

巻頭論文

光電波・通信技術の現状と展望



大塚昌孝\*



小崎成治\*\*



平 明德\*

Present and Prospect of Electro-optics Microwave and Communication Technologies

Masataka Otsuka, Seiji Kozaki, Akinori Taira

要 旨

移動通信，衛星通信，無線LAN，FTTH(Fiber To The Home)，車載情報機器，情報家電，各種レーダ／光センサ等，通信とセンシングはIoT(Internet of Things)社会を支える根幹である。三菱電機は両者でシステムから末端のハードウェアまでを幅広くカバーする光電波・通信技術を持ち，多数の事業に展開している。

当社の光電波・通信技術は六つに分類でき，それぞれが他の新しい技術や視点を巻き込みながら発展を続けている。最近の主なテーマは次のとおりである。

(1) センサ信号処理技術

センシングシステムのコスト低減と品質向上を図るシステム構成の工夫や耐不要信号ロバスト性向上

(2) 通信技術

第5世代移動通信システムや無線LAN，衛星通信などの無線通信の大容量化や光通信の高速・高効率化とフレキシビリティ向上

(3) アンテナ技術

アンテナ・電波伝搬での電磁界理論と他分野技術の融合

(4) マイクロ波回路技術

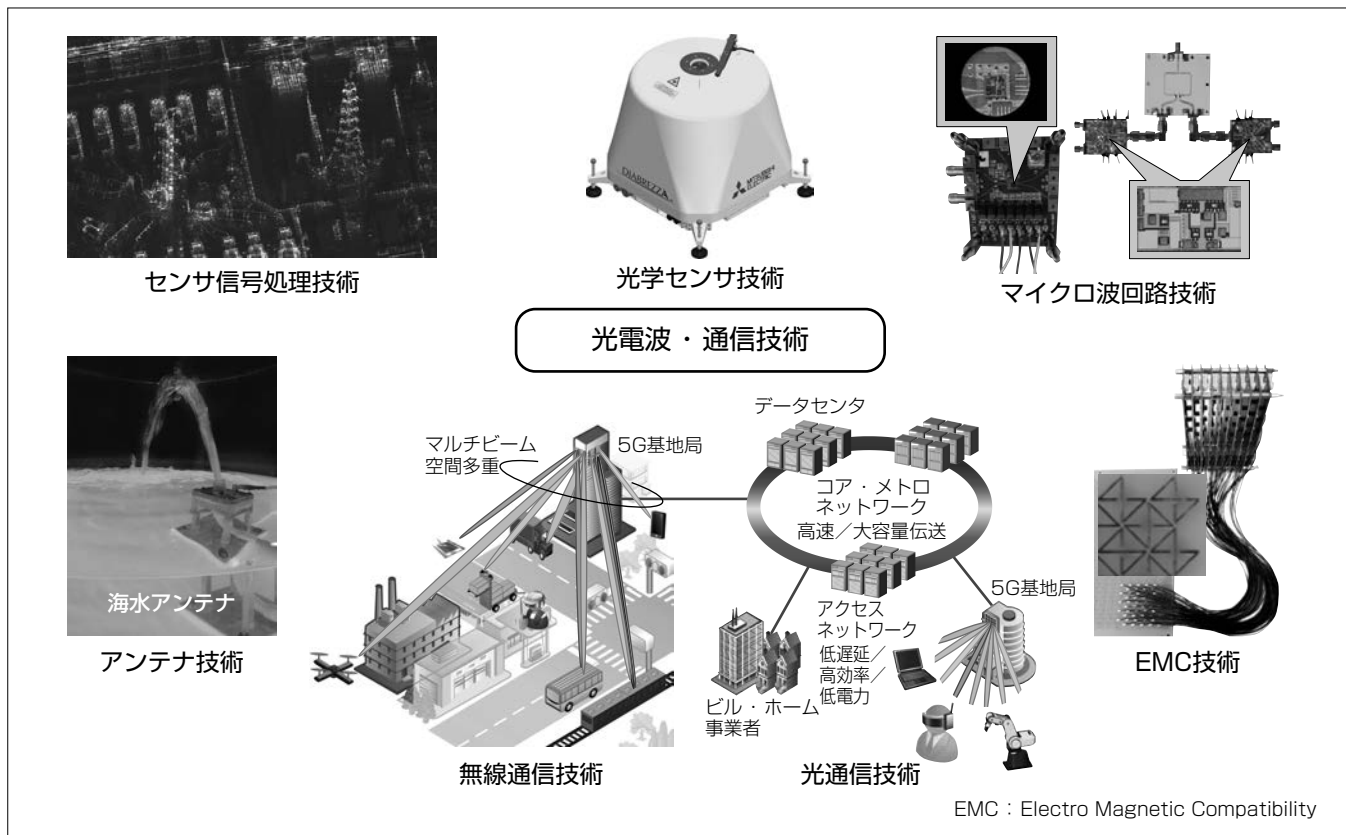
GaN(窒化ガリウム)・Si(シリコン)デバイスの進化への対応やアナログ回路とデジタル信号処理の融合

