として、 $(D/2)$ より大きい値をとってもよい。

【0066】

アンテナ設置高 L_1 の範囲 $[L_l, L_h]$ の複数の L_{1s} について、同様にして、アンテナ間隔 s_c の選択（サンプリング）を行ってもよい。ただし、アンテナ設置高 L_1 が事前

10

20

30

40

50

に決まっている場合などは、その値のアンテナ設置高のみを対象に、アンテナ間隔 s_c のサンプリングを行ってもよい。

【 0 0 6 7 】

アンテナ間隔の候補値 s_c はアンテナ位置調整部 1 1 及び送受調整同期部 1 2 に渡され、アンテナ装置 1 0 0 及び 2 0 0 のアンテナ間隔の大きさが、候補値 s_c になるよう調整される。調整後のアンテナ間隔 s_c で、送信局からパイロット信号を送信し、受信局でチャネル行列の推定及び空間相関の計算を行い、空間相関記憶部 1 5 に格納する。なお、空間相関の計算を、電波伝搬モデルを用いたシミュレーションにより行うことも可能であり、その場合は、アンテナ装置 1 0 0、2 0 0 でアンテナ間隔の調整、及びパイロット信号の送信等を実際に行う必要はない。アンテナ配置決定部 1 7 は、設置高 L_1 の範囲内で、
10
複数のアンテナ間隔候補値 s_c のうち、空間相関が最も低い又は閾値以下のアンテナ間隔候補 s_c とアンテナ設置高 L_1 を決定する。決定された候補値 s_c と設置高 L を、アンテナ設置高 L_1 の設定値及びアンテナ間隔の設定値 s とする。アンテナ設置高 L_1 が特定の値に決まっているときは、空間相関が最も低い又は閾値以下のアンテナ間隔候補 s_c を、設定値 s とする。

【 0 0 6 8 】

図 1 2 はシミュレーションを繰り返し行い、 n を $n = 5$ 、 $n = 10$ 、 $n = 20$ 及び $n = 40$ とした場合に、アンテナ設置高 L_1 の各値について得られる最小の空間相関 の値を丸でプロットしたグラフである。なお、 n の値が大きいくほど、グラフが手前側に表示されている。このため、例えば $n = 5$ のグラフのうち、 $n = 10$ 、 $n = 20$ 、 $n = 40$ のグラフと重なる部分は後ろに隠れて見えないことに注意する。図 1 3 は、図 1 2 の各 n の値に対する空間相関値の累積確率分布と、関連技術の累積確率分布 (LOS-MIMO のグラフ) を表す。
20

【 0 0 6 9 】

この結果をみると、 n の値を大きくするほどアンテナ設置高 L_1 の各値について低い空間相関 を抽出しやすくなっていることがわかる。 $n = 40$ の場合、サンプリング間隔が小さいため、多くのアンテナ設置高で、低い空間相関 を抽出できているが、 $n = 5$ 又は $n = 10$ だと、サンプリング間隔が広がるため、抽出される空間相関 が高くなるケースも多くなる。

【 0 0 7 0 】

図 1 4 は第 1 の実施形態に係る処理を表したフローチャートである。
30

【 0 0 7 1 】

ステップ S 1 0 1 では、波長 λ 、アンテナ設置高 L_1 (又はアンテナ設置高 L_2 の範囲) 及び送受信距離 D 等のパラメータを、送信局及び受信局のそれぞれのアンテナ配置決定装置に設定する。波長 λ の代わりに周波数 f を設定してもよい。一方の通信局に設定したパラメータを、他方の通信局に通知することで両局に同じパラメータを設定してもよい。

【 0 0 7 2 】

ステップ S 1 0 2 では、アンテナ装置 1 0 0 及び 2 0 0 のアンテナ設置高 L_1 及びアンテナ間隔 s を初期値に設定する。アンテナ間隔 s の初期値は任意でよいが、一例として、
($D / 2$) とする。具体的な動作として、受信局 2 側のアンテナ配置決定部 2 7 は、
40
環境値設定部 2 3 からパラメータである波長 λ 、アンテナ設置高 L_1 及び送受信距離 D を取得し、アンテナ間隔の初期値 (候補値) ($D / 2$) を算出する。アンテナ設置高 L_1 を調整対象としない場合はステップ S 1 0 1 で設定されたアンテナ設置高 L_1 の値を初期値として設定する。アンテナ設置高 L_1 も調整対象とする場合は、アンテナ設置高 L_1 の範囲内で、設置高 L_1 の候補値を任意の順番で選択し、選択したそれぞれの候補値について、以下のステップ S 1 0 3 以降の処理を繰り返し実行する。ステップ S 1 0 2 において実行される具体的な処理を下記に説明する。

【 0 0 7 3 】

アンテナ配置決定部 2 7 は、アンテナ位置調整部 2 1 及び送受調整同期部 2 2 に、アンテナ間隔の初期値及びアンテナ設置高 L_1 の値を渡す。アンテナ位置調整部 2 1 は、これ
50

らの値を元にアンテナ装置 200 に係るアンテナ 201 及び 202 の位置を調整する。送受調整同期部 22 は、送信局側の送受調整同期部 12 にアンテナ間隔の初期値及びアンテナ設置高を表す情報を送信する。送受調整同期部 12 は、アンテナ位置調整部 11 にアンテナ間隔の初期値及びアンテナ設置高の値を渡す。アンテナ位置調整部 11 はこれらの値を元に、アンテナ装置 100 に係るアンテナ 101 及び 102 の位置を調整する。ここではパラメータの提供を受信局から送信局に行ったが、送信局から受信局へ行ってもよい。

【0074】

ステップ S103 では、アンテナ間隔 s の初期値及びアンテナ設置高 $L1$ の初期値にアンテナ配置を調整し、チャンネル推定を行い、空間相関を計算する。ステップ S103 において実行される具体的な処理を下記に説明する。

