



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



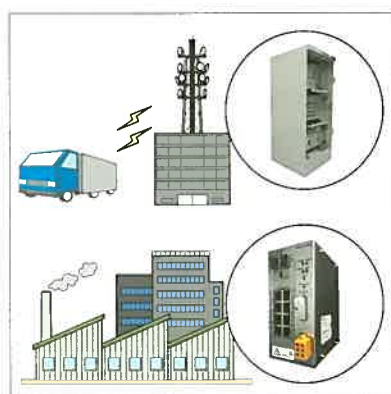
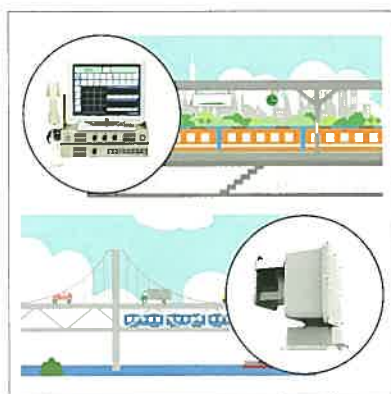
三菱電機技報

6

2016

Vol.90 No.6

社会を支える通信技術



目 次

特集「社会を支える通信技術」

通信技術と社会の密接な関係…………… **巻頭言** 1
本多孝司

社会を支える通信技術の動向と展望…………… **巻頭論文** 2
山田直志

88波×8方路 光クロスコネクトシステム …………… 7
山崎 創・濱田芳彰・高山・宇藤健一

スマートメータ用通信ユニットの小形ダイバーシチアンテナ ……12
西本研悟・林 大祐・田中豊久・秋元晋平・柳 崇

CATV事業者向け無線LANルータ内蔵ONU……………17
野田敬寛・中江 伸・大塚 博

第5世代移動通信システム向け無線アクセス基地局技術…………22
友江直仁・平 明徳・谷口英司・山口 聡

大手私鉄向け150MHz帯空周波デジタル列車無線システム ……27
杉浦哲広・延澤 大・手嶋牧子

MCAシステムの接続回線IP化対応 ……………32
永野好昭・山本正幸・西出和弘・三井茂太

広域監視ネットワーク向けHD・IP複合一体型カメラ ……37
笠井康行・岸田教敬・沖西佳雄

CC-Link IEフィールドネットワーク対応インテリジェントHUB ……42
中安俊行・笠原三郎・酒井謙行・川手竜介・谷口幸子

一般論文

100Gbps超級光コア・メトロネットワーク向け誤り訂正技術 ……47
杉原堅也・宮田好邦・久保和夫・松本 渉・杉原隆嗣

1 Tbps光送受信技術 ……………51
キーラン パーソンズ・デヴィッド ミラー・
ミルティン バヨヴィッチ・小池俊昭・小島啓介

Communication Technologies that Support Society

Good Relationship of Communication Technologies and Society
Takashi Honda

Trend and Future Scope of Communication Technologies for Society
Naoshi Yamada

88-Wavelengths and 8-degrees Optical Cross Connect Systems
Hajime Yamasaki, Yoshiaki Hamada, Shan Gao, Kenichi Uto

Small Diversity Antennas for Transceivers in Smart Meters
Kengo Nishimoto, Daisuke Hayashi, Toyohisa Tanaka, Shimpei Akimoto, Takashi Yanagi

ONU with Built-in Wireless LAN Router for CATV Operators
Takahiro Noda, Shin Nakae, Hiroshi Otsuka

Radio Access Base Station Technologies for 5th Generation Mobile Communication System
Naohito Tomoe, Akinori Taira, Eiji Taniguchi, Satoshi Yamaguchi

150MHz Band Digital Train Radio System for Major Private Railway
Tetsuhiro Sugiura, Masaru Nobesawa, Makiko Teshima

IP Line Implementation in MCA System
Yoshiaki Nagano, Masayuki Yamamoto, Kazuhiro Nishide, Mota Mitsui

PTZ Camera with HD and IP for Wide Area Surveillance System
Yasuyuki Kasai, Yukinori Kishida, Yoshio Okinishi

Intelligent HUB Applicable for CC-Link IE Field Network
Toshiyuki Nakayasu, Saburo Kasahara, Kaneyuki Sakai, Ryusuke Kawate, Sachiko Taniguchi

Error Correction Technologies for Optical Transmission beyond 100Gbps
Kenya Sugihara, Yoshikuni Miyata, Kazuo Kubo, Wataru Matsumoto, Takashi Sugihara

Detection of a 1Tbps Superchannel with a Single Optical Receiver
Kieran Parsons, David S. Millar, Milutin Pajovic, Toshitaki Koike, Keisuke Kojima

特許と新案

「光伝送システム、光伝送方法及び送信装置」……………55

「中継装置および無線通信システム」……………56

スポットライト

クラウドPBX対応三菱通信ゲートウェイ smartstarの販売開始



表紙：見えないところで社会を支える通信技術

家庭やオフィスへの情報の伝達はもちろんのこと、安全な鉄道の運行、高速道路の監視、円滑な貨物や人の移動、工場の生産に至るまで、通信技術はあらゆる場所で社会を支えるために活用されている。

今回の特集号では、24時間365日休むことなく稼働している通信装置に脚光を当て、これに適用される技術を紹介する。表紙では、一般の方には目の触れないところで活躍している通信装置の設置場所や用途を表現した。

巻/頭/言

通信技術と社会の密接な関係

Good Relationship of Communication Technologies and Society

本多孝司

Takashi Honda



この20年を改めてふり返ると、1990年代の音声通信、テキストベースのメール、インターネット環境は、2000年代に入ると高品質の音声通信、静止画通信に代わり、さらに2010年代になるとスマートフォンの普及に伴う動画通信、オンラインゲーム、SNS(Social Networking Service)が主流になるなど私たちをとりまく通信ネットワークは劇的に変化してきました。

総務省の平成27年度版情報通信白書では、インターネットに接続される“モノ”の数は、2020年には2013年度の3倍以上の約530億まで増加すると予測されており、あらゆる“モノ”がコミュニケーションを始めるIoT(Internet of Things)の時代はすぐそこまできています。

将来の社会はどのようなになっているのでしょうか。生活の切り口で考えると、世界の隅々まで高速な通信環境が整備され、自家用車や家電製品をはじめとする様々な“モノ”が通信ネットワークでつながり、私たちに快適な環境を提供してくれるようになっているでしょう。

一方、産業の切り口で捉えると、工場の生産設備である“モノ”や生産を管理する情報システム、また物流の現場などがインターネットで結ばれ、製造業の生産性や効率性、柔軟性が飛躍的に高まるでしょう。この取組みとしてドイツ政府が2011年11月に提唱した“Industrie4.0”が注目を集めていますが、三菱電機ではこれに先立つ2003年からFA統合ソリューション“e-F@ctory”を推進しています。e-F@ctoryではFA技術とIT技術を活用することで開発・生産・保守の全般にわたるトータルコスト削減とともに一歩先のものづくりを指向しており、生産現場にある多数のセンサ情報などのビッグデータの利活用を進めています。

このように大量かつ重要な情報が飛び交う社会を支えるには、通信トラフィックの増加を支える側面に加え、“安心・安全”な社会基盤を構築する側面や“利便性”“快適性”を提供する側面を考慮した通信技術が不可欠です。

国内・海外の都市間を結ぶバックボーンネットワークやメトロネットワークでは、通信トラフィックの増加に伴い、波長当たりの伝送速度が100Gbpsに増大し、1 Tbpsへの拡張も議論されています。今回の特集で紹介している“88波×8方路 光クロスコネクトシステム”は、波長当たり

100Gbpsの伝送速度を持つシステムの1つです。

一般家庭に情報を提供するアクセスネットワークでも、PON(Passive Optical Network)技術の適用によって1 Gbpsクラスのサービスが提供されており、10Gbpsクラスのシステム導入も大都市圏を中心に始まっています。また、一般家庭に“利便性”“快適性”を提供する目的で、家庭内の照明機器やエアコン、ヘルスケア機器などを通信ネットワークに接続し、外出先からこれらの機器を監視制御できるスマートメータなどのシステムの導入が進んでいます。当社は、スマートメータの設置性を高める“小形ダイバーシチアンテナ”や家庭内の情報機器を無線LANでネットワークに接続する“無線LANルータ内蔵型ONU(Optical Network Unit)”などを開発し、これらの市場要求に対応しています。

モバイルネットワークでは、移動端末の通信トラフィックの増加に備えるため、東京オリンピック開催イヤーである2020年にはUWB(Ultra Wide Band)技術などを適用した10Gbps以上の通信速度を持つ第5世代移動通信(5G)システム実用化の検討が進んでいます。当社でも、5Gシステムに適用する“ハイブリッドビームフォーミングを用いたMassive MIMO(Multi Input Multi Output)”の実用化を目指した研究開発を行っています。

交通ネットワークや公共ネットワークでは“安心・安全”な社会の構築を前提としてデジタル化やIP化が進んでいます。今回の特集では、“デジタル列車無線システム”やMCA(Multi-Channel Access)システムで使用される“広域イーサネット^(注1)向け端局装置”，高速道路等の監視に用いられる“広域監視ネットワーク向けHD・IP複合一体型カメラ”について紹介します。また、工場内のネットワークの信頼性を高めるため、リアルタイムな応答性能やネットワークの冗長化／高信頼化を実現した“インテリジェントHUB”についても紹介します。

当社は、これまで培ってきた通信技術をもとに、これからも“安心・安全”な社会、“利便性”“快適性”をもたらす社会の実現に向けて貢献してまいります。通信技術が進化を続ける社会には、もっと素晴らしい未来が待っています。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。



山田直志*

社会を支える通信技術の動向と展望

Trend and Future Scope of Communication Technologies for Society

Naoshi Yamada

1. ま え が き

スマートフォンや携帯端末のIT機器はもとより、家電、車載機器、ロボット等あらゆる種類の機器やセンサを相互間又はサーバと通信させ、得られる情報を収集、蓄積、分析して人に提供したり、機器制御に反映したりすることで、新たな価値を生み出すシステムの実用化が進められている。IoT(Internet of Things)やM2M(Machine to Machine)と呼ばれるこれらのシステムで接続される機器は、近い将来大幅に増加すると予想されている(図1)。

本稿では社会を支える通信技術を概観し、各章で無線通信技術と無線通信技術のそれぞれについて技術動向と三菱電機の取組みを述べる。

2. 社会を支える通信技術

IoTの実現には、情報を取得する機器やセンサ、それらをつなげる通信、取得したデータを処理する情報処理、ユーザーの便に供し活用するアプリケーションが必要である。

中でも、つなげるための通信が必要不可欠であり、IoTでは、センサやサーバがつながることが大前提である。

では、どのようにつなげるかという、有線通信と無線通信に大別することができる。図2に示すように、IoTの世界を考えた時に必要な基本分野として、有線通信ではコア・メトロネットワーク、アクセスネットワーク、フィールド(エリア)ネットワークがある。同様に無線通信では、モバイルブロードバンド、業務無線、M2M無線がある。

当社はこれまで、コア・メトロネットワークの分野では光クロスコネクシステム、アクセスネットワークの分野では光ファイバ網のPON(Passive Optical Network)装置、フィールド(エリア)ネットワークの分野ではFA(Factory Automation)システム向けレイヤ2スイッチ、モバイルブロードバンドの分野では第5世代無線アクセス基地局技術、業務無線の分野では列車無線システムやMCA(Multi-Channel Access)システム、M2M無線の分野ではスマートメータ通信などの技術開発を行ってきた。これらの技術分野の概要を本稿で述べ、個々の技術や製品の開発例を本誌7ページ以降の今特集号の各論文で述べる。

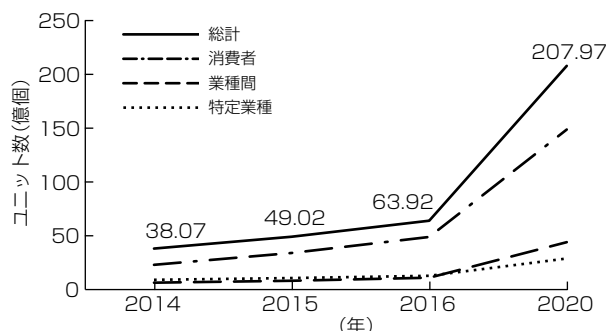


図1. IoT搭載機器ユニット数⁽¹⁾

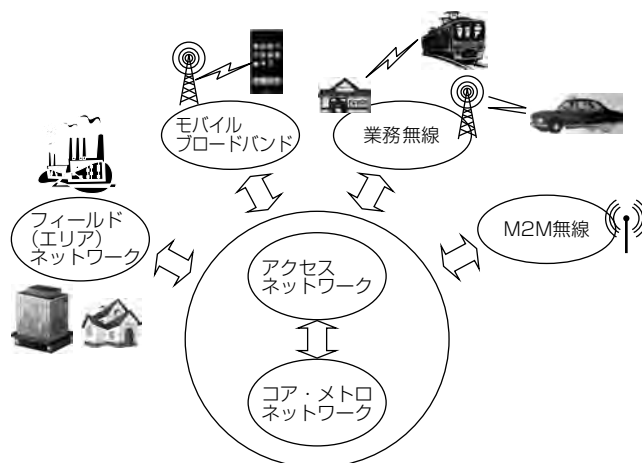


図2. IoTを支える通信の基本分野

3. 有線通信技術

従来の有線通信は、高速化、大容量化の流れを主軸として、メタル伝送から光伝送へと通信メディアを移しながら、技術が進歩し市場が展開されてきた。しかし近年では、高速・大容量化のみならず、高信頼化、高精度化、低遅延化、低消費電力化に関する要求が増大し、これらの課題に対応する技術開発が推進されている。これはキャリア通信以外の分野、つまり後に取り上げるフィールド(エリア)ネットワーク分野など、通信技術や通信システムの適用先が広範になり用途が多様化していることに起因すると考えられる。

次に、基幹系のコア・メトロネットワーク分野、加入者系のアクセスネットワーク分野、及びフィールド(エリア)ネットワーク分野に分け、それぞれの動向と技術課題を述べ、合わせて当社の主要技術について述べる。

3.1 コア・メトロネットワーク

1990年代以降、光通信システムは指数関数的に増大する大容量化の要求に応えてきた。中でもコア・メトロネットワークは、**図3**に示すように光増幅中継技術、波長多重技術に始まり、多値変調技術、デジタルコヒーレント受信技術、誤り訂正技術等の進展を背景に、非線形光学効果や通信に利用できる波長帯域の制限といった光ファイバの特性によって決まる伝送容量限界に迫る進展を遂げた。当社もこれらの技術開発を行ってきた⁽²⁾ (**図4**)。2020年代以降の将来に目を向けると、IoT・人工知能・ビッグデータを活用したサービスの登場に伴い、通信トラフィックは現在の1,000倍にも達すると予想される。情報通信の基盤技術として光通信システム全体の継続的な技術革新が求められており、2020年代の実用化を目指して高速大容量化を主とした研究開発が活発になっている⁽³⁾。コア・メトロネットワークに対しても同じ方向性を持った開発が望まれる。

実用を目指した開発を進めるに際し、標準化はシステムの普及を加速する上で重要である。特に相互接続性を担保する目的で、光・電気信号収容に関するインタフェース規格化がITU-T(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector)やIEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)又はOIF(The Optical Internetworking Forum)といった国際

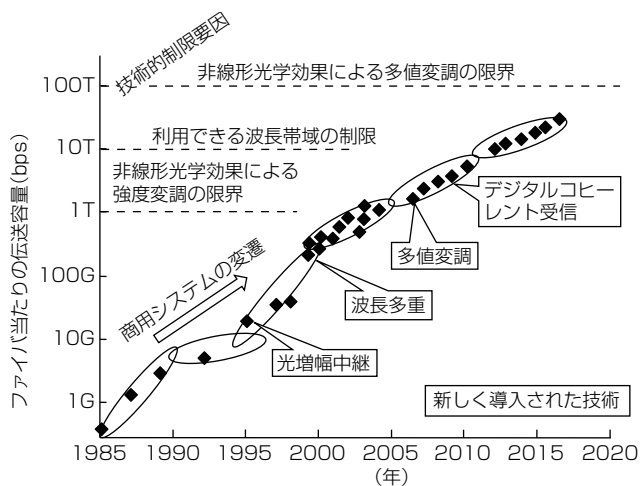


図3. コア・メトロネットワークの技術進展



(a) 波長多重光通信システム (b) デジタルコヒーレント光送受信器

図4. 当社開発品

的な団体・委員会で進められており、例えば基幹デバイスとなる小型100Gbpsモジュール標準化や、IEEE802.3bs小委員会(400Gbps Ethernet Task Force)における次世代大容量通信の標準化議論が開始されている。

技術開発の面では、大容量化、高効率化、長距離化の実現に向けて、光ファイバ帯域の効率的な割当てと光ファイバの非線形光学効果への対処の2つが大きな課題である。デジタルコヒーレント技術を前提とした上で、これらの課題の克服に向けた技術開発が進んでいる。当社では、符号化・変復調の工夫によって周波数利用効率向上を図る技術、効率的な光信号収容に向けた光スペクトル整形技術、デジタル信号処理によって非線形光学効果の影響を低減して伝送距離延伸を図る技術、同一の光ネットワークへの異なる伝送速度信号を収容する技術などの開発を進めている。これらの開発によって、これまでにない高い周波数利用効率を持つ1 Tbps級の超高速通信を達成し⁽⁴⁾、将来の高速・大容量コア・メトロネットワークの実現に備えている。