(5) 光学センサ技術

三次元イメージングや風・ガス計測等に用いる光学センサの高性能・小型・高信頼化

(6) EMC技術

製品品質確保と開発効率化の更なる向上



当社での光電波・通信技術の取組み

通信とセンシングはIoT社会を支える根幹であり，当社は両者に対してシステムから末端のハードウェアまでを幅広くカバーする光電波・通信技術を持ち，多数の事業に展開している。光電波・通信技術はセンサ信号処理，通信(無線通信，光通信)，アンテナ，マイクロ波回路，光学センサ，EMC技術から構成される。通信とセンシングへの要求は今後もますます高度・多様化するため，光電波・通信技術の継続的な研究開発が必要である。

## 1. ま え が き

移動通信、衛星通信、無線LAN、FTTH、車載情報機器、情報家電、各種レーダ・光センサ等、通信とセンシングはIoT社会を支える根幹である。当社は両者でシステムから末端ハードウェアまで幅広くカバーする光電波・通信技術を持ち、多数の事業に展開している。

本稿では光電波・通信技術を構成するセンサ信号処理、通信(無線、光)、アンテナ、マイクロ波回路、光学センサ、EMCの各技術について現状と今後の展望を述べる。

## 2. センサ信号処理技術

近年、センシング応用は民間にも広く普及し、特に最近は防災用途での活用が目立っている。例として地表面の状況把握、法面(のりめん)の地すべり予兆検知、津波検出等があり、これらのセンシングシステムでは技術発展による状況把握能力及び予兆検知確度の更なる向上が期待されている。

センサ信号処理はこれらシステムの性能、品質、コストに大きく影響する重要技術である。観測値の分解能・精度向上による高性能化を始めとして、必要情報を得る最小限のシステム構成に向けた工夫(低コスト化)、ノイズや観測対象外からの信号に対するロバスト性向上(品質向上)も盛んに研究されてきた。また近年では収集データ量の膨大化に伴い効率的なデータ処理が課題になりつつある。

従来のセンシングシステムは目標の高分解能・高精度観測に大開口レーダなど高コストなセンサを用いていたが、システム構成でコスト低減する工夫が実用化されつつある。その一例である合成開口レーダでは、衛星や航空機等の移動体にレーダを搭載し、複数観測地点での信号を合成することで実際のアンテナ開口以上の大開口を等価的に実現し、高分解能を実現している。また、安価な小型センサの複数設置によって得られた信号を融合して高精度な目標観測を行うマルチセンサも研究されており、航空管制のマルチラレーションで実現されている。

センサ信号処理のロバスト性向上としては信号強度の弱い目標の検出や不確定性のある観測結果から正解を検出する工夫が挙げられる。前者の例として移動微小目標検出がある。信号強度が弱い微小目標は観測時間を長く取る必要があるが、観測時間中も移動するためこの影響の補償が必要である。このため移動目標の観測値の時系列をつなぐ追尾技術を信号処理に応用し、目標信号の軌道を追跡しながら信号を積み上げる長時間積分技術が研究されている。また後者の例では追尾技術応用の信号処理として、時系列連続性を基に不確定性のある信号から正解を特定したり、紛れ込んだ信号異常値を除去する方式も検討されている。

