

光技術によるアンテナの高機能化

稻垣 恵三

Advanced Antennas Using Photonics Technologies

Keizo INAGAKI

Array antennas can realize advanced functionalities such as beam shaping, beam steering and adaptive signal processing, with the help of beam forming networks (BFNs). A variety of photonics technologies are utilized for improving BFNs performance. In this report, they are classified from the view point of phase control methods and their advantages and problems are explained briefly. The “Fourier optics” type controls the directivity of the array antenna not by the phase distribution at antenna aperture but by the beam arrangements at the far-field, which results in simple control. Two optical beam formers belonging to the Fourier optics type are explained with their operation of two-dimensional multibeam forming and independently steerable multibeam forming. Finally application fields and future trends of optically controlled array antennas are discussed.

Key words: optically controlled array antenna, optical signal processing, beam forming network, Fourier optics, classification

複数の素子アンテナを用いるアレイアンテナでは、各素子アンテナに給電する RF (radio frequency) 信号の位相と振幅を制御することにより、所望の放射パターンをもたらせるビーム整形、ビームの指向方向を変えるビーム偏向、受信信号に適応して信号処理を行うアダプティブアレイなどのさまざまな機能が実現できる¹⁾。一般に、複数の素子アンテナを配列したアンテナ部と、その背後で各素子アンテナへの励振振幅および位相を制御しているビーム形成回路 (beam forming network; BFN) と呼ばれる複雑な給電ネットワークで構成され、アレイアンテナ特有の機能を実現するにはアンテナ部よりも BFN 部の機能がより重要になる。

BFN に要求される機能は、アンテナの用途により大きく異なる。レーダー用では高利得の主ビームを超高速で走査する機能が、衛星通信用では広いサービスエリア全体を多数の高利得ビームで覆うために大規模な固定マルチビームの形成機能が必要になる。将来の広帯域移動体通信シス

テムでは、干渉源となる不要電波を低減するために各移動体ユーザーを専用のビームでアクセスする方式が有効と考えられ、複数のビームの指向性を独立に制御できるマルチビーム機能が重要になろう。

BFN は実現技術によって 3 種類に分類できる。最も一般的な RF 技術を用いる方法は大規模化すると多数の部品が必要になるが、今後はモノリシックマイクロ波集積回路 (monolithic microwave integrated circuit; MMIC) 化が進展すると考えられる²⁾。デジタル技術を用いる方法は柔軟で適応的な信号処理が可能であり、近年研究の進展が著しいが、信号処理デバイスにより帯域が制限される³⁾。光技術を用いる方法は光制御アンテナとも呼ばれ、低損失で長距離伝送が可能、瞬時比帯域あるいはシステム比帯域が広い、小型軽量で小さく曲げられる、電磁干渉の影響がない、などの多くの潜在的利点を有しているが、まだ基礎研究段階といえる。本稿では、この光制御アンテナについて解説する。

1. 光制御アンテナの分類

光制御アンテナの中にもさまざまな実現方法があるが、光 BFN 中で光信号に変換された RF 信号の位相を制御する方法から、マイクロ波位相制御方式と光波位相制御方式に大別される。前者では、RF 信号を光波の強度に変換した後、光路長を RF 信号の波長程度 (m~cm) 変化させることで位相を制御する。変換された光周波数領域では光搬送波と上下の両側帯波の 3 光波が存在するが、すべて同相であり、光波の位相は利用していない。位相誤差が小さく安定な動作が期待できるが、小型化が困難である。後者では、RF 信号は位相も含めてそのまま光信号に変換され、光信号の位相を制御することで RF 信号の位相を制御した後、受信側でコヒーレント検波により RF 信号に戻す。通常は、実現の容易さから自己ヘテロダイイン方式が用いられ、RF 信号から変換された光信号と位相基準となる光信号の 2 光波を伝送し、受信側の光検波器 (photo diode; PD) で二乗検波することで元の RF 信号を取り出す。位相を制御するには 2 光波の相対位相を変化させるため、RF 信号の波長によらず光波の波長程度 ($\sim 1 \mu\text{m}$) の光路長を制御するだけでよい。光位相器が小型化できるため多数の位相器の集積化や空間並列処理が可能になる利点があるが、光路長変化に対する位相感度の高さが、逆に外乱による位相誤差を増すという課題にもなる。