【0075】

まず、チャンネル推定については、チャンネル推定部 24 の動作の説明で述べたように、一例として、受信局が送信局にパイロット信号を送信することを指示する指示信号を送信し、送信局は、指示信号に従って、パイロット信号を送信する。受信局のチャンネル推定部 24 は、各アンテナを介して、パイロット信号を受信して、チャンネル推定を行い、チャンネル行列 H を求める。続いて、空間相関算出部 25 が、空間相関（受信空間相関 r_r 又は送信空間相関 r_t ）を計算し、計算された空間相関を、アンテナ間隔の現在の候補値（アンテナ設置高も調整の対象とする場合は、アンテナ設置高の現在の値も）とともに、空間相関記憶部 26 に保存する。一例として、空間相関と候補値とを対応づけた空間相関テーブルの形式、又は空間相関と候補値と設置高 $L1$ とを対応づけた空間相関テーブルの形式で保存する。

【0076】

次のステップ S104 でアンテナ間隔のすべての候補値について空間相関を計算したかを判断し、まだ空間相関を計算していない候補値が存在するときは、ステップ S105 に進み、すべての候補値について空間相関を計算したときは、ステップ S106 に進む。

【0077】

ステップ S105 においてはアンテナ間隔の次の候補値を選択し、アンテナ装置 100 及び 200 のアンテナ位置を再調整する。アンテナ設置高 $L1$ は固定し、上側のアンテナを移動させることで、アンテナ間隔を調整する（この結果として、アンテナ設置高 $L2$ が調整される）。次のアンテナ間隔の候補値は、前述したように、アンテナ設置高 $L1$ が大きいほど、サンプル間隔（候補値の間隔）が小さくなる。ある特定のアンテナ設置高 $L1$ に対して、すべての候補値について空間相関を格納した空間相関テーブル 160 の例を図 16 に示す。この例では、アンテナ間隔の初期値が 3.16 m でありサンプル間隔が 0.09 m の場合を示している。空間相関の値は、記号 “XXXXX” により模式的に表しているが、実際には値が入る。この例では、 $D/2L1$ の 2 つ分の長さ内に等間隔に n 個のサンプルを候補値として配置し、初期値である起点（上限値）から順次候補値を選択するとする。候補値を順次選択する様子を模式的に図 15 に示す。図の一番上の矩形が初期の候補値を表す。ステップ S105 を経るごとに、 s が小さくなる方向に候補値を選択する。

【0078】

ステップ S106 では、アンテナ配置決定部 27 は、空間相関記憶部 26 から最小の空間相関が得られた候補値を特定し、特定した候補値をアンテナ間隔の設定値として決定する。特定した候補値を、閾値と比較し、閾値以上である場合は、閾値未満の空間相関が得られるまで、サンプル数 n を段階的に大きくして、より粒度の高い探索を行うようにしてもよい。 n の一定の値まで大きくしても空間相関が閾値未満となるアンテナ間隔を検出できない場合は、アンテナ設置高 $L1$ を別の値に設定し、再びアンテナ間隔の探索を行ってもよい。以降、閾値未満の空間相関が得られるまで、 n の値の変更とアンテナ設置高の変更を繰り返してもよい。 n の値は固定し、アンテナ設置高 $L1$ の値のみ変更していてもよい。アンテナ設置高 $L1$ の複数の値について、ステップ S106 までの処理を行った場合に得られる空間相関テーブル 150 の例を図 17 に示す。図 16 と異なり、アンテナ設

10

20

30

40

50

置高 L 1 の項目が追加されている。アンテナ設置高 L 1 の値を X 1、X 2・・・として記号によって表しているが実際には値が入る。アンテナ設置高 L 1 の変更に加えて、n の値を変更する場合は、n の値ごとに、図 1 7 のようなテーブルが得られる。このテーブルをユーザにインタフェースを介して提供して、ユーザがアンテナ設置高 L 1 の設定値、及びアンテナ間隔の設定値を決定してもよい。

【 0 0 7 9 】

アンテナ配置決定部 2 7 は、決定したアンテナ間隔の設定値及びアンテナ設置高 L 1 の設定値を、送信局に通知する。これにより受信局及び送信局双方においてアンテナ配置が確定する。この後、受信局のアンテナ位置調整部 2 1 は当該設定値に基づきアンテナ 2 0 1、2 0 2 の位置を調整し、送信局のアンテナ位置調整部もアンテナ 1 0 1、1 0 2 の位置を調整する。調整後、送信局及び受信局間で、M I M O 通信を行う。あるいは、ユーザが空間相関テーブル又は空間相関マップに基づき、ビル等に設置するアンテナ装置のアンテナ設置高 L 1 及びアンテナ間隔を決定し、決定した内容に基づきアンテナ装置の設計を行ってもよい。

10

【 0 0 8 0 】

図 1 4 のフローチャートの変形例として、ステップ S 1 0 3 で計算された空間相関を閾値と比較し、閾値未満であるときは、当該空間相関が得られたときのアンテナ間隔の候補値を、アンテナ間隔の設定値として決定してもよい。これにより、他の候補値に対する探索処理を省略できるため、演算時間を短縮できる。

【 0 0 8 1 】

20

本実施形態では、チャンネル推定を実測により行ったが、シミュレーションにより行うことも可能である。例えば、直接波と大地反射波の 2 波が支配的なチャンネルの場合、送信局側の各アンテナの設置高と、受信局側の各アンテナの設置高と、送受信間距離よりフリスの伝搬公式を用いて伝搬路応答（チャンネル情報）を計算しても良い。あるいは、送受信間のチャンネルを模擬したシミュレータを用いて、伝搬路応答を計算しても良い。シミュレーションでは、送受信局の間の地形、土地の利用状況及び存在する構造物など、周囲の地理情報を考慮して、現実環境の再現性の高いモデリングができれば、空間相関マップ又は空間相関テーブルの信頼性も高くなる。

【 0 0 8 2 】

また、本実施形態では、アンテナ設置高 L 1 に応じた間隔で複数の候補値を設定し、最小又は閾値以下の空間相関を得られる候補値を、アンテナ間隔の設定値として決定した。別の方法として、探索範囲内のデータに対して最急降下法を適用して、空間相関が最小又は閾値以下のアンテナ間隔を見つけてもよい。前述した探索範囲内において低空間相関部分の周期性を利用することで、最急降下法により、最小の空間相関値とアンテナ間隔との組を見つけることができる。

30

【 0 0 8 3 】

また、本実施形態では、下側のアンテナ 1 0 1、2 0 1 の位置を固定し、上側のアンテナ 1 0 2、2 0 2 を移動する場合を示したが、上側のアンテナの位置を固定し、下側のアンテナを移動することで、アンテナ間隔を調整してもよい。この場合、上側のアンテナの設置高を変えずに、高い通信品質が得られるアンテナ間隔を効率良く見つけることができる。