ハードウェアの高機能化に伴って膨大化したデータを効率的に処理するアルゴリズムの実現も大きな課題の一つで

ある。例えばレーダの高分解能化で増大したデータの処理として圧縮センシングが挙げられる。圧縮センシングは観測対象データが疎であることを利用してサンプリング定理に基づく理論限界よりも少ない観測値で対象を推定するアルゴリズムであり、工学だけでなく医学等の大量のデータを扱う様々な分野での応用が期待されている。

この特集号ではこれら技術の応用例として合成開口レーダ技術でのデータ処理効率化と変位計測技術での小型センサネットワークによる信号処理について述べる(本号12、8ページ)。

## 3. 通 信 技 術

### 3.1 無線通信技術

無線通信技術は、発展著しい携帯電話システムを初めとして無線LANや電子タグなど幅広い分野で展開が進められている。近年では携帯電話・スマートフォンの爆発的な普及が進み、ほぼ全ての人が音声・映像をやり取りできる環境が整った。今後は既存アプリケーションの高速化・大容量化・常時利用(可用性向上)とともに、人を介さない機器間通信アプリケーションが増加すると考えられる。自動運転やコネクテッドカー、無線式列車制御、生産システム・社会インフラを効率化するサイバーフィジカルシステムなどが新たなアプリケーションとして挙げられる。

大容量移動通信については、2020年のサービスインを目指して第5世代移動通信システム(5G)の標準化が進められている。国際電気通信連合の無線通信部門によれば従来の第4世代に比べてピーク伝送速度が1 Gbpsから20Gbpsへ20倍、ユーザーデータレートで10Mbpsから100Mbpsへ10倍の高速化が要求されている<sup>(1)</sup>。この高速化は単位通信エリア(セル)の小型化、新たな高い周波数帯の活用、マルチビーム空間多重の活用などによって実現される。特に総務省で5Gへの周波数割当ての検討が進められている28GHz帯は従来のマイクロ波帯に比べて波長が短く、アンテナ素子が小型化できる。アンテナ技術・高周波素子集積技術・高速信号処理技術を組み合わせ、図1に示すような多素子からなる大規模アレーアンテナを用いた

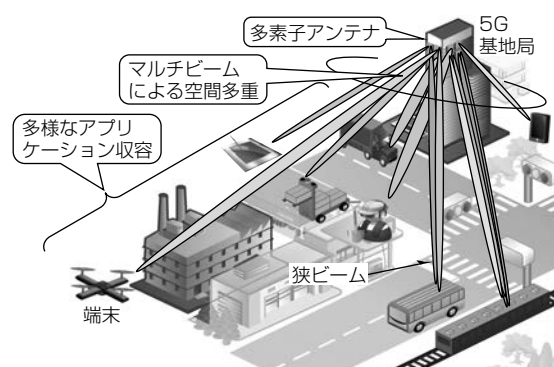


図1. マルチビームを用いた空間多重システム

マルチビーム空間多重の実現が期待されている。さらに5Gでは機器間通信アプリケーションを想定して遅延時間1ミリ秒以下となる高信頼低遅延伝送、1km<sup>2</sup>当たり100万デバイスを超える多接続機能などが実現される見込みである。当社では数百を超える超多素子アンテナを用いた16マルチビーム空間多重・制御技術の開発を進めている。また総務省委託の“第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発”を進めており、20Gbpsを超える空間多重伝送の実証を行う予定である(本号24ページ)。

家庭・オフィスに加えて公衆環境でも普及が進む無線LANも高度化が継続されている。現状、IEEE802.11の無線LAN規格には6GHz以下のマイクロ波帯を用いる11ac/11axと、60GHz帯などミリ波帯を用いる11ad/11ayの大きく二つの流れが存在する。11ac/11axでは空間多重機能の強化、変調多値数の増大による速度改善に加えて無線LANの欠点である稠密(ちゆうみつ)環境でのスループット劣化を抑え、実効データレートを改善する仕組みが取り入れられる見込みである。高速な見通し通信を提供する11ad/11ayでも同様に4ストリームMIMO(Multiple Input Multiple Output)の導入と、変調多値数の増大、伝送帯域幅の拡大によって、100Gbpsを超える高速伝送と100mを超える長距離化が期待される。

衛星通信では観測衛星の高精度化、通信衛星のビットコスト低減に向けて大容量化とフレキシビリティの向上が求められている。Ka帯やQ帯といった新しい周波数帯の開発とともに、天候や衛星仰角で大きく変動する伝搬減衰に対応する適応伝送方式、災害時など局所的なトラフィック変動に柔軟に対応できるチャネライザ・動的周波数割当て方式の検討が進められている(本号20ページ)。