3.2 アクセスネットワーク

アクセスネットワーク市場と関連技術はインターネット接続サービスの高速化を原動力として発展してきた。特にPON方式登場を契機に、メタル電話線を使った xDSL (Digital Subscriber Line)方式に代わり、光ファイバによるアクセスネットワークが急拡大した⁽⁵⁾。

PON方式は光ファイバの帯域を複数の加入者で共有する方法によって、経済性に優れた時分割多重のTDM/TDMA(Time Division Multiplexing/Time Division Multiple Access)方式と、大容量化に有利な波長多重のWDM(Wavelength Division Multiplexing)方式に大別されるが、近年、両者を組み合わせたTWDM(Time and Wavelength Division Multiplexing)方式によって経済的に大容量化を実現するための開発も行われている。これに加え、システム全体の相互接続を考慮した上での高信頼化、低消費電力化、管理機能などの付加や、光ファイバへの無線信号収容を例とする無線システムとの連携に対する期待が高まっている。

これらの課題に対応した取組みとして、当社では波長可変型光モジュールの開発や、PONの冗長切替え機能、パワーセーブ機能、時刻同期機能の開発、モバイルフロントホール向けPONシステムの開発などを行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。モバイルフロントホールは、無線基地局装置のRRH(Remote Radio Head)とBBU(BaseBand Unit)を接続するもので、基地局ネットワークとして重要な役割を担う。経済性のために、TDM-PON技術の活用と光・無線間連携制御技術を用いた低遅延転送の実現、WDM-PON技術の活用と光多値通信技術を用いた高速伝送処理回路の低コスト化が必要で、これらの技術開発に力を入れている(図5)。OLT(Optical Line Terminal)はPONのBBU側装置、ONU(Optical Network

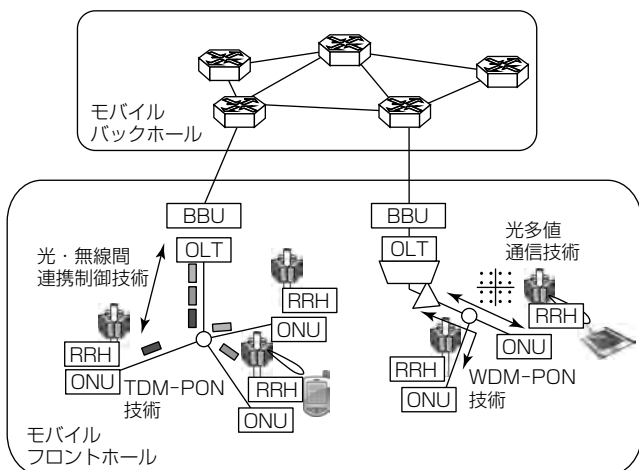


図5. モバイルフロントホールにおける光アクセス技術

Unit)は同じくRRH側装置である。必要となる伝送容量に応じてTDMとWDM方式を使い分け効率的なモバイルフロントホールシステムの提供を目指す。

3.3 フィールド(エリア)ネットワーク

工場、列車、自動車などの各種産業用フィールド(エリア)ネットワークでは今まで伝送容量の異なる個別規格が使用されてきたが、近年では汎用的なIEEE802.3(イーサネット^(注1))化が進んでいる。例えば、工場などのFA分野で、当社ではフィールドバス系の10MbpsネットワークによるCC-Linkに加え、イーサネット機器を利用する1GbpsネットワークのCC-Link IEも提供している。また車載ネットワーク分野では、現時点ではCAN(Controller Area Network)、MOST(Media Oriented System Transport)といった車載用の個別規格が主流であるが、まずはインフォティメント系で大容量画像転送等に100M～1Gbpsのイーサネットが使われ始めている。このような動向の理由として、画像や様々なセンサによって大量に収集した情報を基に機器を分析・制御するために、今までの個別規格のネットワークでは対応しきれない大容量伝送が求められるようになってきていることが挙げられる。また汎用規格では規格済みの各種伝送速度機器のラインアップがそろっていること、各種通信機器の流通量も多く経済的であることも理由であろう。

しかし今後のフィールド(エリア)ネットワーク適用では低遅延性と高信頼性の面で課題がある。この課題を解決する一例として今特集号の42ページで述べるFAシステム向けレイヤ2スイッチ(インテリジェントHUB)では、従来はフレーム単位でストアしてフォワードしていたフレームを、カットスルー転送して低遅延性を実現している。一方、標準化の面ではIEEEで2012年頃から802.3br/802.1Qbu、802.1Qbv、802.1CBなどのTSN(Time-Sensitive Networking)規格群の議論が進められて前述した課題に対応するための規格化検討が行われている。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

4. 無線通信技術

これまでの無線通信は、主として人間が効率よく情報を交換することを目指して開発が進められてきた。このため、音声や写真、動画などをストレスなく伝送できるための通信仕様がセルラーや無線LAN(Local Area Network)を中心に規定されている。加えて、宅内や車内など限られたエリアで手軽に情報機器間を接続するBluetooth^(注2)や、大規模なセンサ網を構築するZigBee^(注3)など、幾つかの規格が普及している。2020年代に本格的な到来を迎えると思われるIoT社会では、あらゆるデバイスがネットワークに接続されることから、多様な利用シーンやアプリケーションへの対応が求められる。次に、当社事業に関わりの強い、モバイルブロードバンド分野、業務無線分野、及びM2M無線分野について述べる。

(注2) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc. の登録商標である。

(注3) ZigBeeは、ZigBee Allianceの登録商標である。

4.1 モバイルブロードバンド

情報機器の高性能化とスマートフォンの普及、LTE(Long Term Evolution)に代表される高速移動通信ネットワーク整備に伴って、移動通信トラフィックは毎年1.5倍近い比率で増加している⁽⁸⁾。このペースで増加が続けば2020年代には2010年の1,000倍のトラフィックを処理する必要がある、第5世代移動通信ネットワーク(5G)と無線LANによるオフロードがその役を担うものと期待される。5Gに求められる要求性能はIMT(International Mobile Telecommunication) Vision⁽⁹⁾としてまとめられている。ピークデータレート20Gbps、ユーザーの実効データレート100Mbps、トラフィック密度10Mbps/m²など、データレートで第4世代の20倍、トラフィック密度で100倍の性能向上が必要となる。無線LANでは2015年現在、マイクロ波帯(5GHz帯)を用いるIEEE802.11acの系統と、ミリ波帯(60GHz帯)を用いるIEEE802.11adの系統が規格化されている。両規格ともに6Gbps超のピークデータレートが規定されており、手軽に利用できる無線LANの特性を活用して家庭やオフィスで高速無線アクセスを提供している。

図6に3GPP(The 3rd Generation Partnership Project)及びIEEE802.11委員会における標準化状況を示す。第4世代となるLTE-Advancedが2015年にサービスが開始され、3GPPでは引き続きLTE-Advancedの機能拡張規格となるRelease(Rel-12, Rel-13)がまとめられた。5Gの規格の主要な部分は、その後のRelease(Rel-14～Rel-16)で規定される予定で、2020年のサービス開始に向けて開発が進められる。IEEEでは802.11acの後継として802.11ax、また802.11adの後継として802.11ayの議論が進められている。データレート高速化に加えて、混雑した環境でも速度低下が発生しにくい仕組みが導入される見込みであり、

2019年の規格化完了を予定している。

当社では、ピークデータレート20Gbpsを達成する5G基地局の実現に向けて、超多素子APAA(Active Phased Array Antenna)アンテナを用いた空間多重技術の検討を進めている⁽¹⁰⁾。**図7**に5G基地局のイメージを示す。各端末に向けて送信する電波をビームのように細く絞り、電力

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
3GPP							
LTE(3.9G)				LTE-A(4G)			
	▲Rel-12	▲Rel-13	▲Rel-14	▲Rel-15	▲Rel-16		5G
IEEE 802.11委員会							11ax
11n				11ac			
▲ac Final Spec.			▲ax Draft 2.0		▲ax Final Spec. 11ay		
11ad							
▲ay Draft 1.0					▲ay Final Spec.		

図6. 3GPP, IEEEにおける標準化状況



図7. 5G基地局用超多素子APAAアンテナ

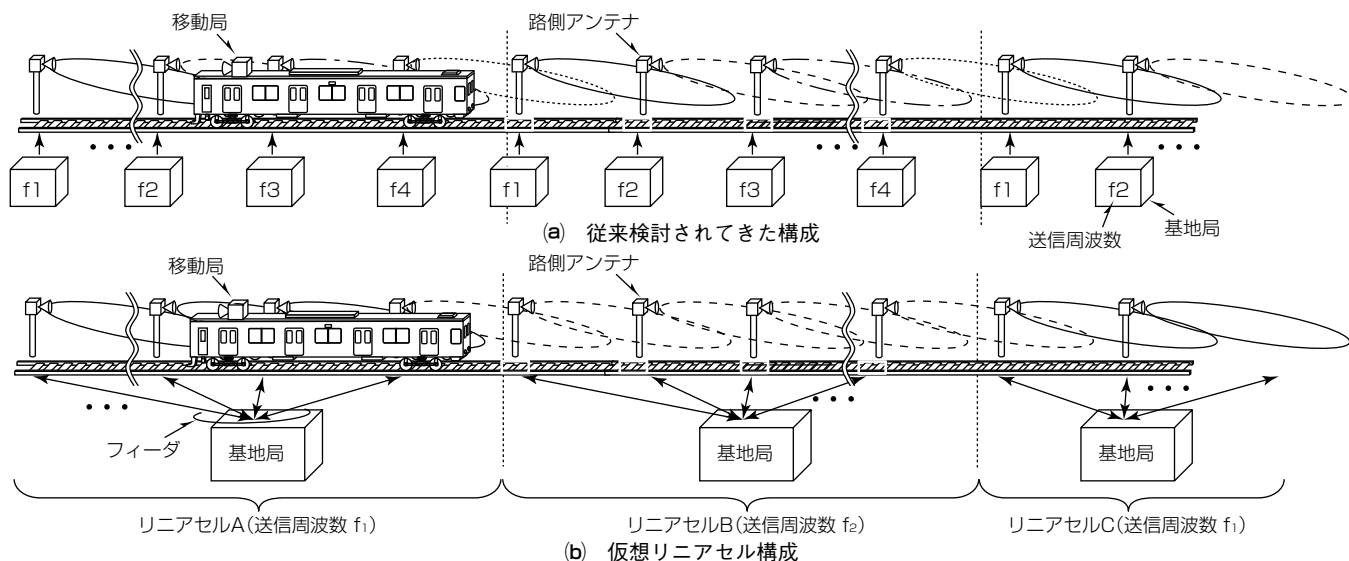


図8. 列車無線でのセル構成

を目標端末のみに集中させる。複数のビームを形成することで、同一の周波数を用いて同時に多数の端末と通信することが可能となり、高いピークデータレートを実現する。超多素子APAAアンテナを含む基地局装置の試作を進め、フィールド試験を経て実用化を目指す予定である。

4.2 業務無線

業務無線は、特定の事業者向けの専用無線通信システムであり、指令所と列車を結ぶ列車無線や、災害・避難情報を伝える防災無線などが該当する。事業者ごとに通信に対する要求が異なるため、独自方式が用いられることも多い。

列車との無線通信では、音声通話に加え、東海道新幹線では旅客向けにインターネット接続サービス、在来線でも列車内での準リアルタイムな情報提供サービスが行われている。今後は、列車各部の劣化診断向けビッグデータ伝送、セキュリティを目的とした監視映像の伝送など新たなアプリケーションも期待される。

当社では独自の無線伝送技術や音声符号化技術を適用することで、各種の業務無線システムを多数開発・製品化してきた⁽¹¹⁾。今後も更なる大容量化、高信頼化、高速移動への対応を進めていく。大容量化に向けた当社の取組みの一例として、図8に提案する仮想リニアセルコンセプトを示す⁽¹²⁾。従来検討されてきたアンテナごとに周波数の異なる基地局を置く構成⁽¹³⁾では、干渉を避けるため短距離で周波数の分割・切替えが必要であり、大容量化が難しい問題があった(図8(a))。また基地局数が多いためコストが増大するとともに、ハンドオーバー回数が多くなる課題があった。これに対し、当社提案構成では多数の路側アンテナを1つの基地局に接続し、単一周波数ネットワーク技術によってアンテナ間の干渉を抑圧し、仮想的に大きなリニアセルを構成する(図8(b))。これによって基地局間の距離が離れるため、周波数再利用が可能となり、2周波数繰り返して全線のサービスが実現できる。基地局数削減とともに

に、基地局当たりの周波数帯域を広くとることができ、大容量伝送が可能となる。

4.3 M2M無線

IoT社会では、人間を介さない機械同士(M2M)のアプリケーションが急速に増加すると考えられる。IMT Vision⁽⁹⁾ではモバイルブロードバンドと並び、5G時代には高信頼・低遅延な通信カテゴリ(Ultra-reliable and low latency communications)、及び大量のデバイスが接続される通信カテゴリ(Massive machine type communications)が利用シナリオとして規定されている。日米欧の通信キャリアを中心としたNGMN(Next Generation Mobile Network)や一般社団法人電波産業会(ARIB)でも、5Gのアプリケーションが詳細に検討されており、各種センサネットワークや、ウェアラブルデバイス(健康管理)、スマートホーム、自動運転、災害監視など多くの将来展開が予想されている。

M2M向け通信システムへの要求はアプリケーションによって大きく異なるが、接続数の増加、長距離通信、低消費電力化、多種規格混在への対応などが求められている。3GPPではセルラーシステムを用いたIoTをMTC(Machine Type Communication)と称し、標準化が進められている。狭帯域伝送、端末間直接通信、簡素なハードウェア実装が可能な構成が規定され、順次公開される予定である。セルラー以外のISM(Industry-Science-Medical)帯を用いたLPWA(Low Power Wide Area)システムとしては、Wi-SUN、SIGFOX^(注4)、LoRa^(注5)、IEEE802.11ahなどが低消費電力化(電池寿命10年以上)、長距離直接伝送などを特長として開発が進められている。

これまで当社では、スマートメータ用としてM2M無線技術を活用して広いエリアで効率的な情報収集を実現するシステムを開発してきた。また国内では1960年代の高度経済成長期に一斉に整備された多くの社会インフラが耐用年数とされる50年を超え、効率的な保守・更新を行う仕組みが求められている。この要求に対し、各種センサデータや監視映像データなど異なる種別のデータを効率的かつ確実に運用管理者に通知するための通信ネットワーク基盤技術を開発中である。具体的には、Wi-SUNを用いて橋脚や列車、斜面などが存在する現実の鉄道事業者環境でのマルチホップ伝送性能を検証するとともに、ビッグデータの階層的で効率の良い収集方法の設計・開発を行っている⁽¹⁴⁾。

(注4) SIGFOXは、SIGFOX社の登録商標である。

(注5) LoRaは、Semtech Corp. の登録商標である。

5. む す び

IoTやM2M推進の機運が高まるなか、これらに必要な通信技術の動向と当社の取組みを述べた。当社はこれまでに開発してきた有線通信・無線通信の技術をもとに、今後効率的で快適な社会を支える通信技術の研究開発を進める。

参 考 文 献

- (1) Gartner Press Release Nov.10, 2015 : Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015
<http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>
- (2) 中川潤一：光通信システム技術の変遷と今後の展開、三菱電機技報、**88**, No.9, 548～551 (2014)
- (3) 情報通信審議会情報通信技術分科会技術戦略委員会、中間報告書(案) (2015)
- (4) 三菱電機ニュースリリース 2016年2月15日：伝送速度1Tbpsを実現する「マルチサブキャリア光送受信技術」を開発
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2016/0215.html>
- (5) 総務省：第2部 情報通信の現況・政策の動向、平成26年度版情報通信白書 (2014)
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc255210.html>
- (6) 向井宏明、ほか：ONU Power Saving Scheme for EPON System, 電子情報通信学会英文論文誌B, **E95-B**, No.5, 1625～1632 (2012)
- (7) 中川潤一、ほか：5Gの全て、日経コミュニケーション2016年2月号 (2016)
- (8) 電波政策ビジョン懇談会：電波政策ビジョン懇談会最終報告書 (2014)
- (9) Recommendation ITU-R M.2083(IMT Vision), Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (2015)
- (10) 三菱電機ニュースリリース 2016年1月21日：伝送速度20Gbps以上を実現する5G向け新「マルチビーム多重技術」を開発
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2016/0121.html>
- (11) 伊村 真：無線通信システム技術の変遷と今後の展望、三菱電機技報、**88**, No.9, 552～555 (2014)
- (12) Nishimoto, H., et al. : Millimeter-wave train radio communication system based on linear cell concept, Proc. of STECH2015 (2015)
- (13) Abe, K., et al. : Millimeter-wave radio communication system between trains and ground facilities, Proc. IEEE ICOIN-12, 363～368 (1998)
- (14) 岡村 敦、ほか：ICNプロジェクト～ソーシャルビッグデータ、ITUジャーナル、**45**, No.3, 12～15 (2015)

