

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2014 年 12 月 18 日(18.12.2014)



(10) 国際公開番号

WO 2014/199451 A1

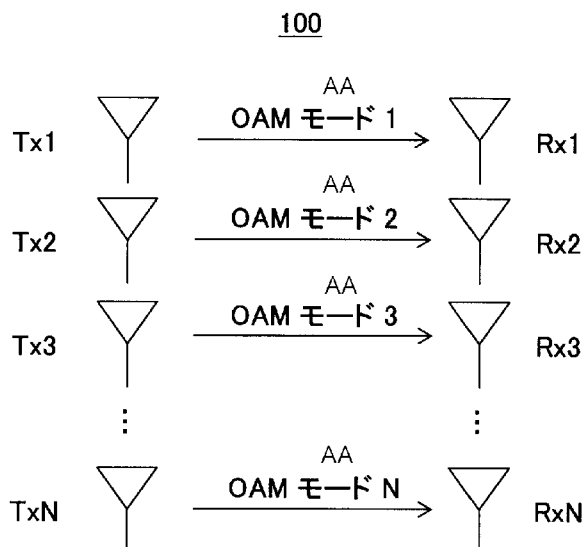
- (51) 国際特許分類:
H01Q 21/00 (2006.01) H04J 99/00 (2009.01)
H01Q 19/10 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/066115
- (22) 国際出願日: 2013 年 6 月 11 日(11.06.2013)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 富士通株式会社 (FUJITSU LIMITED) [JP/JP]; 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 李 正夷(LI, Zhengyi); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 大橋 洋二(OHASHI, Yoji); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP). 河西 和美(KASAI, Kazumi); 〒2118588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 伊東 忠重, 外(ITO, Tadashige et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目 1 番 1 号 丸の内 M Y P L A Z A (明治安田生命ビル) 1 6 階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT,

[続葉有]

(54) Title: ANTENNA DEVICE, AND SIGNAL TRANSMISSION SYSTEM

(54) 発明の名称: アンテナ装置、及び、信号伝送システム

[図4]



AA MODE

(57) Abstract: Provided is an antenna device with which multiplexing of high frequency (RF) signals can be easily performed. The antenna device includes: an N ($N \geq 2$) number of transmission antennae for transmitting RF signals having orbital angular momentums of prescribed modes; and an N number of reception antennae which respectively form pairs with the N number of transmission antennae, and which receive RF signals having orbital angular momentums of modes which are the same as those of the RF signals transmitted by the corresponding transmission antennae.

(57) 要約: 高周波 (RF) 信号の多重化を容易に行うことのできるアンテナ装置を提供する。アンテナ装置は、所定モードの軌道角運動量を有する RF 信号を送信する N ($N \geq 2$) 個の送信アンテナと、前記 N 個の送信アンテナとそれぞれ対をなす N 個の受信アンテナであって、対応する送信アンテナが送信する RF 信号と同一モードの軌道角運動量を有する RF 信号を受信する N 個の受信アンテナを含む。

WO 2014/199451 A1



NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI 添付公開書類:

(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, — 国際調査報告 (条約第 21 条(3))
MR, NE, SN, TD, TG).

明 細 書

発明の名称： アンテナ装置、及び、信号伝送システム

技術分野

[0001] 本発明は、アンテナ装置、及び、信号伝送システムに関する。

背景技術

[0002] 従来より、基地局を対応する基地局コントローラに接続するためにマイクロ波バックホールが用いられている（例えば、非特許文献1参照）。

[0003] しかしながら、現在、ワイヤレスネットワークは、音声のみのサポートから音声及び高速データ通信をサポートするまで発展している。従って、基地局とマイクロ波バックホールの帯域幅容量に対する要求は増大すると考えられる。

[0004] また、帯域幅容量の大きいマイクロ波バックホールの候補として、LoS(Line-of-Sight) MIMO(Multiple-Input and Multiple-Output)を用いたシステムがある（例えば、非特許文献2参照）。このようなシステムでは、マルチパス散乱が生じないため、空間分割多重伝送を実現するアンテナの分離は、通信距離に依存することになる。

[0005] 例えば、図1に示すLoSMIMOを用いたシステムにおいて、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ とで 2×2 形式の通信を行う場合について考える。送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ を分離するための距離 d は、次式(1)に示すように、通信距離 L に依存する。

[0006] [数1]

$$d = \sqrt{\lambda L / 2} \quad (1)$$

ここで、 λ は波長である。 L が400mである場合に、通信周波数が2.

4 GHz の場合は d が約 5 m であり、60 GHz の場合は d が約 1 m となる。このように、アンテナの分離に必要な距離 d は比較的大きく、小型装置への適用可能性は低い。さらに、アンテナの分離が低下すると、チャンネル容量は急激に低下する。

近年、光学分野において、容量の大きい光通信のための軌道角運動量 (OAM: orbital angular momentum) の研究が非常に盛んである (例えば、非特許文献 3 参照)。OAM は、分極 (スピン角運動量 (SAM: spin angular momentum)) と同様に、電磁波の基本的な特性である。

[0007] 図 2 に示すように、OAM を有する電磁波は、螺旋状の波面を有し、方位角による線形的な位相遅延を示す。ここで、OAM モード l ($l = \pm 1, \pm 2, \dots$) は、物理的な 1 周期に $2l\pi$ の位相遅延があることを意味する。位相遅延は電気角で表される。

[0008] 図 3 に示す光学的な構成では、光学結合器を用いることにより、OAM 信号は同一の (一つの) 光軸に対して重畳することができる (例えば、非特許文献 3 参照)。

[0009] 異なる OAM モードを有する電磁波は、互いに直交しており、複数の直交チャンネルによって高い容量が達成される。

[0010] しかしながら、高周波 (RF: Radio Frequency) 信号の通信では、一つの光軸に対して OAM を重畳することは困難であり、高周波 (RF) 信号の多重化を行うこと自体が困難である。

先行技術文献

非特許文献

[0011] 非特許文献 1: Mobile Backhaul: Fiber vs. Microwave, Case Study Analyzing Various Backhaul Technology Strategies, Tzvika Naveh. [2013 年 1 月 29 日検索] インターネット (http://www.ceragon.com/files/ceragon_mobile_backhaul_fiber_microwave_white_paper.pdf)

非特許文献 2: C. Sheldon, E. Torkildson, M. Seo, C. P. Yue, U. Madhow, and M. Rodwell, "A 60 GHz line-of-sight 2×2 MIMO link operating at

1.2 Gbps,” in Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (AP-S 2008), Jul. 2008.

非特許文献3: J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A. E. Willner, ”Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing,” Nature Photonics, vol. 6, pp. 488-496, Jun. 2012.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] 上述のように、高周波（RF）信号の多重化を行うことは困難である。

[0013] そこで、高周波（RF）信号の多重化を容易に行うことのできるアンテナ装置、及び、信号伝送システムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明の実施の形態のアンテナ装置は、所定モードの軌道角運動量を有するRF信号を送信するN（ $N \geq 2$ ）個の送信アンテナと、前記N個の送信アンテナとそれぞれ対をなすN個の受信アンテナであって、対応する送信アンテナが送信するRF信号と同一モードの軌道角運動量を有するRF信号を受信するN個の受信アンテナとを含む。

発明の効果

[0015] 高周波（RF）信号の多重化を容易に行うことのできるアンテナ装置、及び、信号伝送システムを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]LoSMIMOを用いたシステムを示す図である。

[図2]OAMを有する電磁波の螺旋状の波面と、方位角による線形的な位相遅延を示す図である。

[図3]光学結合器でOAM信号を一つの光軸に重畳するシステムの構成を示す図である。

[図4]実施の形態のアンテナ装置100の送信アンテナ及び受信アンテナの配

置を示す図である。

[図5]実施の形態のアンテナ装置100の送信アンテナ及び受信アンテナの配置を示す図である。

[図6]シングルモードにおけるOAMを有するRF信号の波面を示す図である。

[図7]マルチモードにおけるOAMを有するRF信号の波面を示す図である。

[図8]実施の形態のアンテナ装置100における隣り合うアンテナの平面視での位置関係を示す図である。

[図9]実施の形態のアンテナ装置100におけるチャンネル容量の高さを説明するためのシミュレーション結果を示す図である。

[図10]シグナルノイズ比(SNR)を20dBに固定し、 $d = \beta(\lambda L / 2)^{1/2}$ を満たす値 β と、チャンネル容量との関係を示す図である。

[図11]実施の形態のアンテナ装置100のアンテナを示す図である。

[図12]実施の形態のアンテナ装置100のアンテナの変形例を示す図である。

[図13]実施の形態の変形例のアンテナ装置100Aを示す図である。

[図14]実施の形態の他の変形例のアンテナ装置100Bを示す図である。

発明を実施するための形態

[0017] 以下、本発明のアンテナ装置、及び、信号伝送システムを適用した実施の形態について説明する。

[0018] <実施の形態>

図4及び図5は、実施の形態のアンテナ装置100の送信アンテナ及び受信アンテナの配置を示す図である。

[0019] 実施の形態のアンテナ装置100は、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots$ 、 $T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots$ 、 $R \times N$ とを含む。なお、 N は2以上の整数であり、図4及び図5では、 N が5以上の整数である場合について説明する。

[0020] 図4に示すように、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots$ 、 $T \times N$

と、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots R \times N$ とは、それぞれ、直線状に配置されていてもよい。送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots R \times N$ とは、それぞれ、光軸が一致するように配置されている。

[0021] 送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots T \times N$ は、それぞれ、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots R \times N$ と通信を行う。すなわち、送信アンテナ $T \times 1$ は、受信アンテナ $R \times 1$ と通信を行う。同様に、送信アンテナ $T \times 2$ は、受信アンテナ $R \times 2$ と通信を行う。送信アンテナ $T \times 3$ は、受信アンテナ $R \times 3$ と通信を行う。また、送信アンテナ $T \times N$ は、受信アンテナ $R \times N$ と通信を行う。

[0022] これにより、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots R \times N$ の間では、 N チャンネルの通信を行うことができる。

[0023] 実施の形態のアンテナ装置 100では、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots T \times N$ は、軌道角運動量 (OAM) を有しない (平面波の) RF 信号 (電磁波) を所定のモードの軌道角運動量 (OAM) を有する RF 信号 (電磁波) にモード変換して送信する。また、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots R \times N$ は、それぞれ、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots T \times N$ から送信される RF 信号を OAM を有しない (平面波の) RF 信号に変換する。

[0024] OAM を有する RF 信号は、進行方向 (伝搬方向) に伸延する光軸の周りに、位相を変化させながら螺旋状に進行する。すなわち、OAM を有する RF 信号は、光軸を中心軸とした螺旋状の波面を有する。

[0025] ここで、OAM を有する RF 信号のモード l ($l = \pm 1, \pm 2, \dots$) は、物理的な 1 周期 (360 度) に $2l\pi$ の位相遅延が含まれることを意味する。モード 1 ($l = 1$) は、物理的な 1 周期 (360 度) に 2π の位相遅延が含まれることを意味する。

[0026] すなわち、モード 1 ($l = 1$) の OAM を有する RF 信号は、螺旋状に 1

周期（360度）進むうちに、位相が 2π 変化する波面を有する。また、モード2（ $l=2$ ）のOAMを有するRF信号は、螺旋状に1周期（360度）進むうちに、位相が 4π （ $2\pi \times 2$ ）変化する波面を有する。従って、モード l のOAMを有するRF信号は、螺旋状に1周期（360度）進むうちに、位相が $2l\pi$ 変化する波面を有する。

[0027] また、モード l の値の正負は、OAMを有するRF信号が光軸の周りに、反時計回りの螺旋状で伝搬する場合を正とし、時計回りの螺旋状で伝搬する場合を負とする。

[0028] 実施の形態のアンテナ装置100はOAMを有するRF信号を用いるため、受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ は、それぞれ、送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ から送信されるOAMを有するRF信号を受信できる位置に配置されることが必要である。

[0029] ここで、OAMを有するRF信号は、伝搬方向に伸延する光軸の周りで螺旋状に位相を変化させながら、螺旋状に進行する。すなわち、OAMを有するRF信号は、光軸の周りで放射に拡がりながら螺旋状に進行する。OAMを有するRF信号の位相は、螺旋状の波面の方位角によって決まる。

