

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	直角座標系2次元直交多重による60GHz帯空間2多重光ファイバ無線
Title	60-GHz-band Spatial Duplex Radio over Fiber by Rectangular-Coordinate Two-Dimensional Orthogonal Multiplexing
著者	戸村崇, 廣川二郎, Muhsin Ali, Guillermo Carpintero
Authors	Takashi Tomura, JIRO HIROKAWA, Muhsin Ali, Guillermo Carpintero
出典	電子情報通信学会技術研究報告, vol. 121, no. 273, pp. 32-36
Citation	IEICE Technical Report, vol. 121, no. 273, pp. 32-36
発行日 / Pub. date	2021, 11
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は電子情報通信学会に帰属します。 Copyright(c) 2021 IEICE

直角座標系 2次元直交多重による 60GHz 帯空間 2多重光ファイバ無線

戸村 崇[†] 広川 二郎[†] Muhsin Ali[‡] Guillermo Carpintero[‡]

[†] 東京工業大学 工学院 電気電子系 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S3-20

[‡] Dept. of Electronics Technology, Universidad Carlos III de Madrid

Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

E-mail: [†] {tomura, jiro}@ee.e.titech.ac.jp

あらまし 本稿では 60GHz 帯導波管スロットアレーアンテナを用いた直角座標系 2次元直交多重通信(ROM: Rectangular-coordinate two-dimensional Orthogonal Multiplex)を光ファイバ無線で実証する. 直角座標系 2次元直交多重および直角座標系 2次元直交モードを生成/分離する ROM アンテナについて述べる. 光ファイバ無線通信を用いた 2多重通信の測定結果を述べる. 送受信アンテナ間の距離 40cm で 2多重通信 7.4Gbps を確認した.

キーワード 直角座標系 2次元直交多重通信, 導波管スロットアレーアンテナ, 光ファイバ無線, 空間多重

60-GHz-band Spatial Duplex Radio over Fiber by Rectangular-Coordinate Two-Dimensional Orthogonal Multiplexing

Takashi TOMURA[†] Jiro HIROKAWA[†] Muhsin Ali[‡] and Guillermo Carpintero[‡]

[†] Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology

2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

[‡] Dept. of Electronics Technology, Universidad Carlos III de Madrid

Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

E-mail: [†] {tomura, jiro}@ee.e.titech.ac.jp

Abstract In this paper, we demonstrate rectangular-coordinate two-dimensional orthogonal multiplexing (ROM) using a 60-GHz waveguide slot array antenna in a fiber-optic wireless system. We describe the rectangular-coordinate two-dimensional orthogonal multiplex and the ROM antenna that generates and separates the rectangular-coordinate two-dimensional orthogonal modes. The measurement results of two-dimensional multiplex communication using optical fiber wireless communication are described. The distance between the antennas is 40 cm, and the transmission rate is 7.4 Gbps.

Keywords Rectangular-Coordinate Two-Dimensional Orthogonal Multiplex, Waveguide Slot Array Antenna, Radio Over Fiber, Spatial Multiplex

1. はじめに

通信トラフィックの増大により固定無線通信への通信速度の要求が高まっている[1]-[5]. 同一時間, 同一周波数帯を利用する場合, 通信速度は周波数利用効率と使用帯域幅, 空間多重数の積で決まる. 最も一般的な空間多重の方法は偏波共用で, 直交する直線偏波もしくは円偏波を使用して, 空間多重数を2つまり通信速度を2倍にできる. 偏波共用による空間多重数は2に限られているが, 自由空間の直交モードを利用した空間多重方式が検討されてきている.

自由空間の直交モードを利用した空間多重無線通信として OAM (Orbital Angular Momentum 軌道角運動量) [6]-[11]と ROM (Rectangular-coordinate Orthogonal Multiplex 直角座標系 2次元直交多重)[12]-[15]がある.