40

【 0 0 8 4 】

以上、本実施形態によれば、上側のアンテナ 1 0 2、2 0 2 の設置高が所望の範囲に収まるように、高い通信品質が得られるアンテナ間隔を決定できる。

【 0 0 8 5 】**(第 2 の実施形態)**

第 2 の実施形態は、第 1 の実施形態で行ったチャンネル推定及び空間相関計算に代えて、伝送レートを計算し、計算した伝送レートが最も高い又は閾値以上のアンテナ間隔を決定することを特徴とする。空間相関の代わりに伝送レートをを用いることができるのは、高い伝送レートが得られているのであれば、チャンネル干渉の発生が抑制されており、M I M O

50

通信路の低相関が確保されていると推測できるからである。伝送レートの代わりに、ビット誤り率などの別の通信性能を表す指標を用いてもよい。空間相関、及び通信性能を表す指標（伝送レート、ビット誤り率等）は、送信局及び受信局間の通信品質を表す指標の一例である。以降、第2の実施形態について、伝送レートの場合を例に説明を行う。

【0086】

図18は第2の実施形態に係る受信局のアンテナ配置決定装置のブロック図を示している。図6の空間相関算出部24及び空間相関記憶部25が、伝送レート算出部241及び伝送レート記憶部251に変更されている。送信局も同様に、空間相関算出部14及び空間相関記憶部15が、伝送レート算出部及び伝送レート記憶部に置き換わってもよい（図示せず）。伝送レート算出部241は、複数のアンテナ間隔の候補値ごとに、送信局及び受信局間の伝送レートを測定する。伝送レート記憶部15は、候補値と、伝送レートの測定値とを対応づけて記憶する。図19のように、アンテナ間隔の候補値と、伝送レートの測定値とを対応づけた伝送レートテーブル170を生成してもよい。アンテナ設置高を調整の対象とする場合は、図17の空間相関テーブルと同様に、アンテナ設置高の項目を追加すればよい。

10

【0087】

図20は第2の実施形態に係る処理を表したフローチャートである。ステップS201及びステップS202は第1の実施形態におけるステップS101及びステップS102と同じである。ステップS203では送信局から受信局への伝送レートを測定する。伝送レートの測定は、例えば、複数回の伝送レート測定を行い、その平均、最大又は最小の伝送レートを決定してもよい。

20

【0088】

ステップS204、ステップS205は、第1の実施形態におけるステップS104、S105と同じである。ステップS206では、最大の伝送レートが得られた候補値を特定し、特定した候補値をアンテナ間隔の設定値として決定する。特定した候補値を、閾値と比較し、閾値未満である場合は、閾値以上の伝送レートが得られるまで、サンプル数nを段階的に大きくして、より粒度の高い探索を行うようにしてもよい。nの一定の値まで大きくしても伝送レートが閾値以上となるアンテナ間隔を検出できない場合は、アンテナ設置高L1を現在値より大きい値又は小さい値に設定し、再びアンテナ間隔の探索を行ってもよい。以降、閾値以上の伝送レートが得られるまで、nの値の変更とアンテナ設置高の変更を繰り返してもよい。nの値は固定し、アンテナ設置高のみ変更していてもよい。または、複数の候補値を生成する区間を変更してもよい。例えば候補値の生成区間が最初、3.16～2.80であった場合に、0.13だけずらして、3.03～2.67などにしてもよい。

30

【0089】

本実施形態では伝送レートを例に述べたが、ビット誤り率など通信性能に関する別の指標を用いる場合も同様にして実施できる。

【0090】

（第3の実施形態）

第3の実施形態では、送信側及び受信側の双方のアンテナ装置に係るアンテナをそれぞれ大地に対して垂直方向ではなく、斜め又は水平方向に配置する。

40

【0091】

図21は、第3の実施形態に係る送信局及び受信局の概略斜視図である。送信側であるアンテナ701及びアンテナ702、並びに受信側であるアンテナ801及びアンテナ802が、ビル等の建物上に配置されている。なお、アンテナ701の高さはアンテナ801と同じであり、アンテナ702の高さは、アンテナ802と同じである。またアンテナ701及びアンテナ702の相対位置関係と、アンテナ801及びアンテナ802の相対位置関係は同じである。

【0092】

図22は、本実施形態に係る反射波の通信路を説明するための図である。鏡像711は

50

、アンテナ 7 0 1 の大地に対する鏡像、鏡像 7 1 2 はアンテナ 7 0 2 の大地に対する鏡像、鏡像 8 1 1 はアンテナ 8 0 1 の大地に対する鏡像、鏡像 8 1 2 はアンテナ 8 0 2 の大地に対する鏡像をそれぞれ表す。

【 0 0 9 3 】

式 (6) と式 (7) の左辺及び右辺同士を足し、式 (5) の左辺及び右辺を引くと、以下の大地反射波の直交条件の式が得られる。

【 数 2 1 】

$$(d_{11r} - d_{12r}) + (d_{22r} - d_{21r}) = \frac{\lambda}{2} (2p_1 - 2p_2 - 2p_3 - 1) \quad (30) \quad 10$$

【 0 0 9 4 】

図 2 2 を用いて、式 (3 0) に含まれている大地反射波に係る通信路について説明をする。 d_{11r} はアンテナ 7 0 1 とアンテナ 8 0 1 間の大地反射波の経路を表す。 d_{11r} の長さは、アンテナ 7 0 1 と鏡像 8 1 1 間を結ぶ直線の長さ又はアンテナ 8 0 1 と鏡像 7 1 1 間を結ぶ直線の長さに等しい。従って、 d_{11r} は下記の式 (3 1) のように表せる。

【 数 2 2 】

$$d_{11r} = \sqrt{D^2 + (2 \cdot L1)^2} \quad (31) \quad 20$$

【 0 0 9 5 】

d_{22r} は、アンテナ 7 0 2 とアンテナ 8 0 2 間の大地反射波の経路を表す。 d_{22r} の長さは、アンテナ 7 0 2 と鏡像 8 1 2 を結ぶ直線の長さ又はアンテナ 8 0 2 と鏡像 7 1 2 を結ぶ直線の長さに等しい。従って、 d_{22r} の長さは、下記の式 (3 2) のように表せる。