マイクロ波位相制御方式の基本的な動作原理は、長さの異なる複数の伝送路をスイッチで切り替えて遅延時間を制御し、出力の位相を変化させる方式である。光制御アンテナの場合は伝送路が低損失の光ファイバーとなり、RF 信号波長程度の伝搬路長差では、RF 線路切り替え型位相器に比べて損失の変化が小さくなる。このため、多段接続することで最小および最大遅延時間のダイナミックレンジを非常に大きくとることができるが、この特徴は、角度および距離分解能の高い高性能レーダーに用いられる位相器では非常に重要な特性である。分解能を高めるには、大口径アレイアンテナを用いて瞬時比帯域の広い短パルスを特定の角度方向に鋭く指向させる必要があり、狭帯域信号の位相を制御する場合と異なって遅延時間を制御する実時間遅延 (true time delay; TTD) 型アレイアンテナが用いられる。TTD 型アレイアンテナの周辺部の素子アンテナが制御する遅延時間はアンテナ開口径に比例して大きくなるため、遅延時間のダイナミックレンジが大きい TTD 型光制御位相器の研究はマイクロ波位相制御方式の研究のなかで最も活発な領域である。実装では、長さの異なる光ファイバーを切り替える方式⁴⁾だけでなく、光の波長分散性を利用する方式⁵⁾の研究が多い。群遅延の大きな高分散性ファ

イバーと群遅延のないゼロ分散ファイバーを素子アンテナごとに設計された所定の長さで組み合わせて、給電線路を構成しておく。光波の波長を変化させると、長さの組み合わせに応じて各素子アンテナへの遅延時間が変化し、連続的にビームが走査できる。多数の光ファイバー遅延線とスイッチマトリクスが不要になり、システム構成が簡単になる。最近は高分散ファイバーとしてファイバープラググーリーティング (FBG) を用いた報告も多い⁶⁾。

光波位相制御方式では、各素子アンテナに給電される 2 光波の相対位相を制御するために、一方の光波だけ光位相制御デバイスを通過させ、もう一方の光波と合波してから伝送する。光波の位相を制御するデバイスとしては、液晶やマイクロエレクトロメカニカルシステム (MEMS) を集積した空間光変調器⁷⁾ や光導波路⁸⁾ が研究されている。これらは開口面上の各素子アンテナに独立な位相変化を与える方式であるが、主ビームの偏向やマルチビームの形成など実際のビーム形成は、遠方界のビームに対して定義されることが多い。これに適した方式としてフーリエ光学系型の光制御アンテナがあり、次章で紹介する。

これらのほかにも、光技術を RF 信号の位相制御に使わず発生や伝送に用いる超大型電波望遠鏡⁹⁾ や、FET などの RF デバイスの動作点をバイアス電圧だけでなく光で制御する研究¹⁰⁾ がある。

2. フーリエ光学系型光制御アンテナ

アンテナ開口面上の電磁界分布と遠方界の電磁界分布には、フーリエ変換の関係がある。また、フーリエ変換を 2 度行うと、符号や係数のみが異なる相似な関数に戻る。そこで、BFN 内にフーリエ変換機能を実装すると、入力信号は BFN 中とアンテナから遠方界への伝搬中の 2 度フーリエ変換されることになり、入力信号の空間分布と相似な遠方界放射パターンが得られる。このため、ビームを所望形状に整形するにはそれと相似な電磁界の空間分布をもつ信号を給電し、ビームを偏向するには給電位置を移動させる。マルチビームを形成するには、複数の入力信号を異なる位置から入力する。多数の素子アンテナの振幅や位相を協調して制御する必要はない。

RF 技術を用いた BFN では、電波の回折によりフーリエ変換するロットマンレンズやカップラーと固定位相器を高速フーリエ変換のアルゴリズムに従って配線したバトーマトリクスがこの原理を利用している¹⁾。光波も同様に回折によってフーリエ変換でき、しかも波長比に従って小型化できる。そこで、光波の位相を RF 信号の位相に変換する光波位相制御方式において、一方の光波を位相の基準と