[0030] このため、OAMを有するRF信号の1周期分をすべて受信するには、受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ の光軸と、送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ の光軸とが一致していることが必要である。

[0031] このようなOAMを有するRF信号を送信する送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ と、OAMを有するRF信号を受信する受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ とは、それぞれ、モード変換と逆変換を実現するための所定の構成を有する。

[0032] しかしながら、送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ と受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ との具体的な構成については後述することとし、図4及び図5では、送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ との位置関係について説明する。

[0033] 従って、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots$ 、 $T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots$ 、 $R \times N$ とは、図4に示すように、そ

れぞれ、互いの光軸が一致するように、直線状に配置されていてもよい。

[0034] また、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ 、 $T \times 3$ 、 $\dots$ $T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ 、 $R \times 3$ 、 $\dots$ $R \times N$ とは、それぞれ、互いの光軸が一致していれば、図5に示すように、ランダムに配列されていてもよい。

[0035] なお、図4及び図5には、送信アンテナ $T \times 1$ と受信アンテナ $R \times 1$ がモード1のOAMを有するRF信号の通信を行い、送信アンテナ $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 2$ がモード2のOAMを有するRF信号の通信を行う場合を示す。

[0036] また、図4及び図5には、送信アンテナ $T \times 3$ と受信アンテナ $R \times 3$ がモード3のOAMを有するRF信号の通信を行い、送信アンテナ $T \times N$ と受信アンテナ $R \times N$ がモードNのOAMを有するRF信号の通信を行う場合を示す。

[0037] しかしながら、これらのモード1の割り当ては一例である。送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ とは、それぞれの対で、同一のモード1のOAMを有するRF信号を通信する構成であればよい。送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ とは、それぞれ、異なるモードのOAMを有するRF信号を通信することはできない。

[0038] 従って、送信アンテナ $T \times 1 \sim T \times N$ と、受信アンテナ $R \times 1 \sim R \times N$ とは、すべて同一のモード1のOAMを有するRF信号を通信する構成であってもよい。

[0039] 次に、図6及び図7を用いて、シングルモードとマルチモードについて説明する。

[0040] 図6は、シングルモードにおけるOAMを有するRF信号の波面を示す図であり、図7は、マルチモードにおけるOAMを有するRF信号の波面を示す図である。なお、図6及び図7には、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ とで2チャンネルの通信を行う場合を示す。

[0041] シングルモードとは、複数のチャンネルで用いるモード1が1種類であることをいう。また、マルチモードとは、複数のチャンネルで用いるモード1

が2種類以上であることをいう。図6及び図7には、2チャンネルの通信を行う場合を示すので、図6には2つのチャンネルが同一のモード1のOAMを有するRF信号を用いて通信を行う場合を示す。

[0042] 図6に示すOAMを有するRF信号は、それぞれ、光軸A1、A2の周りを螺旋状に伝搬する。

[0043] また、図7には、2チャンネルの通信において、互いにモード1が異なる2つのOAMを有するRF信号を用いて通信を行う場合を示す。図7に示すOAMを有するRF信号は、それぞれ、光軸A1、A2の周りを螺旋状に伝搬する。

[0044] なお、図6及び図7には、OAMを有するRF信号の波形を概略的に示す。

[0045] 次に、図8を用いて、隣り合う受信アンテナの一例として受信アンテナR×1、R×2を用いて、2チャンネルの場合の干渉の低さについて説明する。

[0046] 図8は、実施の形態のアンテナ装置100における隣り合うアンテナの平面視での位置関係を示す図である。

[0047] 図8には、OAMを有するRF信号の到来方向（伝搬方向）から見た、受信アンテナR×1、R×2の中心点O1、O2及び輪郭C1、C2を示す。受信アンテナR×1、R×2は、図7に示すように、互いに隣接して配置されており、2チャンネルでのシングルモード又はマルチモードでの通信を行うこととする。

[0048] 受信アンテナR×1、R×2の輪郭C1、C2は、それぞれ、中心点O1、O2を有する半径Rの円であるとする。中心点O1とO2との間の距離はdである。受信アンテナR×1、R×2は、互いに離間して配設されているため、 $2R < d$ である。

[0049] なお、受信アンテナR×1、R×2の光軸は、それぞれ、中心点O1、O2において、輪郭C1、C2で表される円を垂直に貫く方向に伸延している。

[0050] ここで、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ に対応する送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ は、図 7 に示すように、それぞれ、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ に対向して配置されており、それぞれ、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ と同一の構成を有するものとする。送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ の光軸は、それぞれ、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ の光軸と一致している。

[0051] すなわち、送信アンテナ $T \times 1$ と受信アンテナ $R \times 1$ は、同一の構成を有し、同一の構成の一对のアンテナが、光軸を一致させた状態で、互いに対向するように配置されている。同様に、送信アンテナ $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 2$ は、同一の構成を有し、同一の構成の一对のアンテナが、光軸を一致させた状態で、互いに対向するように配置されている。

[0052] このため、送信アンテナ $T \times 1$ の中心点と送信アンテナ $T \times 2$ の中心点との間の距離も d である。

[0053] また、送信アンテナ $T \times 1$ と受信アンテナ $R \times 1$ は、モード m の OAM を有する RF 信号を用いて通信し、送信アンテナ $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 2$ とは、モード n の OAM を有する RF 信号を用いて通信することとする。 m 、 n は、上述したモード l のうちの任意の値であり、同一の値であってもよいし、互いに異なる値であってもよい。

[0054] ここで、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ の干渉の低さを説明するために、受信アンテナ $R \times 2$ の表面の点 P における、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ から送信された OAM を有する RF 信号の受信状況について検討する。

[0055] また、点 P は、受信アンテナ $R \times 2$ の中心点 O_2 から距離 r ($r < R$) で、線分 $O_1 O_2$ と線分 $O_2 P$ が角度 θ をなす点であることとする。また、線分 $O_1 P$ は線分 $O_1 O_2$ と角度 α をなすこととする。

[0056] 図 8 に示す受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ は、2 チャンネルでの通信を行うものであり、それぞれの光軸が異なるため、点 P における電界 E は、次式 (2) で表すことができる。

[0057]

[数2]

$$E = E_0 e^{jma} \quad (2)$$

ここで、 E_0 は、電界 E の振幅である。

[0058] また、受信アンテナ $R \times 2$ が送信アンテナ $T \times 1$ から受信するOAMを有するRF信号の電力 $P_{m,n}$ は次式(3)で表すことができる。式(3)で求まる電力 $P_{m,n}$ は、受信アンテナ $R \times 2$ が送信アンテナ $T \times 1$ から受ける干渉（あるいは混信（interference））による電力を表す。

[0059] [数3]

$$P_{m,n}^i \propto \frac{1}{Z} \left\| \int_0^R \int_{-\pi}^{\pi} E_0 e^{jma} e^{-jn\theta} d\theta r dr \right\|^2 \quad (3)$$

ここで、 Z は、自由空間においてOAMを有するRF信号が有するインピーダンスである。

[0060] また、線分 O_1P が線分 O_1O_2 となす角度 α は、次式(4)で表すことができる。

[0061] [数4]

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{r \sin \theta}{d + r \cos \theta} \right) \quad (4)$$

また、(3) 式と同様に、受信アンテナ $R \times 2$ が送信アンテナ $T \times 2$ から受信する OAM を有する RF 信号の電力 $P_{s,n}$ は次式 (5) で表すことができる。

[0062] [数5]

$$P_n^s \propto \frac{1}{Z} \left\| \int_0^R \int_{-\pi}^{\pi} E_0 e^{jm\theta} e^{-jn\theta} d\theta r dr \right\|^2 = \frac{E_0^2}{Z} \pi^2 R^4 \quad (5)$$

従って、式 (3) と式 (5) に基づいて、電力 $P_{i,m,n}$ と電力 $P_{s,n}$ の比を求めれば、次式 (6) が与えられる。

[0063] [数6]

$$P_{m,n}^i / P_n^s = \frac{1}{\pi^2 R^4} \left\| \int_0^R \int_{-\pi}^{\pi} e^{jm\alpha} e^{-jn\theta} d\theta r dr \right\|^2 \quad (6)$$

式 (6) に含まれる積分成分 $I|_r$ は、次式 (7) の通りである。

[0064] [数7]

$$I|_r = \int_{-\pi}^{\pi} e^{jm\alpha} e^{-jn\theta} d\theta \quad (7)$$

式 (7) は、 m 、 n が次式 (8) を満たせば零になる。

$$\begin{aligned} m > 0 \quad n > 0 \text{ で } m \text{ が偶数の場合は } n > m/2 + 1, \quad m < 0 \quad n < 0 \text{ で } m \text{ が偶数の場合は } -n > -m/2 + 1 \\ \dots \quad (8) \end{aligned}$$

従って、(6)式の計算結果は零になる。このため、電力 P_{im} 、 n と電力 P_{sn} の比は零になり、送信アンテナ $T \times 1$ 及び受信アンテナ $R \times 1$ から、送信アンテナ $T \times 2$ 及び受信アンテナ $R \times 2$ への干渉は抑制される。また、送信アンテナ $T \times 2$ 及び受信アンテナ $R \times 2$ から、送信アンテナ $T \times 1$ 及び受信アンテナ $R \times 1$ への干渉は抑制される。このとき、 m 、 n は、次式(9)の条件を満たす必要がある。

$m > 0$ $n > 0$ であり、 n が偶数であれば $m > n/2 + 1$ 、 $m < 0$ $n < 0$ であり $-n$ が偶数であれば $-m > -n/2 + 1$. . . (9)

ここで、 m と n が(8)式と(9)式を満たせば、2つのチャンネルは直交している。

[0065] OAMモードは、1周期で1サイクル分回転する螺旋状の波面を示す。ここで1は整数である。(8)式と(9)式がともに成立するとき、2つ送信アンテナの螺旋状の波面は同一方向に回転する。そして、2つの送信アンテナの各々の螺旋状の波面は、1周期で1サイクル回転する。ここで、1は偶数である。

[0066] 実際、図4及び5において、Nチャンネルシステムでは、任意の2つのチャンネルが直交することが最善の条件である。これは、すべての送信アンテナのすべての螺旋状の波面が同一方向に回転し、各送信アンテナの各螺旋状の波面が他のアンテナの2倍未満の速さで回転し、かつ、各送信アンテナの螺旋状の波面が1周期で1サイクル回転する(1は整数)ことを意味する。

[0067] OAMモード(m 、 N)が $\{2\}$ 、 $\{-2\}$ 、 $\{4, 6\}$ 、 $\{-4, -6\}$ は、直交するチャンネルのグループの例である。

[0068] $\{2\}$ については、2は最初の偶数であり、2は明らかに2の2倍の値未満である。 $\{2\}$ は、OAMモード2がNチャンネルのすべてについて適用されることを意味する。

[0069] $\{4, 6\}$ において、4と6はともに偶数であり、6は4の2倍の値未満である。 $\{4, 6\}$ は、OAMモード4がNチャンネルのすべてに適用されること、あるいは、OAMモード6がNチャンネルのすべてに適用されること、

又は、OAMモード4がNチャネルのうちの幾つかに適用されるとともにOAMモード6が残りのチャネルに適用されることを意味する。

[0070] $\{-2\}$ と $\{-4, -6\}$ についての設定は、 $\{2\}$, $\{4, 6\}$ と同様であり、唯一の相違点は、回転方向である。

[0071] これらの直交チャネル以外であっても、干渉が低いチャネルを実現することができる。2つのチャネル（モードm, モードn）について、干渉が低いチャネルは式で与えられる。

[0072] $m > 0, n > 0$ であれば、 $m > n/2$ かつ $n > m/2$
 $m < 0, n < 0$ であれば、 $-m > -n/2$ かつ $-n > m/2$. . .

