

光の領域と融合する無線通信

Wireless Communications Merging with Photonics

西村寿彦 佐藤孝憲 小川恭孝 大鐘武雄

abstract

ミリ波帯の無線通信は 5G や WiGig など既に標準化され実用に向かっている。これまでの歴史的な流れを見ても、広い帯域を確保するためには、更なる高周波数化に向かうことは想像に難くない。本稿では、これまで切り離されて個々に研究されてきた無線通信と光技術が融合する領域の研究（テラヘルツ波通信・OAM 多重・光 MIMO）について紹介し、2030 年の超スマート社会への基盤技術となり得るかについて議論したい。

キーワード：テラヘルツ波通信，軌道角運動量多重，光波多重，光 MIMO，RoF

1. はじめに

移動通信システムは、およそ 10 年周期で世代が進んでおり、2020 年春にはついに第 5 世代移動通信システム (5G) のサービスがスタートした。2030 年頃に実現が期待されている 6G では、その速度は 100 Gbit/s を超えると考えられている^{(1),(2)}。高速化を実現するための方策の一つは、広い帯域を確保できる高周波数帯を利用することであり、既に 5G では数十 GHz のミリ波帯の使用が実現された。今後、更なる高周波数化が進み、数百 GHz を超えることが予想されている。このような高い周波数帯では、従来の無線通信で用いてきた技術をそのまま使うことが難しくなる代わりに、光の性質に近いことで光技術を導入できるかもしれない。そこで、本稿では、無線通信と光技術が融合する領域の研究（テラヘルツ波通信・軌道角運動量 (OAM: Orbital Angular Momentum) 多重，光 MIMO (Multiple Input Multiple

Output)) について紹介する。

2. では、テラヘルツ波を用いる上での問題点とその実現について概要を述べる。なお、テラヘルツ波の周波数範囲は、文献により異なっているが、本稿では 100 GHz~10 THz をその範囲と考えることにする。

3. では、電磁波、及び、光が持つ物理量である OAM を用いた OAM モード多重通信の紹介とその問題点について説明する。従来、無線通信の多重化には、時間や周波数といった物理量をそれぞれ直交させたモードに異なる情報を乗せる（変調する）ことで行われてきた。これらは、等位相面が平面となって伝搬する直線偏波や円偏波の直交性を利用して多重化に用いられている。ところが、OAM モードは等位相面がらせん状となって伝搬し、原理的には無限のモードを発生させることが可能である。

4. では、光 MIMO^(註1)の基本原則とその応用について紹介する。光電変換を行う前の段階、つまり光の領域で、各モードの光信号を遅らせたり干渉させたりすることが可能であり、本節ではこのような「光 (信号の) MIMO」について取り上げる^{(3)~(5)}。光 MIMO は、現行のシステムにおける DSP (Digital Signal Processor) への負荷を軽減するだけでなく、アナログ光無線

西村寿彦 正員：シニア会員 北海道大学大学院情報科学研究院情報科学専攻
E-mail nishim@ist.hokudai.ac.jp
佐藤孝憲 正員 北海道大学大学院情報科学研究院情報科学専攻
E-mail tksato@ist.hokudai.ac.jp
小川恭孝 正員：フェロー 北海道大学大学院情報科学研究院情報科学専攻
E-mail ogawa@ist.hokudai.ac.jp
大鐘武雄 正員：フェロー 北海道大学大学院情報科学研究院情報科学専攻
E-mail ohgane@ist.hokudai.ac.jp

Toshihiko NISHIMURA, Senior Member, Takanori SATO, Member, Yasutaka OGAWA, and Takeo OHGANE, Fellows (Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-0814 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.104 No.5 pp.485-489 2021 年 5 月
©電子情報通信学会 2021

(註1) 一般的に知られている「光 MIMO」は、一度フォトディテクタで光信号を電気信号に変換してから、デジタル信号処理装置を用いた補償によって送信信号を復元することを指す。