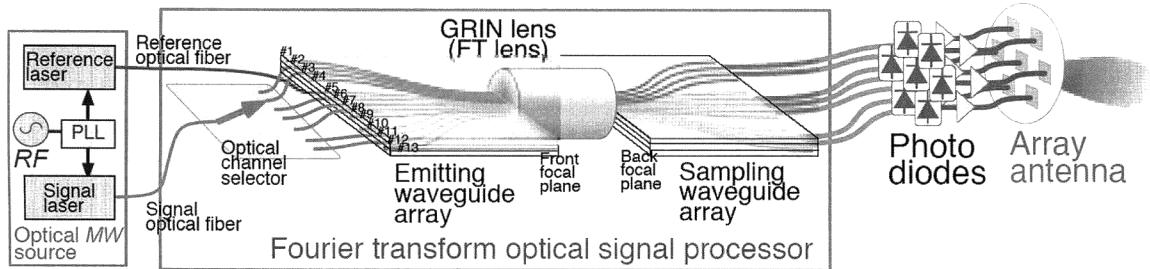


図1 二次元マルチビーム形成用光制御アンテナの実験系。

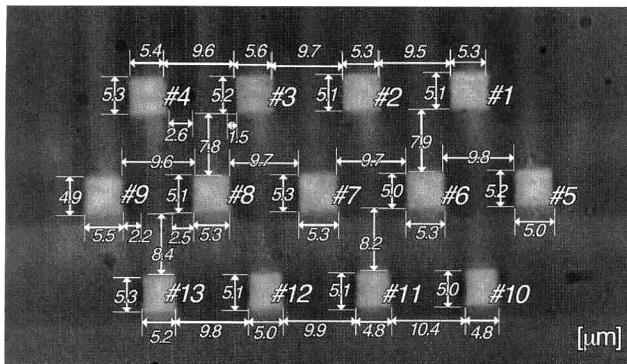


図2 ポリマー光導波路を積層した二次元光導波路アレイの端面。

し、もう一方の光波をレンズでフーリエ変換した後に合波して二乗検波すると、上記のフーリエ変換型 BFN を小型化できる¹¹⁾。これをフーリエ光学系型光制御アンテナと呼んでいる。

2.1 二次元マルチビーム形成¹²⁾

レンズの前側焦点面上と後側焦点面上の光波の電磁界分布がフーリエ変換対となっていることを利用して、アレイアンテナから出射された電磁界が遠方界でマルチビームとなるような振幅・位相分布をもつ RF 信号を生成し、実際にアレイアンテナに給電してマルチビームが形成されることを確認した。実験系を図1に示す。フーリエ変換にはピッチ 0.25 の屈折率分布型 (graded-index; GRIN) レンズを用いた。レンズの前後端面が前側および後側焦点面となり、アライメントが容易になる。前側焦点面上にはマルチビームに対応した複数の信号光波をビーム形状と相似な形に配置し、後側焦点面上ではフーリエ変換後の光電磁界を素子アンテナの配置と相似な位置でサンプリングする。二次元マルチビームを実現するには光波の配置およびサンプリングとともに二次元的に行う必要があり、二次元光導波路アレイを開発した。シングルモードのポリマー光導波路を 4 本、5 本、4 本と 3 層積層した 13 素子の正三角配列二次元光導波路アレイで、図2に端面の写真を示す。1 対の二次元光導波路アレイを GRIN レンズの前後端面に接するように配置し、おのおの 13 本の光導波路のうち中央部の 7