これは、2つの送信アンテナの螺旋状の波面が同一方向に回転し、各送信アンテナの螺旋状の波面が他のアンテナの螺旋状の波面の2倍未満の速さで回転することを意味する。直交チャネルがこの条件を満足することは明らかである。

従って、図4及び5において、Nチャネルのシステムでは、任意の2つのチャネルは干渉が低いことが期待される。これは、すべての送信アンテナのすべての螺旋状の波面が同一方向に回転し、かつ、各送信アンテナの螺旋状の波面が他のアンテナの螺旋状の波面の2倍未満の速さで回転することを意味する。 $\{1, 2\}$, $\{-1, -2\}$, $\{2, 3, 4\}$, $\{-2, -3, -4\}$ は、上述のように干渉が低いチャネルのグループの例である。

[0073] $\{1, 2\}$ については、2は明らかに1の2倍の値未満である。 $\{1, 2\}$ は、OAMモード1がNチャネルのすべてについて適用されること、OAMモード2がNチャネルのすべてについて適用されること、又は、OAMモード1がNチャネルのうちの幾つかに適用されるとともにOAMモード2が残りのチャネルに適用されることを意味する。

[0074] $\{2, 3, 4\}$ については、4は明らかに2の2倍の値未満である。 $\{2, 3, 4\}$ は、OAMモード2がNチャネルのすべてについて適用されること、OAMモード3がNチャネルのすべてについて適用されること、OAMモード4がNチャネルのすべてについて適用されること、OAMモー

ド2がNチャネルのうちの幾つかに適用されるとともにOAMモード3が残りのチャネルに適用されること、OAMモード2がNチャネルのうちの幾つかに適用されるとともにOAMモード4が残りのチャネルに適用されること、OAMモード3がNチャネルのうちの幾つかに適用されるとともにOAMモード4が残りのチャネルに適用されること、又は、OAMモード2がNチャネルのうちの幾つかに適用され、OAMモード3がNチャネルのうちの他の幾つかに適用されるとともにOAMモード4が残りのチャネルに適用されることを意味する。

[0075] $\{-1, -2\}$ と $\{-2, -3, -4\}$ についての設定は、 $\{2\}$, $\{4, 6\}$ と同様であり、唯一の相違点は、回転方向である。

[0076] 式(6)に関して、 $m>0$ で $n<0$ ある場合、又は、 $m<0$ で $n>0$ ある場合は、干渉は比較的大きくなる。従って、図4及び5に示すように、Nチャネルのシステムでは、少なくとも、すべての送信アンテナのすべての螺旋状の波面は、同一方向に回転するべきである。

[0077] 次に、図9を用いて、実施の形態のアンテナ装置100におけるチャネル容量の高さについて説明する。

[0078] 図9は、実施の形態のアンテナ装置100におけるチャネル容量の高さを説明するためのシミュレーション結果を示す図である。

[0079] 図9には、実施の形態のアンテナ装置100の送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ のチャネル容量(2×2 OAM)に加えて、比較用に、SISO (Single Input Single Output) による送信アンテナと受信アンテナを用いた場合のチャネル容量 (SISO) を示す。さらに、比較用に、LoS MIMOによる送信アンテナと受信アンテナを2チャネル (2組) 並べて、送信アンテナと受信アンテナとの中心間距離 d を変えた場合の3種類のチャネル容量 (2×2 LoS MIMO ($d = (\lambda L / 2)^{1/2}$), 2×2 LoS MIMO ($d = (1/2 * \lambda L / 2)^{1/2}$), 2×2 LoS MIMO ($d = (1/4 * \lambda L / 2)^{1/2}$) を示す。

[0080] 3種類の2チャネルのLoS MIMOのチャネル容量 (2×2 LoS MIMO ($d = (\lambda L / 2)^{1/2}$), 2×2 LoS MIMO ($d = (1/2 * \lambda L / 2)^{1/2}$), 2×2 LoS MIMO ($d = (1/4 * \lambda L / 2)^{1/2}$)

$1/2)$ は、それぞれ、送信アンテナと受信アンテナの間の距離 d (図 8 参照) が、 $\lambda L / 2)^{1/2}$ 、 $1/2 * \lambda L / 2)^{1/2}$ 、 $1/4 * \lambda L / 2)^{1/2}$ である場合の $L o s M I M O$ によるチャンネル容量を示す。

[0081] ここで、 L は、送信アンテナ $T \times 1$ と受信アンテナ $R \times 1$ との間の長さであり、これは、送信アンテナ $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 2$ との間の長さと同じである。

[0082] なお、図 9 において、横軸はシグナルノイズ比 ($S N R$ (Signal to Noise Ratio)) を示し、縦軸はチャンネル容量 (bps/Hz) を示す。

[0083] 図 9 に示すように、 $2 * 2 L o s M I M O (d = (\lambda L / 2)^{1/2})$ は、実施の形態のアンテナ装置 100 の送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ のチャンネル容量 ($2 * 20 A M$) よりも僅かに高く、最も高い値を示した。

[0084] しかしながら、これは、3 つの $L o s M I M O$ のチャンネル容量のうち、距離 d が最も長い場合に得られる値である。

[0085] また、3 つの $L o s M I M O$ のチャンネル容量を比べると分かるように、 $L o s M I M O$ のチャンネル容量は、距離 d が短縮されて分離性が低下すると、急激に低下することが分かる。

[0086] このように $L o s M I M O$ のチャンネル容量が距離 d の短縮に伴って大幅に低下することに比べると、実施の形態によるチャンネル容量 ($2 * 20 A M$) は、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ との中心間距離 d が小さくても、非常に高いチャンネル容量が得られることが分かる。アンテナ装置 100 における距離 d は、 $(1/4 * \lambda L / 2)^{1/2}$ よりも非常に短く、 $2 R$ (図 8 参照) に近い長さである。

[0087] なお、 $S I S O$ は、チャンネル容量が最も低い。 $S I S O$ の場合は、シグナルノイズ比 ($S N R$) が高くなれば、チャンネル容量は上昇するが、実施の形態のアンテナ装置 100 の送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ のチャンネル容量 ($2 * 20 A M$) と $L o s M I M O$ よりも低い値になる。

[0088] 次に、図 10 を用いて、シグナルノイズ比 ($S N R$) を $20 d B$ に固定し

、 $d = \beta (\lambda L / 2)^{1/2}$ を満たす値 β と、チャンネル容量との関係について説明する。

[0089] 図10は、シグナルノイズ比(SNR)を20dBに固定し、 $d = \beta (\lambda L / 2)^{1/2}$ を満たす値 β と、チャンネル容量との関係を示す図である。

[0090] 図10には、実施の形態のアンテナ装置100の送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ のチャンネル容量($2 \times 20AM$)と、比較用にLosMIMOによる送信アンテナと受信アンテナを2チャンネル(2組)並べた場合のチャンネル容量($2 \times 2LosMIMO$)とを示す。

[0091] 図10の横軸は、 $d = \beta (\lambda L / 2)^{1/2}$ を満たす値 β を表すため、図10において、横軸が左側に行くほど、中心間距離 d が長いことになる。すなわち、横軸が左側に行くほど、2つのチャンネルのアンテナ同士が遠いことになる。

[0092] また、横軸が右側に行くほど、中心間距離 d が短いことになる。すなわち、横軸が右側に行くほど、2つのチャンネルのアンテナ同士が近くなることになる。

[0093] 図10に示すように、実施の形態のアンテナ装置100の送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ のチャンネル容量($2 \times 20AM$)は、横軸の値によらず一定値を示した。これは、中心間距離 d によらずに、高いチャンネル容量が得られていることから導き出された結果であると考えることができる。

[0094] また、比較用にLosMIMOによる送信アンテナと受信アンテナを2チャンネル(2組)並べた場合のチャンネル容量($2 \times 2LosMIMO$)は、横軸において右側に行くほど低い値を示した。

[0095] これは、中心間距離 d が短くなるほど、チャンネル容量が急激に低下することを示している。

[0096] 以上より、実施の形態によるチャンネル容量($2 \times 20AM$)は、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ との中心間距離 d によらずに、非常に高いチャンネル容量が得られることが分かる。

[0097] また、中心間距離 d が短くなるほど、比較用の $LosMIMO$ による 2 チャンネルのチャンネル容量 ($2 \times 2LosMIMO$) に比べて、実施の形態のアンテナ装置 100 による 2 チャンネルのチャンネル容量 ($2 \times 2OAM$) の優位性が際立つことが分かる。

[0098] このため、実施の形態のアンテナ装置 100 は、隣接するアンテナ同士の分離性が低い場合ほど有利であり、小型化に適していることが分かる。

[0099] 次に、図 11 乃至図 14 を用いて、実施の形態のアンテナ装置 100 の送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ と受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ の構成について説明する。

[0100] また、以下では、送信アンテナ $T \times 1$ 、 $T \times 2$ を特に区別しない場合には、送信アンテナ $T \times$ と称す。また、受信アンテナ $R \times 1$ 、 $R \times 2$ を特に区別しない場合には、受信アンテナ $R \times$ と称す。

[0101] また、送信アンテナ $T \times$ と受信アンテナ $R \times$ は、同一の構成を有するため、送信アンテナ $T \times$ を受信アンテナ $R \times$ として用いることができ、受信アンテナ $R \times$ を送信アンテナ $T \times$ として用いることができる。

[0102] このため、送信アンテナ $T \times$ と受信アンテナ $R \times$ を区別しない場合には、アンテナ 10 又はアンテナ 20 と称す。

[0103] 図 11 は、実施の形態のアンテナ装置 100 のアンテナを示す図である。図 11 の (A1)、(A2) には、モード 1 の OAM を有する RF 信号を送受信するアンテナ 10 を示し、図 11 の (B1)、(B2) には、モード 2 の OAM を有する RF 信号を送受信するアンテナ 20 を示す。

[0104] なお、図 11 の (A1)、(A2)、(B1)、(B2) では図示するように、直交座標系である XYZ 座標系を定義する。なお、Z 軸は、アンテナ 10、20 の光軸と平行な軸である。

[0105] 図 11 の (A1)、(A2) に示すように、モード 1 用のアンテナ 10 は、輻射器 11 (A2 参照) と、反射器 12 とを含む。アンテナ 10 は、パラボラアンテナを変形したアンテナである。なお、図 11 の (A1) では輻射器 11 を省略する。

- [0106] 輻射器 11 は、RF 信号の送受信を行う部分である。輻射器 11 は、図示しないステー等により、反射器 12 に対して固定されている。輻射器 11 は、RF 信号を送信する際は、反射器 12 に向けて、Z 軸負方向に RF 信号を放射する。輻射器 11 は、RF 信号を受信する際は、反射器 12 で反射されて Z 軸正方向に伝搬する RF 信号を受信する。
- [0107] 反射器 12 は、Z 軸を含む平面で切った断面が放物線を描く凹状で、平面視で円形（A1 参照）の形状を有する。反射器 12 の光軸は、中心 O を通り、Z 軸に平行な軸である。
- [0108] 反射器 12 は、切り欠き部 12A を有する。切り欠き部 12A は、中心 O から X 軸正方向側において反射器 12 が切り欠かれた部分である。切り欠き部 12A を挟んだ一方側 12B と他方側 12C との間は、Z 軸方向において、アンテナ装置 100 の通信周波数における $1/2$ 波長 ($\lambda/2$) のギャップが中心 O に形成されている。このギャップは、Z 軸方向に形成される。ギャップは 1 波長分の経路長の差を生み出すために用いられる。
- [0109] このような反射器 12 において、一方側 12B と他方側 12C との間の $1/2$ 波長 ($\lambda/2$) のギャップによる Z 軸方向の変位は、一方側 12B から他方側 12C にかけて、Z 軸正方向から見て中心 O の周りの反時計方向の 360 度にわたって均等かつ線形的に配分されている。これは、一方側 12B から他方側 12C にかけて、中心 O の周りの反時計方向の 360 度にわたって、Z 軸正方向から見て中心 O の周りの反時計方向に連続的に反射器 12 の反射面の位相が $\lambda/2$ (π) 進むように設定されていることを表す。
- [0110] このため、輻射器 11 から反射器 12 に OAM を有しない RF 信号を（Z 軸負方向に）放射すると、輻射器 11 から放射された RF 信号（電磁波）は、反射器 12 でモード 1 の OAM を有する RF 信号にモード変換され、Z 軸正方向に向かって螺旋状に伝搬する。
- [0111] 反射器 12 で反射されるとともにモード変換されたモード 1 の OAM を有する RF 信号は、Z 軸に平行で中心 O を通る光軸を中心軸として螺旋状に伝搬する。反射器 12 でモード変換された RF 信号は、アンテナ 10 と同一の

モード１のＯＡＭを有する。

[0112] また、アンテナ１０と同一のモード１のＯＡＭを有するＲＦ信号が、Ｚ軸に平行で中心Ｏを通る光軸を中心軸として反射器１２に向かって螺旋状に伝搬すると、モード１のＯＡＭを有するＲＦ信号は、反射器１２で逆変換されて平面波になり、Ｚ軸正方向に反射されて輻射器１１で受信される。