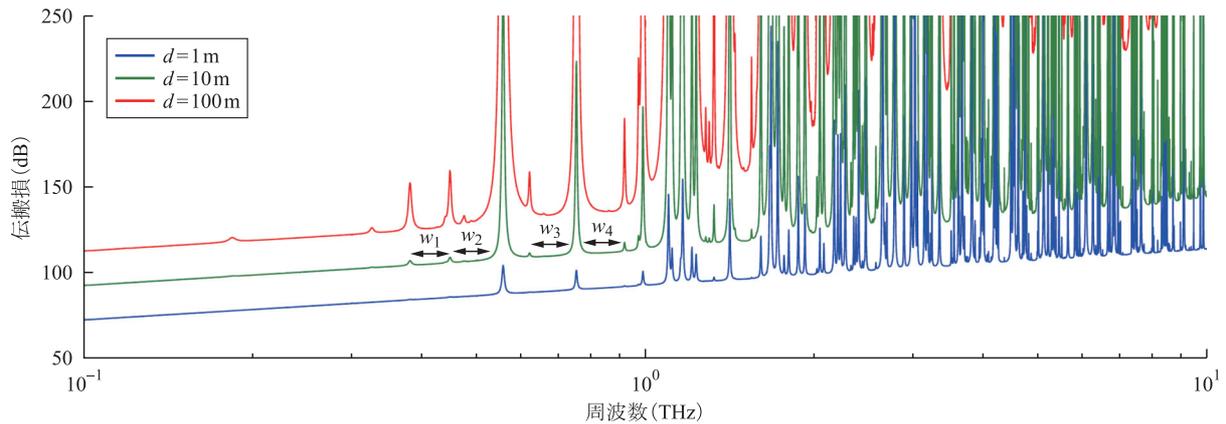


図1 テラヘルツ波の伝搬損 伝搬距離をパラメータとした伝搬損の周波数特性を伝搬モデルにより求めたものである。0.1 THz 近傍で明らかな、右上がりのなだらかな直線は周波数の二乗に比例する自由空間伝搬損である。一方、ピークは大気による吸収減衰であり、特に1 THz を超えた周波数帯で顕著である。w₁, w₂, w₃, w₄ は大気の窓の例である。文献(8)から許諾を得て転載。(©Elsevier 2014)。

(RoF: Radio-over Fiber) 通信において光の領域でウェイト制御できる等の応用可能性も期待される。

2. テラヘルツ波通信

テラヘルツ波の通信への応用として検討されているユースケースは、モバイルフロントホール、モバイルバックホール^(用語)、近接ダウンロード、半導体チップ間通信、プリント基板間通信、データセンターのサーバ間通信などである^{(6), (7)}。

テラヘルツ波を用いるときに問題となるのは減衰である。まず、大気による吸収などが起きない真空中での伝搬を考える。送信信号の電力を P_t 、周波数を f 、送受信間の距離を d とするとき、受信電力 P_r はフリソの伝達公式から次式で与えられる。

$$P_r = \frac{G_r G_t P_t}{L_p} \quad (1)$$

ここで、 L_p は次式で定義されている。

$$L_p = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (2)$$

上式で、 c は光速、 G_r と G_t は、それぞれ、受信機と

送信機のアンテナ利得を表している。 L_p は自由空間伝搬損であり、周波数の二乗に比例して増加することが分かる。したがって、高い周波数帯のテラヘルツ波は大きな伝搬損を被ることが分かる。

更に、大気中をテラヘルツ波が伝搬するとき、水蒸気と酸素による吸収のため、著しい周波数選択性を持った減衰を受けることになる。この損失を大気減衰損という。

以上の二つの損失を、伝搬距離をパラメータとして、数値計算により求めた結果⁽⁸⁾を図1に示した。0.1 THz 近傍で明確に認められる右上がりの直線は、周波数が10倍になると20 dB増加しており、周波数の二乗に比例して増加する自由空間伝搬損である。また、周波数に強く依存するピークは大気減衰損である。1 THz を超えた領域で大気による減衰が著しいことが分かる。また、ピークとピークの間の損失が比較的小さい周波数範囲を「大気の窓」と呼んでいる。

テラヘルツ波を用いた通信において、大気の窓の周波数帯域を選択し、送受信アンテナの利得 G_t 、 G_r を大きくすることによって伝搬距離を長くすることができる。アンテナの物理的な大きさが同じであれば、利得は周波数の二乗に比例して増加することから、このことは十分可能である⁽¹⁾。

テラヘルツ波はミリ波から遠赤外線の領域に及ぶため、送受信機はエレクトロニクス技術、あるいは、フォトンクス技術により実現される。エレクトロニクス技術を用いたものとしては、InPのような高い周波数で優れた特性を有する化合物半導体デバイスが挙げられる。また、シリコン CMOS 集積回路は、コンピュータなどで最も広く使われているデバイスであり、300 GHz 付近のテラヘルツ波についても利用可能である。また、フォトンクス技術による実現例の一つは、二つのレーザー光を

