

# 光・電波技術の現状と展望



小西善彦\*



宮田裕行\*\*



平野嘉仁\*\*\*

## Improvement of Electro-optics and Microwave Electronics Technology

Yoshihiko Konishi, Hiroyuki Miyata, Yoshihito Hirano

### 要 旨

電波、光を用いて通信やセンシングを行う光・電波機器は、携帯電話や無線LAN(Local Area Network), ETC (Electronic Toll Collection), FTTH(Fiber To The Home)などの普及に見られるように、日常生活に欠かせないものとなっており、日々、高度化が図られている。光・電波技術は、この光・電波機器を実現するための技術として、電波の送受信を行うアンテナ技術、電波の増幅や制御を行うマイクロ波回路技術、光の送受信と制御を行う光学センサ技術、送受信した光/電波信号の処理を行う信号処理技術、そして、光・電波機器をはじめとする電子機器すべての電磁干渉問題を扱うEMC(Electromagnetic Compatibility)技術から構成される。

この特集号では、三菱電機における光・電波技術の研究開発に関して、その現状と今後の展望について述べる。

#### (1) アンテナ技術

当社が開発を行っている小形アンテナ、アレーアンテナ、

反射鏡アンテナの現在の状況と今後の方向性を示す。

#### (2) マイクロ波回路技術

マイクロ波半導体技術の現状と、Si RFIC(Radio Frequency Integrated Circuit)及び、GaNデバイスによる小型化・高機能化・高効率化などの技術展望について示す。

#### (3) 光学センサ技術

レーザ技術や光制御技術の著しい進歩によって技術革新がなされているライダ(Light Detection And Ranging : LIDAR)技術の現状と展望を示す。

#### (4) 信号処理技術

レーダなどに代表される信号処理技術として、目標検出、及び位置情報などの取得について示す。

#### (5) EMC技術

製品のEMC性能向上と開発期間の短縮に貢献するEMC設計技術と、国際規格に基づくEMC評価技術について示す。



## 光・電波技術

アンテナ技術

信号処理技術

マイクロ波回路技術

光学センサ技術

EMC技術

### 当社における光・電波技術の取組み

電波、光を用いて通信やセンシングを行う光・電波機器は、携帯電話や無線LAN, ETC, FTTHなどの普及に見られるように、日常生活に欠かせないものとなっている。光・電波技術は、この光・電波機器を実現するための技術として、アンテナ技術、マイクロ波回路技術、光学センサ技術、信号処理技術、そして、EMC技術から構成される。光・電波機器に対する要求は、今後、ますます高度化と多様化がなされるため、光・電波技術の研究開発を継続的に推進していく必要がある。

## 1. ま え が き

電波、光を用いて通信やセンシングを行う光・電波機器は、携帯電話や無線LAN, ETC, FTTHなどの普及に見られるように、日常生活に欠かせないものとなっており、日々、高度化が図られている。光・電波技術は、この光・電波機器を実現するための技術として、電波の送受信を行うアンテナ技術、電波の増幅や制御を行うマイクロ波回路技術、光の送受信と制御を行う光学センサ技術、送受信した光／電波信号の処理を行う信号処理技術、そして、光・電波機器をはじめとする電子機器すべての電磁干渉問題を扱うEMC技術から構成される。本稿では、当社における光・電波技術開発の現状と展望について示す。

## 2. アンテナ技術

当社は、公衆通信、衛星通信、レーダなどの各種用途に対応したアンテナ開発を行ってきた。図1は、使用する周波数(波長)と、波長で正規化したアンテナ開口寸法(電波を放射する部分の寸法)を直交軸とした場合の、各アンテナ形式の対応状況を示したものである。当社が開発を行ってきた“小形アンテナ”“アレーアンテナ”“ホーンアンテナ(導波管開口アンテナ)”“反射鏡アンテナ”における使用周波数と開口寸法の関係が概観できる。

小形アンテナは、ダイポールアンテナなどの小形のアンテナを単体で使用する場合を総称したものであり、開口寸法としては約2波長以下となる<sup>(1)</sup>。また、一般に共振を用いて高感度化を行うため、広い周波数帯域での動作が難しい。