[0113] このように、アンテナ１０は、モード１のＯＡＭを有するＲＦ信号の螺旋の１周期に対応する螺旋形状に形成される反射面を有するパラボラアンテナである。

[0114] また、図１１の（Ｂ１）、（Ｂ２）に示すモード２用のアンテナ２０は、輻射器２１（Ｂ２参照）と、パラボラアンテナを変形した反射器２２とを含む。なお、図１１の（Ｂ１）では輻射器２１を省略する。

[0115] 輻射器２１は、ＲＦ信号の送受信を行う部分である。輻射器２１は、図示しないステー等により、反射器２２に対して固定されている。輻射器２１は、ＲＦ信号を送信する際は、反射器２２に向けて、Ｚ軸負方向にＲＦ信号を放射する。輻射器２１は、ＲＦ信号を受信する際は、反射器２２で反射されてＺ軸正方向に伝搬するＲＦ信号を受信する。輻射器２１は、輻射器１１と同様である。

[0116] 反射器２２は、Ｚ軸を含む平面に沿って得られる断面が放物線を描く凹状で、平面視で円形（Ｂ１参照）の形状を有する。反射器２２の光軸は、中心Ｏを通り、Ｚ軸に平行な軸である。

[0117] 反射器２２は、境界部２２Ａを有する。境界部２２Ａは、中心Ｏを通るＸＺ平面で反射器２２をＹ軸正方向側の反射部２２１と、Ｙ軸負方向側の反射部２２２とに分離する境界である。反射器２２は、境界部２２Ａによって２つの反射部２２１、２２２に分離されている。

[0118] 反射部２２１、２２２は、１つのパラボラアンテナを中心点を通る線に沿って二等分することによって得られる部分である。

[0119] 反射部２２１、２２２は、中心Ｏに対して、それぞれ、原点を通るＹ軸に平行な軸に沿って、互いに逆方向に回転移動させた位置関係にある。

- [0120] 境界部 22A を挟んだ一方側 22B1 と他方側 22C1 との間は、Z 軸方向において、アンテナ装置 100 の通信周波数における $1/2$ 波長 ($\lambda/2$) のギャップが中心 O に形成されている。このギャップは、Z 軸方向に形成される。ギャップは 1 波長分の経路長の差を生み出すために用いられる。
- [0121] 同様に、境界部 22A を挟んだ一方側 22B2 と他方側 22C2 との間は、Z 軸方向において、アンテナ装置 100 の通信周波数における $1/2$ 波長 ($\lambda/2$) のギャップが中心 O に形成されている。このギャップは、Z 軸方向に形成される。ギャップは 1 波長分の経路長の差を生み出すために用いられる。
- [0122] このような反射器 22 において、一方側 22B1 と一方側 22B2 との間では、1 波長 (λ) のギャップによる Z 軸方向の変位が、一方側 22B1 から反対側の一方側 22B2 にかけて、中心 O の周りの反時計方向の 180 度にわたって均等に配分されている。これは、中心 O の周りの反時計方向の 180 度にわたって連続的に位相が λ (2π) 進むように設定されていることを表す。
- [0123] 同様に、他方側 22C1 と他方側 22C2 との間では、ギャップによる Z 軸方向の変位が、他方側 22C2 から反対側の他方側 22C1 にかけて、中心 O の周りの反時計方向の 180 度にわたって均等に配分されている。これは、中心 O の周りの反時計方向の 180 度にわたって連続的に位相が $\lambda/2$ (π) 進むように設定されていることを表す。
- [0124] このため、輻射器 21 から反射器 22 に OAM を有しない RF 信号（電磁波）を（Z 軸負方向に）放射すると、輻射器 21 から放射された OAM を有しない RF 信号（電磁波）は、反射器 22 でモード 2 の OAM を有する RF 信号にモード変換され、Z 軸正方向に向かって螺旋状に伝搬する。
- [0125] 反射器 22 で反射されるとともにモード変換されたモード 2 の OAM を有する RF 信号は、Z 軸に平行で中心 O を通る光軸を中心軸として螺旋状に伝搬する。
- [0126] また、アンテナ 20 と同一のモード 2 の OAM を有する RF 信号が、Z 軸

に平行で中心Oを通る光軸を中心軸として反射器22に向かって螺旋状に伝搬すると、モード2のOAMを有するRF信号は、反射器22で逆変換されて平面波になり、Z軸正方向に反射されて輻射器21で受信される。

[0127] このように、アンテナ20は、モード2のOAMを有するRF信号の螺旋の1周期に対応する螺旋形状に形成される表面を有するパラボラアンテナである。

[0128] 次に、図12を用いて、実施の形態のアンテナ装置100のアンテナの変形例について説明する。

[0129] 図12は、実施の形態のアンテナ装置100のアンテナの変形例を示す図である。

[0130] 図12の(A)には、変形例によるアンテナ30を示す。アンテナ30は、輻射器31と透過フィルタ32を含む。図12の(B)には、モード1用の透過フィルタ32を示し、図12の(C)には、モード2用の透過フィルタ32を示す。なお、図12では、図11と同様にXYZ座標系を定義する。

[0131] 輻射器31は、図11の(A2)、(B2)にそれぞれ示す輻射器11、21と同様である。

[0132] 透過フィルタ32は、RF信号が透過可能な誘電体製の円盤状の部材であり、輻射器31の輻射面の前に配設される。

[0133] 図12の(B)に示す透過フィルタ32は、中心O1から放射状に8つの透過部32A1～32A8に分けられている。透過部32A1～32A8は、Z軸正方向側から見ると、45度の中心角を有する扇形の部分である。透過部32A1～32A8は、Z軸正方向側から見ると、この順番に反時計回りに配列されており、透過部32A1の隣に透過部32A8が位置する。

[0134] 透過部32A1～32A8は、互いに厚さが異なり、透過部32A1の厚さが最も薄く、透過部32A8の厚さが最も厚い。このように透過部32A1～32A8の厚さが異なるのは、各透過部32A1～32A8をRF信号が透過する所要時間を設定するためである。

- [0135] 誘電体の内部では、大気中よりもRF信号の伝搬速度は低下するため、各透過部32A1～32A8の厚さを変えることにより、各透過部32A1～32A8においてRF信号に与える遅延時間（位相）を設定することができる。
- [0136] 透過部32A1～32A8がRF信号に与える遅延時間は、最も薄い透過部32A1が最も短く、最も厚い透過部32A8が最も長くなる。透過部32A1がRF信号に与える遅延時間と、透過部32A8がRF信号に与える遅延時間との差は、輻射器31から輻射されるRF信号の1周期分の時間に設定されている。
- [0137] 従って、透過部32A1～32A8の厚さの差を均等に設定することにより、輻射器31から透過フィルタ32に入射されるRF信号を、モード1のOAMを有するRF信号にモード変換することができる。
- [0138] また、透過フィルタ32によってモード変換されたモード1のOAMを有するRF信号を逆変換するには、透過フィルタ32とは逆位相の透過フィルタを用いればよい。
- [0139] すなわち、透過フィルタ32のように反時計回りに厚さが厚くなる透過部32A1～32A8によってモード変換されたOAMを有するRF信号を逆変換するには、透過部32A1～32A8と同様の8つの透過部を時計回りに配列した透過フィルタを用いればよい。
- [0140] すなわち、図12の（B）に示す透過フィルタ32含むアンテナ30を送信アンテナTxとして用いる場合は、対応する受信アンテナRxとしては、透過フィルタ32とは逆位相の透過フィルタを含むアンテナを用いればよい。
- [0141] 図12の（C）は、モード2用の透過フィルタ32を示す。モード2用の透過フィルタ32は、中心O2から放射状に8つの透過部32B1～32B8に分けられている。透過部32B1～32B8は、Z軸正方向側から見ると、45度の中心角を有する扇形の部分である。透過部32B1～32B8は、Z軸正方向側から見ると、この順番に反時計回りに配列されており、透

過部 3 2 B 1 の隣に透過部 3 2 B 8 が位置する。

- [0142] 透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 8 は、互いに厚さが異なり、透過部 3 2 B 1 と 3 2 B 5 の厚さが最も薄く、透過部 3 2 B 4 と 3 2 B 8 の厚さが最も厚い。このように透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 8 の厚さが異なるのは、各透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 4、3 2 B 5 ～ 3 2 B 8 を R F 信号が透過する所要時間を設定するためである。
- [0143] 誘電体の内部では、大気中よりも R F 信号の伝搬速度は低下するため、各透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 8 の厚さを変えることにより、各透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 8 において R F 信号に与える遅延時間（位相）を設定することができる。
- [0144] 透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 8 が R F 信号に与える遅延時間は、最も薄い透過部 3 2 B 1 と 3 2 B 5 が最も短く、最も厚い透過部 3 2 B 4 と 3 2 B 8 が最も長くなる。
- [0145] 透過部 3 2 B 1 と 3 2 B 5 が R F 信号に与える遅延時間と、透過部 3 2 B 4 と 3 2 B 8 が R F 信号に与える遅延時間との差は、それぞれ、輻射器 3 1 から輻射される R F 信号の 1 周期分の時間に設定されている。
- [0146] なお、透過部 3 2 B 1 と 3 2 B 5 の厚さは等しく、透過部 3 2 B 2 と 3 2 B 6 の厚さは等しく、透過部 3 2 B 3 と 3 2 B 7 の厚さは等しく、透過部 3 2 B 4 と 3 2 B 8 の厚さは等しい。
- [0147] 従って、透過部 3 2 B 1 ～ 3 2 B 4 と透過部 3 2 B 5 ～ 3 2 B 8 の厚さの差を均等に設定することにより、輻射器 3 1 から透過フィルタ 3 2 に入射される R F 信号を、モード 2 の O A M を有する R F 信号にモード変換することができる。
- [0148] また、透過フィルタ 3 2 によってモード変換されたモード 2 の O A M を有する R F 信号を逆変換するには、モード 2 の透過フィルタ 3 2 とは逆位相の透過フィルタを用いればよい。
- [0149] なお、図 1 2 では、8 つの透過部 3 2 A 1 ～ 3 2 A 8、3 2 B 1 ～ 3 2 B 8 に分割した透過フィルタについて説明したが、分割数は幾つであってもよ

い。分割数が多くなれば、透過フィルタ 3 2 の分解能が高くなるため、図 1 1 に示すアンテナ 1 0、2 0 により近い O A M を有する R F 信号を得ることができる。

[0150] 次に、図 1 3 及び図 1 4 を用いて、実施の形態の変形例のアンテナ装置 1 0 0 A、1 0 0 B について説明する。アンテナ装置 1 0 0 A、1 0 0 B は、図 1 1 に示すアンテナ 1 0、2 0 と、図 1 2 に示すアンテナ 3 0 とを組み合わせた構成を有する。

[0151] 図 1 3 は、実施の形態の変形例のアンテナ装置 1 0 0 A を示す図であり、図 1 4 は、実施の形態の他の変形例のアンテナ装置 1 0 0 B を示す図である。

[0152] 図 1 3 に示すアンテナ装置 1 0 0 A は、アンテナ 1 3 0 A、1 3 0 B、1 4 0 A、1 4 0 B、及び反射器 1 5 0 A、1 5 0 B を含む。

[0153] アンテナ 1 3 0 A、1 3 0 B、1 4 0 A、1 4 0 B は、図 1 2 に示すアンテナ 3 0 に対応するものである。アンテナ 1 3 0 A、1 3 0 B は、送信アンテナとして用いられ、アンテナ 1 4 0 A、1 4 0 B は、受信アンテナとして用いられる。

[0154] アンテナ 1 3 0 A、1 3 0 B は、それぞれ、輻射器 1 3 1 A 及び透過フィルタ 1 3 2 A、輻射器 1 3 1 B 及び透過フィルタ 1 3 2 B を含む。同様に、アンテナ 1 4 0 A、1 4 0 B は、それぞれ、輻射器 1 4 1 A 及び透過フィルタ 1 4 2 A、輻射器 1 4 1 B 及び透過フィルタ 1 4 2 B を含む。