OAM は円形開口の周方向の直交性を利用しており, ラゲールガウシアンビーム[16]に対応する. これらのモードは周方向で位相分布が異なり, このモード分布をハードウェアで広帯域に生成/分離するのが難しい. この欠点を補うために OAM-MIMO(Multi-Input Multi-Output) [17]-[19]が提案されている. 本方式では信号処理によりモードの生成/分離を行うが, 信号処理が必要になる欠点がある.

ROM は矩形開口の直交モードを利用しており, エルミートガウシアンビームに対応する. 矩形開口を複数の領域に分割し, それぞれの領域での極性(+1 が 0 度位相, -1 が 180 度位相に対応)の違いにより, 直交性が生じている. この開口分布はマジック T [20]を使用することで広帯域に生成/分離可能であり, OAM-MIMO

に必要な信号処理が不要である。よってミリ波・テラヘルツ波を使用した超広帯域・高速無線通信への適用が期待されている。

本稿では 60GHz 帯導波管スロットアレーアンテナを用い直角座標系 2 次元直交多重通信を光ファイバ無線で実証する。まず、直角座標系 2 次元直交多重について述べる。次に直角座標系 2 次元直交モードを生成/分離する ROM アンテナについて述べる。最後に光ファイバ無線通信を用いた 2 多重通信の測定結果を述べる。

2. 直角座標系 2 次元直交多重

4 モード空間多重通信の模式図を図 1 に示す。送受信アンテナそれぞれが 4 つのポートを有し、アンテナはポートごとに空間直交モードを送信/受信する。これらの空間直交モードは空間中で直交しているため、空間内で混じり合わない。よって送信アンテナのポート 1 とポート 2 に異なる信号を入力しても、受信アンテナのポート 1 には送信アンテナのポート 1 に入力した信号のみが伝送され、1 つの空間で複数の異なるデータを送信することが可能である。空間多重数を増やすには複数のモードを送受信できるアンテナを用意することで可能になる。

自由空間内で直交しお互いに混じり合わない 4 つの直角座標系空間固有モードを図 2 に示す。それぞれビームの数や向きが異なり、自由空間で直交している。これらのモードを生成するためのアンテナ開口分布を同図に示す。モード 1 は正面方向に 1 つのビームを有し、これを生成するにはアンテナ開口面で全て同じ極性（同じ電界の向き・同じ位相）を有する必要がある。モード 2 は 2 つのビームが上下方向に形成されており、アンテナ開口分布は上下で極性が異なる（電界の向きが逆・位相差が 180 度）。となっており、これらのモードを生成するにはアンテナ開口面で極性を変える必要がある。なお、振幅分布は 2 軸対称性があればどのような分布でも自由空間で直交する。なお、ガウシアンビームの高次モードであるエルミートガウシアンモードもこの直角座標系固有モードの 1 つである。