山崎 創* 宇藤健一**
濱田芳彰*
高山**

88波×8方路 光クロスコネクシステム

88 - Wavelengths and 8 - degrees Optical Cross Connect Systems

Hajime Yamasaki, Yoshiaki Hamada, Shan Gao, Kenichi Uto

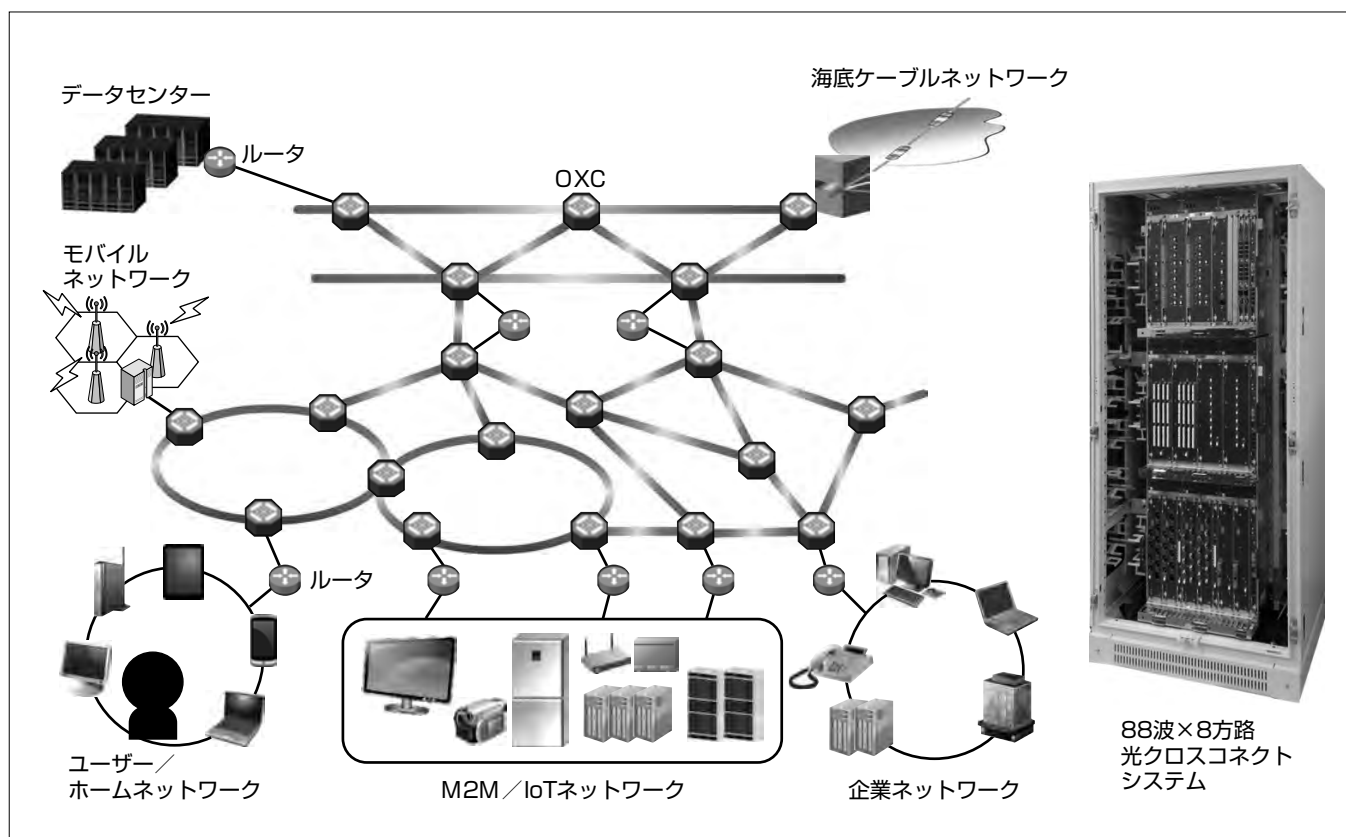
要 旨

多様化した携帯型通信端末の複数利用に加えて、M2M (Machine to Machine) /IoT(Internet of Things) ネットワークの導入が進むなど、通信トラフィック需要は継続的に増加している。基幹系ネットワークであるコア・メトロネットワークや海底ケーブルネットワークにおける波長多重伝送システム(Wavelength Division Multiplexing: WDM)では1ファイバ当たりの伝送容量が8 Tbps以上となる大容量化と情報伝達の高信頼化の要求が高まっている。また、大容量化に伴うCAPEX/OPEX(CAPital EXpenditure/OPERating EXpenditure)の増大を抑制する必要がある。これらの要求や課題を解決するため、ネットワークを効率化する多方路化技術及びメッシュ網管理技術が注目されている。

多方路化技術は、波長クロスコネク技術、長距離大容量伝送技術、装置間監視技術によって実現される。これらは情報伝達時の光/電気/光変換による無駄を抑制し、ネットワークのシンプル化かつ通信設備の高効率運用に寄与する。

メッシュ網管理技術は、多重ルート冗長化技術とレイヤ管理技術によって実現される。震災等のネットワーク多重障害時における遠隔復旧の実現やメッシュ網で複雑化したパスの高度視認性によって、ネットワークの高信頼化、オペレータの負荷の大幅軽減に寄与する。

これらの技術を適用した100Gbps×88波×8方路 光クロスコネク(Optical Cross-Connect: OXC)システムを開発した。今後は400Gbps/1Tbpsへの高速化と拡張機能の追加によって、超高度情報化社会のネットワーク構築に貢献していく。



基幹系ネットワークを支える光クロスコネクシステム

陸上のコア・メトロネットワークから海底ケーブルネットワークに至る基幹系ネットワークの通信トラフィック需要は増加している。光クロスコネクシステムによってWDM(1本の光ファイバに複数の異なる波長の光信号を多重して伝送する方式)の高速大容量化と多方路化技術、メッシュ網管理技術によるネットワーク効率化を実現した。今後の通信トラフィック需要増に貢献していく。

1. ま え が き

通信トラフィック需要は1.4～1.8倍/年で継続的に増加しており、コア・メトロネットワークの波長多重伝送システム(WDM)では更なる高速大容量化と高信頼化が求められている。一方で、増大し続けるネットワークのCAPEX/OPEXの低減が課題であり、ネットワーク効率化への要求が高まっている。これらの要求に対する最適なソリューションが、1ファイバ当たり8Tbps以上の大容量波長多重伝送を実現するとともに、光スイッチング機能を具備した多方路光クロスコネクシステムである。このシステムの実現には、光信号を直接スイッチングする波長クロスコネク技術、高度な信号劣化抑制性能を備えた長距離大容量伝送技術などの多方路化技術が重要となる。また、メッシュ状に構築されたネットワーク管理を容易にするメッシュ網管理技術やネットワーク多重障害時の迂回(うかい)路確保等で信頼性を確保する多重ルート冗長化技術が必要となる。これらの技術を適用し、拡張性に富んだコア・メトロネットワーク向け88波×8方路光クロスコネク(OXC)システムを開発した。

2. 多方路化技術

従来のコア・メトロネットワークでは、2方路波長多重伝送システムによるリング・リニアトポロジーが主流であった。このため、2方路以上の通信経路を構築するには、同一局舎に複数台の波長多重伝送装置の設置が必要であり、装置スペース、供給電力の確保が深刻化している。これらを背景に、多方路光クロスコネクシステムによるメッシュトポロジーへの移行が加速している(図1)。

多方路化には、既存光信号に影響を与えることなく遠隔から波長や方路を設定変更可能な波長クロスコネク技術が必須である。また実運用化に向け、自在なルートでの通信を可能とする長距離大容量伝送技術や、複数のルート経由で装置間の情報授受を実現する装置間監視技術が不可欠となる。

2.1 波長クロスコネク技術

波長クロスコネク技術は、異なる方路同士、又は自局で合分波される波長をシステム側の要求に応じて波長単位や波長群単位で任意の方路に切り替える技術である。一般的に、波長クロスコネクの実現方式には光信号切替え方式と光電変換後の電気信号切替え方式がある。光信号切替え方式では、大規模なM×Nの光メッシュスイッチ

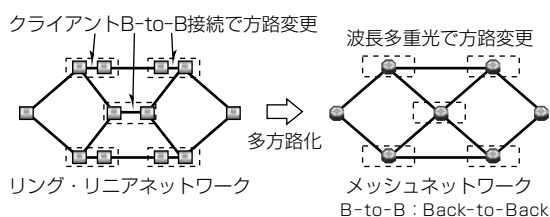


図1. ネットワークの多方路化

を使用したものと小型の波長選択スイッチ(Wavelength Selective Switch: WSS)に代表される光デバイスを組み合わせるものがある。

三菱電機は、WSSを用いて、方路単位での増減設可能な経済的な波長クロスコネク技術を開発した。図2に波長クロスコネク技術を実現した機能構成を示す。波長クロスコネク技術はWSSを搭載したWXC(Wavelength Cross-Connect)機能部で実現される。WXC機能部は方路単位に配備され、それぞれが装置内の光ファイバで接続されることでメッシュスイッチを形成することができる。トラフィック需要に応じて、遠隔から方路切替えが可能であり、かつ切替え対象外への信号品質に影響を与えないため、柔軟なネットワーク構築に貢献できる技術である。キーデバイスであるWSSはポート単位に透過波長を任意に設定することが可能であり、ポート独立性、波長独立性が高いデバイスである。なお、WSSには、将来のフレキシブルグリッドに拡張可能なLCOS(Liquid Crystal On Silicon)素子を適用した。

また、より柔軟なネットワーク構築に適したCDC(Colorless(カラーレス), Directionless(ディレクションレス), Contentionless(コンテンションレス))機能を開発した。従来はパス構築のたびに人手でファイバを再接続して波長や方路を切り替えていたが、CDC機能によって任意のポートにあらかじめファイバを接続しておくだけで全て遠隔から波長や方路を自由に切り替えることができる。また、これらを実現するMUX/DEMUX機能部、MSW機能部を機能ごとに独立した物理構成とすることで、波長及び方路の独立性を高くし、物理的な波長干渉を抑制して自由度を高く保つコンテンションレス技術を開発した。これによって、CDC機能のそれぞれをミニマムコストで実装可能とし、波長・方路増減設時や障害発生時の他方路への主信号影響を抑止可能とした。

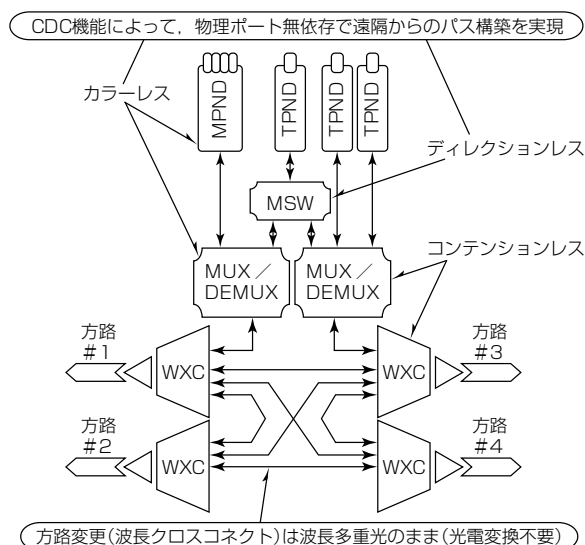


図2. 波長クロスコネク構成

2.2 長距離大容量伝送技術

メッシュネットワークでは、光信号の始点から終点まで複数経路が存在し、伝送性能が不足すると光電変換を伴う3R再生中継が必要となり、メッシュネットワークの利点が損なわれてしまう。このため、3R再生中継箇所を削減できる長距離大容量伝送を実現する技術が必須である。特にWDMで100Gbps以上の信号を伝送する場合、ルート内のOXCノードを多段中継した際に生じる光信号帯域の狭窄(きょうさく)化及びOSNR(Optical Signal to Noise Ratio)低下に伴う光信号劣化に対する補償が課題である。当社は、光信号送信スペクトル波形整形技術と誤り訂正技術を開発して長距離大容量伝送を実現した。

光信号帯域の狭窄化による信号劣化を抑圧するため、送信スペクトル波形整形技術を適用した。送信器内部の電気フィルタを用いて光信号の高周波成分を強調することで、OXCノードにおけるスペクトル波形の狭窄化を補償する⁽¹⁾。図3に狭窄化補償有無による多段中継時の伝送性能を示す。伝送速度128Gbps、変調方式DP-QPSK(Dual Polarization Quadrature Shift Keying)の信号を多段中継伝送させた場合の狭窄化補償有無のQ値(信号品質パラメータ)ペナルティを計算した。OXCノード内のWSSの通過帯域は周波数間隔50GHzとした。図3(a)にOXCノード構成、図3(b)に光スペクトル波形を示す。図3(c)に示すとおり、OXCノードの通過段数が増えるに従い狭窄化補償の効果が現れ、通過ノード数10個の場合には0.5dB以上のQ値ペナルティの改善が見込める。

低OSNR条件での光信号受信を可能とするため、誤り訂正技術を適用した。多重空間結合方法を用いた軟判定低密度パリティ検査符号(Low-Density Parity-Check: LDPC)を開発し、硬判定符号を組み合わせた接続符号とすることで、符号化利得12dBとなる高い訂正能力を実現した⁽²⁾。また、ルート長や伝送路種別に応じた最適な信号速度と訂正能力を選択するため、誤り訂正符号の冗長度を可変とする方式を開発した⁽³⁾。

2.3 装置間監視技術

メッシュ網化に伴い、複数障害発生時にも装置間監視を継続できるネットワーク管理の実現が課題である。装置の外部回線を使用するアウトバンド通信と装置間の空き通信領域を使用するインバンド通信を組み合わせ、それぞれで同報する構成を適用することによってメッシュ網の装置間監視技術を実現した。装置のアウトバンド通信では任意に定義可能なサブネットワークごとにGNE(Gateway Network Element)を2か所設置し、NMS(Network Management System)に対して2経路で同報する構成とした。インバンド通信では装置から各経路に対して同一メッセージを同報し、受信側で重複する通知を削除することでロバストな経路冗長構成とした。これらの構成によって、複数の障害発生時でも光信

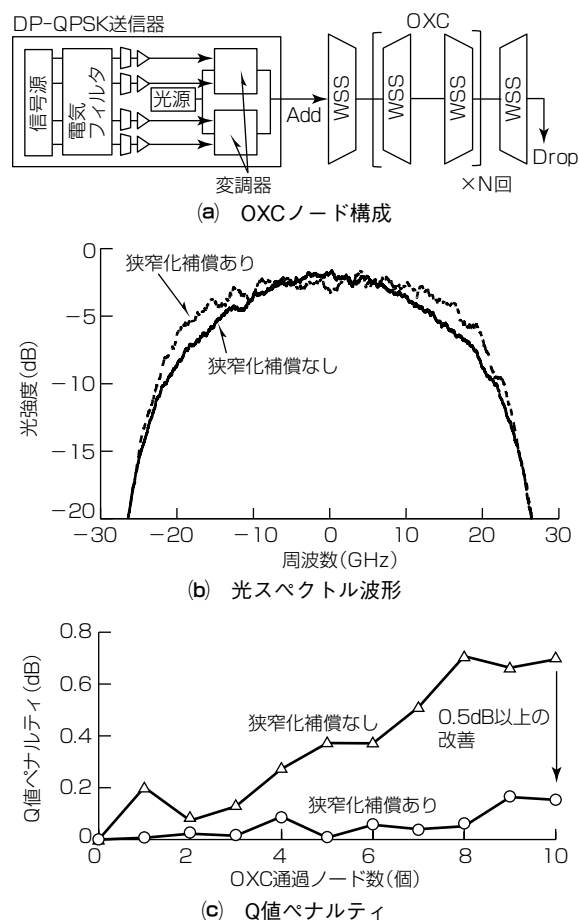


図3. OXCノード多段中継時の伝送性能

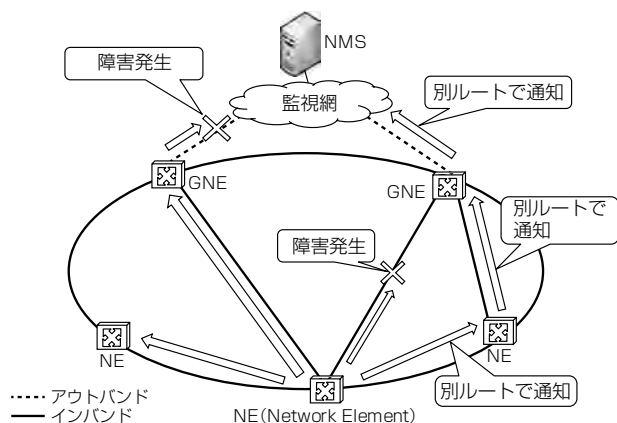


図4. メッシュ監視ネットワーク

号の監視制御に影響を与えることなく、継続管理可能な装置監視を実現した(図4)。

3. メッシュ網管理技術

従来のリングトポロジーでは1+1プロテクションによる冗長構成で信頼性を確保していた。また、ネットワークと装置の監視制御を行うNMSはリングごとに独立したネットワークに適した分散監視型であった。一方、メッシュトポロジーでは多数のルート構成が構築可能なため、多重ルート冗長化技術によって多重障害時のサービス継続