[0155] また、反射器 1 5 0 A、1 5 0 B は、図 1 1 に示す反射器 1 2 と同様に、断面が放物線を描く凹状で、平面視で円形の形状を有する。反射器 1 5 0 A は実線で示す 2 つの光軸を有し、2 つの光軸は実線で示すように、透過フィルタ 1 3 2 A、1 4 2 A の光軸と一致している。同様に、反射器 1 5 0 B は実線で示す 2 つの光軸を有し、2 つの光軸は実線で示すように、透過フィルタ 1 3 2 B、1 4 2 B の光軸と一致している。

[0156] アンテナ 1 3 0 A は、反射器 1 5 0 A、1 5 0 B を介して、アンテナ 1 3 0 B と対をなしている。また、アンテナ 1 3 0 A と 1 3 0 B は、反射器 1 5

0 A、150 Bを介して、図13に実線で示す光軸が一致するように配置されている。

[0157] ここで、アンテナ130 Aの透過フィルタ132 AがRF信号に与える遅延時間（位相）と、反射器150 AがRF信号に与える位相との合計の位相は、アンテナ130 Aとアンテナ130 Bとの間の光軸上において、輻射器130 Aから輻射される平面波のRF信号を、モード1のOAMを有するRF信号にモード変換する値に設定されている。すなわち、この合計の位相は、 $\lambda (2\pi)$ に対応する。

[0158] 一方、アンテナ130 Bの透過フィルタ132 BがRF信号に与える遅延時間（位相）と、反射器150 BがRF信号に与える位相との合計の位相は、アンテナ130 Aとアンテナ130 Bとの間の光軸上において、モード1のOAMを有するRF信号を平面波のRF信号に変換して、輻射器131 Bに入射させる値に設定されている。この合計の位相は、 $\lambda (2\pi)$ に対応する。

[0159] 同様に、アンテナ140 Aは、反射器150 A、150 Bを介して、アンテナ140 Bと対をなしている。また、アンテナ140 Aと140 Bは、反射器150 A、150 Bを介して、光軸が一致するように配置されている。

[0160] ここで、アンテナ140 Aの透過フィルタ142 AがRF信号に与える遅延時間（位相）と、反射器150 AがRF信号に与える位相との合計の位相は、アンテナ140 Aとアンテナ140 Bとの間の光軸上において、輻射器140 Aから輻射される平面波のRF信号を、モード2のOAMを有するRF信号にモード変換する値に設定されている。

[0161] 一方、アンテナ140 Bの透過フィルタ142 BがRF信号に与える遅延時間（位相）と、反射器150 BがRF信号に与える位相との合計の位相は、アンテナ130 Aとアンテナ130 Bとの間の光軸上において、モード4のOAMを有するRF信号を平面波のRF信号に変換して、輻射器141 Bに入射させる値に設定されている。

[0162] このような構成のアンテナ装置100 Aでは、アンテナ130 Aと130

Bとの間で、モード1のOAMを有するRF信号を用いて通信を行うことができ、アンテナ140Aと140Bとの間で、モード2のOAMを有するRF信号を用いて通信を行うことができる。

[0163] 従って、2チャンネルの通信を行うことが可能なアンテナ装置100Aを提供することができる。なお、アンテナ装置100の2つのチャンネルのモード1は同一であっても良い。また、アンテナ装置100Aは、2つ以上のチャンネルを有する構成であってもよい。

[0164] また、反射器150A、150Bは、図14に示すアンテナ装置100Bのように、反射器151A、151Bと、反射器152A、152Bとにチャンネル毎に分けてもよい。この場合に、図13に示す透過フィルタ132A、132B、142A、142Bを含まない構成にしてもよい。

[0165] すなわち、反射器151Aと輻射器131Aとで図11に示すアンテナ10のようなモード1用のアンテナを構築し、同様に、反射器151Bと輻射器131Bとで図11に示すアンテナ10のようなモード1用のアンテナを構築すればよい。

[0166] また、反射器152Aと輻射器141Aとで図11に示すアンテナ20のようなモード2用のアンテナを構築し、同様に、反射器152Bと輻射器141Bとで図11に示すアンテナ20のようなモード2用のアンテナを構築すればよい。

[0167] この場合に、反射器151A、151B、152A、152Bにおける光軸は、パラボラアンテナの放物線状の断面形状の中心軸からオフセットしている。すなわち、反射器151A、151B、152A、152Bとしては、所謂オフセットパラボラ型の反射器を用いればよい。

[0168] 以上、実施の形態によれば、送信アンテナTx1、Tx2と受信アンテナRx1、Rx2との中心間距離dによらずに、非常に高いチャンネル容量を有するアンテナ装置100、100A、100Bを提供することができる。

[0169] このため、高周波(RF)信号の多重化を容易に行うことのできるアンテナ装置100、100A、100Bを提供することができる。

[0170] 以上、本発明の例示的な実施の形態のアンテナ装置、及び、信号伝送システムについて説明したが、本発明は、具体的に開示された実施の形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲から逸脱することなく、種々の変形や変更が可能である。

符号の説明

[0171] 100、100A、100B アンテナ装置
Tx1、Tx2、Tx3、TxN 送信アンテナ
Rx1、Rx2、Rx3、RxN 受信アンテナ
10 アンテナ
11 輻射器
12 反射器
20 アンテナ
21 輻射器
22 反射器
30 アンテナ
31 輻射器
32 透過フィルタ
130A、130B、140A、140B アンテナ
150A、150B、151A、151B、152A、152B 反射器

請求の範囲

- [請求項1] 所定モードの軌道角運動量を有する R F 信号を送信する N ($N \geq 2$) 個の送信アンテナと、
前記 N 個の送信アンテナとそれぞれ対をなす N 個の受信アンテナであって、対応する送信アンテナが送信する R F 信号と同一モードの軌道角運動量を有する R F 信号を受信する N 個の受信アンテナとを含む、アンテナ装置。
- [請求項2] 前記 N 個の対をなす前記 N 個の送信アンテナと前記 N 個の受信アンテナは、互いの間に干渉を有する 2 組の前記対を含む、請求項 1 記載のアンテナ装置。
- [請求項3] 前記 N 個の対をなす前記 N 個の送信アンテナと前記 N 個の受信アンテナは、一方の対は他方の対に対して干渉を有さず、前記他方の対は前記一方の対に対して干渉を有する 2 組の前記対を含む、請求項 1 記載のアンテナ装置。
- [請求項4] 前記 N 個の対をなす前記 N 個の送信アンテナと前記 N 個の受信アンテナは、互いに干渉を有しない 2 組の前記対を含む、請求項 1 記載のアンテナ装置。
- [請求項5] 前記 N 個の受信アンテナは、対応する送信アンテナの光軸と一致する光軸を有する、請求項 1 乃至 4 のいずれか一項記載のアンテナ装置。
- [請求項6] 前記送信アンテナ及び前記受信アンテナは、それぞれ、前記 R F 信号の螺旋の 1 周期に対応する螺旋形状に形成される表面を有する、パラボラアンテナである、請求項 1 乃至 5 のいずれか一項記載のアンテナ装置。
- [請求項7] 前記送信アンテナは、R F 信号を出力する出力部と、前記出力部から出力される R F 信号に遅延を与えることによって前記 R F 信号の螺旋の 1 周期に対応する螺旋形状を実現する第 1 透過フィルタとを有し、

前記受信アンテナは、前記 R F 信号の螺旋の 1 周期の位相を反転させた螺旋形状を実現する第 2 透過フィルタと、前記第 2 透過フィルタを透過した R F 信号を受信する受信部とを有する、請求項 1 乃至 6 のいずれか一項記載のアンテナ装置。

[請求項 8]

前記送信アンテナは、R F 信号を出力する出力部と、前記出力部から出力される R F 信号を透過する第 1 透過フィルタと、前記第 1 透過フィルタを透過した R F 信号を反射するパラボラ状の第 1 反射器とを有し、前記第 1 透過フィルタが前記 R F 信号に与える遅延と、前記第 1 反射器が前記 R F 信号に与える遅延との合計の遅延は、平面波を前記所定モードの軌道角運動量を有する R F 信号に変換するモード変換を実現する遅延であり、

前記受信アンテナは、前記送信アンテナから送信される前記所定モードの軌道角運動量を有する R F 信号を反射するパラボラ状の第 2 反射器と、前記第 2 反射器から出力される R F 信号に遅延を与える第 2 透過フィルタと、前記第 2 透過フィルタを透過した R F 信号を受信する受信部とを有し、前記第 2 反射器が前記 R F 信号に与える遅延と、前記第 2 透過フィルタが R F 信号に与える遅延との合計の遅延は、前記所定モードの軌道角運動量を有する R F 信号を平面波に逆変換する逆変換を実現する遅延である、請求項 1 乃至 7 のいずれか一項記載のアンテナ装置。

[請求項 9]

前記所定モードは、1 周期において生じる位相遅延を l 倍にするモードであり、 l は偶数である、請求項 1 乃至 8 のいずれか一項記載のアンテナ装置。

[請求項 10]

ある軸を軌道角運動量の軸として有し、その軸を 1 周する角度を比例係数で整数倍して得る位相遅延の分布をもつ軌道角運動量を持った信号を送信する送信アンテナと、

ある軸を軌道角運動量の軸として有し、前記信号を受信する受信アンテナと

を含む、信号伝送システムであって、

前記送信アンテナの軌道角運動量の軸と、前記受信アンテナの軌道角運動量の軸とがそれぞれ同一の直線上にあり、

前記送信アンテナと前記受信アンテナの組が複数あって、それぞれの軌道角運動量の軸を複数の異なる直線によって構成し、それぞれの軌道角運動量を持った信号が同じ周波数帯域・同じ時間帯に伝送する、信号伝送システム。

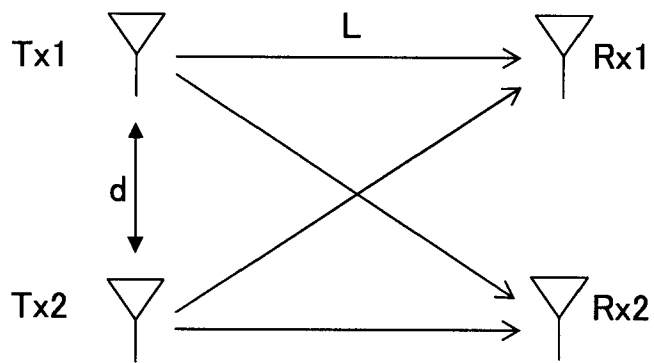
[請求項11] 前記複数組の前記送信アンテナ及び前記受信アンテナにおいて、それぞれの組の前記送信アンテナと前記受信アンテナとが同じ符号の組み合わせの比例係数を有することにより、前記複数の軌道角運動量の伝送システムが構成される、請求項10記載の信号伝送システム。

[請求項12] 前記複数組の前記送信アンテナ及び前記受信アンテナにおいて、ある組の前記比例係数の絶対値は、他の組の比例係数の絶対値の2倍以下である、請求項11記載の信号伝送システム。

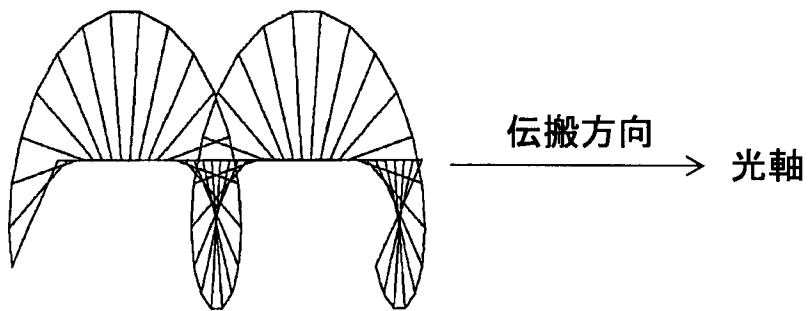
[請求項13] 前記比例係数は偶数の値を持つ、請求項12記載の信号伝送システム。