アレーアンテナは、多数の小形アンテナを素子アンテナとして配列して、一つの大きなアンテナを構成するものである。反射鏡アンテナと比べ、平面状で奥行き寸法を薄くでき、素子アンテナに給電するRF(Radio Frequency)信号の振幅と位相を変化させることで、ビームの放射方向やビーム形状を自由に制御できる<sup>(2)(3)</sup>。アレーアンテナは、小形アンテナを使用し、かつ、素子アンテナに信号を給電する電力分配回路を必要とするため、20GHz程度以下の単一周波数での使用が一般的である。また、アンテナ開口寸法が大きくなると、素子アンテナ数が増大し、かつ、電力

分配回路も複雑化して損失も増大するため、開口寸法も20波長程度が上限になっている。

ホーンアンテナは低損失であり、開口寸法が2～20波長程度のアンテナとして古くから用いられてきた<sup>(4)</sup>。後に述べる反射鏡アンテナの一次放射器としては現在も多用されるが、アレーアンテナが発達したため、20GHz程度以下の周波数で単独使用される例は、近年は、ほとんど見られない。

反射鏡アンテナの基本形は、電波を反射する反射鏡と反射鏡に電波を照射する一次放射器から構成されるため構造が単純であり、かつ、低損失、広帯域であるため、衛星搭載アンテナや衛星通信地球局、電波望遠鏡などに用いられてきた<sup>(5)</sup>。衛星放送受信アンテナなどの受信専用アンテナでは、反射鏡直径が10波長程度から使用されている。しかし、送信を必要とするアンテナ、特に衛星通信用アンテナなどでは、ほかのシステムへの電波干渉を防止するために不要放射レベルが厳しく規制されるため<sup>(6)</sup>、30～50波長程度の反射鏡直径が必要となり、小形化が難しい。

先に述べた各アンテナ形式の状況を踏まえて、各アンテナ形式の今後の展望を次に示す。図2は、各アンテナ形式の方向性(要求)を示したものである。

小形アンテナの方向性の一つは、周波数の広帯域化であり、RFID(Radio Frequency Identification)タグ(本号27ページ)などで、複数の周波数を共用するアンテナが求められている。また、小形アンテナへの要求の二つ目は、更なる小形化と高放射効率化である。これに対しては、アンテナ設置環境の影響も含めたアンテナ設計が不可欠となる。

アレーアンテナの方向性は、高周波数化、広帯域化及び大形化／低損失化である。高周波数化については、ブロードバンド通信や車載レーダなどの用途に対して、30GHz以上のミリ波帯域での使用が強く求められており、この特集号にも一部を示すとおり、各種の開発を行っている。広帯域化については、電波監視などの用途で、3倍以上の周波数帯域をカバーするアンテナが求められている<sup>(7)</sup>。大形化／低損失化は衛星搭載アンテナなどで強く求められているが<sup>(5)</sup>、給電回路の低損失化、半導体デバイス類の低コスト／低消費電力化が鍵(かぎ)である。

反射鏡アンテナは、良好な放射性能を維持しながらどこ

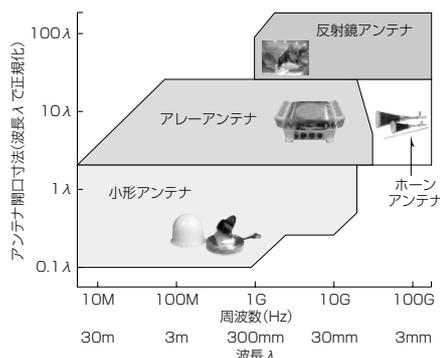


図1. 各アンテナ形式の使用周波数と開口寸法

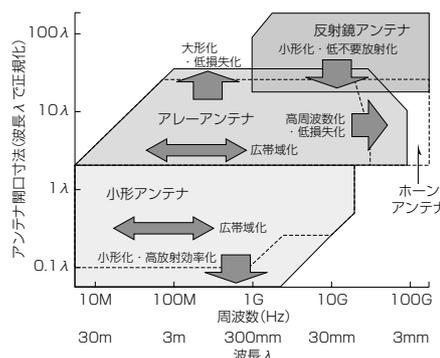


図2. 各アンテナ形式の方向性

まで小形化できるかが課題である。これに対しては、従来の幾何光学に基づく鏡面設計手法に代わる波動的手法による設計や、散乱波／回折波などの抑圧設計が重要である(本号39ページ)。