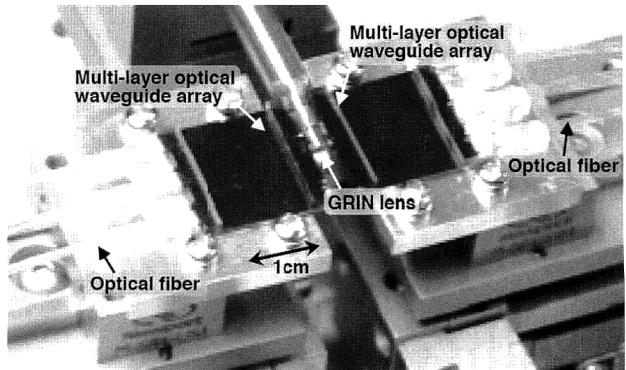


図3 光ビーム形成回路 (BFN) 部の写真。

本 (#2, #3, #6, #7, #8, #11, #12) を用いることで 7 本のマルチビームを出射できる 7 素子アレイアンテナ用の BFN を構成した。なお、位相の基準となる光波はレンズ前面に配置した二次元光導波路アレイの #1 の光導波路から入射させ、GRIN レンズ中で空間的に合波させている。図3に光 BFN 部の写真を示す。各ビームに対応する光波と位相基準光をサンプリングした光導波路アレイの出力は光ファイバーでアレイアンテナ近くまで伝送され、PD で二乗検波して所望位相の RF 信号に変換されてから各素子アンテナに給電される。

図4にアレイアンテナに給電される RF 信号の位相分布測定結果を示す。まず、#7 の中心の光導波路から信号光波を入射させた場合を基準として出射側給電線路（サンプリング光導波路—光ファイバー—PD—同軸ケーブル）の全長が等しくなるように校正する。この結果を中央の #7 の図に示す。X-Y 面がアレイアンテナ開口面に相当し、素子アンテナ位置が黒点で示されている。Z 軸が測定された位相を表しており、すべて同相である。次に、周辺の 6 本の光導波路から信号光を入射させた場合の位相分布の変化を、#2, #3, #6, #8, #11, #12 にそれぞれ示す。入射光導波路の位置に応じて位相分布が傾いていることがわかる。これらの信号を X バンドの正三角配列 7 素子アレイアンテナに給電し、電波暗室内で二次元放射パターンを測定した。図5に結果を示す。×印で表された主ビームの放射方向

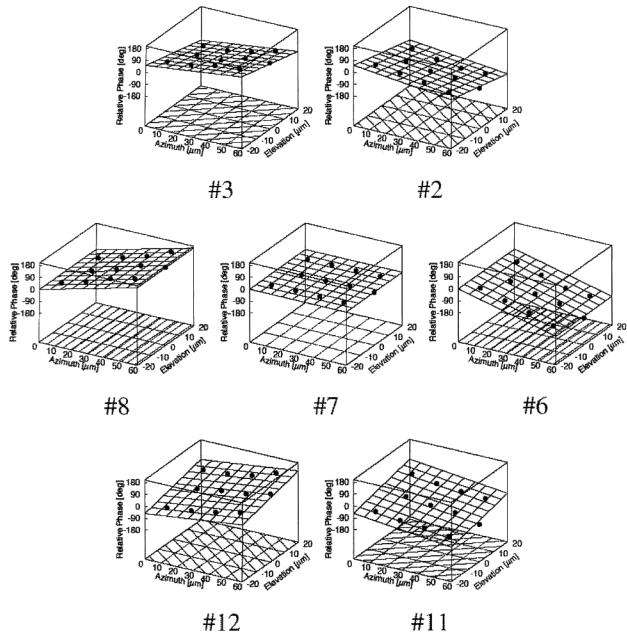


図4 アレイアンテナ給電信号の位相分布測定結果。

が、入射光導波路位置に応じて偏向されていることがわかる。ここでは各ビームを順次測定しているが、複数の入射光導波路に同時に信号光を入射させれば、マルチビームが形成できる。

2.2 独立偏向マルチビーム¹³⁾

前節では衛星通信用などに適した二次元固定マルチビームを形成する実験系を紹介した。次に各ビームの出射方向を他のビームとは独立に制御できる BFN について検討した。簡単のため一次元の場合を考えると、固定マルチビームは複数の入射および出射光導波路をもつスラブ光導波路で形成できる¹⁴⁾。さらに、各ビームの位相分布を変化させるため、RF の周波数走査アレイの考え方を光領域に拡張した。

周波数走査アレイの構成は単純で、アレイアンテナ部には等間隔に穴を開けた導波管などの受動部品を用い、入射信号の周波数を変化させることで主ビームを走査する。ただし、アンテナから放射する RF 信号の周波数も変化するため、実際の利用は限られてしまう。光波位相制御方式の場合、2 光波の差周波数が所望の RF 信号周波数であれば、各光波の絶対周波数（波長）は光部品の波長特性の範囲内で任意に選択できる。そこで、2 光波の差周波数は一定に保ったまま、絶対周波数を変化させることで 2 光波間の相対位相を変化させる方法であれば、放射する周波数も一定に保つことができる。波長によって相対位相差を変化させる光受動部品には、複屈折光導波路中では偏波面によって屈折率およびその分散が異なる特性が利用できる。