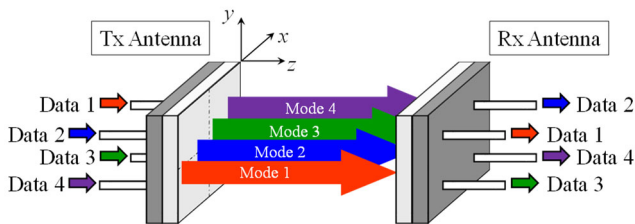


図 1 4 モード空間多重通信

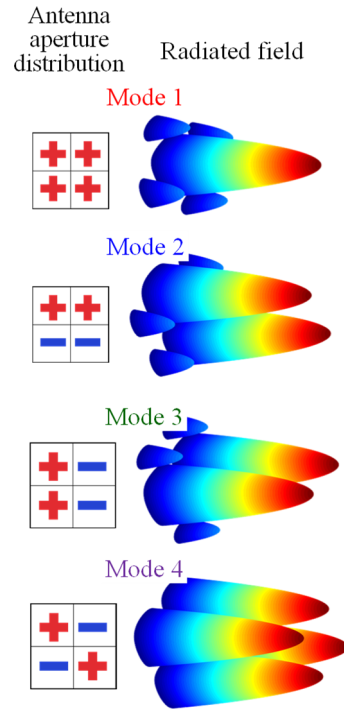


図 2 4 つの直角座標系空間固有モード

3. 直角座標系 2 次元直交多重(ROM)アンテナ

先に述べた直角座標系空間固有モードをハードウェアで生成/分離する手法を述べる。マジック T と呼ばれる導波管回路を用いることで、広帯域に直角座標系空間固有モードの生成/分離が可能である。マジック T の構造を図 3(a) に示す。2 つの入力ポートと 2 つの出力ポートを持つ 4 ポート回路である。Σ ポートから入力すると同じ極性（同じ電界の向き・同じ位相）で出力される。一方で、Δ ポートから入力すると異なる極性（異なる電界の向き・180 度位相差）で出力される。このマジック T の 2 つの出力にアンテナを接続すると 2 モードの直角座標系空間固有モードを生成/分離できる。

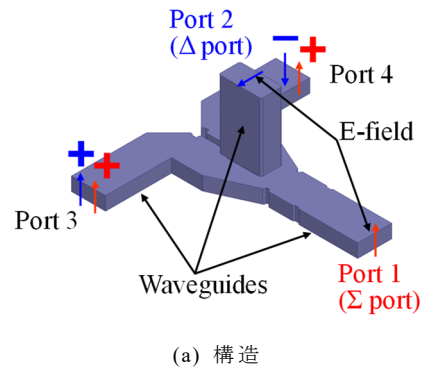
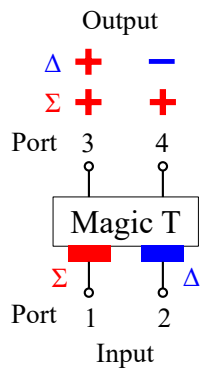
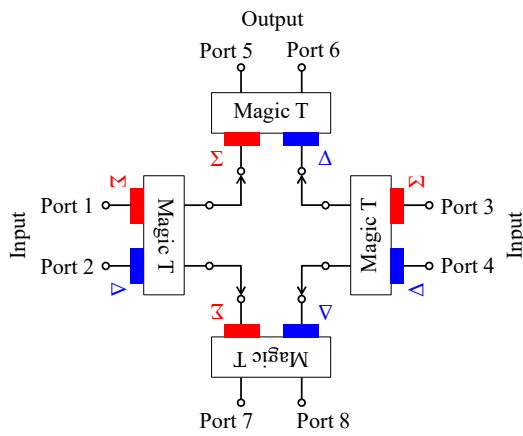


図 3 導波管マジック T の構造と動作



(b) 動作

図3 導波管マジック T の構造と動作



(a) 構造

Excitation	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
Output phase	$\begin{bmatrix} + & + \\ + & + \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} + & + \\ - & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} + & - \\ + & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} - & + \\ - & + \end{bmatrix}$