IoT社会の基盤として、広域から大量のデータを収集するLPWA(Low Power Wide Area)と呼ばれる通信方式が注目されている。大規模なセンサネットワーク構築を目的としており、SIGFOX<sup>(注1)</sup>、LoRa<sup>(注2)</sup>、WiSUN<sup>(注3)</sup>(IEEE802.15.4g)などが挙げられる。いずれも数kmの長距離伝送、耐干渉性、数年の電池駆動に堪える超低消費電力、低コスト端末が特長で、今後情報収集時間の更なる短縮、マルチホップによる利用環境の拡大などが予想される。この他、信号機を省略して無線で列車の速度制御を行う無線式列車制御(CBTC: Communication Based Train Control)も実用化が始まっており、高信頼・低遅延伝送技術の高度化とともに幅広いアプリケーションへの無線適用が進むものと期待される。

(注1) SIGFOXは、SIGFOX S.A.の登録商標である。  
 (注2) LoRaは、Semtech Corp.の登録商標である。  
 (注3) Wi-SUNは、Wi-SUN Allianceの登録商標である。

### 3.2 光通信技術

光通信技術はFTTH等の光回線サービスの加入者を収容するアクセスネットワーク、県内・県間を結ぶメトロネットワーク、さらには国内主要拠点間接続や国際通信を実現するコアネットワーク等、様々なエリアの光通信ネットワーク(図2)に適用されているが、近年では社会全体でのネットワーク利用形態の変化<sup>(2)</sup>から適用分野が更に広がり、性能・機能の向上が求められている。

近年のニーズの一つ目として、携帯電話等モバイル端末の普及や動画コンテンツの流通、ネットワーク接続機器増大に伴う高速・大容量化がある。これに対しコア・メトロネットワーク向けでは、複数のファイバコアを同一の光ファイバで多重伝送する空間多重光伝送技術、信号多値化に加え偏波・時間方向の複数の軸にまたがって情報を割り当てる方式や、伝送信号の電力が正規分布に従うように情報を割り当てる方式を用いる多次元変復調技術が、長距離化を含めた課題解決技術として注目されている。また稠密な波長多重と高い変調多値度を実現するため光源の光波長高安定化やスペクトル幅狭窄(きょうさく)を行う高精度光源技術等も開発されている。さらに送信情報に冗長な情報を付加して伝送中に発生する誤りを受信側で検出・訂正する誤り訂正技術では、100Gbpsの信号に対して理論限界に迫る符号化利得12dBを実現する技術が開発されており、最先端半導体プロセスを用いた光通信用の超高速デジタル信号処理LSIによって100Gbps当たり10Wの低電力化を実現している。

アクセスネットワーク向けでは携帯電話等の単位通信エリア(セル)の小型・多数化、及び通信速度高速化に対応するため、複数チャネルを同時使用して従来の4倍以上の広帯域化を実現する超広帯域伝送技術、FTTH技術を適用して高速・高精度な制御によって効率的に高密度配置の基地局を収容する光無線統合アクセス技術、光・電気部品の集積化で単位体積当たりの伝送速度向上と低消費電力化を実現する光トランシーバ設計技術等が開発されている。