が可能となる。また、シームレス接続に伴うネットワークの複雑化に伴い、オペレータの保守運用作業を軽減するレイヤ管理技術が重要となる。

3.1 多重ルート冗長化技術

予備ルートのリソースを共有する波長レストレーション技術と1+1プロテクション技術の組合せによって、信頼性と経済性を両立させた多重ルート冗長化技術を実現した。

3.1.1 波長レストレーション技術

波長レストレーション機能を図5に示す。波長レストレーション機能として事前予約型に対応した。事前予約型では、現用ルートの光パスに対してあらかじめ迂回ルートと迂回波長をNMSに登録しておき、障害発生時に登録した迂回ルートで予備の光パスを確立し、現用ルートの光パスを切り替える。現用ルートの光パスに対して、複数の予備ルートの光パスを登録することで、多重障害発生時での信号復旧を可能とした。また、事前予約型の波長レストレーション機能では、現用ルートの光パスで障害検出した後にシグナリングを行い、予備ルートの光パスを設定する。そのため、複数の現用ルートの光パスに対して予備ルートのリソース共用化が可能であり、波長資源の高効率活用を実現した。波長レストレーション技術によって、単一障害発生時には100%復旧可能である。

3.1.2 3ルートプロテクション技術

1+1プロテクションと事前予約型の波長レストレーションを組み合わせることで3ルートプロテクション技術を実現した。図6に光パスの3ルートプロテクションを示す。1+1プロテクションの現用ルートの光パス及び予備ルートの光パスに対して、それぞれ複数の迂回ルートをNMSに事前登録しておく。現用ルートの光パス又は予備ルートの光パスで障害発生した場合には、1+1プロテクションで自動的に光パスを切り替える。事前登録済みの迂回ルートが波長レストレーションで新たな予備ルートの光パスとして確立される。そのため、多重障害発生時でも常時1+1プロテクションを維持することを可能にした。

3.2 レイヤ管理技術

NMSの拡張性や可用性を備え、オペレータの保守運用を容易にするレイヤ管理技術を実現した。

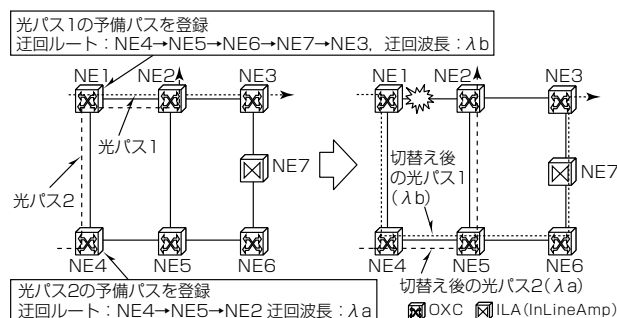


図5. 波長レストレーション機能

3.2.1 拡張性

従来のリングネットワークと異なり、メッシュネットワークではネットワークと装置の監視制御を行うNMSの拡張性及び監視ネットワークの大規模化の実現が課題である。リングネットワークでは、NMSは各リングを独立したネットワークとみなして分散監視していた。一方、メッシュネットワークではネットワーク内の接続に切れ目がなく収容装置数が増えた場合にもシームレスな監視が必須となった。そこで、ネットワーク管理機能を受け持つメインサーバと装置管理を受け持つサブサーバの2つの部位にNMSを機能分割した。図7にNMSサーバの構成を示す。この構成を適用することによって収容装置数が増えた場合にはサブサーバを増加させることでメインサーバによるシームレスなネットワーク管理を可能とし、メッシュネットワークにおける大規模監視を実現した。

3.2.2 高信頼性

大規模ネットワークを監視するNMSでは、サーバ障害が発生した場合でも常時運用継続が不可欠である。高い可用性を実現するため、ホットスタンバイ方式での冗長システムを開発した。ホットスタンバイ方式のため、片系で障害が発生した場合でも監視断状態は発生することなく常に監視継続可能である。また、大規模災害時に対応できるようサーバの異ロケーション設置が可能なシステム構成とした。さらに片系障害発生時のオペレータ作業を軽減するた

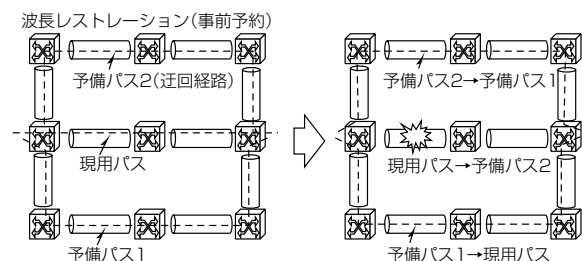


図6. 光パスの3ルートプロテクション

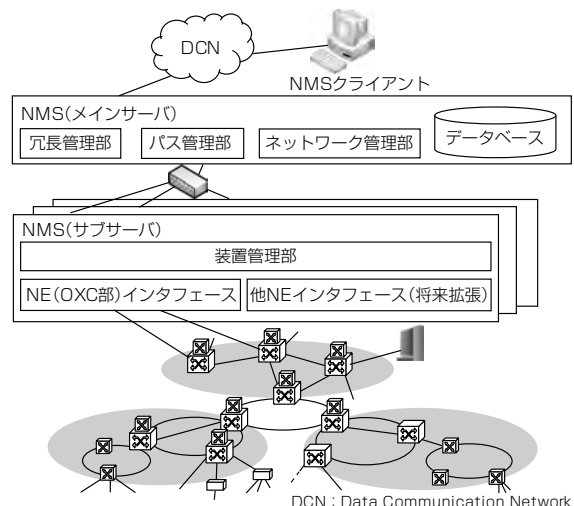


図7. NMSサーバの構成

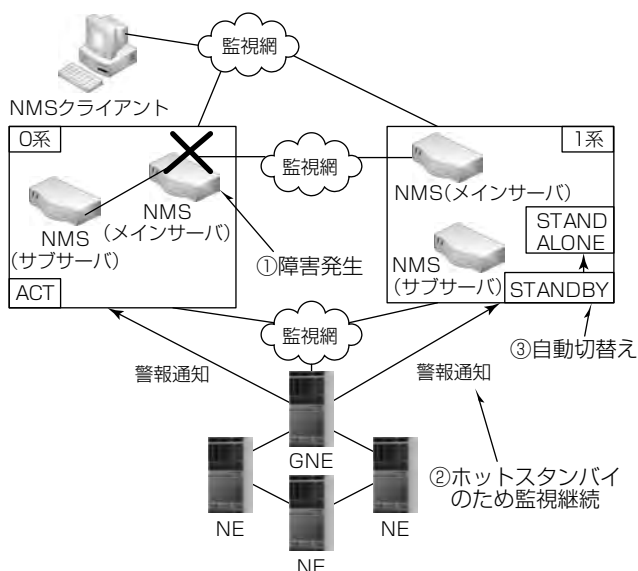


図8. NMSサーバ冗長切替え

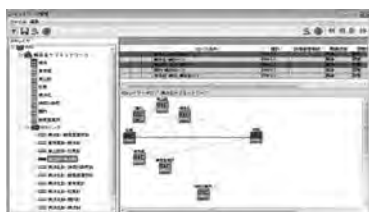


図9. サブネットワーク管理画面例

め、稼働モードの自動切替え機能を実装した。自動切替え機能は通常時に0系ACT、1系STANDBYの稼働モードで両系サーバがデータ整合して動作する。0系障害発生時に1系STANDBYからSTANDALONE(単独運用)に自動的に移行する。この機能によって運用を継続し、障害による影響を最小化した(図8)。

3.2.3 操作性

管理ネットワークの複雑化に伴い、オペレータの負荷軽減が必須である。オペレータが直感的に操作できるユーザーフレンドリーなGUI(Graphical User Interface)をコンセプトとしてNMSクライアントを開発した。図9に主要画面例としてネットワーク管理画面を示す。ネットワーク管理画面はネットワークを構成する装置及びそのネットワークを経由する光パスを一元管理する。障害発生時は関連する装置や光パスが警報色(赤色)表示となり、オペレータが一目で障害状況を確認可能である。また、全てのオペレーションはネットワーク管理画面から起動でき、光パスに関してはE2E(End-to-End)での制御をワンクリックで実施可能である。NMSではネットワーク管理だけでなくEMS(Equipment Managemet System)の機能である装置制御も取り込むことで一元的な操作を実現した。

4. 将来技術

400Gbps/1Tbps伝送への高速大容量化を実現する

ため、フレキシブルグリッド機能、DP-16QAM(Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation)変調、マルチサブキャリア伝送技術を用いた信号伝送方式の開発に取り組んでいる⁽⁴⁾。また、所要帯域と伝送距離を考慮し、最適変調方式・周波数グリッド構成を導出して最適な光パス経路を算出するPCE(Path Computation Element)⁽⁵⁾機能によって高効率収容可能なOXCを実現する。

将来的にはSDN(Software Defined Networking), オペレーション機能によるIP等を含めたトランスポート網のレイヤ統合監視制御に向け, 上位管理装置との管理インタフェースを拡充する。さらに, レイヤ統合ネットワークで複数レイヤを跨(また)がった最適な障害復旧を実現するためのPCE機能のオンライン化, トランスポートSDNのユースケース議論や相互接続に向けた議論を推進している⁶⁾。

5. む す び

88波×8方路光クロスコネクシステムで多方路化技術を実現する波長クロスコネク技術、長距離大容量伝送技術と装置間監視技術及びメッシュ網管理技術を実現する多重ルート冗長化技術とレイヤ管理技術を述べた。これらの技術がコア・メトロネットワークの高速大容量化と高信頼化につながり、CAPEX/OPEX低減に寄与することを期待する。

この開発成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究“光トランスペアレント伝送技術の研究開発(イリーチ)”から得られたものである。

参考文献

- (1) 佐野勇人, ほか: ROADMシステムにおける非ナイキスト型LPFを用いたサブキャリア多重の検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-10-48 (2015)
- (2) Sugihara, K., et al.: MSSC-LDPC: Multiple-Structured Spatially-Coupled type LDPC, OFC/NFOEC 2013, OM2B.4 (2013)
- (3) 杉原堅也, ほか: 高速光通信用FECのパンクチャによる冗長度可変方式, 電子情報通信学会, B-10-85(2013)
- (4) 野口由比多, ほか: 偏波多重16QAM信号に対するサブキャリア多重時の光スペクトル整形に関する検討, 第29回OCSシンポジウム, P-8 (2015)
- (5) 堀内栄一, ほか: フォトニックネットワークのネットワーク制御と運用管理, 電子情報通信学会技術研究報告, 111, No.475, PN2011-92, 61~66 (2012)
- (6) 三菱電機ニュースリリース 2015年4月20日: 世界初, 複数の異なる光トランスポートネットワークを相互接続し, マルチSDNコントローラにより全国規模でのフロー／パス設定に成功

<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2015/0420.pdf>

スマートメータ用通信ユニットの 小形ダイバーシチアンテナ

西本研悟* 秋元晋平***
林 大祐** 柳 崇†
田中豊久*

Small Diversity Antennas for Transceivers in Smart Meters

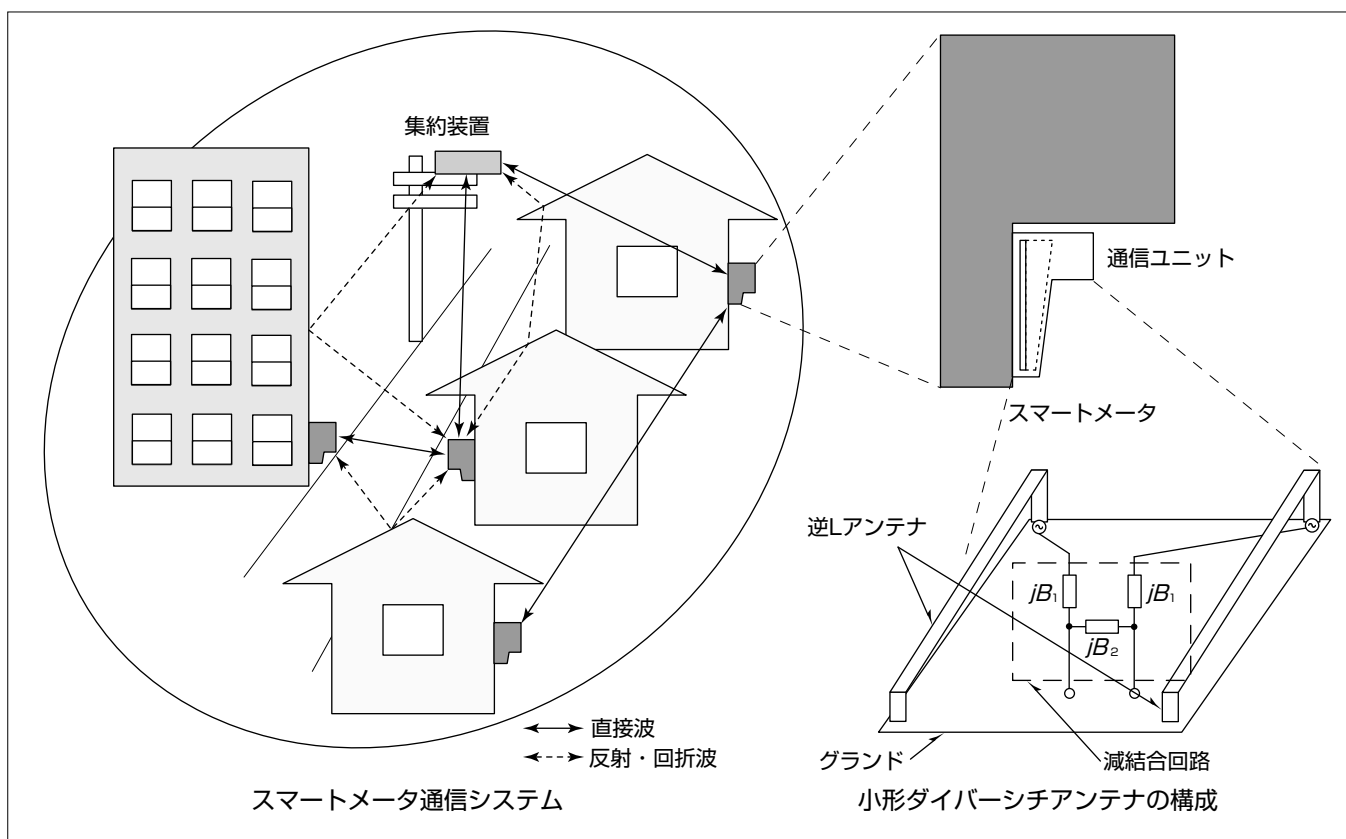
Kengo Nishimoto, Daisuke Hayashi, Toyohisa Tanaka, Shimpei Akimoto, Takashi Yanagi

要 旨

双方向通信機能を持つ電力メータであるスマートメータは、様々な場所に設置されるため、無線通信品質の改善のためにはダイバーシチ方式が有効である。ダイバーシチ方式実現のため、スマートメータに内蔵される通信ユニット内の小領域にアンテナを2本設置する場合、アンテナ間の相互結合が強くなり通信性能が劣化するという課題がある。また、小形アンテナは周囲環境の影響を受けやすいため、通信ユニットをメータと組み合わせたときの性能確保が課題となる。これらの課題を解決するためにスマートメータ用通信ユニットの小形ダイバーシチアンテナを開発した。まず、電波伝搬解析を行い、特にマルチパス環境にスマートメータが設置される場合、アンテナ指標として

放射効率と水平面内平均化利得が重要であることを示した。次に、アンテナ方式、実装エリアが異なる基板アンテナと板金アンテナを検討した結果、メータの影響を低減した小形ダイバーシチアンテナとしては、板金で作製した2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成が適していることを明らかにした。

開発したダイバーシチアンテナは、放射効率-3 dB以上、水平面内平均化利得-2 dBi以上、アンテナ相関0.1以下であり、メータとの組合せ時に、通信ユニット内の限られたスペースで良好なアンテナ特性を実現した。これによって、スマートメータの通信品質が確保される場所率を向上し、環境配慮型社会の実現に貢献していく。



スマートメータ形状に適した小形ダイバーシチアンテナ

スマートメータが設置されるマルチパス環境では、フェージングの影響で設置位置によっては通信できない場合が発生する。通信品質改善に有効なダイバーシチ方式の実現のために、スマートメータ形状に適したダイバーシチアンテナとして、2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成を示す。この構成によって、通信ユニット内の限られたスペースで良好なアンテナ特性が得られる。

1. ま え が き

低炭素社会／エネルギー安定供給を実現するために、発電、送配電網、需要家からなる電力システムを情報通信ネットワークで接続し、電力システムの最適制御によって効率的なエネルギー利用を図るスマートグリッドの導入が進んでいる。スマートグリッドを構成する重要な一要素として、双方向通信機能を持つ電力メータであるスマートメータがある⁽¹⁾。スマートメータ周辺の通信ネットワークでは、スマートメータ同士が互いに無線通信を行い集約装置までバケツリレー式にデータを伝送する無線マルチホップ通信が一般的に用いられる。

スマートメータは、一戸建ての軒下、集合住宅のパイプシャフト、繁華街など様々な場所に設置されるため、通信品質改善のためにはダイバーシチ方式が有効である。ダイバーシチ方式実現のため、スマートメータに内蔵される通信ユニット内の小領域にアンテナを2本設置する場合、アンテナ間の相互結合が強くなり通信性能が劣化するという課題がある。また、小形アンテナは周囲環境の影響を受けやすいため、通信ユニットをメータと組み合わせた時の性能確保が課題となる。

本稿では、まず、スマートメータ通信システムにおけるアンテナ指標について検証するために、電波伝搬解析を行う。次に、前述した課題を解決するために開発した、スマートメータ用通信ユニットの小形ダイバーシチアンテナについて述べる。なお、周波数は、特定小電力無線で適用される900MHz帯とする。