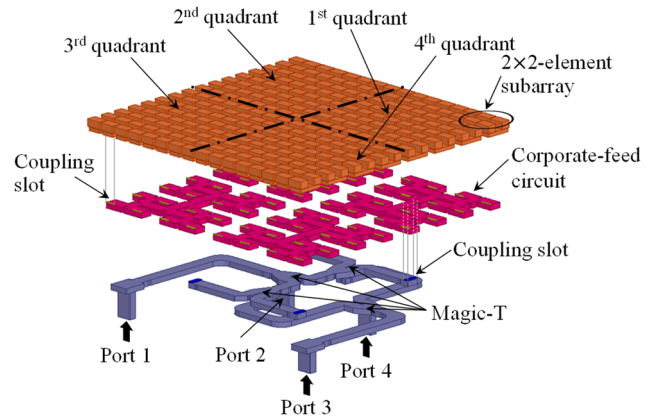
(b) 動作

図4 マジック T の縦続接続による4モード直角座標系空間固有モード生成・分離回路の構成と出力極性

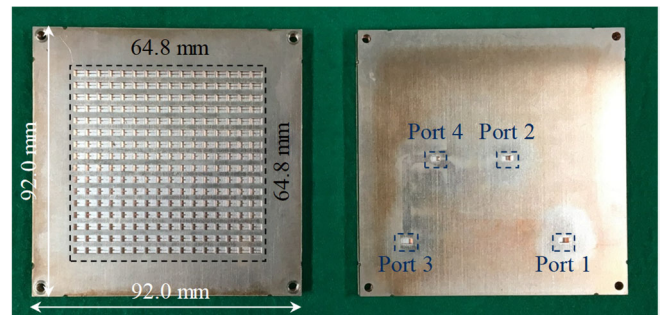
マジック T を縦続接続して生成/分離するモードの数を増やすことが可能である。4モードの場合の回路構成を図4に示す。4つの入力ポート(ポート1~4)と4つの出力がある(ポート5~8)。4つの出力を4つの領域に配置したアンテナに接続する。各入力ポートを励振した場合の出力の極性分布を同図(b)に示す。4つの領域の極性が入力ポートで変わり、4つの直角座標系空間固有モードを生成/分離可能である。マジック T をさらに縦続接続することでさらに多重数を増加させることが可能である。

この4モード生成/分離回路を用いた導波管スロットアレーアンテナ(ROMアンテナ)を図5に示す。最下層にマジック T を用いた4モード生成/分離回路があ

り、その4つの出力に4つの8×8導波管スロットアレーアンテナが接続されている。振幅分布は送受信アンテナ間の距離40cmで送受信アンテナ間の透過量が最大になるように設計されている。このアンテナは、エッチングされた薄い銅板を拡散接合することで製作される。57~66GHzにおいて反射はVSWR2以下、アイソレーションは28dB以上となっている。



(a) 分解斜視図[15]



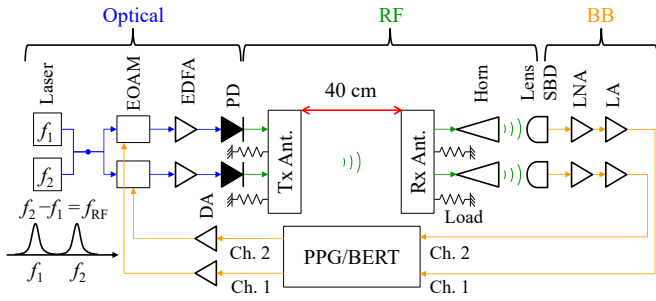
(b) 写真[13]

図5 ROMアンテナの構造

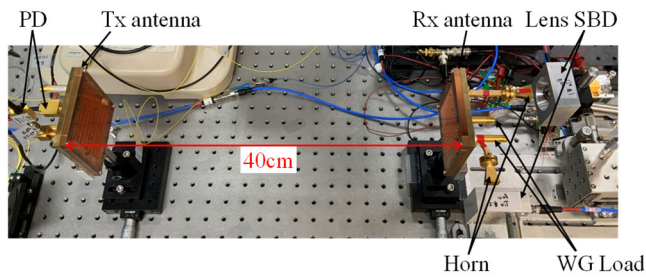
4. 60GHz 帯空間 2 多重光ファイバ無線通信系

ROMアンテナおよび光ファイバ無線を用い2モード空間多重通信の測定系を構築した。図6に測定系のブロック図と写真を示す。送受信アンテナ間の距離は40cmであり、測定時には吸収体で送受信アンテナ間の空間を覆った。2つの波長可変レーザにより、周波数の差がRF周波数となる2トーン信号を生成する。PPG (Pulse Pattern Generator)により2つの独立したデータ列が生成され、EOAM (Electro-Optic Amplitude Modulator)により光信号を強度変調する。強度変調された光信号はEDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)を経由し、PD(Photo-Diode)でRF信号に変換される。PDは送信アンテナに接続され、接続したポートに対応する空間固有モードを放射する。受信アンテナでは空間固有モードに対応したポートにホーンを介したSBD (Schottky Barrier Diode)[21]を接続し、ベースバンド信