【 数 2 3 】

$$d_{22r} = \sqrt{D^2 + (2 \cdot L2)^2} \quad (32) \quad 30$$

【 0 0 9 6 】

d_{12r} はアンテナ 8 0 2 とアンテナ 7 0 1 間の大地反射波の経路を表す。 d_{21r} はアンテナ 8 0 1 とアンテナ 7 0 2 の大地反射波の経路を表す。 d_{12r} と d_{21r} の長さは等しい。 d_{12r} 及び d_{21r} の長さは、アンテナ 7 0 1 と鏡像 8 1 2 を結ぶ直線の長さ又はアンテナ 8 0 2 と鏡像 7 1 1 を結ぶ直線の長さに等しくなる。また、図 2 2 における線分 M の長さは下記のように表される。

【 数 2 4 】

$$M = \sqrt{s^2 - (L2 - L1)^2} = \sqrt{s^2 - L2^2 + 2 \cdot L2 \cdot L1 - L1^2} \quad (33) \quad 40$$

式 (3 3) を用いて、図 2 2 における線分 O の長さを表すと下記のようになる。

【数 2 5】

$$O = \sqrt{M^2 + D^2} = \sqrt{s^2 - L2^2 + 2 \cdot L2 \cdot L1 - L1^2 + D^2} \quad (34)$$

従って、 d_{12r} 及び d_{21r} の長さは下記のように表される。

【数 2 6】

$$d_{12r} = d_{21r} = \sqrt{O^2 + (L1 + L2)^2} = \sqrt{D^2 + s^2 + 4 \cdot L2 \cdot L1} \quad (35)$$

10

【0097】

式(31)、(32)及び(35)を式(30)に代入すると下記の式が得られる。

【数 2 7】

$$L2 - L1 = \pm \sqrt{\frac{\lambda D(2p_1 - 2p_2 - 2p_3 - 1) + 2s^2}{4}} \quad (36)$$

20

式(36)で $p_1 = 0$, $p_2 = -1$ 及び $p_3 = 0$ と置くと、下記の式(37)が得られる。

【数 2 8】

$$L2 - L1 = \pm \sqrt{\frac{\lambda D + 2s^2}{4}} \quad (37)$$

30

式(37)の関係が満たされるよう、斜め方向にアンテナ配置を行うと第1の実施形態及び第2の実施形態に係る垂直配置されたアンテナ装置と同様に通信路の直交性又は低い空間相関が確保できる。第1の実施形態において図7及び図8を用いて説明したのと同様に、式(37)を満たすアンテナ間隔 s 以外にも、低い空間相関が得られるアンテナ間隔及びアンテナ設置位置が多数存在する。アンテナ設置高が高いほど、低い空間相関が得られるアンテナ間隔の周期が小さくなる。よって、第1の実施形態と同様にして、アンテナの位置調整処理(図14のフローチャート参照)を行うことで、低い空間相関を得られるアンテナ間隔及びアンテナ設置位置を決定できる。位置調整処理を行う際、アンテナ間隔の初期値は、一例として式(37)を満たすアンテナ間隔 s としてもよい。

40

【0098】

更に、式(36)で $p_1 = 0$, $p_2 = 0$ 及び $p_3 = 0$ と置くと、下記の式(38)が得られる。

【数 29】

$$L2 - L1 = \pm \sqrt{\frac{-\lambda D + 2s^2}{4}} \quad (38)$$

Rと $2s^2$ が等しくなるようにアンテナ間隔を調整すると、式(38)の右辺は0となる。このような場合には $L2 = L1$ が成立し、アンテナ701、702、801、802の高さがすべて等しくなる。すなわち、アンテナ701、702は水平配置され、アンテナ801、802も水平配置される。この場合も、アンテナの位置調整処理により、低い空間相関を実現する柔軟なアンテナ配置を行うことができる。このように、本発明の実施形態は、垂直配置、斜め方向の配置、水平方向の配置などアンテナの配置方向を問わずに適用できる。

【0099】

(第4の実施形態)

第4の実施形態は、アンテナ位置調整処理を、使用する周波数帯域内において周波数選択性フェージングの影響が軽減される周波数(又は波長)で行うことを特徴とする。

【0100】

無線通信装置の使用する周波数帯域内に周波数選択性フェージングが発生すると、通信品質に影響を及ぼす。

【0101】

このため、周波数フェージングの影響が相対的に少ない周波数を用いることで、アンテナ位置調整処理を効果的に行うことができる。

【0102】

第4の実施形態に係る処理においては、図14のステップS101又は図20のステップS201で、周波数選択性フェージングの影響が少ない周波数又は波長を選択する。

【0103】

例えば、使用周波数帯域で試験用の信号を送信局から受信局に送信し、受信信号を解析する。これにより図23に示すように、周波数ごとの振幅を表すデータを取得する。データに基づき、信号強度が最も高い又は閾値以上の周波数(又は波長)を選択する。信号の送信を複数回行い、信号強度の時間変動が少なく、信号強度の時間平均値が閾値以上の周波数を選択してもよい。選択した周波数を用いて位置調整のための通信(チャンネル推定のための通信等)を行う。この通信では、選択した周波数を中心とする狭い帯域を使用する。位置調整後の通常の通信では、選択した周波数を含む周波数帯域全体を使えばよい。

【0104】

本実施形態により、アンテナ位置調整をより効果的に行うことができる。

【0105】

(第5の実施形態)

第5の実施形態は、送信側及び受信側のアンテナ装置にそれぞれ3つ以上のアンテナがある構成において、2つのアンテナを送信側及び受信側のアンテナ装置のそれぞれにおいて選択し、選択した2つのアンテナを対象に、これまで述べた実施形態のアンテナ位置調整処理を行う。

【0106】

図24に、3つのアンテナ101、102、103を備えた送信局と、3つのアンテナ201、202、203を備えた受信局を模式的に示す。送信局のアンテナは、大地に近い側から、アンテナ101、102、103の順に大地に垂直に配置されている。受信局のアンテナは、大地に近い側から、アンテナ201、202、203の順に大地に垂直に配置されている。一例として、アンテナ101、201は同じ高さ、アンテナ102、2