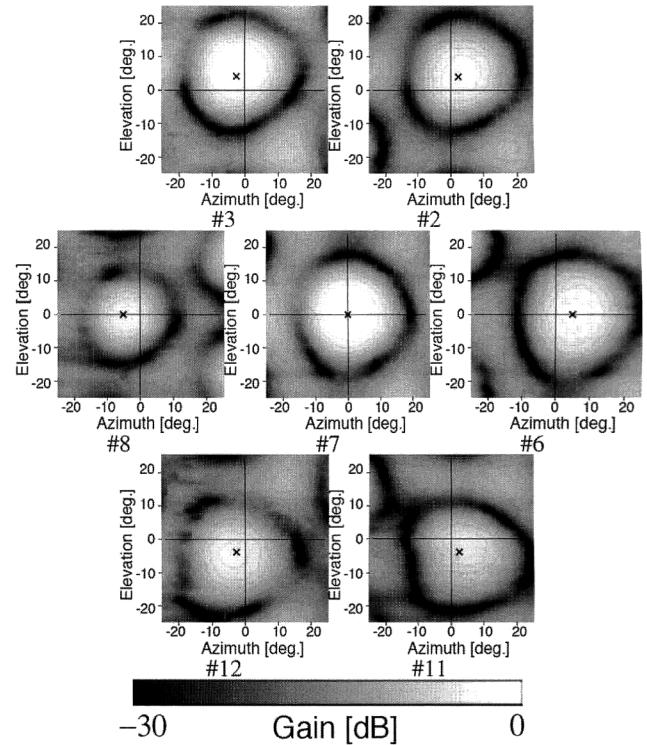


図5 マルチビームの各ビームについて測定した二次元遠方放射パターン。

図6にシステムの構成を示す。光源には、参照光および所望の周波数だけ離れた信号光の 2 光波を出力するだけでなく、波長が走査できることと、2 光波の偏波面が直交していることが要求される。LiNbO₃ で作製した光 BFN チップには、信号光と参照光は同じ入力光導波路の常光および異常光として入射される。スラブ導波路で素子数分の出力導波路に分配された後、各素子ごとに一定の長さの異なる複屈折光導波路を伝搬する。図7に試作した BFN の光導波路のパターンを示す。入射波長を変化させると、複屈折およびその分散により隣接素子間における常光と異常光の相対位相差にずれが生じ、PD で二乗検波した後の RF 信号位相に差が生じる。図8に測定結果を示す。隣接素子間で約 8 度/nm の直線的な波長-位相特性を有していることがわかる。

波長可変域の異なる光源を複数用意し、同時に別の入力導波路から入射するとマルチビームが形成でき、各光源の波長を変化させると他のビームとは独立に特定のビームのみを偏向できる。本方式は制御箇所が光源部に集中しており、BFN 部は受動的な光導波路で構成できる。このため、中央の制御局に光源を設置し、街中に配備される無線基地局に BFN 部を設置するファイバー無線システムと相性がよい。