[請求項14] 前記組をなす前記送信アンテナと前記受信アンテナとは、それぞれ同じ軌道角運動量を持つ、請求項10記載の信号伝送システム。

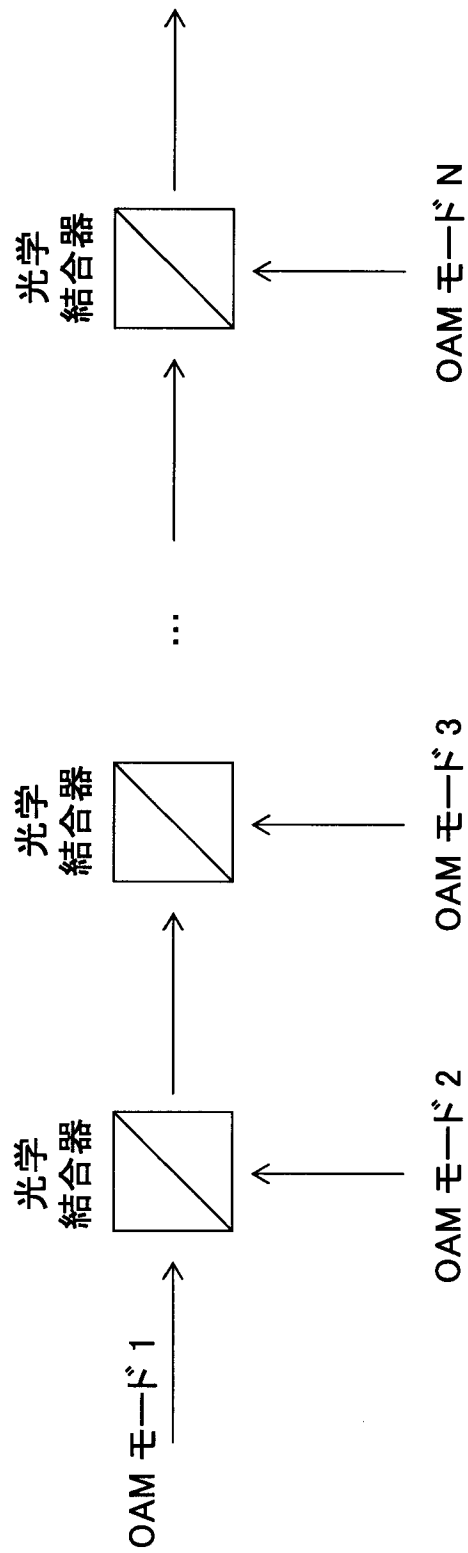
[図1]



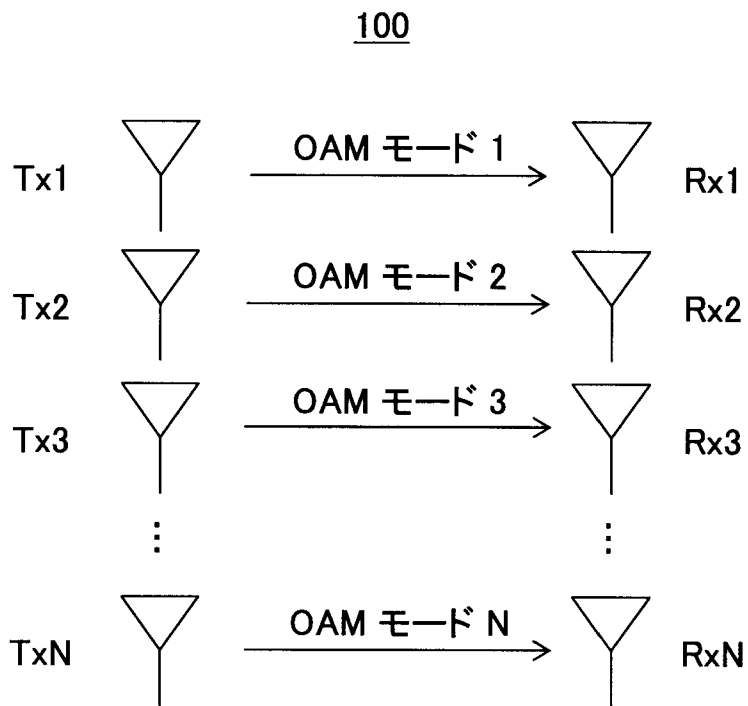
[図2]



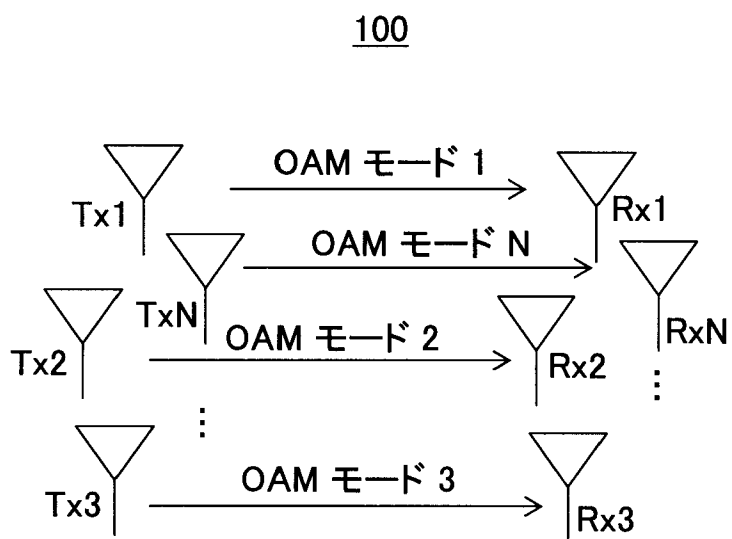
[図3]



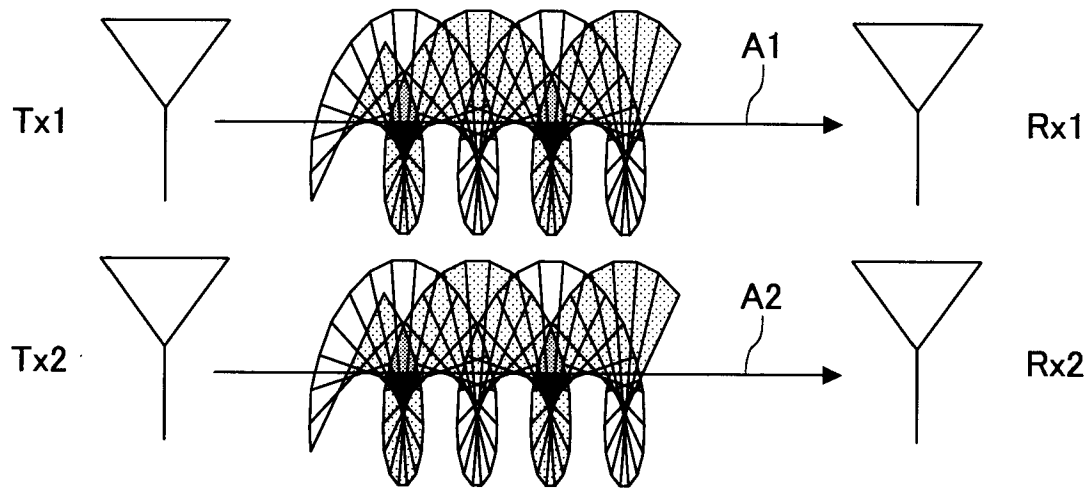
[図4]



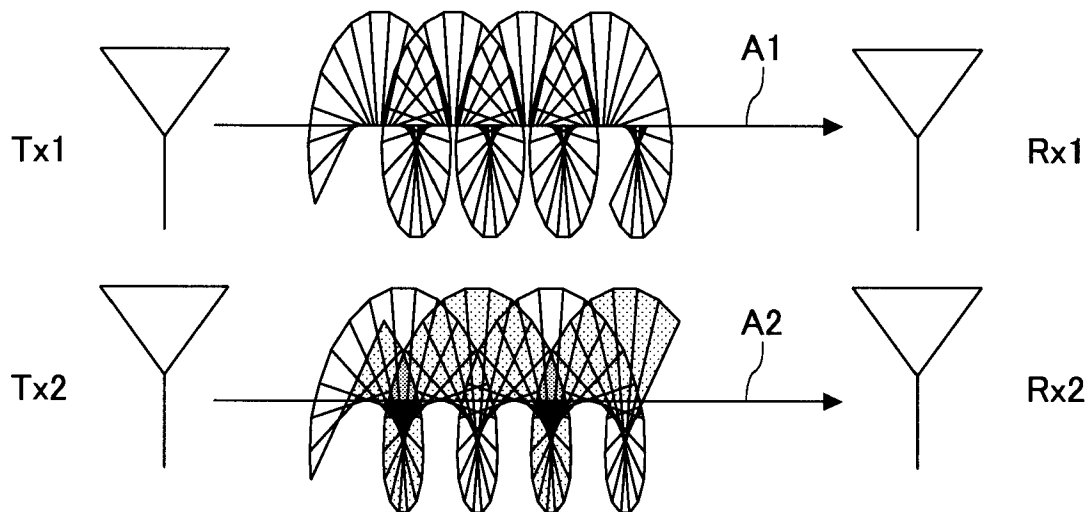
[図5]



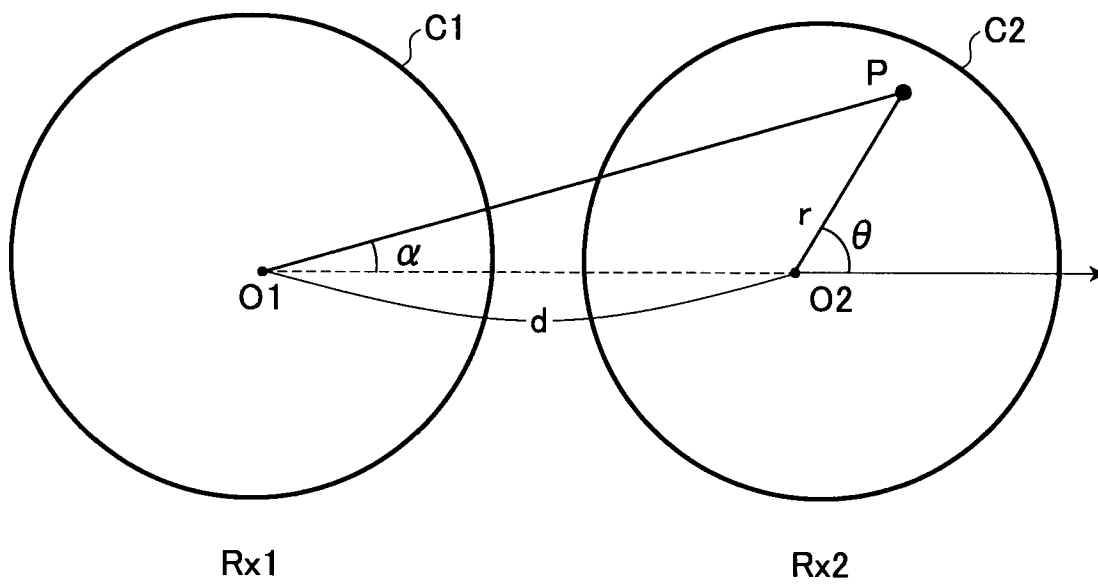
[図6]