近年のニーズの二つ目として、通信サービス以外の様々

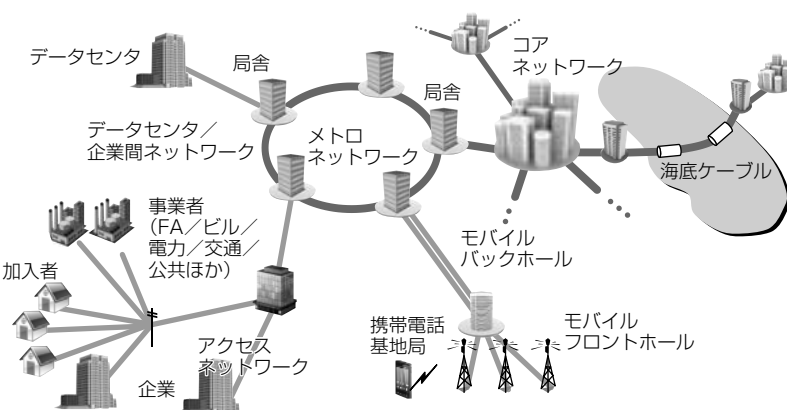


図2. 光通信ネットワークの全体構成

な事業分野でネットワークを利用・活用するため、通信システムの柔軟性・高可用性・多様性が求められている。またB2B2X(Business to Business to X)と呼ばれる、企業(B)が他企業(B)のサービス基盤を活用してユーザー(X)に新たな価値を付加したサービスを提供する事業モデルが注目されている。これに対し様々な利用者にとって効率的かつ迅速に利用可能なサービス基盤を実現するため、ネットワーク要件を抽象化して共通的かつ簡易なインタフェースを提供しつつ柔軟に性能・機能を構築するネットワーク仮想化・ソフトウェア化技術の開発が盛んに行われており、またユーザーデータを守りつつ低コストにサービス基盤管理を実現するためのAI(Artificial Intelligence)適用技術、ネットワーク機能のモジュール化・プラットフォーム化技術、セキュリティ技術等が注目されている。

当社ではこれらの全技術に取り組んでおり、特にIoT時代のトラフィック急増に対応する多次元変復調技術、適応リンクレート処理を適用した誤り訂正技術(本号37, 32ページ)、基地局収容向けに低遅延化を実現する光無線統合アクセス技術等の開発を進めている。

#### 4. アンテナ技術

当社のアンテナ技術は移動通信、衛星通信、レーダ、各種無線通信機器(車載情報機器、スマートメータ、スマート家電等)に幅広く展開されている。品種の多さと近年の無線システムの発展でアンテナは高周波化、広帯域・マルチバンド化、低損失化、指向性・偏波制御の高精度化など更なる電気性能向上が求められ、また装置筐体(きょうたい)との一体化、製造・環境に対するロバスト性、材料・製造法革新への対応など信頼性とコスト低減にかかわる課題も重要になっている。一方これら従来の競争軸に加え、今までとは異なる製品・サービスの創出に向けたアンテナ技術応用も模索している。アンテナ技術の根本である電磁界理論と他分野の技術を融合させることで新たな価値を生み出す動きについて述べる(図3)。

衛星通信等に利用される開口面アンテナではアンテナ構造物による電波散乱影響評価のため幾何(きか)光学的回折理論による高精度な電磁界解析法を確立した。この技術は

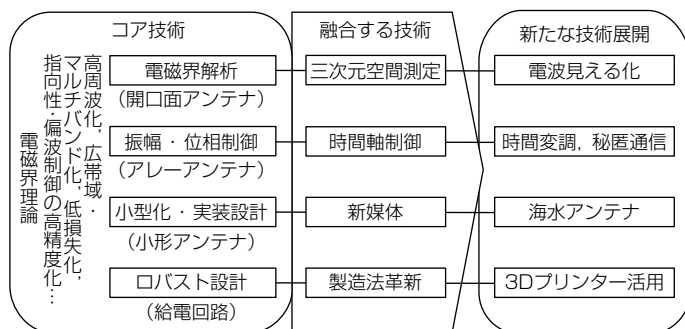


図3. アンテナ技術の新たな展開

周囲構造物の影響を含む電波伝搬解析にも応用されている。近年の市街地構造の電子地図化と計算機能力の向上によって数kmの範囲を10dB以内の精度で電波強度を推定できる。室内伝搬では三次元空間測定装置と当社開発の統計モデル<sup>(3)</sup>の融合で、室内マッピング後に数分から数秒で4dB以内の精度で計算でき、“電波見える化技術”による無線機器設置提案ツールとしての活用を目指している。

レーダや移動体衛星通信に用いるアレーアンテナでは多数の素子アンテナ間の結合を含めた正確な解析・設計法や所望放射特性を実現する振幅・位相制御法を開発してきた。空間・周波数特性が主要評価対象であるが近年は時間を含めた活用で新技術を開発している。レーダでは送信ビーム形状を時間変化させて効率良く不要波を抑圧して正確に目標把握する“時間変調アレー”技術を開発した。通信では所望信号ビームに干渉信号ビームを重畳してビームを時間変化させ、限られた方向だけで解読可能な通信を行う“秘匿通信アレー”を開発した(本号28ページ)。