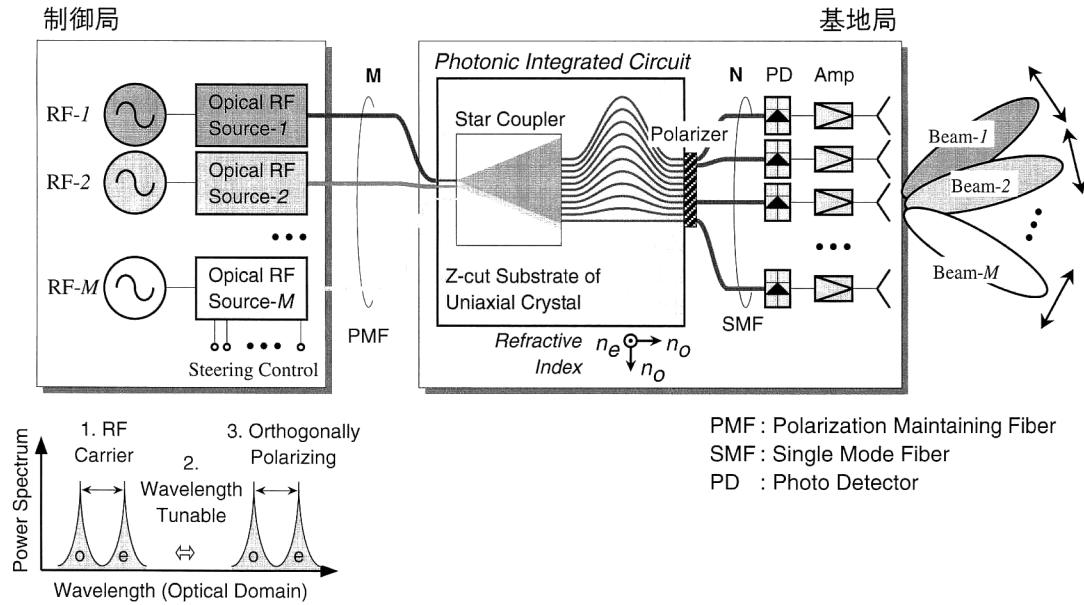


図6 独立偏向マルチビームアンテナのシステム構成。

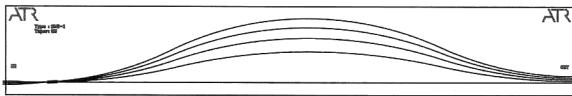


図7 試作した光 BFN の光導波路パターン。

3. 応用分野と研究動向

光制御アレイアンテナの応用分野としては、まず軍用レーダーが挙げられる。当初はさまざまな方式が検討されたが、近年はマイクロ波位相制御方式の TTD 型に関する研究が大部分を占めており、米国海軍研究所をはじめとする軍や企業の研究所が活発に研究している。これは、TTD 型の瞬時比帯域が広く、時間的にも空間的にも鋭く局在したパルスを形成できることから高性能レーダーに適していること、光ファイバーの低損失性や波長分散などの光技術の特徴を活用してマイクロ波技術のみでは困難な高性能化を達成できること、コストやサイズに対する要求が緩いこと、などがその理由として考えられる。

次に重要なのは通信用のアンテナである。当初は通信衛星搭載用の大規模マルチビームアンテナの研究が盛んであったが、幹線系通信システムが衛星通信から光ファイバーへとシフトしたため、現在はほとんど報告がない。代わって、携帯電話の基地局に RF 信号を分配するファイバ無線 (ROF) にアンテナを組み込んだシステムの検討が増えつつある¹⁵⁻¹⁷⁾。現状では ROF に重点が置かれていて、アンテナが複数であってもセクターアンテナのように独立しており、光制御アンテナという観点からは単純な信号伝送型になる。しかし、適応制御などの高機能化にはアレイ化

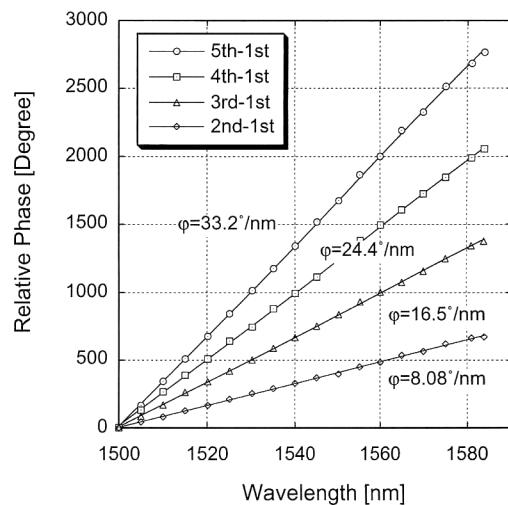


図8 波長-位相特性実験結果。

が必要となり、瞬時比帯域は狭くてもマルチバンドのビーム形成を同一の BFN で実現できる光位相制御方式が重要になろう、技術的には、安価な光集積回路技術の開発が課題になると思われる。