号に変換する。LNA (Low Noise Amplifier) と LA (Limiting Amplifier) を介して BERT (Bit Error Rate Tester) に入力され、リアルタイムに BER (Bit Error Rate) を測定する。



(a) ブロック図

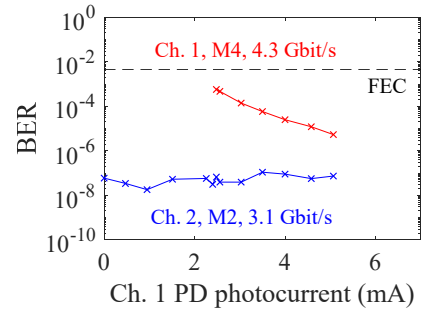


(b) 写真

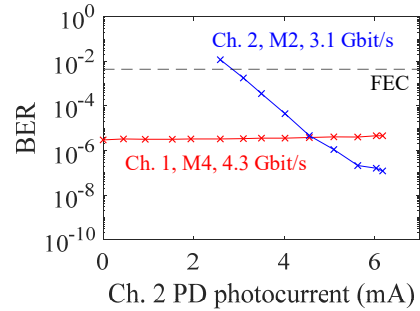
図 6 2モード空間多重通信の測定系

5. 測定結果

チャンネル 1 にモード 4 とチャンネル 2 にモード 2 を使用し、空間 2 多重通信の測定結果を示す。チャンネル 1, 2 の速度はそれぞれ 4.3Gbps, 3.1Gbps である。通信速度がチャンネルで異なるのは使用している PD の最高動作周波数が異なるためである。一方の PD の光電流を固定し、もう一方の光電流を変化させたときの、それぞれのリンクの BER を図 7 に示す。同図(a) にチャンネル 1 の PD の光電流を変えた場合のチャンネル 1 とチャンネル 2 の BER を示す。チャンネル 1 の BER はチャンネル 1 の PD の光電流を増加させることで低減しており、SNR が改善していることが分かる。この時、チャンネル 2 の BER の変化は少なく、チャンネル 1 の影響をあまり受けていないことが分かる。同図(b) にチャンネル 2 の PD の光電流を変えた場合の特性を示す。チャンネル 2 の BER は光電流とともに変化するが、チャンネル 1 の BER はほぼ変わらず、チャンネル 2 の影響が少ないと分かる。以上より、モード 4 とモード 2 の空間および送受信アンテナ系によるモードの間干渉は少なく、空間多重通信が可能であることが示された。他のモードの組み合わせの測定結果については[15]を参照されたい。



(a) チャンネル 1 の光電流を変化



(b) チャンネル 2 の PD 光電流を変化

図 7 PD の光電流と BER の測定結果

6. まとめ

本稿では 60GHz 帯導波管スロットアレーアンテナを用い直角座標系 2次元直交多重通信を光ファイバ無線で実証する。送受信アンテナ間の距離 40cm で 2 多重通信 7.4Gbps を確認した。

今後の課題として通信距離拡大や高周波数化があげられる。通信距離はアンテナ開口面積に比例するため、アンテナ開口径を大きくすることで実現できる。高周波化としては、本実験で使用した ROM アンテナと同様の構造のアンテナを 350GHz 帯で試作しており、良好な特性を確認した[22]。今後、350GHz 帯での多重通信実験を検討する。

文献

- [1] “Future Network Trends” Ericsson Technology Review (Sept. 2020) <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/technology-trends-2020#trend4>
- [2] H. Takahashi, A. Hirata, N. Kukutsu, Y. Kado, T. Kosugi, K. Murata “Compact, Low-power, 120-GHz-band Wireless Link for 10-Gbit/s Data Transmission” NTT Technical Review, Vol. 7, No. 3, pp. 1–6, 2009.
- [3] https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-19-19A1_Rcd.pdf
- [4] T. Nagatsuma, G. Ducournau, C. Renaud, “Advances in terahertz communications accelerated by photonics” Nature Photon., vol. 10, pp. 371–379, Jun. 2016.