用語解説

モバイルバックホール、モバイルフロントホール 移動通信システムで基地局と基幹となるコアネットワークを結ぶネットワークをモバイルバックホールという。基地局とアンテナ部分が離れている場合、これらを結ぶ回線をモバイルフロントホールと呼ぶ。

フォトダイオードに入力し、その光信号の差の周波数を有する電気信号を得るものである。この差周波数をテラヘルツ帯に定めることによってその発生が可能となる。これらの詳細は、文献(2)、(6)、(7)を参照されたい。

3. 軌道角運動量多重通信

OAMモードによるビームは、図2に示すように等位相面のらせんの数が整数（OAMモードの次数）となって伝搬する。原理的には無限のモードが考えられ、各モードは互いに直交するので無限の情報を多重できることになる。ただし、後述する幾つかの問題点があり、現在のところ、無限多重は実現できていない。

歴史的には、2004年に自由空間伝送において初めて実証⁽⁹⁾されて以来、無線通信では、2019年にNTTにより200 Gbit/sの伝送実験が行われた⁽¹⁰⁾。光通信においては、軌道角運動量を用いた光多重通信として知られており、光ファイバ通信の伝送方式の一つとして研究が進められている。そして、東京工業大学が五つのOAMモードを多重する光多重器を開発する⁽¹¹⁾に至っている。このように、無線通信と光通信でそれぞれ研究が進んでおり、実用化のフェーズへ進みつつある。しかしながら、幾つかの解決されていない問題点が存在する。

一つ目の問題点は、複数のOAMモードを発生させて多重する装置の物理的規模が、多重数に応じて大きくなることである。光通信においては、OAMモードはらせん位相プレートやホログラムプレートを用いて位相をらせん状に回転させる方法を用いる。どちらも複数のモードを発生させるには、位相の回転数に応じたプレートを複数用意して、ハーフミラーなどによる合波処理を行うことになる。ただし、この問題は文献(11)で用いられているシリコンフォトニクス技術を導入することで解決できる。

無線通信においては、光通信と同様な方法でも発生可能である。それに加えて、文献(10)、(12)で用いられているようなUCA（Uniform Circular Array：円形アレー）を使うことで、他の多重方式と同様な規模で装置を構成することができる。図3は、NECが実証実験を行った際の装置構成の写真で、8素子のUCAが用いられている⁽¹²⁾。なお、このようにアレーアンテナを用いる場合、実現可能なOAMモードの多重数はアレーの自由度を超えることはできないため、原理的に固有モード伝送との違いがない。

二つ目の問題点は、OAMモードの次数が大きくなるのに応じて、送信波の電力の最大方向が進行方向の外側に広がってしまうというものである。前述したように、軌道角運動量を持つ電磁波は、らせん状の等位相面を持つ。そのため、進行方向の中心では特異点となって電力

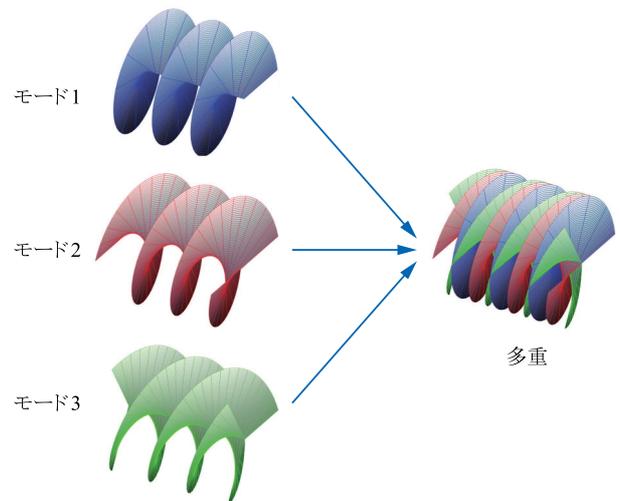


図2 OAMビームの等位相面 重なるらせんの数がOAMモードの次数となる。この図では3波長進行している。各モードは直交関係にある。また、中心は、モード0を除き、全ての位相が合成された特異点となり電力は存在しない。