光制御アンテナの基本的な技術について紹介し、フーリエ光学系型の光信号処理アンテナにおける、二次元マルチビーム形成および独立偏向マルチビーム形成の実験について解説した。今後、通信用途において基礎研究から実用を目指した研究に移行するためには、性能・機能を保ったまま劇的な低コスト化が必要と考えられ、光集積回路技術などでさらなるブレークスルーが期待されている。

日頃ご指導いただき ATR 適応コミュニケーション研究

所の小宮山所長に感謝します。本研究は通信・放送機構の研究委託により実施したものである。

文 献

- 1) 電子情報通信学会編：アンテナ工学ハンドブック（オーム社，東京，1980）。
- 2) T. Ohira, Y. Suzuki, H. Ogawa and H. Kamitsuna: "Megalithic microwave signal processing for phased-array beamforming and steering," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **45** (1997) 2324-2332.
- 3) 菊間信良：アレーランテナによる適応信号処理(科学技術出版，東京，1998）。
- 4) J. J. Lee, R. Y. Loo, S. Livingston, V. I. Jones, J. B. Lewis, H.-W. Yen, G. L. Tangonan and M. Wechsberg: "Photonic wideband array antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **43** (1995) 966-982.
- 5) M. Y. Frankel and R. D. Esman: "True time-delay fiber-optic control of an ultrawideband array transmitter/receiver with multibeam capability," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **43** (1995) 2387-2395.
- 6) S. Palit, M. Jaeger, S. Granieri, A. Siahmakoun, B. Black and J. Chestnut: "5-Bit programmable binary and ternary architectures for an optical transmit/receive beamformer," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1203-1208.
- 7) R. A. Wilson, P. Sample, A. Johnstone and M. F. Lewis: "Phased array antenna beamforming using a micromachined silicon spatial light modulator," *Tech. Digest of MWP 2000* (2000) pp. 23-26.
- 8) J. Stulemeijer, R. van Dijk, F. E. van Vliet, D. H. P. Maat and M. K. Smit: "Photonic chip for steering a four element phased array antenna," *Tech. Digest of MWP 2000* (2000) pp. 20-22.
- 9) J. Payne, B. Shillue and A. Vaccari: "Photonic techniques for use on the Atacama large millimeter array," *Tech. Digest of MWP '99* (1999) pp. 105-108.
- 10) Y. Ueno, M. Katsuragi and Y. Yamamoto: "A novel two-element active antenna for varying the direction of microwave radiation by optical illumination," *Tech. Digest of MWP 2000* (2000) pp. 93-96.
- 11) K. Inagaki and Y. Karasawa: "Spatial optical signal processing beam forming network for 2-dimensional beam steering," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1209-1217.
- 12) T. Akiyama, K. Inagaki, T. Ohira and M. Hikita: "Two-dimensional optical signal-processing beamformer using multilayer polymeric optical waveguide arrays," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **49** (2001) 2055-2061.
- 13) K. Inagaki and T. Ohira: "Phase shift characteristics of an optical wavelength controlled beam forming network using birefringent waveguide," *Tech. Digest of The 3rd Japan-Korea Joint Workshop on Microwave and Millimeter-Wave Photonics* (2002) pp. 11-14.
- 14) I. Ogawa, K. Horikawa, T. Kitoh, A. Himeno and H. Ogawa: "Two-dimensional multiple beam forming using slab-waveguide implemented photonic beam forming network," *Tech. Digest of MWP '96* (1996) pp. 197-200.
- 15) C. Lim, A. Nirmalathas, D. Novak and R. Waterhouse: "Capacity analysis and the merging of a WDM ring fiber-radio backbone incorporating wavelength interleaving with a sectorized antenna interface," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1184-1190.
- 16) H. Yamamoto, K. Utsumi, M. Miyashita, M. Kurono, Y. Serizawa, Y. Shoji and H. Ogawa: "Fiber-optic sectorized remote antenna systems for millimeter-wave broadband wireless access networks," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1191-1196.
- 17) H. Ohtsuki, K. Tsukamoto and S. Komaki: "Macrodiversity effect using ROF ubiquitous antenna architecture in wireless CDMA system," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1197-1202.

(2004年2月12日受理)