2. 電波伝搬解析

まず、スマートメータ通信システムにおけるアンテナ指標について検証するために、電波伝搬解析を行う。市街地、マンション群にスマートメータを設置したモデルについて、レイトレース法⁽²⁾を用いた計算を行う。

2.1 計 算 方 法

市街地のモデルを図1に、マンション群のモデルを図2に示す。地面はアスファルト(比誘電率15.0, 導電率0.005)とし、建物はコンクリート(比誘電率5.5, 導電率0.023)とする。図3に市街地モデルでの送受信点の位置を、図4にマンション群モデルでの送受信点の位置を示す。各モデルで送信点を変化させて5ケースの計算を行う。また、送受信アンテナとしては、指向性パターンの異なる4種類のアンテナ(スマートメータ搭載ダイバーシチアンテナ、半波長ダイポール、正面スルアンテナ)を用いる。スマートメータ搭載ダイバーシチアンテナとしては3章の基板アンテナを用い、ダイポールモードを基板アンテナ1、モノポールモードを基板アンテナ2とする。図5に、各アンテナの放射パターンを示す。表1に示したように、指向性パターンは変

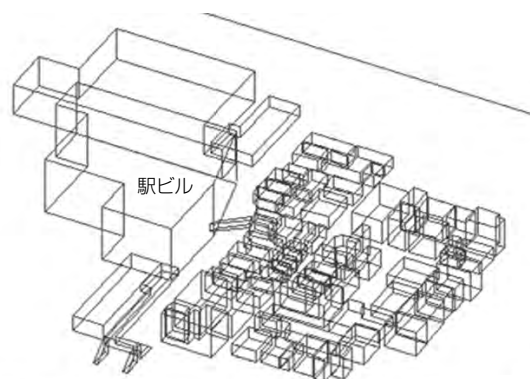


図1. 市街地モデル

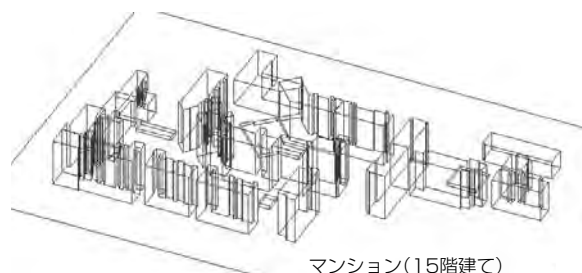


図2. マンション群モデル



図3. 市街地モデルにおける送受信点の位置

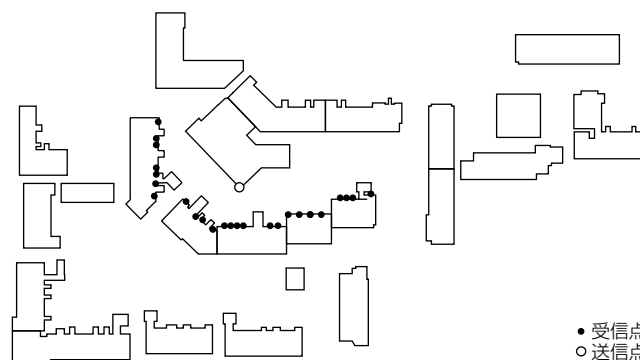


図4. マンション群モデルにおける送受信点の位置

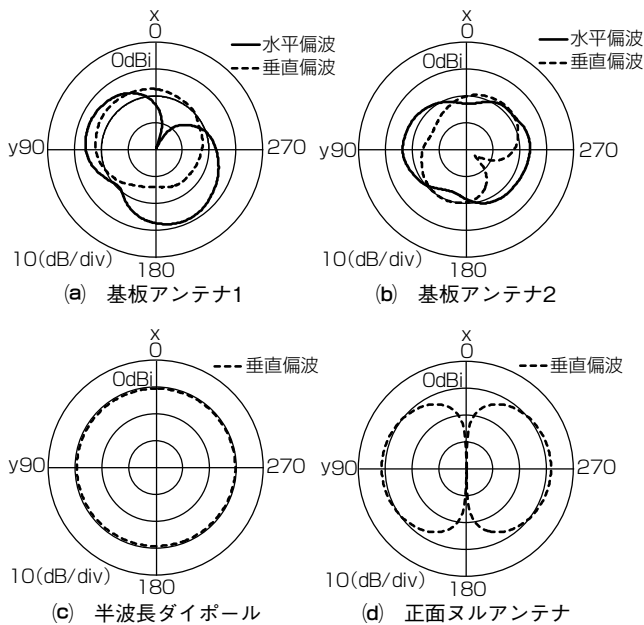


図5. 各アンテナの放射パターン(水平面)

表1. 各アンテナの放射効率と水平面内平均化利得

(a) 各アンテナの放射効率を同じにした場合				
	基板 アンテナ1	基板 アンテナ2	半波長 ダイポール	正面ヌル アンテナ
放射効率(dB)	-3.0			
水平面内平均化利得 (dBi)	-4.1	-6.1	-0.9	-0.9
(b) 各アンテナの水平面内平均化利得を同じにした場合				
	基板 アンテナ1	基板 アンテナ2	半波長 ダイポール	正面ヌル アンテナ
放射効率(dB)	-2.9	-0.9	-6.2	-6.2
水平面内平均化利得 (dBi)	-4.0			

えずに、各アンテナの放射効率を同じ(-3 dB)にした場合と、水平面内平均化利得を同じ(-4 dBi)にした場合について検討する。

2.2 計算結果

まず、各受信点で、ピーク値より-30dB以上となるレイ(幾何学的な伝搬経路)を対象として、到来波の角度の平均値、標準偏差を求める。仰角方向の到来角(送信点位置の全ケース、送信アンテナ全種類、全受信点の平均値±標準偏差)は、市街地モデルで -0.1 ± 9.4 度、マンション群モデルで -7.4 ± 14.4 度となった。市街地モデルでは、ほぼ水平方向から電波が到来していることが確認できる。一方、マンション群モデルでは、下方向からの到来波が多いことが確認できるが、これは地面反射の影響と考えられる。

図6に、受信アンテナ各種類での平均受信電力の計算結果を示す。市街地モデルでは、各アンテナの水平面内平均化利得を同じにした場合に平均受信電力がほぼ等しくなる。すなわち、アンテナの指向性パターンの形状に関わらず、水平面内平均化利得が同じであれば受信電力が等しくな

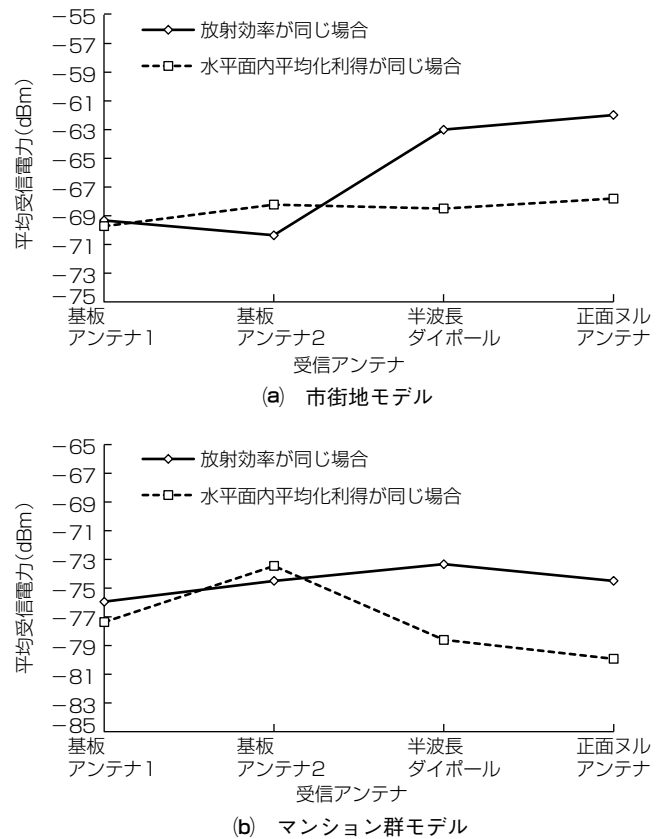


図6. 平均受信電力の計算結果

るので、到来波の仰角が低い場合には水平面内平均化利得がアンテナ指標として適当であることが分かる。一方、マンション群モデルでは、各アンテナの放射効率を同じにした場合に平均受信電力が等しくなる傾向にある。すなわち、アンテナの指向性パターンの形状に関わらず、放射効率と同じであれば受信電力が等しくなるので、到来波の仰角が高い場合には、仰角方向の分散も考慮する必要がある、放射効率がアンテナ指標として適当であると考えられる。

このように、スマートメータ通信システムでは、特にマルチパス環境にスマートメータが設置される場合、指向性の受信電力への影響は小さく、アンテナ指標として放射効率と水平面内平均化利得が重要であることを電波伝搬解析によって確認した。

3. スマートメータ用ダイバーシチアンテナ

マルチパス環境では、フェージングによってスマートメータの設置位置によっては通信できない場合が発生する。したがって、スマートメータ通信システムでは、受信レベルが落ち込む場所率を低減させる手法としてダイバーシチ方式が有効となる。そこで、スマートメータ用アンテナとして、2本のアンテナを用いた小形ダイバーシチアンテナを検討する。

3.1 アンテナ方式

図7に、通信ユニットの形状とスマートメータへの設置位置を示す。図に示すように、通信ユニット内の小領域に

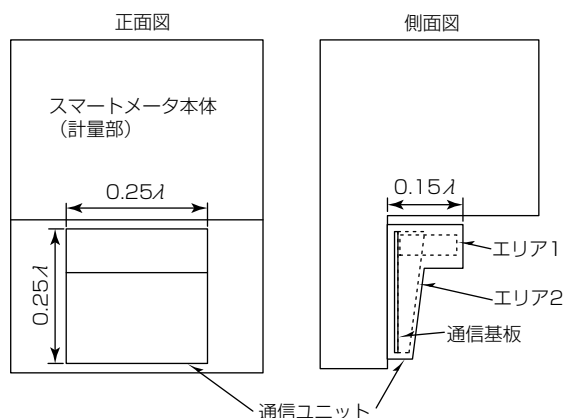


図7. 通信ユニットの形状と設置位置

アンテナを2本設置する必要がある。したがって、アンテナ間の相互結合が強くなるため、アンテナ間の相関係数が高くなりダイバーシチ効果が劣化する、放射効率・利得が低下するという課題がある。また、小形アンテナは周囲環境の影響を受けやすいため、メータと組み合わせた時の性能確保が課題となる。ここでは、これらの課題を解決するための小形ダイバーシチアンテナの構成方法として、次の2案を比較検討する。

- (1) 図7のエリア1に、基板上に構成した一体型ダイバーシチアンテナを設置した場合(基板アンテナ)
- (2) 図7のエリア2に、板金によって構成した逆Lアンテナを2本設置した場合(板金アンテナ)

3. 1. 1 基板アンテナ(エリア1)

小形の基板アンテナとして、エリア1にダイポール／モノポールモードを利用した一体型ダイバーシチアンテナを設置する場合を考える⁽³⁾。図8にアンテナ構成を示す。GNDは、通信基板を模擬したものである。アンテナは基板上に構成するが、図8ではモデルを簡略化している。GNDの上端から、給電線路を介して、高さ h の先端折り曲げダイポールを給電点#1によって給電する。給電線路のGNDにスリットを開け、不平衡平衡変換を行う。また、給電線路のGNDと先端折り曲げダイポールをモノポールとして動作させるため、GNDにスロットを設け、その中央に給電点#2を設置する。給電点#2には直近に整合回路を設ける。給電点#1を励振した場合には、ダイポールに同相、給電線路GNDに逆相の電流が流れ、主としてダイポールから放射する(ダイポールモード)。一方、給電点#2を励振した場合には、ダイポールに逆相、給電線路GNDに同相の電流が流れ、主として給電線路GNDから放射する(モノポールモード)。

図8で $h=0.11\lambda_c$ 、 $h_s=0.10\lambda_c$ 、 $l_d=0.55\lambda_c$ 、 $l_s=0.31\lambda_c$ とした場合のSパラメータの測定結果を図9に示す。 λ_c は、設計の中心周波数 f_c での波長である。結合量 $|S_{21}|$ の測定値は、 f_c で-49dBであり、非常に低いことが確認できる。

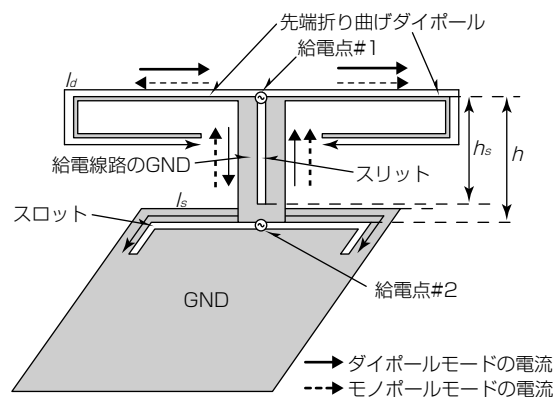


図8. 基板アンテナの構成

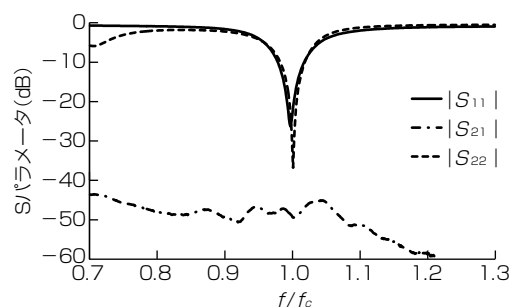


図9. Sパラメータの測定結果

これは、このアンテナが対称構造となっているためである。また、放射パターン測定結果から求めた2アンテナの相関係数は、到来波が全方向に様に分布していると仮定した場合、0.001以下である。

実際には、通信基板上の部品実装領域確保のため、図8のスロットを、ノッチ(スリット)としたモデル⁽⁴⁾について、メータに設置した場合の検討を行う。

3. 1. 2 板金アンテナ(エリア2)

低姿勢の板金アンテナとして、エリア2に逆Lアンテナを2本設置する場合を考える。図10にアンテナ構成を示す。逆Lアンテナ(Inverted L Antenna: ILA)は、通信ユニット筐体内に収容できる範囲で可能な限り大きくし、GNDからの高さを確保する。また、アンテナ先端部はGNDと非接続とする。

2本の逆LアンテナはGNDの左右端部に設置するが、間隔が $0.18\lambda_c$ と狭いためアンテナ間の結合の低減が必要である。そこで、アンテナによる結合を回路による結合で相殺させる減結合回路⁽⁵⁾を適用する。図11に示すように、減結合回路は2つの直列のサセプタンス B_1 と1つの並列のサセプタンス B_2 によって構成する。任意の2素子アンテナのアダミタンスマトリックス Y は、

$$[Y] = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここで、 $y_{ij}=g_{ij}+jb_{ij}$ とする。ポート1とポート2の結合が0となる条件から、 B_1 、 B_2 の値は次式に

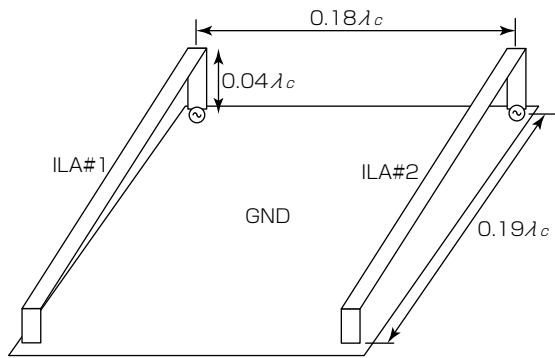


図10. 板金アンテナの構成

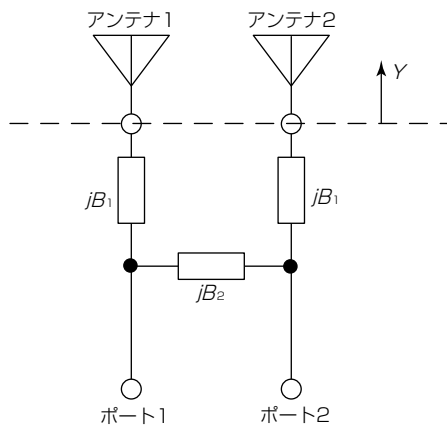


図11. 減結合回路

によって求められる⁽⁵⁾。

$$B_1 = (-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4g_{12}c_2}) / 2g_{12} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$B_2 = \frac{B_1^2 g_{12}}{b_{11}g_{22} + g_{11}b_{22} - g_{12}b_{21} - b_{12}g_{21} + B_1(g_{11} + g_{22})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$c_1 = g_{12}(b_{11} + b_{22}) - b_{12}(g_{11} + g_{22}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$c_2 = -g_{12}(g_{11}g_{22} - b_{11}b_{22} - g_{12}g_{21}) + b_{12}(-b_{11}g_{22} - g_{11}b_{22} + b_{12}g_{21}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

この減結合回路は、小形であるとともに、少数の集中定数素子のみで構成しているので調整が容易であるという利点がある。

3.2 スマートメータに設置した場合の測定結果

基板アンテナ、板金アンテナを内蔵した通信ユニットをスマートメータに設置した場合の放射効率、水平面内平均化利得、相関係数を表2に示す。基板アンテナでは、水平面内平均化利得が低いが、これは基板アンテナの上側にある計量部(図7)の影響によって、水平面より下方向に指向性を持つ傾向にあるためである。また、メータの影響によって、相関係数が劣化している。一方、板金アンテナでは、放射効率-3 dB以上、水平面内平均化利得-2 dBi以上が得られている。これは、アンテナ周囲にメータ金属物が少なく、また、逆Lアンテナ背面にある基板GNDによってメータの影響が小さいためと考えられる。相関係数は減結合回路によって0.07と低くなっている。以上から、