10

20

30

40

50

02は同じ高さ、アンテナ103、203は同じ高さに配置されている。

【0107】

位置調整を行う2つのアンテナを選択する際、一例として、送信局及び受信局の双方で同じ相対位置関係にあるアンテナを選択する。例えば送信局からアンテナ102、103を選択し、受信局からアンテナ202、203を選択する。あるいは、送信局からアンテナ101、103を選択し、受信局からアンテナ201、203を選択してもよい。その他の組み合わせのアンテナを選択してもよい。

【0108】

位置調整を行った後は、送信局及び受信局でそれぞれ3つのアンテナを用いて、 3×3 のMIMO通信を行えばよい。

10

【0109】

図24では、送信局及び受信局がそれぞれ3つのアンテナの場合を示したが、4つ以上のアンテナを備える場合も同様にして、アンテナ選択及び位置調整を行えばよい。

【0110】

(第6の実施形態)

第6の実施形態では、送信局及び受信局間で、FDD(Frequency Division Duplex)を用いて双方向のMIMO通信を行う場合を想定する。FDDは、送信用と受信用にそれぞれ別々の周波数を割り当てることにより全二重通信を実現する。具体的には、送信局から受信局への送信と、受信局から送信局への送信(送信局による受信局からの受信)とで別々の周波数帯域(使用する周波数帯域がオーバーラップしない)を用いて同時に通信を行う。なお、送信用の周波数帯域と、受信用の周波数帯域間には、ガードバンドが設けられる。

20

【0111】

第6の実施形態においては、FDDにおいて、送信及び受信の双方に共通して空間相関を抑制できるアンテナ間隔及びアンテナ設置位置 L_1 又は L_2 を決定する。具体的な動作例として、送信局から受信局への送信について、第1の実施形態と同様にして、空間相関テーブル(図16、図17参照)を作成する。同様にして、受信局から送信局への送信についても同様に空間相関テーブルを生成する。空間相関テーブルは、アンテナ設置高の範囲内の各設置高に対して作成してもよいし、特定のアンテナ設置高に対してのみ作成してもよい。これらの空間相関テーブルの双方で、空間相関が最小もしくは閾値未満のアンテナ間隔とアンテナ設置高 L_1 (又はアンテナ間隔とアンテナ設置高 L_2 の組)を特定する。特定したアンテナ間隔及びアンテナ設置高 L_1 (又は L_2)の値を設定値に決定する。

30

【0112】

(第7の実施形態)

図25は、シミュレーションによりアンテナ設置高 L_1 の複数の値に対して、アンテナ間隔を $s - s/2$ から s まで変化させ、その中で空間相関が最小となるアンテナ間隔をプロットし、グラフで結んだものである。 s の値は、任意の方法で決定する。一例として、第1の実施形態と同様、 $s = (D/2)$ とする。分布は $s - s/2$ 以上に集中している。このことから、アンテナ間隔の候補値を設定する範囲(候補値の探索範囲)は、 $s - s/2$ から s としてもよい。シミュレーションと同じモデルを適用する場合は、シミュレーションの結果を記憶しておき、このシミュレーションの結果から、適用するアンテナ設置高 L_1 に対応するアンテナ間隔を1つ特定してもよい。シミュレーションの結果は図25のようにグラフ形式でもよいし、第1の実施形態における空間相関テーブルの形式でもよい。この場合、第1の実施形態のようにアンテナ間隔の候補値の探索を行わなくてもよい。

40

【0113】

図25における空間相関が最小になる近似グラフを算出し、図25のシミュレーション結果を記憶する代わりに、近似グラフを記憶してもよい。シミュレーションと同じモデルを適用する場合は、適用するアンテナ設置高 L_1 に対応するアンテナ間隔を近似グラフから特定してもよい。この場合、第1の実施形態のようにアンテナ間隔の候補値の探索を行う

50

必要はない。近似グラフの算出例として、
【数 3 0】

$$ks < h_2 < (k+1)s \quad (39)$$

において (ks, s) 、 $((3k+1)/2s, 2/3s)$ 、 $((2k+1)s, 1/2k)$ の 3 点を通る 2 次関数を導出しても良い。カッコ内の左側の要素が設置高、右側の要素がアンテナ間隔を表す。図 26 に $k = 1, 2, \dots$ として求めた複数の 2 次関数の例を示す。

10

【0114】

なお、本発明は上記各実施形態そのままに限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で構成要素を変形して具体化できる。また、上記各実施形態に開示されている複数の構成要素を適宜組み合わせることによって種々の発明を形成できる。また例えば、各実施形態に示される全構成要素からいくつかの構成要素を削除した構成も考えられる。さらに、異なる実施形態に記載した構成要素を適宜組み合わせてもよい。

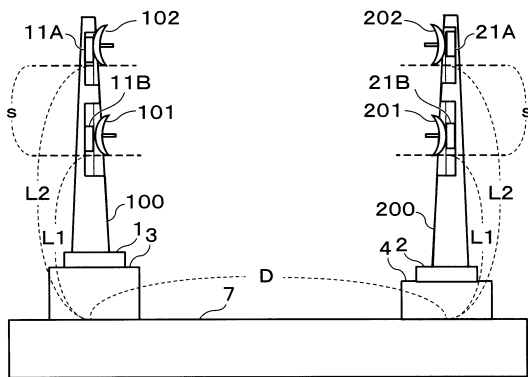
【符号の説明】

【0115】

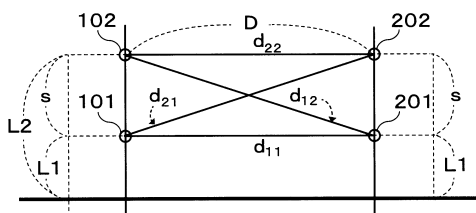
1 : アンテナ配置決定装置	20
2 : アンテナ配置決定装置	
11 : アンテナ位置調整部	
12 : 送受調整同期部	
13 : 環境値設定部	
14 : チャンネル推定部	
15 : 空間相関算出部	
16 : 空間相関記憶部	
17 : アンテナ配置決定部	
18 : 送受信部	
19 : 候補値生成部	30
21 : アンテナ位置調整部	
22 : 送受調整同期部	
23 : 環境値設定部	
24 : チャンネル推定部	
25 : 空間相関算出部	
26 : 空間相関記憶部	
27 : アンテナ配置決定部	
28 : 送受信部	
29 : 候補値生成部	
100 : アンテナ装置	40
101 : アンテナ	
102 : アンテナ	
150 : 空間相関テーブル	
160 : 空間相関テーブル	
170 : 伝送レートテーブル	
200 : アンテナ装置	
201 : アンテナ	
202 : アンテナ	
701 : アンテナ	
702 : アンテナ	50