### 3. マイクロ波回路技術

マイクロ波回路は、無線通信機器やレーダなどのキーコンポーネントとして用いられ、機能、大きさ、コスト、信頼性などの装置性能を左右する重要な部品である。このため、回路理論、電磁界理論を基礎とした高周波回路開発や、要素となるアクティブ部品の開発が古くから行われている。特に、アクティブ部品である半導体デバイスの昨今の性能向上は著しく、最近のマイクロ波回路研究の中心となっている。

図3に、各種マイクロ波半導体の適用周波数範囲とその出力電力を示す。現状、マイクロ波回路における半導体材料の主流はGaAsであり、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Emission Transistor), HEMT (High Electron Mobility Transistor), HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) などの高速トランジスタが開発されている<sup>(8)</sup>。一般に、発振器、増幅器、フィルタ、スイッチなどのマイクロ波機能回路は、能動素子、受動素子のチップを、アルミナなどの誘電体基板上に構成したマイクロ波伝送路に装着して実現される。特に、携帯電話用増幅器などのように小形化が要求されるものや、ミリ波機器に用いる機能回路のように高周波化が必要なものについては、GaAs基板上に能動素子、受動素子を半導体プロセスによって集積回路化したMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) が広く用いられている(本号15ページ及び19ページ)。

一方、最近の半導体デバイスの急激な進歩に伴い、マイクロ波回路に対して二つの大きな技術革新が起こっている。これら詳細についてはこの特集号の他論文に譲るが、一つはSi RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit) による小形化・高集積化・高機能化である。Siプロセス技術の微細化によってCMOS (Complementary MOS) FETやSiGe HBTなどトランジスタの動作周波数がマイクロ波領域にまで向上しており、マイクロ波回路のSi IC化が可能になってきた。これによって、これまで複数の化合物MMICで

実現してきた機能を単一ICに集約できるとともに、デジタル回路を同時に集積した能動素子のアクティブ制御による高機能化も実現できる。当初、携帯電話など比較的低い周波数帯から導入されたこの技術も、プロセス技術の微細化に伴い最近ではミリ波帯の広帯域通信機器や自動車レーダなどへの適用も検討し始めている<sup>(9)</sup>。

二つ目は、GaAs (Eg=1.43eV) に比べバンドギャップが3.4eVと大きい化合物半導体であるGaNを用いたHEMT, HBTなどの能動素子の進展である。GaNは高い絶縁破壊電圧特性からパワートランジスタとしても注目されているが、高い飽和電子速度を持つことから高出力のマイクロ波増幅素子として有望である。従来、多数のGaAs素子を並列化して用いていた高出力増幅器の素子数を劇的に低減でき、高出力マイクロ波回路の小形化、分配損失の低減による高効率化、高インピーダンス動作による広帯域化などが図れる。GaNはすでに携帯電話基地局用増幅器や、C帯、X帯のレーダで実用化が始まっており<sup>(10)</sup>、MMIC化を含めたより高周波での実用化が次の開発ターゲットとなる。

さらに、将来に向けた新技術として、マイクロ波に比べ1,000倍以上高周波である光をマイクロ波で変調し、光領域でマイクロ波の振幅・位相の制御や低損失な伝送を行う光・マイクロ波融合技術の研究も始まっており<sup>(11)</sup>、従来のマイクロ波回路では実現が難しかった周波数に依存しない超広帯域で高性能なマイクロ波システムの開発を進めている。