寸法が電波の波長以下のものは小形アンテナと呼ばれ、無線LAN、無線タグなどの小型端末に使用される。周囲の装置、回路による電氣的な結合影響が大きい中で安定した性能を確保しつつ複数機能を実現する小型化・実装設計が課題である。本来アンテナではない構造部分も活用して小型・低コストなアンテナを実現してきた。その顕著な発展例として伝導性を持つ海水を噴水状に噴き上げてアンテナとする“シーエアリアル”<sup>(4)</sup>を開発した。ポンプと給電ノズルからなるためアンテナ線展張の必要がなく、海岸線や船に設置して必要なときだけ動作させるコンパクトな無線装置としての活用が期待される。

給電回路はこれら全てのアンテナと無線装置を結ぶ重要なコンポーネントであり、用途ごとに様々な性能と構造制限が要求される。近年の3Dプリンター技術の発展で従来では製造できない複雑な構造の提案が可能になる。ただし3Dプリンターはまだ製造精度に限界があり、ロバスト設計技術の開発を進めている(本号45ページ)。

#### 5. 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機器のキーコンポーネントであり、高性能化に加え、低消費電力化、低コスト化が求められている。近年、マイクロ波回路を用いる半導体デバイスでのGaNデバイスの登場やSiデバイスのマイクロ波帯への適用拡大に伴う技術開発、さらにはデジタル信号処理回路の高速化に伴うアナログ回路とデジタル信号処理の融合の技術開発が行われている。

図4にアクティブ回路に注目したマイクロ波送受信機のブロック図を示す。従来のGaAs(ガリウムヒ素)デバイスに加えて、GaNデバイスやSiデバイスの実用化が進んでいる。GaNデバイスは高出力・高効率な特

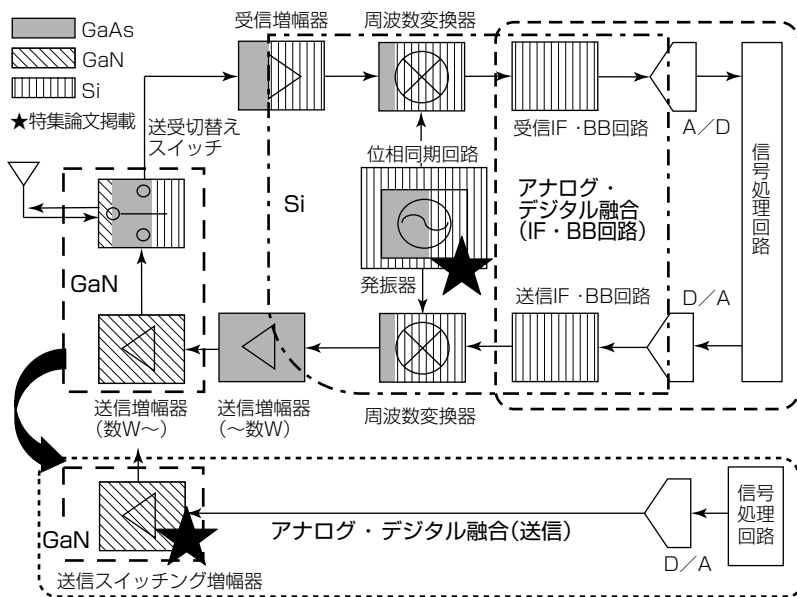


図4. マイクロ波送受信機のブロック図

性によって、まず、レーダ用途の送信増幅器で実用化され、続いて、低歪(ひず)み化技術の開発によって無線通信用途で実用化されている。Siデバイスはプロセスの微細化によって遮断周波数が300GHz以上に及び、集積化によるコストメリットと相まってマイクロ波帯からミリ波帯まで適用されている。特に高出力や低雑音な特性が必要な回路を除いて、様々な機能回路が1チップに集積化されている。近年では、第5世代移動通信システムや車載レーダ等の新たな用途に向けた開発、多チャンネル回路を1チップに集積化する開発<sup>5)</sup>、集積可能な機能回路の範囲を広げる増幅器の高出力化や発振器の低位相雑音化(本号49ページ)等、個別回路の高性能化開発が行われている。