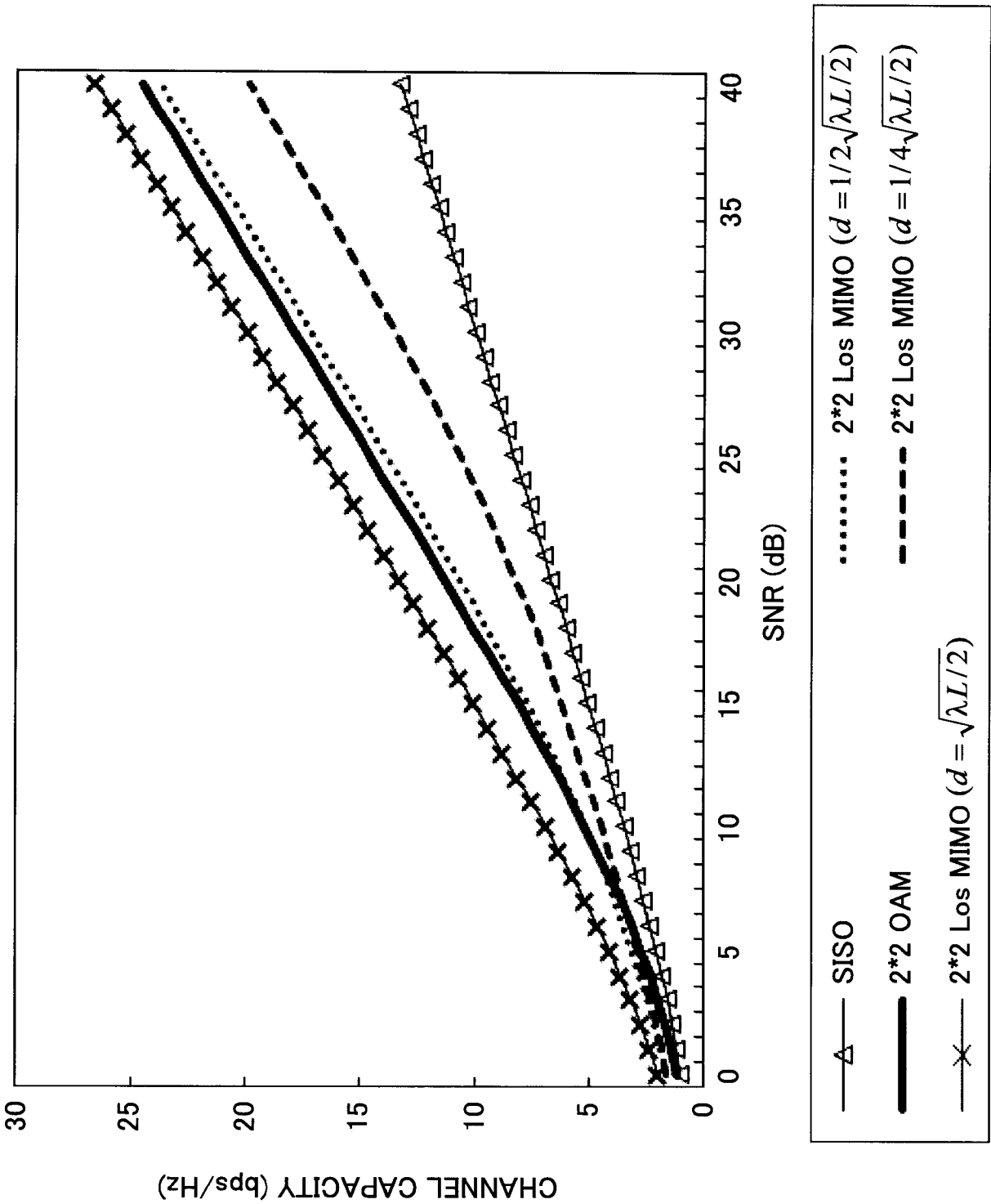
[図7]



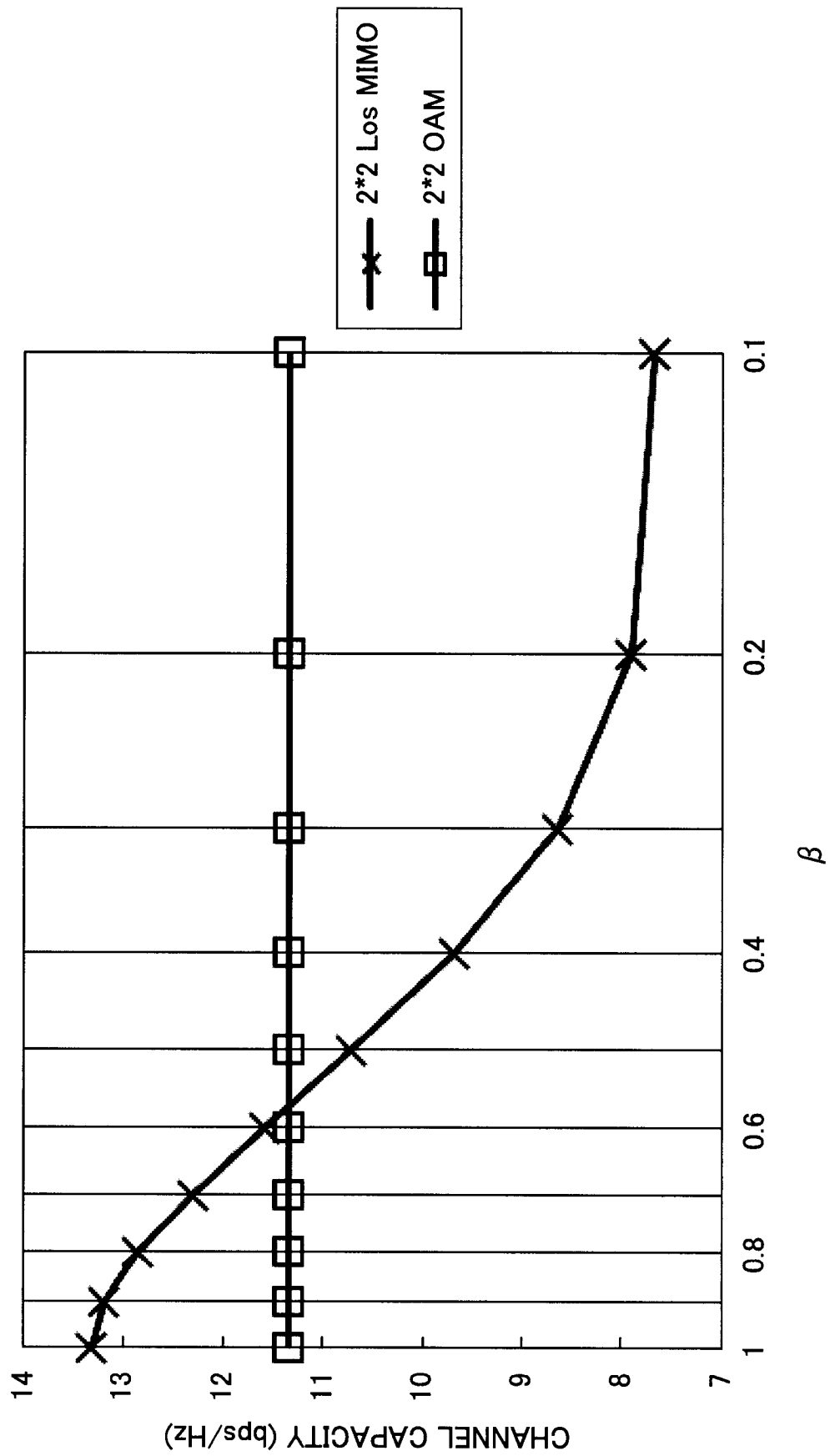
[図8]



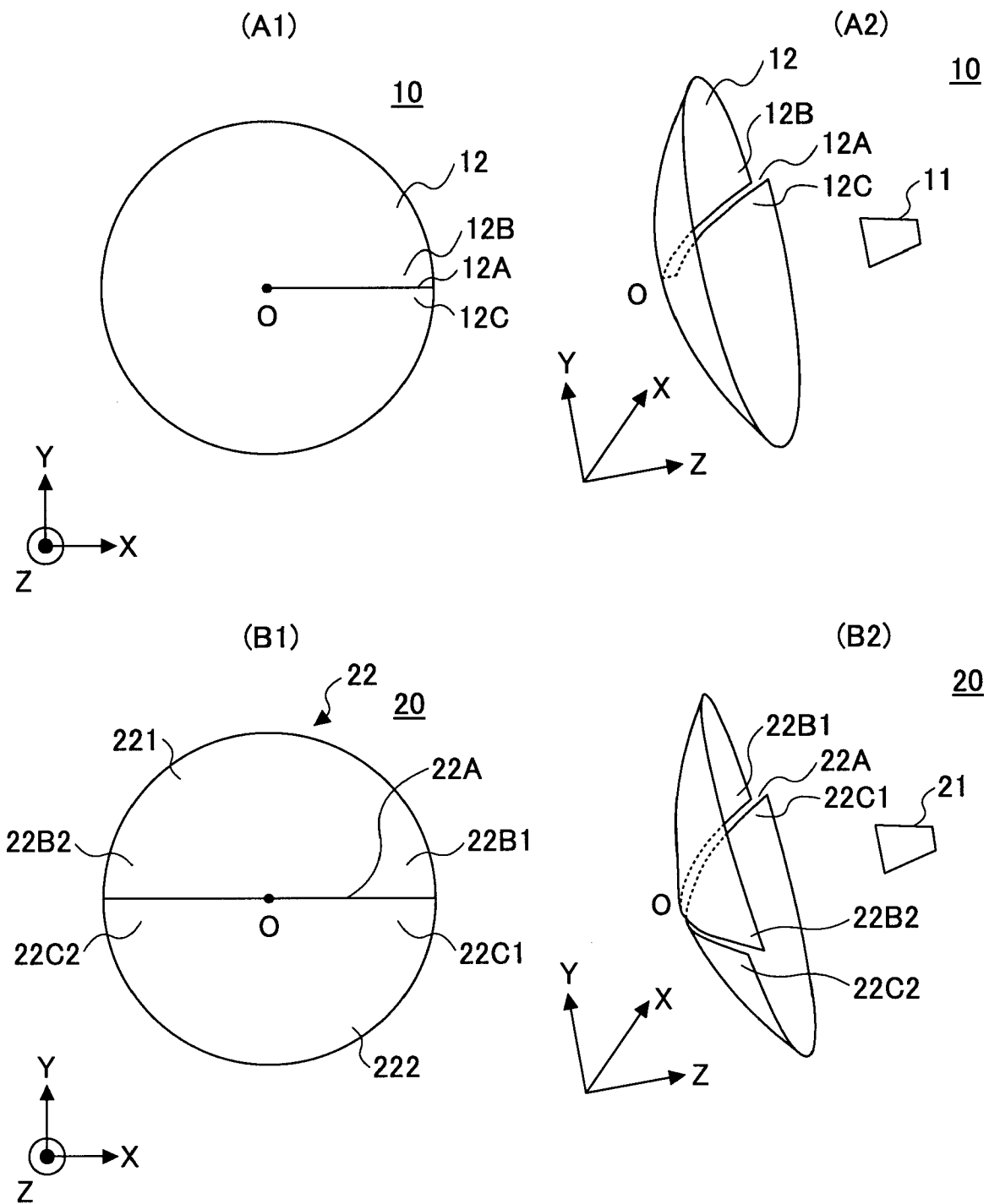
[図9]



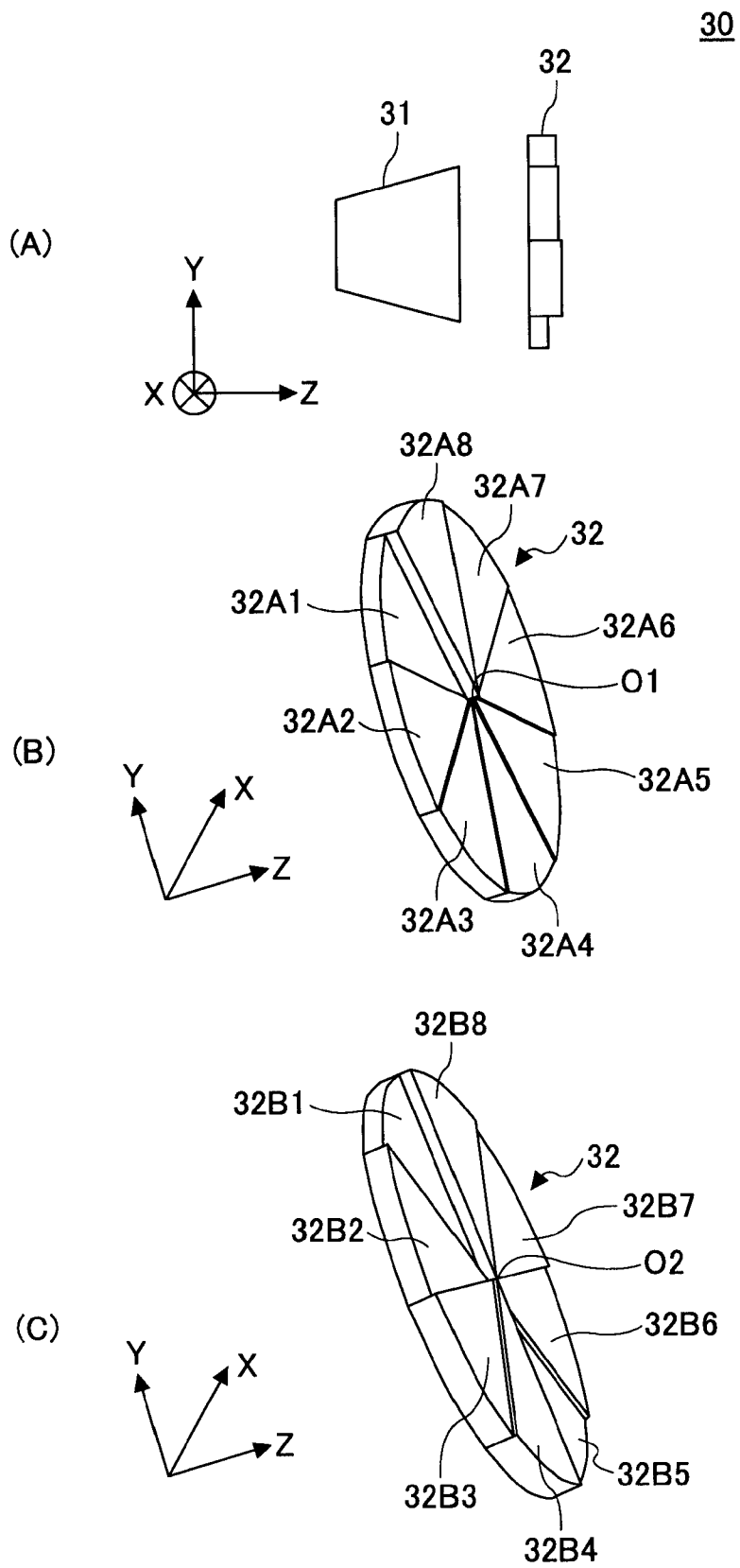
[図10]