- [5] S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, et al, "Wireless sub-THz communication system with high data rate" *Nature Photon.* vol. 7, pp. 977–981, Dec. 2013.
- [6] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman, "Orbital angular-momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes" *Phys. Rev.*, vol. 45, pp. 8185–8189, Jun. 1992.
- [7] Gibson, G. et al, "Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum" *Opt. Express*, vol. 12, pp. 5448–5456, Nov. 2004.
- [8] Y. Yan et al., "High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing," *Nature Commun.*, vol. 5, no. 1, p. 4876, Dec. 2014.
- [9] Y. Yan et al., "32-Gbit/s 60-GHz millimeter-wave wireless communication using orbital angular momentum and polarization multiplexing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.* 2016, pp. 1-6.
- [10] Z. Zhao et al., "A dual-channel 60 GHz communications link using patch antenna arrays to generate data-carrying orbital-angular-momentum beams," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, 2016, pp. 1-6.
- [11] Y. Zhang and J. Li, "Analyses and full-duplex applications of circularly polarized OAM arrays using sequentially rotated configuration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 12, pp. 7010-7020, Dec. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2872169.
- [12] K. Tekkouk, J. Hirokawa, and M. Ando, "Multiplexing antenna system in the non-far region exploiting two-dimensional beam mode orthogonality in the rectangular coordinate system," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 3, pp. 1507–1515, Mar. 2018.
- [13] R. Ohashi, T. Tomura, and J. Hirokawa, "Transmission enhancement in rectangular-coordinate orthogonal multiplexing by excitation optimization of slot arrays for a given distance in the non-far region communication," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E103-B, no. 2, pp. 130-138, Feb. 2020, doi: 10.1587/transcom.2019EBP3051. [Online]. Available: <https://t2r2.star.titech.ac.jp/rrows/file/CTT100816214/ATD10000413/>
- [14] K. Wada, T. Tomura, and J. Hirokawa, "Dual-polarized two-dimensional beam mode orthogonal multiplexing antenna system for the non-far region," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 9, pp. 6614-6623, Sep. 2020.
- [15] T. Tomura, J. Hirokawa, M. Ali, and G. Carpintero, "Millimeter-wave multiplexed wideband wireless link using rectangular-coordinate orthogonal multiplexing (ROM) antennas," *J. Lightw. Technol.*, Dec. 2021 (to be published). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2021.3093445>
- [16] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.
- [17] W. Zhang et al., "Mode division multiplexing communication using microwave orbital angular momentum: an experimental study," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 2, pp. 1308-1318, Feb. 2017.
- [18] T. Nguyen, M. Hirabe, H. Miyamoto, R. Zenkyu, M. Uchida, and E. Sasaki, "An experimental study of high-capacity link using orbital angular momentum mode multiplexing in E-band," in *Proc. Int. Symp. Antennas Propag.*, 2018, pp. 1-2.
- [19] H. Sasaki, Y. Yagi, T. Yamada, T. Semoto, and D. Lee, "An experimental demonstration of over 100 Gbit/s OAM multiplexing transmission at a distance of 100 m on 40 GHz band," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops*, 2020, pp. 1-6.
- [20] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., NY, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [21] M. Ali, et al., "Quasi-optical Schottky barrier diode detector for mmWave/sub-THz wireless communication," in *Proc. Int. Conf. Telecommun.*, 2018, pp. 1–4.
- [22] A. Gomez-Torrent, T. Tomura, W. Kuramoto, J. Hirokawa, I. Watanabe, A. Kasamatsu, and J. Oberhammer, "A 38 dB gain, low-loss, flat array antenna for 320–400 GHz enabled by silicon-on-insulator micromachining," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 6, pp. 4450-4458, Jun. 2020.