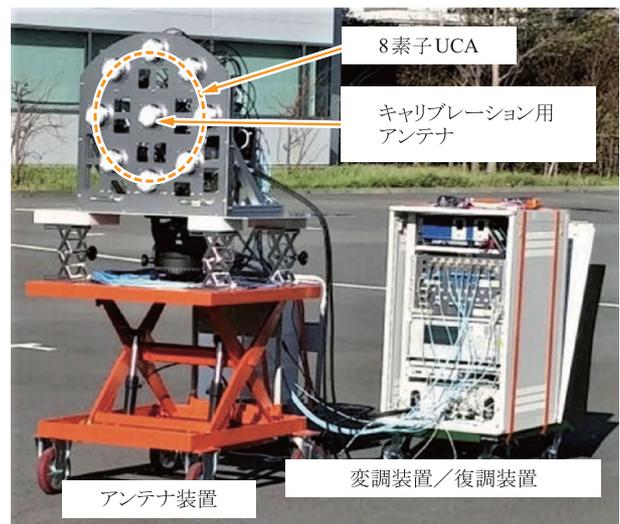


図3 OAMモード多重通信の実証実験を行った装置構成 8素子のUCAが用いられており、8モード多重が実証された。文献(12)から許諾を得て転載。

は存在せず、中心軸からの距離を r 、モード次数を l とすると、ビームはほぼ $r^{|l|}$ に比例して広がる⁽¹³⁾。ラゲルガウスビームと呼ばれるこのビーム形状により、特に高次モードの長距離伝送が難しいとされている。光学的なアプローチでは、誘電体レンズを用いて、ビーム広がりを抑制する方法があるものの、多重した場合のモードごとのビーム制御は難しい。無線通信では、UCAを同心円状に複数用いて、それぞれのアレーに対して位相と電力配分を調整し、モードごとのビームの広がりをそろえることで、距離方向の特性劣化をある程度抑制することが可能となる⁽¹⁴⁾。

三つ目は、特に無線通信で大きな問題となる設置誤差による影響である。設置誤差等により直交性が崩れると、モード間干渉が発生し、伝送特性が大きく劣化する。これについても、幾つかの検討がなされているが、誌面の都合で割愛する。

以上のように、OAMモード多重には解決すべき問題が残されている。しかしながら、光通信と無線通信でそれぞれ研究が進み、テラヘルツ波帯では光と無線の両方のメリットを統合することで、これらの問題が解決されることを期待する。例えば、OAMモードの発生と複数モードの合波は光技術の延長で行い、ビームの広がりや誤差の影響の対策などは無線で検討されている信号処理を導入するといったことが考えられる。

4. 光 M I M O

光 MIMO のプロトタイプである光ユニタリ変換器(ユニバーサル線形光回路とも呼ばれる)は、 n 個の光入力(複素振幅列 $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_n\}^T$) に対して、任意の $n \times n$ のユニタリ行列 (\mathbf{U}) による基底変換が施された光出力 ($\mathbf{b} = \mathbf{U}\mathbf{a}$) を得るための光デバイスである⁽³⁾。

1994年に Reck らが発表したものは $\frac{n(n+1)}{2}$ 個の位相シフタと $\frac{n(n-1)}{2}$ 個のハーフミラーによる理論提案にとどまっていたが、その後の平面光波回路の作製技術の向上により、マッハツェンダ干渉計を用いた構成の石英系デバイスが実験により実証されるまでに至った⁽⁴⁾。しかしながら、光回路の素子サイズが大きくなる傾向があり(文献(4)の報告例では、 6×6 のユニタリ変換部分のデバイス長はおよそ 5 cm 程度)、演算次元の拡大が困難であった。

近年、回路サイズを 1/10 以下に小形化できるシリコ

ン光共振器とリング共振器構造を用いたユニタリ変換器の構成が提案されている⁽⁵⁾。リング共振器形のマッハツェンダ干渉計は、およそ $0.01 \times 0.02 \text{ mm}^2$ のフットプリントで実現可能であり、光回路の専有面積だけで考えると、 100×100 の変換でも $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 程度に収まると見込まれる^{(5), (15)}。また、任意の行列 (\mathbf{M}) に対しても、特異値分解 ($\mathbf{M} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H$) を行うことで、特異値(光増幅器・光減衰器)とユニタリ行列 \mathbf{U} , \mathbf{V} (光ユニタリ変換器) に分離できることから、ユニタリ変換に限らず任意の行列 \mathbf{M} を用いた変換が可能である。各モードを遅延させて干渉させることで一般的な MIMO 補償を光の領域で行うことも可能であることから、DSP への負荷を軽減した高速な光送受信システムの実現も期待できる。