表2. 放射効率、水平面内平均化利得、相関係数の測定結果

(a) 基板アンテナ(エリア1)

	ダイポール	モノポール
放射効率(dB)	-3.5	-4.0
水平面内平均化利得(dBi)	-4.1	-6.1
相関係数	0.43	

(b) 板金アンテナ(エリア2)

	ILA #1	ILA #2
放射効率(dB)	-2.0	-2.4
水平面内平均化利得(dBi)	-1.5	-1.9
相関係数	0.07	

メータの影響を低減した小形ダイバーシチアンテナとしては、エリア2に設置した2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成が適していることが分かる。

4. む す び

まず、スマートメータ通信システムにおけるアンテナ指標について検証するために、市街地、マンション群のモデルに対して電波伝搬解析を行った。その結果、特にマルチパス環境にスマートメータが設置される場合、アンテナ指標として放射効率と水平面内平均化利得が重要であることを確認した。次に、アンテナ方式、実装エリアが異なる基板アンテナと板金アンテナを検討し、メータの影響を低減した小形ダイバーシチアンテナとしては、板金で作製した2本の逆Lアンテナに減結合回路を組み合わせた構成が適していることを示した。開発したダイバーシチアンテナは、放射効率-3 dB以上、水平面内平均化利得-2 dBi以上、アンテナ相関0.1以下であり、メータとの組合せ時に、通信ユニット内の限られたスペースで良好なアンテナ特性を実現した。これによって、スマートメータの通信品質が確保される場所率を向上させ、環境配慮型社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：スマートメーター制度検討会報告書(2011)
- (2) 岩井誠人：移動通信における電波伝搬、コロナ社(2012)
- (3) 西本研悟、ほか：ダイポール／モノポールモードを利用した対称性を有するダイバーシチアンテナの実験検討、2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-1-125(2012)
- (4) Nishimoto, K., et al.: Compact diversity antenna using dipole and monopole modes, 2012 European Conference on Antennas and Propagation, 2469~2473(2012)
- (5) Nishimoto, K., et al.: Decoupling networks composed of lumped elements for diversity/MIMO antennas, 2013 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 307~310(2013)

CATV事業者向け無線LANルータ内蔵ONU

ONU with Built-in Wireless LAN Router for CATV Operators

Takahiro Noda, Shin Nakae, Hiroshi Otsuka

要 旨

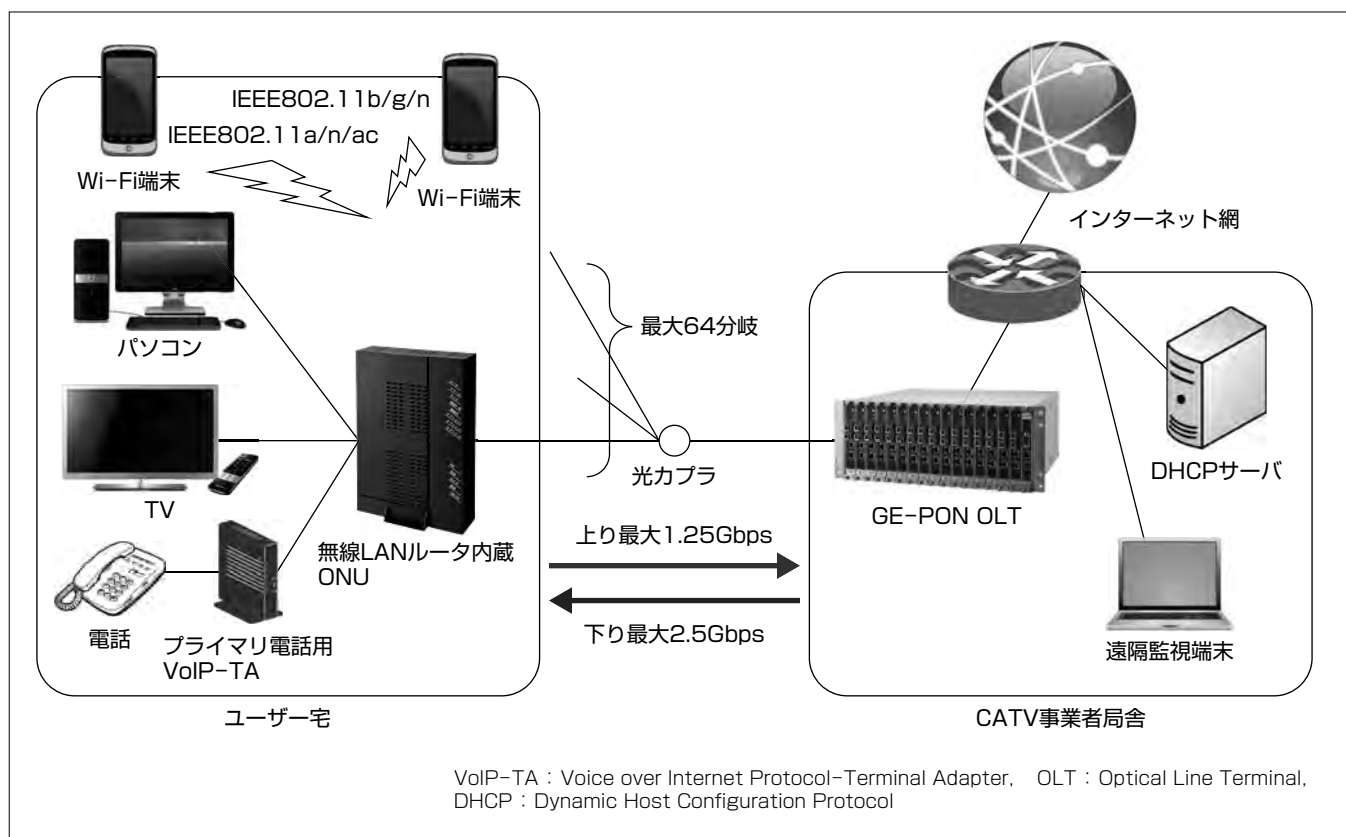
近年、CATV(Cable TeleVision)業界では通信キャリアとの競合激化による高速化、HFC(Hybrid Fiber-Coaxial)インフラ老朽化対策、4K/8K映像配信への対応からFTTH(Fiber To The Home)化を志向する事業者が増加傾向にある。一方、スマートフォンの普及によって、多くの家庭ではONU(Optical Network Unit)に無線ルータが接続され、省スペース化要望から無線LANルータをONUに実装するニーズが高まり始めている。

三菱電機は、2004年以降ユーザー収容効率の高いGE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)装置⁽¹⁾を製品化してきた。また、2010年には無線LAN内蔵ホームゲートウェイ装置⁽²⁾の製品化を実現し、ブロードバンド

サービスを提供してきた。今回、CATV事業者向けに無線LANルータ内蔵ONUを開発した。

無線LAN機能は2.4GHz帯及び5GHz帯の同時使用を可能とし、GE-PON区間は下り最大2.5Gbps伝送を可能とした。また、CATV事業者向けにルータ機能の遠隔監視及びサービスオプション追加を可能としている。

当社は、今後もこれまでの開発で培った光アクセス技術や当社が保有する多様な通信技術を活用し、GE-PON装置の高機能化を推し進める。また、長距離高速伝送技術と無線伝送技術を活用し、ブロードバンドサービス用途だけでなく無線基地局や鉄道事業者向けシステム等の社会インフラサービスへの適用拡大を進めていく。



無線LANルータ内蔵ONUのシステム構成

無線LANルータ内蔵ONUは光通信を使ったインターネットサービスを提供するための宅内通信装置である。今回製品化したONUは、無線LANの機能として2.4GHzと5GHz(11ac)の同時通信機能を実装した。さらに、将来の下り通信容量増加に備え、光アクセス回線の下り2.5Gbps伝送、CATV事業者向けに保守性向上としてルータ部の遠隔設定を可能とした。

1. ま え が き

近年、CATV業界では通信キャリアとの競合激化による高速化、HFCインフラ老朽化対策、4K/8K映像配信への対応から、FTTH化を志向する事業者が増加傾向にある。一方、スマートフォンやタブレット端末の普及によって、多くの家庭ではONUに無線LANルータが接続され、省スペース化要望から無線LAN機能をONUに実装するニーズが高まり始めている。

今回、ONU機能と無線LANルータを一体化した無線LANルータ内蔵ONUを開発した。ONU機能は将来の下り通信容量増加に備え、従来の上下1.25Gbps通信に加え、下り2.5Gbps通信を可能とした。無線LAN機能は、実効速度800Mbpsを実現するIEEE802.11ac(以下“11ac”)を含め、2.4GHz帯及び5GHz帯のデュアルバンド化を可能にした。また、CATV事業者向けに遠隔からの保守及びサービス変更が可能な遠隔操作機能を追加した。

2. 市場での課題と要求

2.1 市場状況

光アクセスを用いたブロードバンドサービスは、インターネットアクセスの手段として一般ユーザーに広く普及し、国内の契約者数は、約2,729万世帯(2015年9月末時点)まで拡大している⁽³⁾。

当社は、2004年以降ユーザー収容効率の高いGE-PON装置の製品化を行い、超高速ブロードバンドサービスの提供に寄与してきた。また、機能カスタマイズによる機能向上を図り、幅広いユーザーへの展開を行ってきた。

CATV事業者でも、HFCインフラ老朽化対策、4K/8K映像配信への対応からFTTH化が進められており、光ファイバの有効活用としてGE-PON装置などを用いてインターネット接続サービスを提供している。

2.2 課題と要求

インターネット接続方法が多様化し、家庭での利用方法もパソコンに加え、スマートフォン、タブレット型端末、家庭用テレビゲーム機などによる無線LAN接続の需要が高まりつつある(図1)。

従来のONUは、ユーザー側との接続を有線LANのインタフェースで行っており、無線LANでの接続を行う場合は別途無線LANルータを介して行うことが一般的であった。しかし、スマートフォンなどでインターネット接続を行うライトユーザーに対してサービスを提供するに当たり、より容易に利用できることや機器一体化による省スペース化が求められている。

一方で高速通信に対応した無線LAN規格の策定も進められている。理論速度として433Mbps~6.9Gbpsに対応した規格である11acは2013年12月に標準化が完了した。同

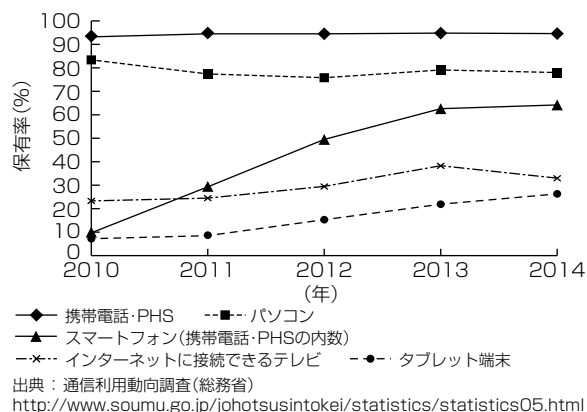


図1. 情報通信端末の世帯保有率の推移

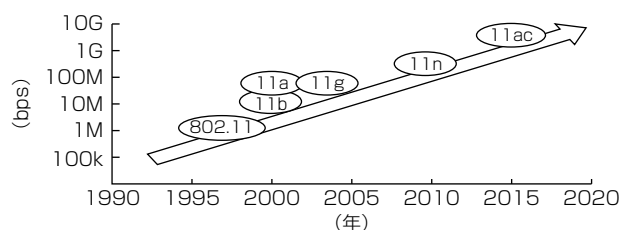


図2. 無線LAN規格の変遷

規格に対応した情報通信端末の製品化が進み、1.3Gbpsの伝送速度に対応した無線LANルータが普及している(図2)。

3. 無線LANルータ内蔵ONU

3.1 システム構成

無線LANルータ内蔵ONUは、GE-PON ONU機能と無線LANルータ機能で構成される。

GE-PONとは、光ファイバを用いLAN(Local Area Network)で使われてきたギガビットイーサネット技術で1.25Gbpsの光アクセス通信を行う技術である。GE-PONシステムは、上位ネットワーク側の事業者局舎に設置されるOLTとユーザー宅に設置されるONUで構成される。また低コストな受動素子である光カプラを用いて光信号を複数に分岐し、一心の光ファイバを複数ユーザーで共有することで経済的なネットワークを実現している。

無線LANルータ内蔵ONUは、ユーザー端末を有線で接続する100/1000BASE-Tに準拠したLANポートを4ポートとプライマリ電話サービス専用LANポートを1ポート具備する。また、無線LAN機能は、2.4GHz帯のIEEE802.11b/g/n、5GHz帯のIEEE802.11a/n/acのデュアル化による同時利用を可能としている。図3にGE-PONのシステム構成を示す。

3.2 主要諸元

今回開発した無線LANルータ内蔵ONU機能の主要諸元を表1に、無線LANルータ機能の主要諸元を表2に、ONUの外観を図4に示す。

3.3 2.4GHz/5GHzデュアル無線LAN機能

このONUの要求仕様である2.4GHz/5GHzデュアル無線LAN同時動作機能の実装と、性能測定結果について述べる。

表 1. 無線LANルータ内蔵ONU機能の主要諸元

項目	仕様
PON	ポート種別 1000BASE-PX10-U
	コネクタ／ポート数 SC／1ポート
LAN	ポート種別 100BASE-TX／1000BASE-T
	コネクタ／ポート数 RJ45／5ポート(速度設定: Auto) MDI／MDI-X自動検出
LAN(TA)	ポート種別 10BASE-T／100BASE-TX
	コネクタ／ポート数 RJ45／1ポート(速度設定: Auto) MDI／MDI-X自動検出
無線LAN	ポート種別 オンボード実装
	コネクタ／ポート数 b/g/n 2.4GHz 3×3MIMO≥300Mbps a/n/ac 5GHz 3×3MIMO≥800Mbps
USB	ポート種別 USB 2.0 High Speed(480Mbps)
	コネクタ／ポート数 Type A／2ポート
PON機能	送信波長 1,260～1,360nm
	受信波長 1,480～1,500nm
	送信電力 -0.7～+5.3dBm
	受信感度 -5.5～-25.7dBm
	伝送距離 32分岐: 14.0km, 64km: 12.5km
	伝送速度 上り最大: 1.25Gbps, 下り最大: 2.5Gbps
ブロードバンドルータ機能	インターネット接続 IPoE
	ルーティング変換, Proxy IPv 4／IPv 6ルーティング DNS Proxy 動的・静的NAPT, 静的NAT パケットフィルタリング
	無線LAN AP WPS2.0対応
	アドレス配布 DHCPサーバ
	ログ管理 通信ログ, 装置ログ, セキュリティログ
	遠隔保守 HTTPによるリモート操作, 遠隔バージョンアップ
ハードウェア諸元	動作環境条件 0～40℃, 20～80% (ただし, 結露なきこと)
	電源 AC100V(50/60Hz)
	消費電力 20W以下
	電波障害規格 VCCI クラスB
	外形寸法 55(W)×258(H)×171(D)(mm) (ACアダプタ, 突起含まず)
	質量 650g以下(ACアダプタ含まず)

RJ45 : Registered Jack 45
MDI : Medium Dependent Interface
MDI-X : MDI Crossover
MIMO : Multi Input Multi Output
IPoE : Internet Protocol over Ethernet
DNS : Domain Name Server
NAPT : Network Address Port Translation
NAT : Network Address Translation
AP : Access Point
WPS : WiFi Protected Setup
HTTP : HyperText Transfer Protocol
VCCI : Voluntary Control Council for Interference by information technology equipment

3.3.1 デュアルバンド同時動作機能の実装

2.4GHz帯／5GHz帯の同時動作を可能とするため、2.4GHz帯／5GHz帯それぞれに3×3 MIMOに対応する無線LANプロセッサを1個ずつ実装するプラットフォームを採用した。各無線LANプロセッサを同時動作させることで、デュアルバンド同時動作機能を実現している。図5に無線LAN回路部のブロック図を示す。

フロントエンド回路は、送受信アンプ、送受信切替え用スイッチ、フィルタで構成されている。フロントエンド回路のアンテナ側は、ダイプレクサと2.4GHz帯／5GHz帯の両周波数帯に対応するアンテナを採用し、2.4GHz帯／5GHz帯でアンテナを共用化し、基板上のアンテナ実装面積を削減した。

表 2. 無線LANルータ機能の主要諸元

項目	仕様
準拠規格	IEEE802.11ac/a/b/g/n
周波数帯	b/g/n 2.4GHz 3×3MIMO
	a/n/ac 5GHz 3×3MIMO
最大伝送速度(理論値)	2.4GHz／5GHz帯デュアル
	(1) 1,300Mbps(11ac: 3×3MIMO)
	(2) 450Mbps(11n: 3×3MIMO)
	(3) 54Mbps(11a, 11g)
セキュリティ	(4) 11Mbps(11b)
	(1) 暗号化
	① WPA2-PSK(AES)
	② WPA2/WPA-PSK(TKIP/AES)
アンテナ	③ WEP(64/128bit)
	(2) SSIDステルス(ANY接続拒否)
	(3) MACアドレス制限機能
アンテナ 2.4GHz／5GHz共用小形マルチアンテナ: 3本	