### 4. 光学センサ技術

カメラに代表される光学センサ技術は、古くから研究開発が進められてきたが<sup>(12)(13)</sup>、特に昨今の安全・安心社会の構築や、環境・エコなどといったキーワードとともに注目される技術となっている。光学センサは、照明光反射や赤外放射するターゲットの像を捕らえる受動型センサと、主にレーザー光をターゲットに照射して、その反射・散乱を捕らえる能動型センサに大別できる。受動型センサで用いられる新しい反射型光学系についてこの特集号の中で述べるが(本号31ページ)、ここでは、最近のレーザー技術や光制御技術の著しい進歩によって技術革新がもたらされている能動型センサであるライダー技術<sup>(14)</sup>の現状と展望について示す。

ライダーは、レーザー光を照射し、戻ってきた光の振幅や周波数変化、往復時間から遠隔の情報を計測する装置である。計測の基本原理は、広く実用化されている電波を用いるレーダと同様であるが、光の高周波性を生かした特長ある計測が可能となる。例えば、レーザー光の高い指向性を生かし、精密ビームスキャニング機構と組み合わせ距離計測を行えば三次元画像が得られ、高精度地形マッピングや温度や日照に影響されないセキュリティセンサが実現可能である。

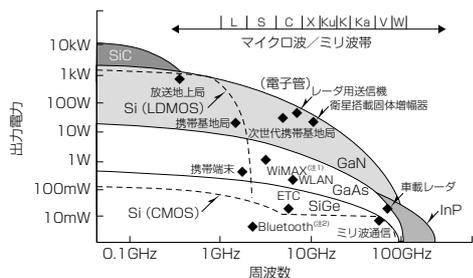


図3. 各種マイクロ波半導体の適用周波数範囲と出力電力

また、レーザ光の空気中のエアロゾルや分子に対する散乱・吸収特性を生かし、散乱光の周波数変化計測を行えば風速検出が、吸収波長における反射光量の測定を行えば温室効果ガス(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)や汚染物質などの濃度計測ができ、航空機搭載の乱気流検出センサや環境保全センサが実現できる。しかし、従来のライダーは測量用途などの簡易なものを除けば、レーザや電気回路などの性能から実験室での評価に留(とど)まっており、社会システムの中での実運用に至っているものが少なかった。これが、昨今の、光技術、電気回路技術の進展によって、目に安全な波長帯(1.5 μm帯)で高スペクトル純度を持つ高出力光源(半導体、固体、ファイバ)やコンパクトな光ファイバ部品、Siベースの高速アナログICやFPGA(Field Programmable Gate Array)に代表される高速デジタル処理回路が実現したことで実用化が見え始めている<sup>(15)</sup>。

現状の研究開発課題としては、従来、“点”で行っていた計測を二次元の“面”で高速に行うことである。これによって、三次元カメラや、乱気流やガスなど目に見えないものの動きを可視化するセンサなど、従来のカメラとは一線を画するセンサが実現できる。この実現のためには計測の並列化が必要であり、固体レーザの導波路化、アレー化による小形・高出力化<sup>(16)</sup>と、受信器の信号処理回路を含めたアレー化などが不可欠となり、開発を進めている<sup>(17)</sup>。

## 5. 信号処理技術

レーダなどに代表される信号処理技術は、古くから研究が行われているが、昨今のステルス機に代表されるように、対象とする目標のレーダ散乱断面積RCS(Radar Cross Section)が小さくなるにつれ、更なる技術革新が求められている。ここでは、レーダ信号処理の中でも、受信信号を画像化して扱う合成開口レーダSAR(Synthetic Aperture Radar)を中心にして、その現状と将来を展望する。