- 7 1 1 : アンテナの鏡像
- 7 1 2 : アンテナの鏡像
- 8 0 1 : アンテナ
- 8 0 2 : アンテナ
- 8 1 1 : アンテナの鏡像
- 8 1 2 : アンテナの鏡像

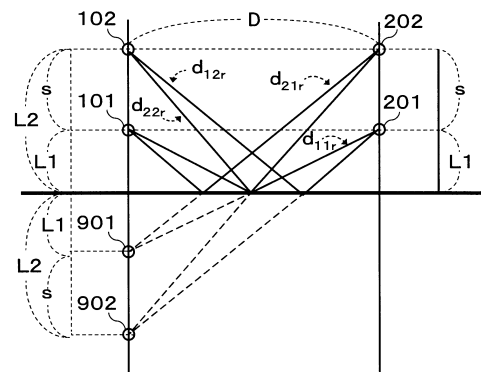
【図1】



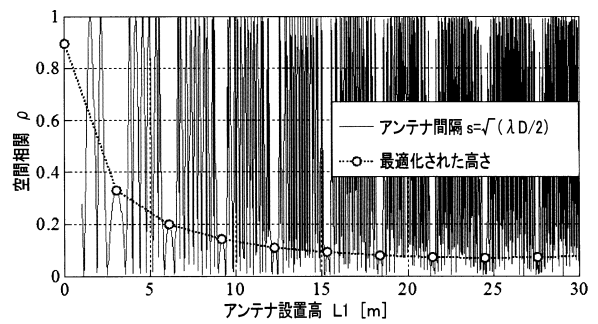
【図2】



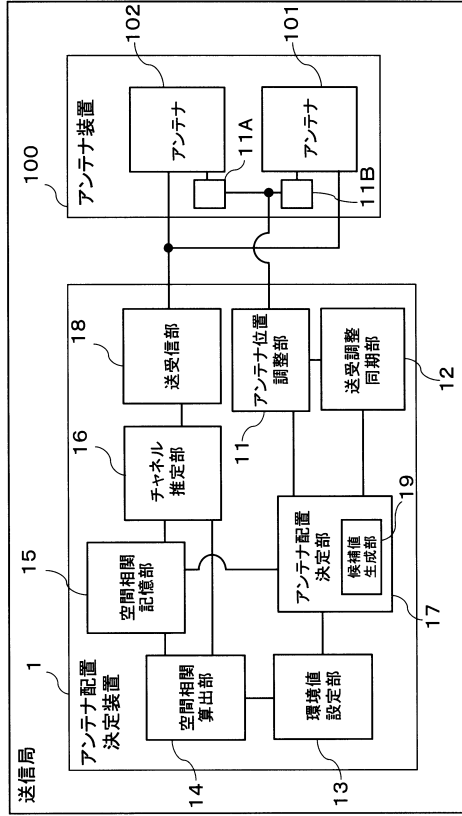
【図3】



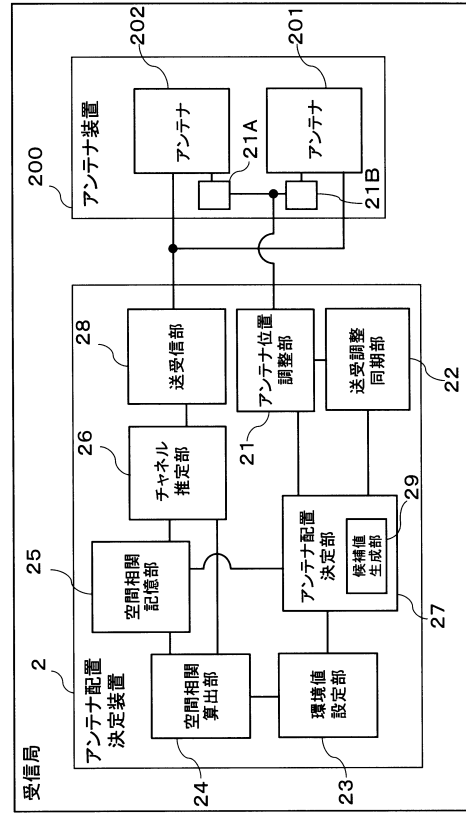
【図4】



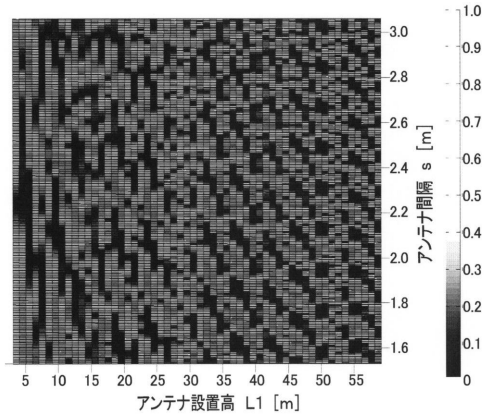
【図5】



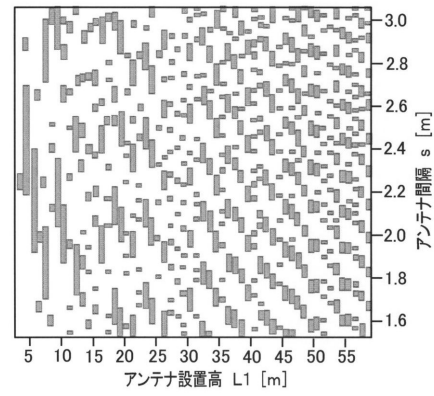
【図6】



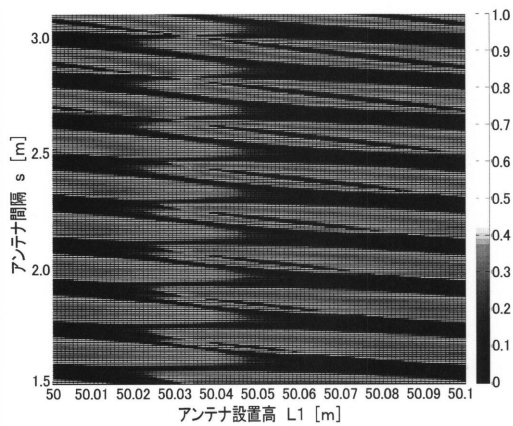
【図7】



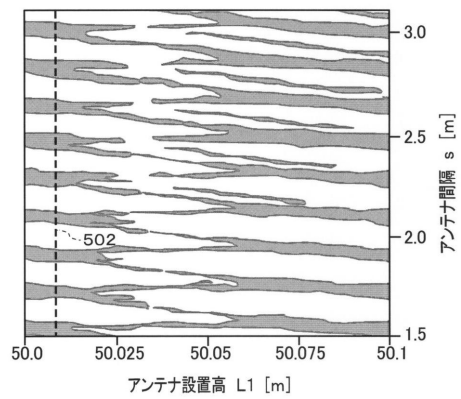
【図9】



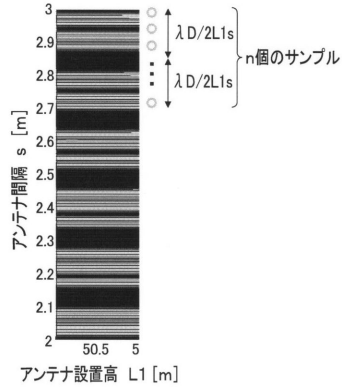
【図8】



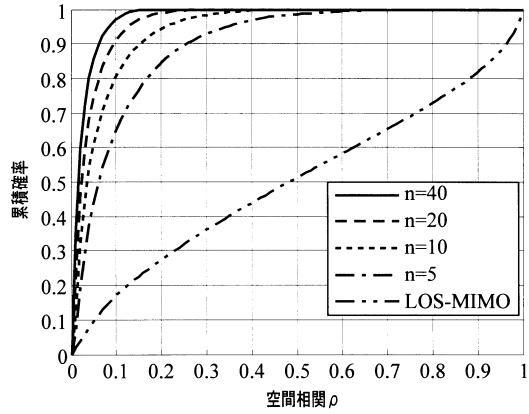