WPA : Wi-Fi Protected Access, PSK : Pre-Shared Key,
AES : Advanced Encryption Standard,
TKIP : Temporal Key Integrity Protocol,
WEP : Wired Equivalent Privacy, SSID : Service Set Identifier,
MAC : Media Access Control



図 4. 無線LANルータ内蔵ONU

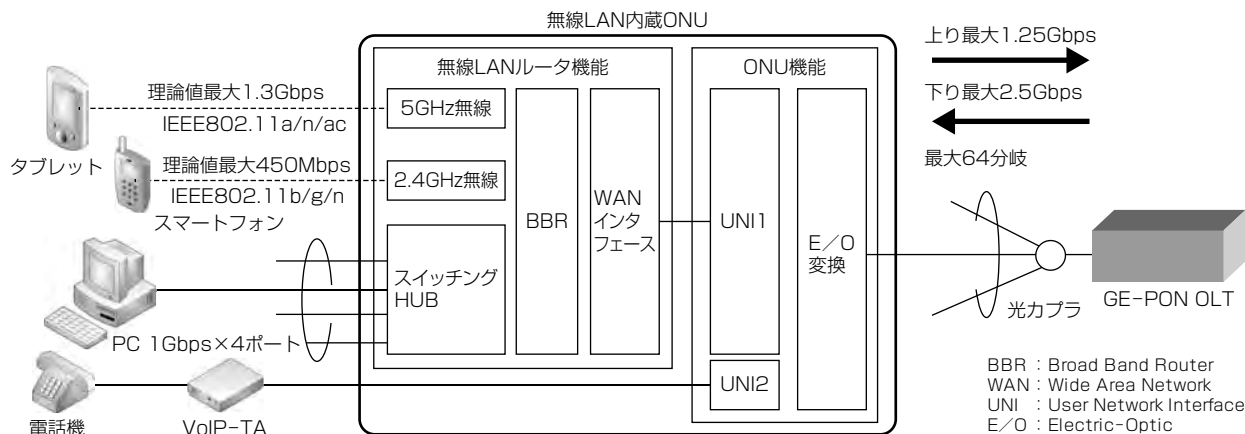


図 3. 無線LANルータ内蔵ONUのシステム構成

図5. 無線LAN回路部のブロック図

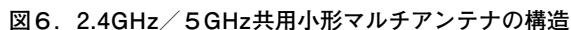
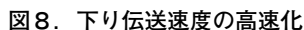


図7. 無線LANスループット測定系



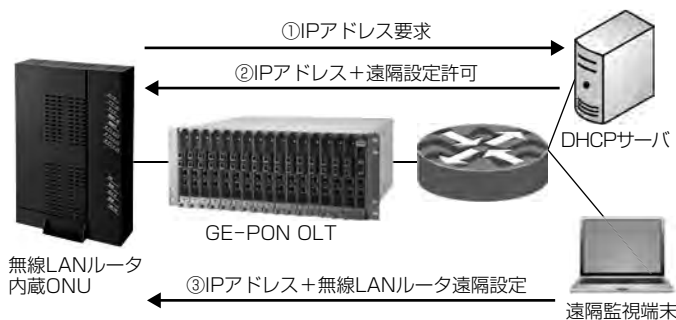


図9. 遠隔設定シーケンス

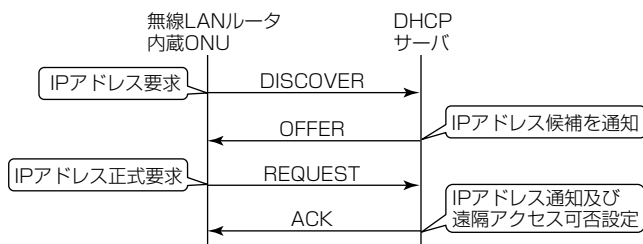


図10. DHCPシーケンス

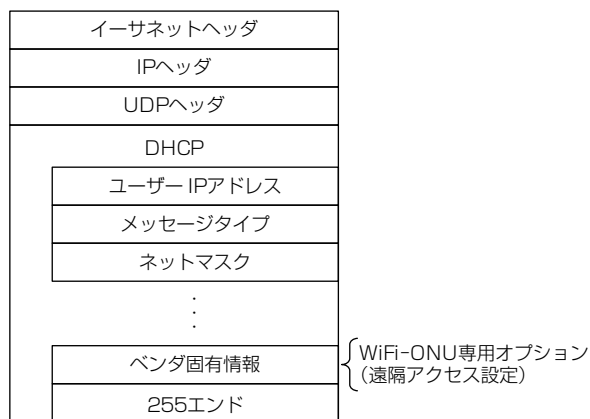


図11. DHCPパケットと遠隔アクセス可否設定

同機能実現のためONUでは、光送受信器に2.5Gbpsの伝送に対応した受光素子を採用している。この素子は1.25Gbpsでの信号伝送にも対応しており、従来のGE-PONシステム(上り下りともに伝送速度1.25Gbps)にも接続することが可能である。

3.5 遠隔保守・サービスの追加

CATV事業者向けに一般の無線LANルータには実装されていない遠隔保守機能を追加した(図9)。遠隔保守機能によって、CATV事業者は、エンドユーザーに提供するサービスに合わせ設定変更、障害時の調査が容易となる。

一般的な無線LANルータは、セキュリティ上、遠隔からのアクセスを禁止している。このONUでは、DHCPによるCATV業者からのIPアドレス設定時に特定の遠隔監視端末からのアクセス可否を設定する。遠隔設定は、各事業者での設定ツール開発負荷を考慮し、一般的に普及しているHTTPを採用した。

表4. 遠隔監視・設定内容

HTTPメソッド	内容
POST	IPv6ルーティング有効/無効設定
POST	無線LANサービス有効/無効設定
GET	ルータ再起動
GET	無線LANサービス状態取得
GET	ソフトウェアバージョン取得
POST	ソフトウェア更新通知

3.5.1 DHCPによる遠隔設定許可機能

一般的にCATV事業者では、従来のケーブルモデムの設定に合わせ、DHCPによって通信機器のネットワーク設定を行う。

DHCPでは、無線LANルータ内蔵ONUからサーバに対してIPアドレスを要求し、サーバはOFFERメッセージでIPアドレスの候補値を応答する。無線LANルータ内蔵ONUは、割り当てられたIPアドレスを使用可能であれば、正式にIPアドレスを要求し、サーバは再度応答する。また、DHCPでは、IPアドレスに加え、オプションとしてサービスに必要な情報を付与して無線LANルータ内蔵ONUのネットワークを設定することが可能である(図10)。

このONUでは、DHCPのオプションを使用し、専用の情報を付与することで、特定端末からの遠隔アクセスのみを許可することを可能とした(図11)。

3.5.2 HTTPによる遠隔設定コマンド

遠隔設定プロトコルには各CATV事業者での監視アプリケーションの実装を容易にするためHTTPを使用している。表4にサポートする遠隔監視・設定内容を示す。

4. む す び

CATV事業者向けの無線LANルータ内蔵ONUの2.4GHz/5GHzデュアル無線LAN技術、下り2.5Gbps化の技術及び遠隔保守機能について述べた。

今後も、これまでの開発で培った光アクセス技術、無線アクセス技術、ルータ機能拡張技術を活用し、GE-PON装置又はルータ装置の高機能化を推し進める。またブロードバンドサービスへの展開だけでなく、無線LANルータ部のソフトウェア拡張性とGE-PONの長距離高速伝送を活用し、鉄道事業者向けシステムや産業用システム等の社会インフラサービスへの適用拡大を進めることによって“スマートで安心な社会”の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 妻藤 憲, ほか: GE-PONシステムのサービス展開, 三菱電機技報, **87**, No.5, 266~270 (2013)
- (2) 岡 稔久, ほか: 三菱通信ゲートウェイ“smartstar”, 三菱電機技報, **89**, No. 6, 338~342 (2015)
- (3) 総務省, 電気通信サービスの契約及びシェアに関する四半期データの公表(平成27年度第2四半期(9月末))

第5世代移動通信システム向け 無線アクセス基地局技術

友江直仁* 山口 聡**
平 明德**
谷口英司**

Radio Access Base Station Technologies for 5th Generation Mobile Communication System

Naohito Tomoe, Akinori Taira, Eiji Taniguchi, Satoshi Yamaguchi

要 旨

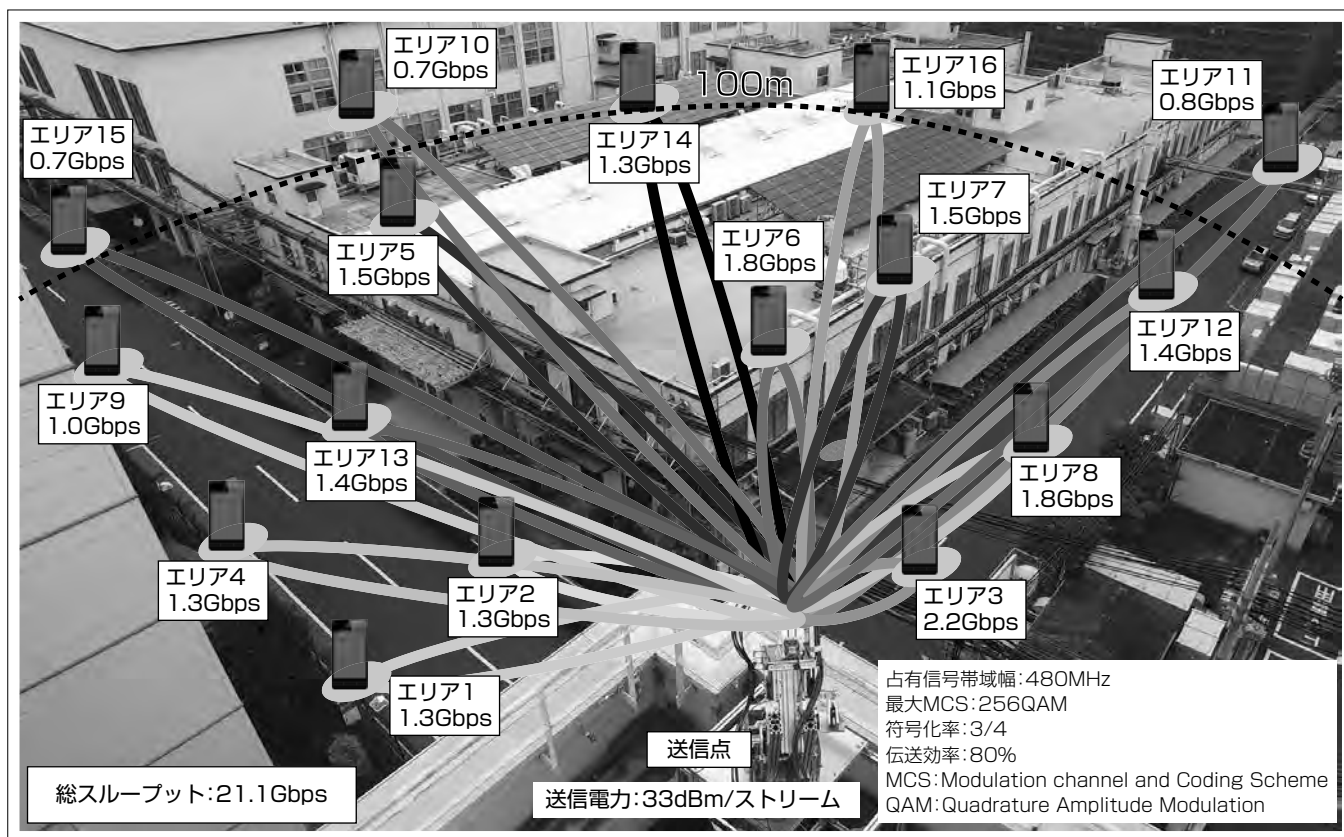
急増する移動通信のトラフィック対策、多種多様なサービス、アプリケーションの実現に向け、2020年以降の実用化が期待される第5世代(5G)移動通信システムの研究開発が急務となっている。

このような背景の中、三菱電機は、多素子アンテナとMIMO(Multiple Input Multiple Output)を組み合わせ、空間多重度を上げることで飛躍的に周波数利用効率を向上させ、大容量伝送を実現することが期待されるMassive MIMOの実用化を目指した無線アクセス基地局技術の研究開発を行っている。

(株)NTTドコモと当社は、高SHF帯(60GHz以上)Massive MIMOに空間多重度の増加と演算量削減を実現するハイブリッドビームフォーミング(Beamforming: BF)を用いるこ

とを提案し、総務省の採択を受けた。送信機は、複数のアレーアンテナで構成したサブアレー型とした。簡易に基地局を設置できるように、小型化を目指して各種構成要素の回路を全て一体化したRFフロントエンドモジュールの開発を進めている。また、上記とは独立して、Massive MIMOの技術確立に向けて、(株)NTTドコモに行った伝搬実験結果、及び伝送シミュレーション評価結果として、それぞれ次の(1)、(2)を明らかにした。

- (1) 高SHF帯(6~30GHz)に近いEHF(Extra High Frequency)帯(44GHz)の伝搬実験の結果、見通し環境では、直接波が支配的となる。
- (2) 伝送シミュレーション評価の結果、16ビーム空間多重で20Gbps伝送が実現可能である。



伝搬実験を行った実験場所全景と16ユーザー空間多重伝送シミュレーション評価結果

図は伝搬実験結果から作成したチャネルモデルを用いて行った伝送シミュレーション評価結果に基づくイメージである。伝送シミュレーション評価結果では、空間多重数16、ユーザー当たりの送信電力33dBmで、第4世代(4G)移動通信システムの規格上の最大伝送容量3Gbpsを超える20Gbpsの実現性があることを明らかにした。

1. ま え が き

第5世代(5G)移動通信システムは、2020年以降のIMT (International Mobile Telecommunications)の拡大を想定して、ITU-R勧告M.2083 (IMT Vision)⁽¹⁾にも述べられている、①Enhanced Mobile Broadband, ②Ultra-reliable and Low Latency Communications, ③Massive Machine Type Communicationsといった多様なユースシナリオへの対応が求められている。

本稿では、これらのユースシナリオの内、“Enhanced Mobile Broadband”に寄与する技術として、第4世代(4G)移動通信システムの規格上の最大伝送容量3Gbpsを超える20Gbpsの超大容量伝送の実現に向けて開発中のMassive MIMO技術に関して述べる。

2. 5G移動体通信システムの要求条件

図1に周波数帯域幅、空間、時間の3軸で表した、3.9G・4G・5G移動通信システムの物理リソースイメージを示す。

図1が示すように、3.9Gでは、周波数帯域幅20MHz、空間多重数2、無線フレームを構成するサブフレーム長1msの物理リソース構成によってデータレート150Mbpsとなっていた。4Gでは、サブフレーム長は変えずに、周波数帯域幅や空間多重数を上げることで、データレート300M～3Gbpsが可能な仕様となっている。これに対して5Gでは、周波数帯域幅100MHz以上、空間多重数8以上によって総通信帯域幅800MHz以上とすることで、ピークデータレート20Gbpsまでの高速・大容量化を図るとともに、サブフレーム長1ms以下とすることで、1ms以下の低遅延化を図ることが求められる。

この要求を実現するには、多素子アンテナとMIMOを組み合わせることで空間多重数を上げることで飛躍的に周波数利用効率を向上させることができるMassive MIMOが有効となる⁽²⁾。

3. Massive MIMOの送信機

Massive MIMOは、BFを適用することで、高周波数帯で大きくなる伝搬損失を補償するとともにチャネル情報(Channel State Information : CSI)に基づくプリコーディングによって、空間多重数を向上させる技術である。

Massive MIMOの送信機構成は、フルデジタルMassive MIMOと、ハイブリッドBFによる構成が考えられ、フルデジタルMassive MIMOよりもハイブリッドBFによる構成の方がCSI誤差に対する影響は小さいことが示されている⁽³⁾。これに対して、(株)NTTドコモと当社は、総務省が公募を行った“平成27年度における電波資源拡大のための研究開発”の研究開発課題の1つである“第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発～高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術の研究開発～”に対して、数100MHzの周波数帯域幅が確保できる高SHF帯(6GHz以上)にハイブリッドBFを用いたMassive MIMOの研究開発提案を行い、採択された⁽⁴⁾。

この研究開発では、周波数帯を15GHz帯、周波数帯域幅を480MHzとし、Massive MIMOによって空間多重数を16まで上げることで、ピークデータレート20Gbps以上をねらい、周波数利用効率の高い“Enhanced Mobile Broadband”の技術確立を目指す。また、サブフレーム長を4Gの1/4となる0.25ms以下とし、“Ultra-reliable and Low Latency Communications”の技術確立も目指す。