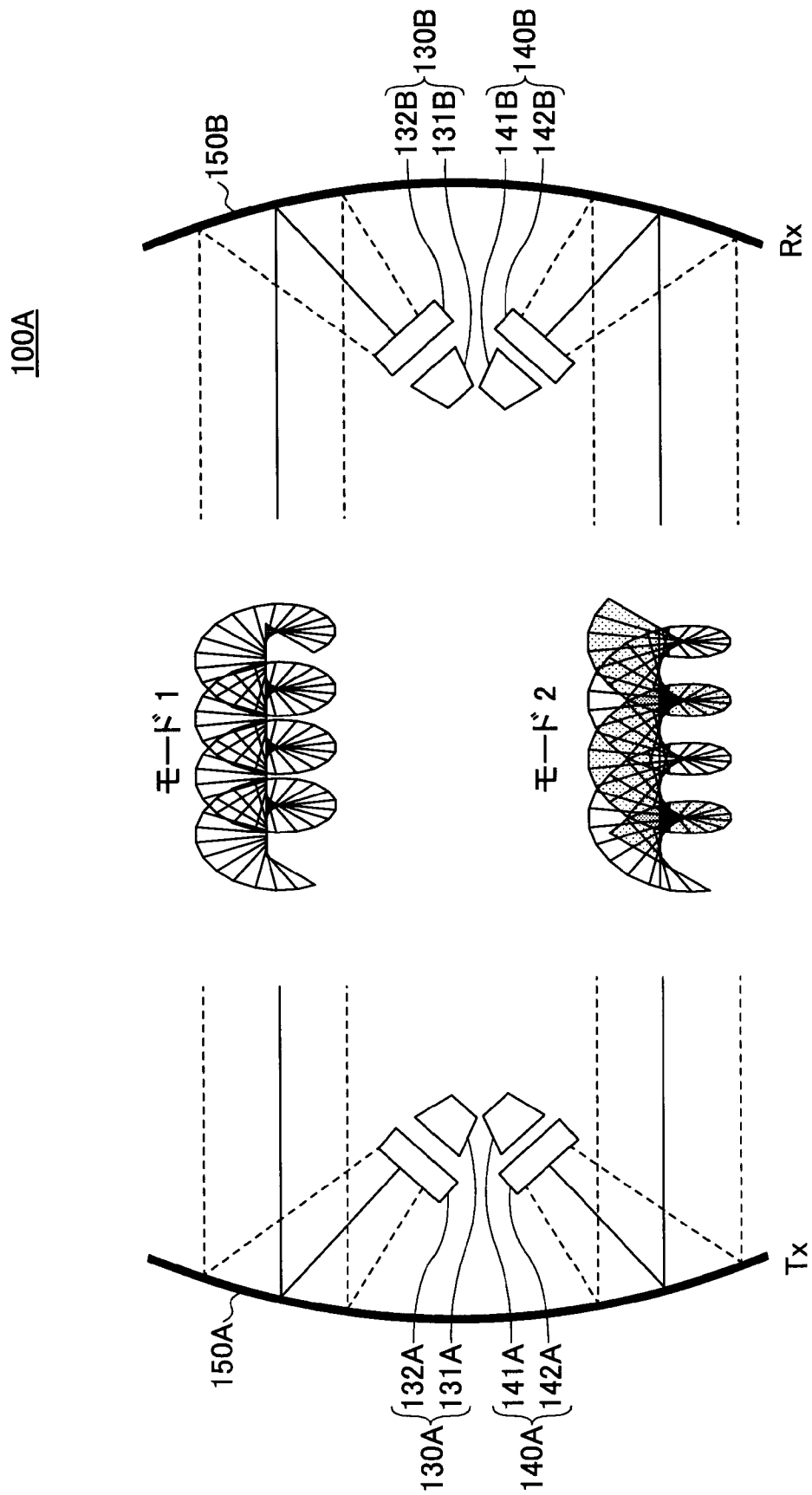
[図11]



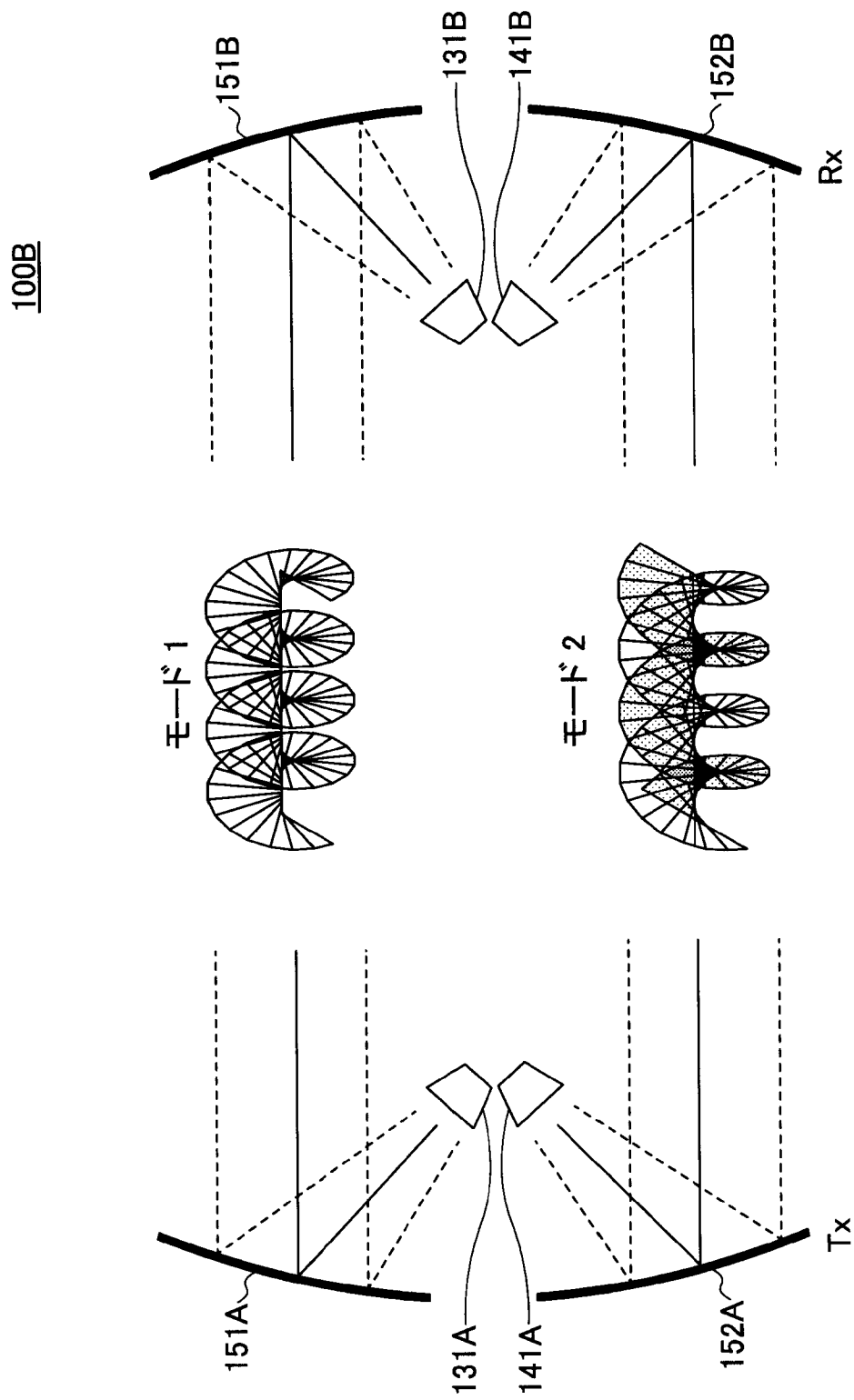
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/066115

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01Q21/00(2006.01) i, H01Q19/10(2006.01) i, H04J99/00(2009.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01Q21/00, H01Q19/10, H04J99/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	WO 2005/069443 A1 (ROKE MANOR RESEARCH LTD.), 28 July 2005 (28.07.2005), fig. 9 & GB 401084 D & GB 401084 D0	1, 2, 5, 6, 9 3, 4, 7, 8, 10-14
Y A	WO 2010/026233 A1 (ASTRIUM LTD.), 11 March 2010 (11.03.2010), fig. 3, 4 & JP 2012-502534 A & US 2010/0060546 A1 & US 2010/0295753 A1 & EP 2161784 A1 & EP 2321871 A & CA 2735798 A & CN 102144333 A	1, 2, 5, 6 3, 4, 7, 8-14

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
30 August, 2013 (30.08.13)

Date of mailing of the international search report
10 September, 2013 (10.09.13)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/066115

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	WO 2008/059985 A1 (NEC Corp.), 22 May 2008 (22.05.2008), fig. 1 & US 2009/0296846 A1 & EP 2091168 A1 & AU 2007320337 A & CN 101542936 A & RU 2009122993 A	1, 2, 5, 6, 9 3, 4, 7, 8, 10-14
Y A	WO 2009/017230 A1 (NEC Corp.), 05 February 2009 (05.02.2009), fig. 1 & US 2010/0135203 A1 & EP 2180623 A1 & CN 101772904 A	1, 2, 5, 6, 9 3, 4, 7, 8, 10-14
A	JP 2009-33747 A (Fujitsu Ltd.), 12 February 2009 (12.02.2009), entire text; all drawings & US 2009/0028332 A1 & GB 2451268 A & GB 714519 D0 & EP 2019497 A1 & DE 602008003069 D & CN 101355420 A	1-14

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01Q21/00(2006.01)i, H01Q19/10(2006.01)i, H04J99/00(2009.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01Q21/00, H01Q19/10, H04J99/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 3 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 3 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 3 年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	WO 2005/069443 A1 (ROKE MANOR RESEARCH LIMITED) 2005.07.28, FIG 9 & GB 401084 D & GB 401084 D0	1, 2, 5, 6, 9
A		3, 4, 7, 8, 10-14
Y	WO 2010/026233 A1 (ASTRIUM LIMITED) 2010.03.11, Fig.3、Fig.4 & JP 2012-502534 A & US 2010/0060546 A1 & US 2010/0295753 A1 & EP 2161784 A1 & EP 2321871 A & CA 2735798 A & CN 102144333 A	1, 2, 5, 6
A		3, 4, 7, 8-14

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

3 0 . 0 8 . 2 0 1 3

国際調査報告の発送日

1 0 . 0 9 . 2 0 1 3

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

高野 洋

5 K

9 6 4 7

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 5 5 6

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	WO 2008/059985 A1 (日本電気株式会社) 2008.05.22, 図1 & US 2009/0296846 A1 & EP 2091168 A1 & AU 2007320337 A & CN 101542936 A & RU 2009122993 A	1, 2, 5, 6, 9 3, 4, 7, 8, 10-14
Y A	WO 2009/017230 A1 (日本電気株式会社) 2009.02.05, 図1 & US 2010/0135203 A1 & EP 2180623 A1 & CN 101772904 A	1, 2, 5, 6, 9 3, 4, 7, 8, 10-14
A	JP 2009-33747 A (富士通株式会社) 2009.02.12, 全文、全図 & US 2009/0028332 A1 & GB 2451268 A & GB 714519 D0 & EP 2019497 A1 & DE 602008003069 D & CN 101355420 A	1-14