信号処理を大別すると、①目標検出、②位置情報などの取得、③追尾処理などに分けられるが、ここでは①と②について述べる。目標検出では、より遠方の、よりRCSの小さな目標を検出するために、信号の分解能を高めることが行われてきている。例えば、人工衛星に搭載されるSARの分解能を年代別にプロットしたものを図4に示す。1990年代には、数10mのレベルであったものが、昨今では、1mまでの分解能までに高まってきており、航空機SARの実験では、10cmの分解能までが実証されている<sup>(18)</sup>。理論的には、雲、雨などによる減衰の影響までを考えると、数cmが限界とされており、ほぼSARの分解能については、限界に近づきつつあると考えられる。現在は、高度数十Km程度の航空機からの実証であるため、高度数百Kmの衛星に搭載し実現することが課題となっている。また、衛星で収集される大量の画像データを有効活用するための技術開

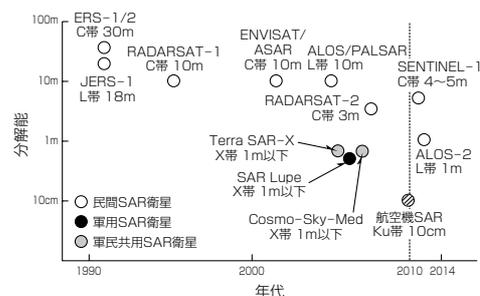


図4. SAR衛星の分解能の推移

発も今後の課題となっている(本号11ページ)。

次に、位置情報などの取得について考察する。レーダから得られる情報としては、目標の距離、速度、角度などがある。また、目標が移動している物体の場合には、先に述べたSARの技術を利用したISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)技術によって、物体のレーダ画像を得る手法もある。これらの情報の更なる精度を求めめるために、複数のアンテナを利用した分散アレーレーダなどによる高精度化を図っている。

また、レーダから電波を送信することは、ある意味では自分の居所を先方に知らせることにもなるため、自らは電波を発信せず、例えば、テレビ放送波などを利用し、パッシブレーダとして目標を測位、ISAR画像を得ることも考えられる。パッシブレーダ技術の概念そのものは古くからあり、その歴史は50年以上さかのぼることができる。しかし、アナログ放送では、放送局や中継局の数が少なかったことや、放送波の帯域幅がそれほど広くないため、十分な距離分解能が得られなかったことなどから、実用化された例は極めて少ない。ところが、大電力の電波を放射する今日の一般的なレーダと違い、パッシブレーダは自ら電波を放射しないため、省電力・省電波資源に資する技術として近年改めて注目を集めている。

近年普及の進んでいる地上デジタルテレビ放送は、その信号帯域幅が1チャンネルあたり6MHzと比較的広いこと、また、中継局が各地に配置されていることから、分解能と覆域を確保できる電波源として期待できる。さらに、複数のチャンネルの信号を合成すると、距離分解能を数mのオーダーまで上げることができるため、パッシブレーダを用いたターゲット識別の実現も期待できる。この特集号の中では、電波源として東京タワーから送信される地上デジタルテレビ放送波を用い、空港近傍を飛行する旅客機をターゲットとする測位、ISAR画像の観測について述べる(本号23ページ)。

## 6. EMC技術

近年、電子機器のデジタル化が進展すると同時に、内蔵されるデジタル回路が年々高速化されている。これらの電子機器から発生する低レベルの不要電磁波がほかの機器に



図5. EMC大型電波暗室

干渉し、例えば放送受信を妨害する等のケースがある。また、機器の小形化、高機能化によって、実装密度が高くなると同時に様々な回路が混載されることによる機器内部での内部電磁干渉も課題となっている。EMC（電磁両立性）技術は、内部電磁干渉による動作不良、ほかの機器への干渉や、ほかの機器からの干渉による誤動作などの不具合を起ささない機器を製造するための設計評価技術である。当社は、EMC技術向上の研究開発を進めている。また、国際規格ISO/IEC17025に基づき、(株)電磁環境試験所認定センター（VLAC：Voluntary EMC Laboratory Accreditation Center Inc.）から試験所認定を取得して、国際的に通用する高品質のEMC評価技術を提供するEMC試験所を運用している（図5）。2010年度から適用が開始される新規格に対しても設備登録（通信ポート伝導妨害波測定設備、1GHz超電界強度測定設備）を完了しており、電子機器がEMC規格に適合することを評価する体制を整備している。