【図10】



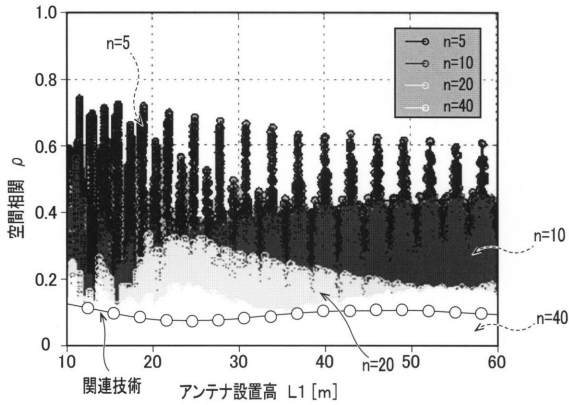
【図11】



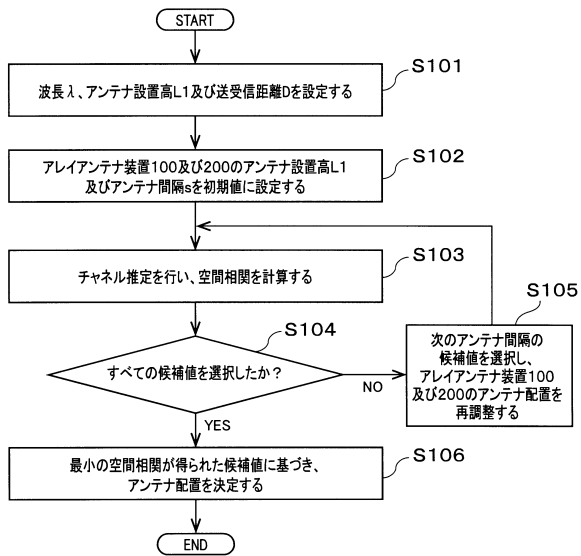
【図13】



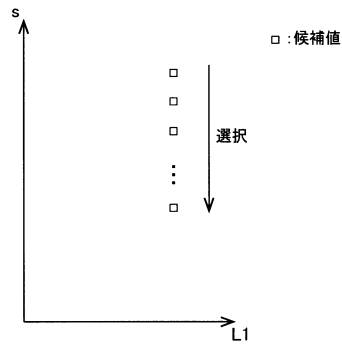
【図12】



【図14】



【図15】



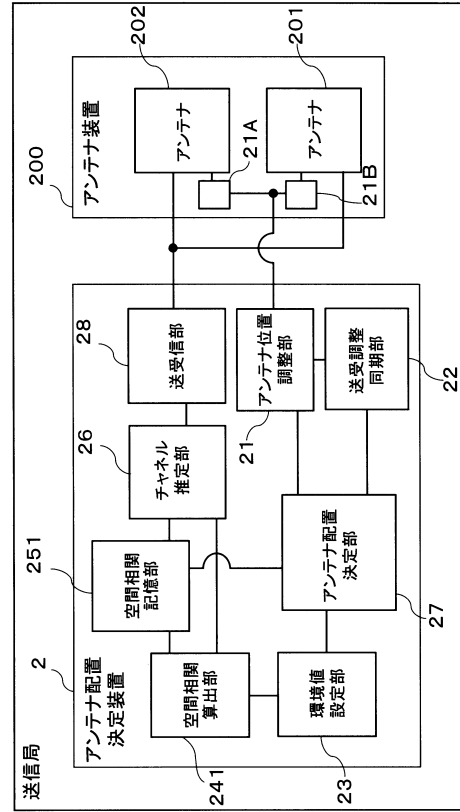
【図16】

アンテナ間隔の候補値	空間相関 ρ
3.16m	XXXXX
3.07m	XXXXX
2.98m	XXXXX
2.89m	XXXXX
2.80m	XXXXX
....

【図17】

アンテナ設置高 L1[m]	X1	X2	X3	X4	X5	...
アンテナ間隔の候補値						
3.16m	0.15	0.02	0.09	0.16	0.04	...
3.07m	0.06	0.17	0.43	0.08	0.57	...
2.98m	0.41	0.08	0.14	0.03	0.05	...
2.89m	0.03	0.14	0.02	0.16	0.02	...
2.80m	0.02	0.06	0.08	0.04	0.17	...
...						