アナログ回路とデジタル信号処理の融合技術では、アナログデジタル(A/D)、デジタルアナログ(D/A)コンバータの高速化によってマイクロ波回路とデジタル回路の境界の中間周波数(IF)・ベースバンド(BB)回路をデジタル回路で小型化する開発が行われている。送信回路では、送信増幅器の低歪み・高効率化のために、デジタル信号処理で歪み補償するデジタルプリディストーション・エンベロープトラッキング技術が携帯基地局・端末用途で実用化され、変調帯域やマイクロ波帯の広帯域化が課題となっている<sup>6)</sup>。さらに、マイクロ波信号をデジタル回路で生成して高効率スイッチング増幅器で増幅するデジタル送信機の研究開発が始まっている(本号41ページ)。

### 6. 光学センサ技術

光学センサは、太陽光の反射や赤外放射する対象物の像を捕らえる受動型センサと主にレーザー光を対象物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。その中で近年、安心・安全な社会、循環型社会の構築

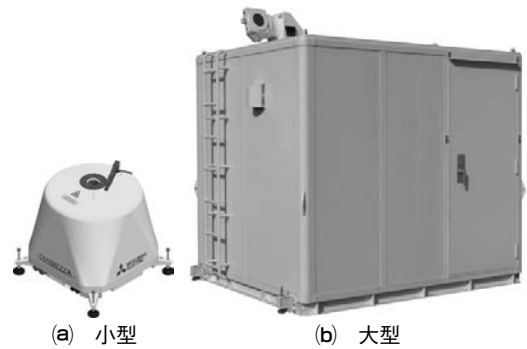


図5. 風計測ライダー

に向け、能動型センサであるライダーの利用が加速している。ライダーは、レーザー光を照射し戻ってきた光の往復時間、周波数変化や振幅から遠隔の情報計測する装置である。当社は、人の目に対して最も安全な波長1.5μm帯のレーザー光を活用し、三次元イメージングや風・ガス計測用のライダー開発を継続している。

三次元イメージングに関しては、交通監視向けとして独自の高速イメージング方式を開発し、高速走行する車両をぶれなく撮像することを可能にした。この技術を用いることで、高速道路の自動料金支払システムでの車種判別の高度化を進めている<sup>7)</sup>。また、この技術はセキュリティや測量等、幅広い分野への展開が可能である。

風計測では、高い信頼性と小型化へのニーズに応えるため、光ファイバ部品をベースとした小型風計測ライダー(図5(a))を開発し<sup>8)</sup>、風力発電等で実用化している。また、長距離計測が求められる航空安全用途では、世界最高出力<sup>(注4)</sup>のレーザー増幅器を開発し、半径30km以上の広範囲にわたる風計測に成功した。この技術を用いた大型風計測ライダー(図5(b))で空港周辺の乱気流監視が可能になり、国内外の主要空港で導入が進んでいる。またこれらレーザー増幅器を用いたライダーを航空機に搭載して前方の乱気流を検出し、巡航時の安全に役立てる取組みも進んでいる。最近更なる小型・軽量化による普及に向け、ライダー用の新しい光変調技術も開発している(本号16ページ)。

ガス計測に関し、約5年前までは衛星からの温室効果ガス(二酸化炭素等)の地球規模観測向けとして開発を始めていた。これに対し最近、頻発する豪雨災害を背景に、豪雨の予兆である積乱雲発生前の水蒸気濃度の上昇を検出するニーズが高まっている。このニーズを満たすには広範囲かつ高精度な計測が必要であり、ガス計測ライダーでこの実現に必要な光送受信技術(複数レーザー波長送受信・増幅技術、波長安定化技術)を開発した。kmオーダーの範囲で水蒸気濃度の空間分布を計測できることを実証しており、計測距離の延伸化と計測精度の実証を進めることで、早期豪雨予測への貢献が期待できる。

(注4) 2015年2月17日現在、当社調べ

## 7. EMC技術

EMC(電磁両立性)技術は、製品から発生する不要電磁ノイズ(エミッション)が他機器に影響しないように低下させ、外来電磁ノイズで誤動作を起こさないように耐性(イミュニティ)を持たせ、さらに機器内部の電磁干渉による誤動作が起きないようにする技術である。これによって、電気・電子機器に必要な基本性能と品質を確保する。