更に、本稿の主眼としている光と無線の融合という観点からは、例えば図4のように、アナログ RoF 信号のビーム形状を、光の領域でプログラマブルに設定可能な送信デバイスを構成することも可能である。一般に、RF 信号の位相は、上下側波帯 (USB/LSB: Upper/Lower sideband) に対応する光信号に対して光位相を変化させることで制御可能であることが知られている⁽¹⁶⁾。USB/LSB に対して光フェイズドアレーを通すだけでも RF 信号の放射角度を制御可能であるが、ユニタリ変換部においてバトラマトリックス⁽¹⁷⁾を適用することで、4 信号分を同時に放射させたり、あるいはバトラマトリックスの列を入れ替えて放射角度を時間変動させたりすることも可能である。また、光共振器を用いたユニタリ変換器を用いることで、アンテナ数を 32, 64, ... と増やすことも容易である。これはほんの一例であり、光の領域で任意のウェイト行列を乗じることができるとは、これまでに考えられてこなかったようなシステム構築につながることを期待される。こうした光の領域における柔軟な制御機構を無線通信システムに取り入れるこ

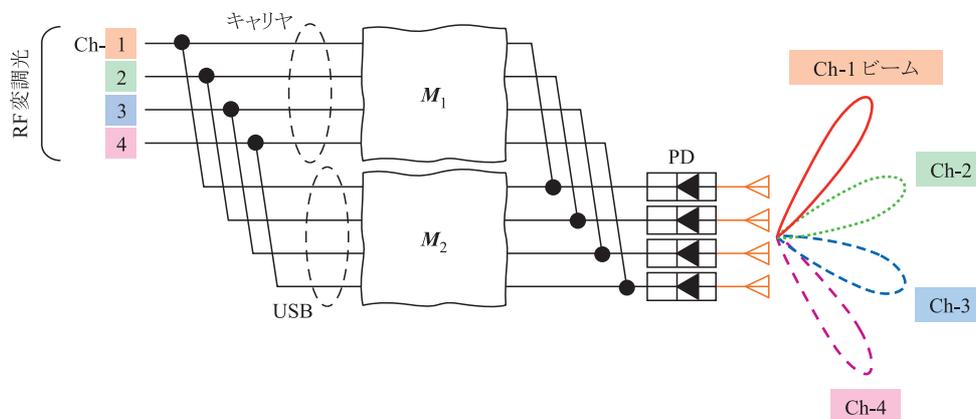


図4 4×4光ユニタリ変換器を用いたRoF伝送用ビームフォーミングデバイスの構成例 RF信号で変調した四つの光信号をキャリアとUSBに分波して、それぞれに対して、光ユニタリ変換器・光減衰器による行列積演算を施し、光電変換後にアンテナへ入力することで、変換行列に応じた様々なビームフォーミングが実現できる。

とで、よりスマートな伝送システムを確立することの検討が進められている。

5. おわりに

2030年には、ほぼ確実に従来の無線通信と光通信の中間の高周波（ミリ波・テラヘルツ波）帯による情報伝送が実用化されているだろう。本稿では、無線と光の技術の融合が実現され得る三つの技術（テラヘルツ波通信、OAM多重、光MIMO）を紹介した。この周波数帯で、これまで別々に研究されていた技術が融合し、それぞれのメリットを生かした通信方式が開発されるものと期待する。