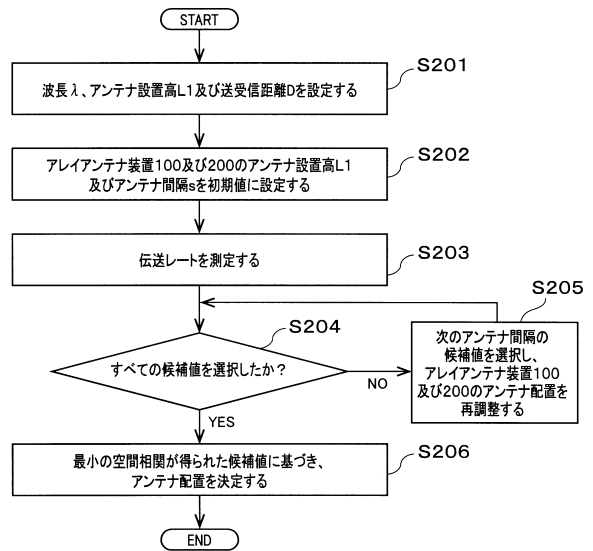
【図18】



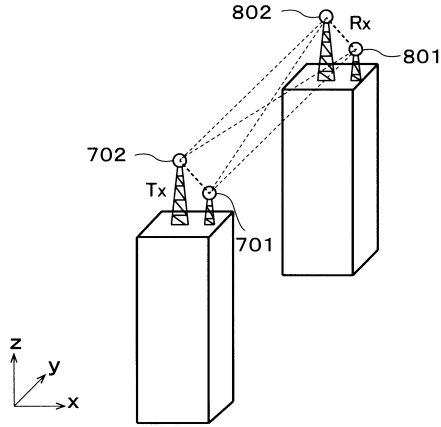
【図19】

アンテナ設置高 L1[m]	伝送レート測定値(Mbps)
アンテナ間隔の候補値[m]	
3.0m	427
2.95m	820
2.90m	745
2.85m	453
2.80m	570
...	...

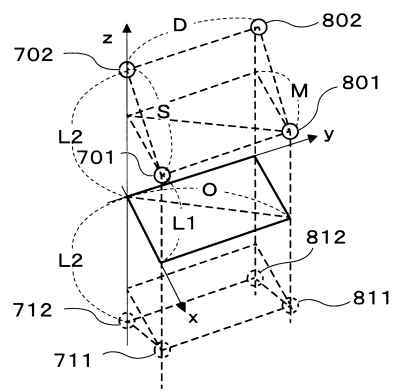
【図20】



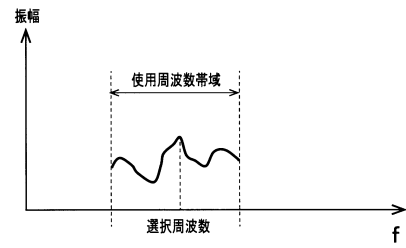
【図 2 1】



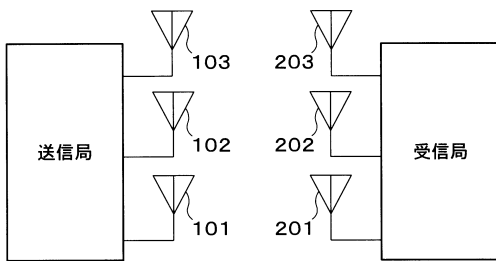
【図 2 2】



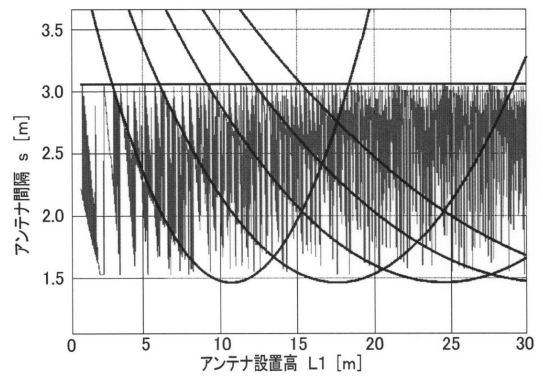
【図 2 3】



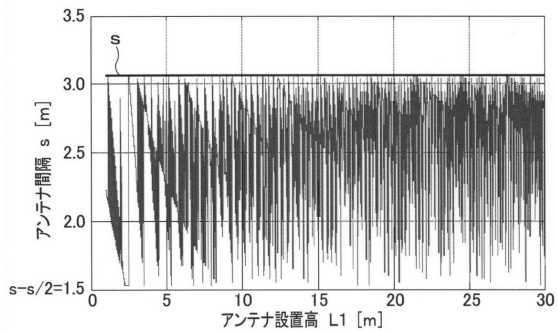
【図 2 4】



【図 2 6】



【図 2 5】



フロントページの続き

- (72)発明者 内田 大輔
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 依田 大輝
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 秋田 耕司
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 旦代 智哉
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 阿部 弘

- (56)参考文献 国際公開第2009/017230(WO, A1)
特開2014-230094(JP, A)
特開2016-226007(JP, A)
国際公開第2016/058179(WO, A1)
内田 大輔 Daisuke UCHIDA, 5Gバックホール向け見通し内MIMO通信のアンテナ配置に関する一検討 A Study on an Antenna Arrangement of Line-Of-Sight MIMO Communications for 5G Backhaul Systems, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol. 117 No. 284 IEICE Technical Report, 日本, 一般社団法人電子情報通信学会 The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2017年11月1日, 第117巻/第284号, P. 181-186
内田 大輔 Daisuke Uchida, 高速ミリ波固定通信向け見通し内MIMO伝送におけるアンテナ設置法の一検討 A Study on an Antenna Arrangement of Line-Of-Sight MIMO Transmission in High Speed Millimeter Wave Fixed Wireless Systems, 電子情報通信学会2017年通信ソサイエティ大会講演論文集1 PROCEEDINGS OF THE 2017 IEICE COMMUNICATIONS SOCIETY CONFERENCE, 日本, 一般社団法人電子情報通信学会 THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS, 2017年8月29日, P. 303

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04B 7/0413
H01Q 3/26
H04B 17/309
3GPP TSG RAN WG1-4
SA WG1-4
CT WG1, 4
IEEE 802.11
15
16