当社では、家電から宇宙機器まで、構成や大きさ、電力レベル、使用環境、適用EMC規格などが大きく異なる幅広い分野の製品を扱っており、それぞれに対してEMC性能を確保した製品開発を行っている。一方、製品の高性能化や小型・高密度実装化、高電圧高速スイッチングを行う電力系装置の普及に伴う発生ノイズのレベル増加や高周波化、外来ノイズ耐性の低下、機器内電磁干渉の増加など、EMC問題の顕在化はとどまらない。今後、IoTの普及によって、様々なセンサや機器がネットワークで接続されたシステムが構築される状況では、より複雑な電磁環境下での高い信頼性が要求され、EMCに関する課題は更に増加すると予想される。このように複雑化する課題に対し、EMC品質を確保する製品開発を効率的に進めるため、EMC要素技術の開発を行うとともに、設計結果の検証や製品のEMC性能評価を行うためのEMC評価解析技術の開発を推進し、事業を支えている。

当社のEMC技術は研究開発を基盤にしていることが特徴である。これは多種事業分野にわたる製品のEMC性能を継続して満たすために、最も効率的であるとの観点による。計測技術、ノイズ抑制法、評価方法など多くの技術開発を行い、学会発表によって有効性を示してきた。最近では静電気放電による誤動作対策に対応するため、エリア内の電磁界変動を短時間で同時計測する技術<sup>(9)</sup>がある。図6に、関連する過渡ノイズ可視化計測装置を示す。また、ノイズバイパス素子としてのコンデンサ回路の性能限界を向上させる技術<sup>(10)</sup>、差動信号線路の平衡度分析によって部品接続の実装

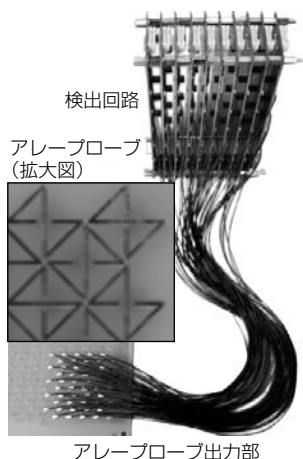


図6. 過渡ノイズ可視化計測装置

自由度を高める技術、特定周波数帯だけの遮蔽特性を持つ非接触型シールド接合技術(本号53ページ)等が挙げられる。

## 8. む す び

光電波・通信技術の動向と当社の取組みについて述べた。通信、センシングに対する要求は今後ますます高度化、多様化すると予想されるため、他分野の新しい技術、視点を巻き込みながら光電波・通信技術の研究開発を継続的に推進する必要がある。

## 参 考 文 献

- (1) Recommendation ITU-R M.2083-0 : IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (2015)
- (2) 総務省, 情報通信白書 概要 (2017)
- (3) 橋本貴博, ほか: 幾何光学的な空間分類を用いた屋内電波伝搬損失の統計モデル, 電子情報通信学会和文論文誌B, **J99-B**, No.9, 684~692 (2016)
- (4) Akimoto, S., et al., : Demonstration of a Highly Efficient Seawater Antenna, IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 55~58 (2016)
- (5) Tsutsumi, K., et al., : A 15GHz 4-channel transmit/receive RF core-chip for high SHF wide-band massive MIMO in 5G, IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 115~117 (2017)
- (6) Sakata, S., et al., : An 80MHz modulation bandwidth high efficiency multi-band envelope-tracking power amplifier using GaN single-phase buck-converter, IEEE Int. Microwave Symposium, 1854~1857 (2017)
- (7) Imaki, M., et al. : Line scanning time-of-flight laser sensor for intelligent transport systems, combining wide field-of-view optics of 30 deg, high scanning speed of 0.9 ms/line, and simple sensor configuration, SPIE Optical Engineering, **56**, No. 3, 031205 (2017)
- (8) Kameyama, S., et al. : Compact all-fiber pulsed coherent Doppler Radar system for wind sensing, Applied Optics, **46**, No. 11, 1953~1962 (2007)
- (9) 小林遼太, ほか: 近傍磁界測定用プローブの構造検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-4-17 (2015)
- (10) 小林玲仁, ほか: 両側磁気結合を用いたノイズフィルタの設計方針, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-4-30 (2017)