文献

- (1) T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G.C. Trichopoulos, "Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond," IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, June 2019.
- (2) T. Kawanishi, "THz and photonic seamless communications," IEEE/OEA J. Light. Technol., vol. 37, no. 7, pp. 1671-1679, April 2019.
- (3) M. Reck, A. Zeilinger, H.J. Bernstein, and P. Bertani, "Experimental realization of any discrete unitary operator," Phys. Rev. Lett., vol. 73, no. 1, pp. 58-61, July 1994.
- (4) J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow, E. Martin-Lopez, N.J. Russell, J.W. Silverstone, P.J. Shadbolt, N. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G.D. Marshall, M.G. Thompson, J.C.F. Matthews, T. Hashimoto, J.L. O'Brien, and A. Laing, "Universal linear optics," Science, vol. 349, no. 6249, pp. 711-716, Aug. 2015.
- (5) T. Sato and A. Enokihara, "Ultrascale design of a universal linear circuit based on microring resonators," Opt. Express, vol. 27, no. 23, pp. 33005-33010, Nov. 2019.
- (6) K. Sengupta, T. Nagatsuma, and D.M. Mittleman, "Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonics systems," Nature Electron., vol. 1, no. 12, pp. 622-635, Dec. 2018.
- (7) 笠松章史, 寶迫 巖, "テラヘルツ波無線通信の研究開発動向," 信学通誌, vol. 12, no. 3, pp. 176-182, Dec. 2018.
- (8) I.F. Akyildiz, J.M. Jornet, and C. Hana, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," Phys. Commun., vol. 12, no. 2, pp. 16-32, Sept. 2014.
- (9) G. Gibson, J. Courtial, M.J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S.M. Barnett, and S. Franke-Arnold, "Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum," Opt. Express, vol. 12, no. 22, pp. 5448-5456, Nov. 2004.
- (10) Y. Yagi, H. Sasaki, T. Yamada, and D. Lee, "200 Gbit/s wireless transmission using dual-polarized OAM-MIMO multiplexing on 28 GHz band," Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec. 2019.
- (11) T. Amemiya, T. Yoshida, Y. Atsumi, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, Y. Sakakibara, and S. Arai, "Orbital angular momentum mux/demux module using vertically curved Si waveguides," Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), no. M1C. 7, March 2019.

- (12) 平部正司, 善久竜滋, 宮元裕章, 生田耕嗣, 佐々木英作, "OAMモード多重による大容量無線伝送技術," 信学通誌, vol. 13, no. 3, pp. 195-204, Dec. 2019.
- (13) 荒木純道, 李 斗煥, "空間多重化としてのOAM伝送," 信学通誌, vol. 100, no. 8, pp. 854-858, Aug. 2017.
- (14) A. Yamamoto, T. Nishimura, T. Ohgane, T. Tandai and D. Uchida, "Maximum ratio transmission for OAM mode multiplexing using multiple UCAs," Proc. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), March 2020.
- (15) W.R. Clements, P.C. Humphreys, B.J. Metcalf, W.S. Kolthammer, and I.A. Walsmley, "Optimal design for universal multipoint interferometers," Optica, vol. 3, no. 12, pp. 1460-1465, Dec. 2016.
- (16) C. Tsokos, E. Mylonas, P. Groumas, V. Katopodis, L. Gounaridis, R.B. Timens, R.M. Oldenbeuving, C.G.H. Roeloffzen, H. Avramopoulos, and C. Kouloumentas, "Analysis of a multibeam optical beamforming network based on Blass matrix architecture," J. Light. Technol., vol. 36, no. 16, pp. 3354-3372, Aug. 2018.
- (17) W. Charczenko, M.R. Surette, P.J. Matthews, H. Klotz, and A.R. Mickelson, "Integrated optical Butler matrix for beam forming in phased-array antennas," Optoelectron. Signal Process. Phased-Array Antennas II, vol. 1217, pp. 196-206, June 1990.

(2020年11月30日受付)



にしむら としひこ
西村 寿彦 (正員: シニア会員)

平4北大・理・物理卒。平10同大学院工学研究科博士後期課程了。同年同大学院工学研究科電子情報専攻助手を経て、平29同准教授、現在に至る。この間、MIMOシステムによる高速通信に関する研究に従事。博士(工学)。平18年度本会論文賞受賞。



さとう たかのり
佐藤 孝憲 (正員)

平26北大・工・情報卒。平30同大学院情報科学研究科博士後期課程了。平31兵庫県立大・工・電子情報工・助教を経て、令2北大大学院情報科学研究科准教授、現在に至る。その間、光通信・光演算のための各種光導波路・光共振器デバイスに関する研究に従事。博士(工学)。



おがわ やすたか
小川 恭孝 (正員: フェロー)

昭48北大・工・電子卒。昭53同大学院博士課程了。昭54同大学・工・講師を経て、平16同大学院情報科学研究科教授、平25同名誉教授、現在に至る。この間、アダプティブアンテナ、MIMOシステムなどの研究に従事。工博。平18年度本会論文賞、平25年度本会業績賞各受賞。IEEEフェロー。



おおがね たけお
大鐘 武雄 (正員: フェロー)

昭59北大・工・電子卒。昭61同大学院修士課程了。同年郵政省電波研究所、平4(株)ATR光電波通信研究所、平7北大大学院工学研究科助教を経て、平27同大学院情報科学研究科教授、現在に至る。この間、MIMOシステムなどの研究に従事。博士(工学)。平18年度本会論文賞受賞。