EMC設計技術は、製品開発の上流段階で適用することによって、製品のEMC性能向上と開発期間の短縮に貢献している。特に、近年の電磁界解析技術や高周波回路解析技術の向上に伴い、これらの解析技術をEMC設計に適用する試みが広く行われている。EMCの問題は、発生すると複雑な現象として観測されることが多いが、これは多くのノイズ源や干渉経路が存在することにも要因がある。しかし、個々の現象を整理して考えると、EMCの問題は、電磁ノイズの発生源、ノイズによって被害を受ける回路、発生源と被害回路との干渉経路の三要素に帰着し、これらについて定量的な検討を設計段階で実施することが重要である。当社では、EMC設計評価を実施する上で特に重要な、電源ラインフィルタ設計法の検討、プリント基板の電源プレーン共振についての検討、平衡度とコモンモード電流についての検討、シールド効果についての電磁界解析、新規格に対応した評価法の開発などのテーマについて研究開発を実施してきた。これらの研究成果は、学会活動などを通してその有効性を示している。これらのEMC設計技術を基に、EMC設計指針を作成し、製品開発過程で適用することによって、高品質なEMC性能を持つ電子機器の製品化に貢献している。

## 7. む す び

当社における光・電波技術開発の取組みについて述べた。光・電波機器に対する要求は、今後、ますます高度化と多

様化がなされるものと考えられ、光・電波技術の研究開発を継続的に推進していく必要がある。

## 参 考 文 献

- (1) Konishi, Y., et al : L-band Vehicle Antennas for Mobile Satellite Communication Systems, Intl. Workshop on Multi-dimensional Mobile Communications (MDMC'94), No.8-5, 163~166 (1994)
- (2) 大塚昌孝, ほか : Ku帯衛星通信可搬端末用平面アンテナ, 電子情報通信学会技術研究報告, SAT97-102 (1997)
- (3) Kuバンド移動体衛星通信用アンテナ, Space Japan Review, No.58 (2008)
- (4) 近藤五郎, ほか : インテルサットV 6/4GHz帯直交偏波共用ホーンアンテナ, 三菱電機技報, 55, No.12, 825~828 (1981)
- (5) 針生健一, ほか : 衛星通信ミッション技術, 三菱電機技報, 83, No.3, 211~214 (2009)
- (6) Recommendation ITU-R S.728-1 : Maximum Permissible Level of Off-Axis e.i.r.p. Density from Very Small Aperture Terminals (VSATs) (1995)
- (7) Yamaguchi, S., et al : Ultra-Wideband Tapered Slot Antenna Arrays with Parallel-Plate Waveguides, IEICE Trans. Commun., E93-B, No.5 (2010)
- (8) 高山洋一郎 : マイクロ波トランジスタ, 電子情報通信学会 (1998)
- (9) Forster, H.P., et al : A 77GHz 4-channel automotive radar transceiver in SiGe, IEEE RFIC Symp., 233~236 (2008)
- (10) 三菱電機ニュースリリース, <http://www.Mitsubishi-Electric.co.jp/news-data/2010/pdf/0225.pdf> (2010)
- (11) Yao, J. : Microwave Photonics, J. Lightw. Technol., Vol. 27, No. 3 (2009)
- (12) Campana, S.B. : The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, 5, SPIE Press (1996)
- (13) Fox, C.S. : The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, 6, SPIE Press (1996)
- (14) Weitkamp, C. : Lidar, Springer (2005)
- (15) 平野嘉仁, ほか : 光ファイバーレーザーの環境遠隔計測分野への応用, O plus E 27.1274 (2006)
- (16) 平野嘉仁 : 超小型波長変換緑色レーザーとレーザーTV, 応用物理, 78, 1039 (2009)
- (17) 亀山俊平, ほか : リアルタイムレーザ3Dイメージャ, 光技術コンタクト, 48, 21 (2010)
- (18) 長谷川秀樹, ほか : 10cm級分解能合成開口レーダ装置の開発及び画像取得結果, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2008-10 (2008)