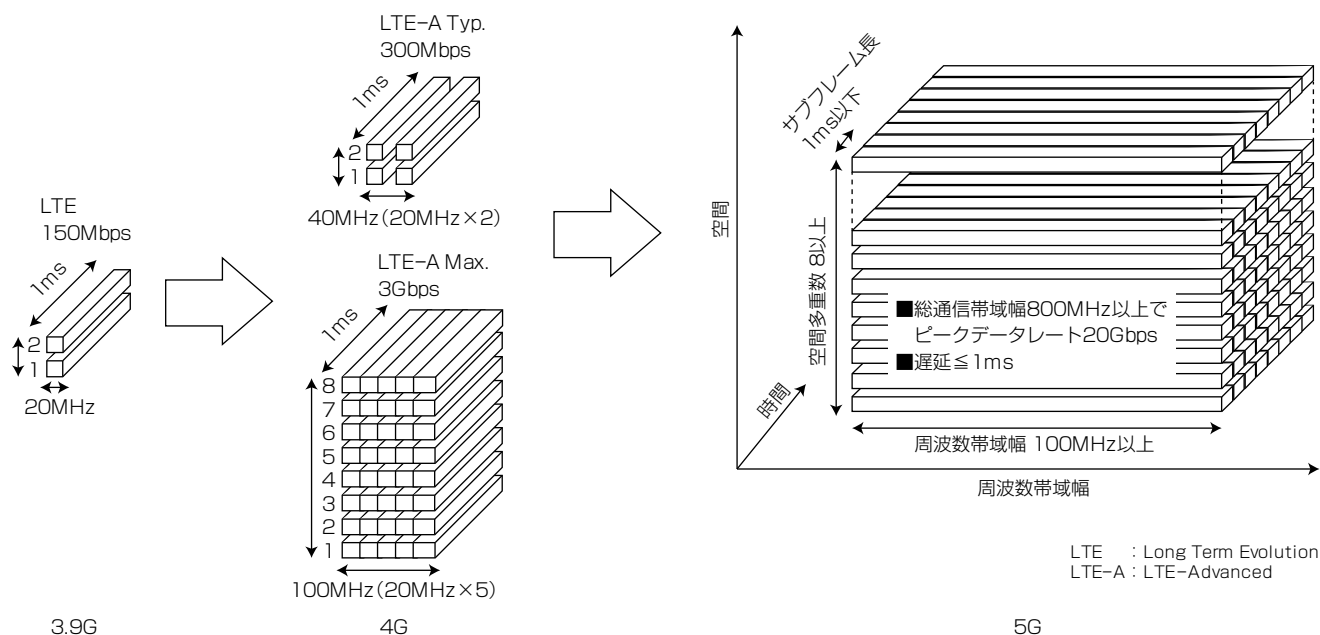


図1. 移動通信システムの世代別物理リソースイメージ

Massive MIMO送信機は、ハイブリッドBFによる構成としており、図2にこの構成を示す。アンテナ・RF(Radio Frequency)フロントエンドは、複数のアレーアンテナで構成されたサブアレー型となっている。サブアレーアンテナは、各素子の振幅と位相を調整することによってアナログビームを形成する。これによって通信を行う端末に対して高いアンテナ利得が得られ、1つの周波数リソースを利用して複数の端末との通信(空間多重通信)が可能となる。一方、アナログビーム特有のサイドローブは他端末に対して干渉要因となるため、デジタルプリコーディングによってビーム間の干渉を回避する。ハイブリッドBFでは、デジタルMIMO処理部で行うプリコーディングをアンテナ素子ごとではなくビームごとに行うため、飛躍的な演算量削減が可能となる⁽⁵⁾。

運用時に基地局装置を市街地のあらゆる場所に簡単に設置可能にするため、Massive MIMO送信機は小型かつ薄型であることが求められる。この開発では、アンテナやフィルタなどのRF受動回路と、増幅器や移相器などのRF能動回路、及び電源・制御回路を全て一体化したRFフロントエンドモジュールを実現し、基地局装置の小型薄型化を目指す。

開発するRFフロントエンドモジュールの構成を図3に示す。主に、多素子アンテナ基板、RF回路部、電源・制御ICチップ、外部装置との各種インタフェースから構成される。多素子アンテナ基板は、アンテナパネルと多層基板から成る。アンテナパネルは64の素子アンテナから構成されたアレーアンテナであり、各素子アンテナからの放射電力を端末方向に向けて空間合成することによって、指向性の鋭い高利得なビームを形成することができる。多層基板は、片方の面にRF回路部、電源・制御ICチップ、RF・電源・制御インタフェースを実装しつつ、多層基板内部にはアンテナ給電回路、フィルタ、及び分配・合成器などの受動回路を形成することで、アナログBFに必要なRFフロントエンドの各機能が高密度に集積される。

図4に、RFフロントエンドモジュールでのRF回路部の構成を示す。RF回路部は主にRF信号の位相や振幅を制御する移相器及び利得可変回路を内蔵するRF-IC、RF信号を増幅する電力増幅器IC及び低雑音増幅器ICで構成される。アンテナの多素子化に伴い、RF回路部では低消費電力化、小型化が課題となる。特に電力増幅器の消費電力は、アンテナシステム全体の消費電力への寄与が大きいことから、増幅器にはGaAs(ガリウム砒素)プロセスを用いるとともに、動的負荷変調方式を用いることで高効率化を図る。また、RF-ICはRF回路部全体のサイズに大きく影響するため、高集積化による小型化に適したCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスを用い、高精度にビーム形成を行う上でキーデバイスと

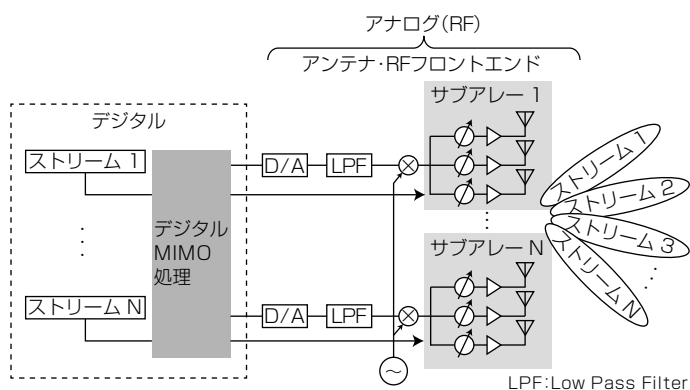


図2. ハイブリッドBFによるMassive MIMO送信機の構成

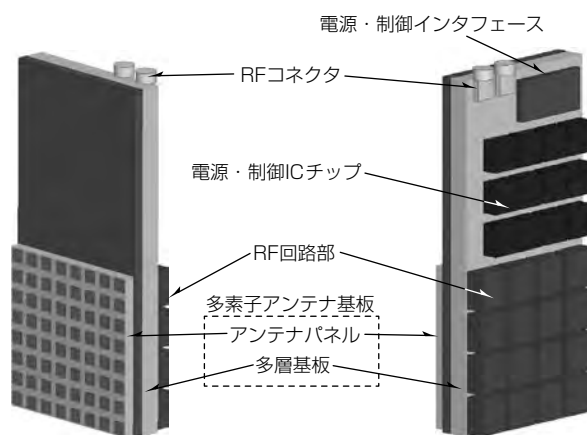


図3. RFフロントエンドモジュールの構成

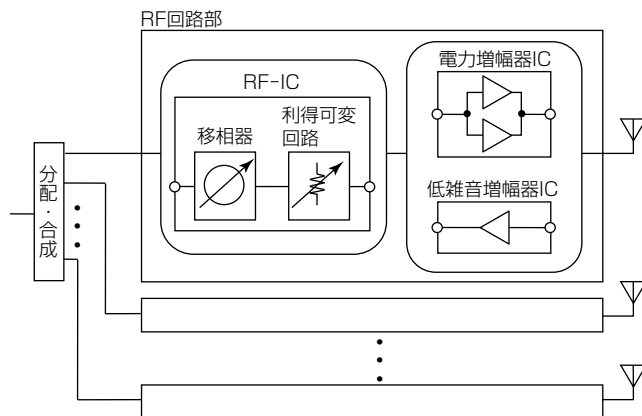


図4. RF回路部の構成

なる移相器はアクティブ方式による移相精度向上を図る。

4. Massive MIMOの基礎実験

高SHF帯におけるMassive MIMO技術の確立に向け、(株)NTTドコモと当社はMassive MIMOの基礎実験を行った⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この基礎実験では、高SHF帯(6~30GHz)に近いEHF帯(44GHz)で見通し環境での伝搬実験を行い、マルチビーム形成時のビーム間干渉を考慮したMassive MIMO基地局の周波数利用効率を評価し、大容量伝送の実現性を明らかにした。次に、伝搬実験結果、及び伝搬実

験結果から作成したチャンネルモデルを用いて行った計算機シミュレーション評価について述べる。

伝搬実験を行った実験場所の全景は要旨の図に示したとおりである。図5に送信機及び受信機、表1に主要な実験諸元を示す。送信アンテナは横6素子、縦8素子の48素子APAA (Active Phased Array Antenna)であり、高さ26mの建物屋上に設置した。送信周波数は44GHz、帯域幅100MHzの広帯域信号を、ビーム方向を切り替えながら25のエリアに向けて照射した。受信側ではホーンアンテナを用い、仰角(30~160°、真下が0°)と方位角(0~360°)を変えながら、各到来方向からの受信電力強度(Received Signal Strength Indicator : RSSI)を測定した。

図6に25エリアのうち、屋上と路上それぞれ1エリアの測定結果を示す。横軸が方位角、縦軸が仰角であり、このエリアに送信ビームを向けた場合の受信電力強度分布、言い換えれば所望信号の空間的分布を濃淡で示した。全てのエリアは見通し環境であるため、送信機方向に強い信号強度で直接波が観測されている。加えて、受信点周辺に反射した反射波がいくつか観測されているものの、近距離の金属面に反射している一部の例を除き、その電力は直接波と比較して小さいことが分かる。この実験では、サブアレー間干渉の影響を調査するため、別のエリアに送信ビームを向けた際の、干渉信号電力(サイドローブの電力)分布の測定も行った。ほとんどのエリアで、干渉信号電力は直接波が支配的となり、反射波成分は非常に小

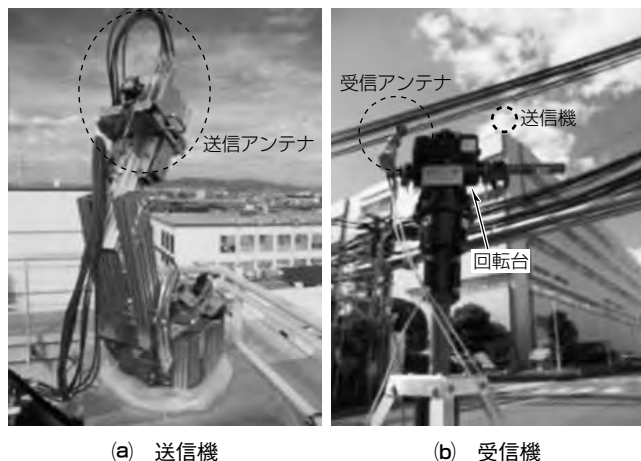


図5. 伝搬実験における送信機と受信機

表1. 伝搬実験の主要諸元

項目	諸元
送信アンテナ	48素子APAA(横6素子×縦8素子) 利得17.2dBi(半値幅15°)
周波数、帯域幅	44GHz、100MHz
送信機設置位置	屋上(高さ26m)
受信アンテナ	ホーンアンテナ 利得20.4dBi(半値幅20°)
受信機設置位置	測定場所：25エリア 場所：地表、屋上(高さ11m) 送受信機間距離：40~126m

さいことが明らかとなった。

この実験環境におけるMassive MIMO基地局の伝送容量を評価するため、測定データを用いて図7に示すクラスタチャンネルモデルを構成し、計算機シミュレーションを行った。チャンネルモデル化に当たっては、各測定点での全ての有意なパスの受信電力と到来角度、及び実験場所のレイアウト図から送受信機間の伝搬路を推定し、放射角度と遅延時間を求めた。推定された反射点は、複数の散乱物体から成るクラスタとみなし、マルチパスによるフェージングを生成した。

表2に主要なシミュレーション諸元を示す。基地局側は16サブアレー構成を仮定し、無指向性の1アンテナを持つ端末が16エリアに分布するものとした。個々のクラスタの角度広がり θ とし、480MHz幅のOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) による情報伝送を行う。

16ユーザーの空間多重(Multi-User MIMO)にはブロック対角化法を用いた。送受信機間の距離の差は、信号電力対雑音電力比(SNR)の差として扱い、シミュレーションを行った。



図6. 受信点での受信電力強度と到来角

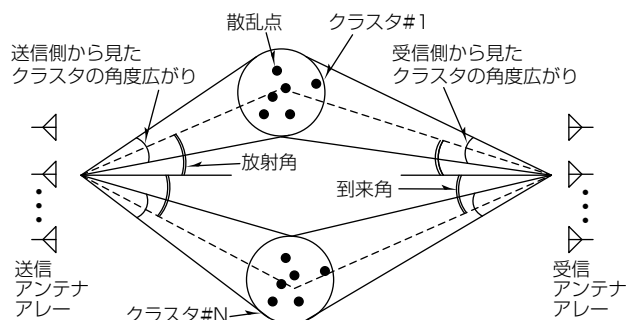


図7. クラスタチャンネルモデル

表2. 伝送シミュレーションの主要諸元

項目	諸元
伝送方式	OFDM
占有帯域幅	480MHz
変調方式	適応変調 QPSK／16QAM／64QAM／256QAM
誤り訂正	ターボ符号(1/2, 2/3, 3/4)
送信系サブアレー	2次元平面アレー(48素子)
送信系サブアレー数	16(10λ間隔)
ユーザー数	16ユーザー
受信系アンテナ	無指向性アンテナ×1
受信系NF	6 dB
クラスタ角度広がり	送信側・受信側とも5°
プリコーディング	ブロック対角化
オーバーヘッド	20%

QPSK：Quadrature Phase Shift Keying, NF：Noise Figure

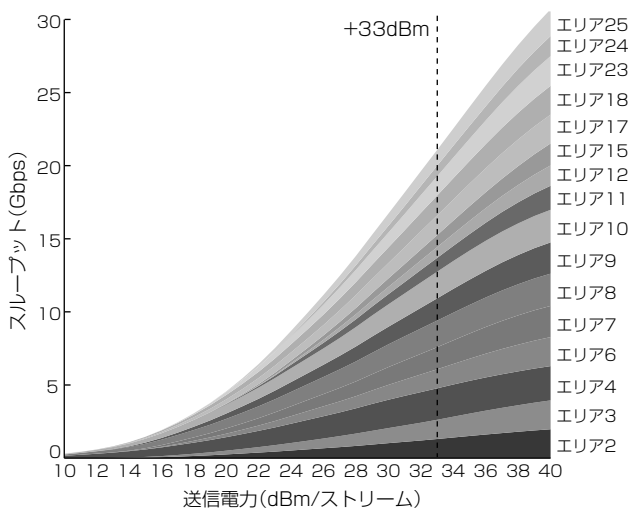


図8. 送信電力とシステムスループット

図8にユーザー(ストリーム)当たりの送信電力とシステムスループットの関係を示す。測定した25エリアのうち条件の良い16エリアにユーザー端末を配置した場合を想定した。測定エリアによって送信機からの距離が異なるため、平均受信電力に差異が生じる。図では各エリア別のスループット内訳についても示した。ストリーム当たりの送信電力を大きくするに従い、受信機における信号電力対干渉雑音電力比(SINR)が大きくなり、高次の変調方式・符号化率が選択されて高いスループットが得られる。同時通信する端末位置と端末ごとのスループットは要旨の図に示したとおりである。半径約100mの範囲に端末が分布した場合でも、ストリーム当たりの送信電力33dBmで、目標とする20Gbpsが達成できることが明らかとなった。今後

は、信号分離が困難なユーザーが近接するようなケースや、移動条件を考慮して検討を進め、実用的な環境で優れた伝送性能を確保可能な伝送方式の確立を目指す。

5. む す び

超大容量伝送の実現に向けて開発中のMassive MIMO技術について述べた。今後は、Massive MIMOの装置開発で、周波数利用効率の高い“Enhanced Mobile Broadband”の技術を確立し、2020年以降のトラフィック対策、多種多様なサービス、アプリケーションの実現に貢献する。

本報告には、総務省からの委託を受けて実施した“第5世代移動通信に向けた研究開発”の成果の一部が含まれており、関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- Recommendation ITU-R M.2083(IMT Vision)：Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (2015)
- 奥村幸彦，ほか：将来無線アクセス・モバイル光ネットワークの構想，電子情報通信学会技術研究報告，RCS2013-231/232 (2013)
- 小原辰徳，ほか：ハイブリッドビームフォーミングを用いる超高速Massive MIMOにおけるCSI誤差の影響とチャネル推定に関する検討，電子情報通信学会技術研究報告，RCS2014-338(2015)
- 奥村幸彦，ほか：5G実現に向けた高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術の研究開発の概要，電子情報通信学会技術研究報告，RCS2015-249 (2015)
- 岡崎彰浩，ほか：次世代無線アクセスに向けた高周波数帯活用の一検討，電子情報通信学会技術研究報告，RCS2014-81 (2014)
- 岡崎彰浩，ほか：5G超大容量Massive MIMO伝送におけるマルチビーム多重化技術と44GHz帯を用いた屋外基礎実験に基づいた評価，電子情報通信学会技術研究報告，RCS2015-22 (2015)
- A.Taira, et al.：Evaluation of Multi-Beam Multiplexing Technologies for Massive MIMO System Based on the EHF-band Channel Measurement, 2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications(APCC), 228~233 (2015)

大手私鉄向け150MHz帯空間波デジタル列車無線システム

杉浦哲広*
延澤 大*
手嶋牧子*

150MHz Band Digital Train Radio System for Major Private Railway

Tetsuhiro Sugiura, Masaru Nobesawa, Makiko Teshima

要 旨

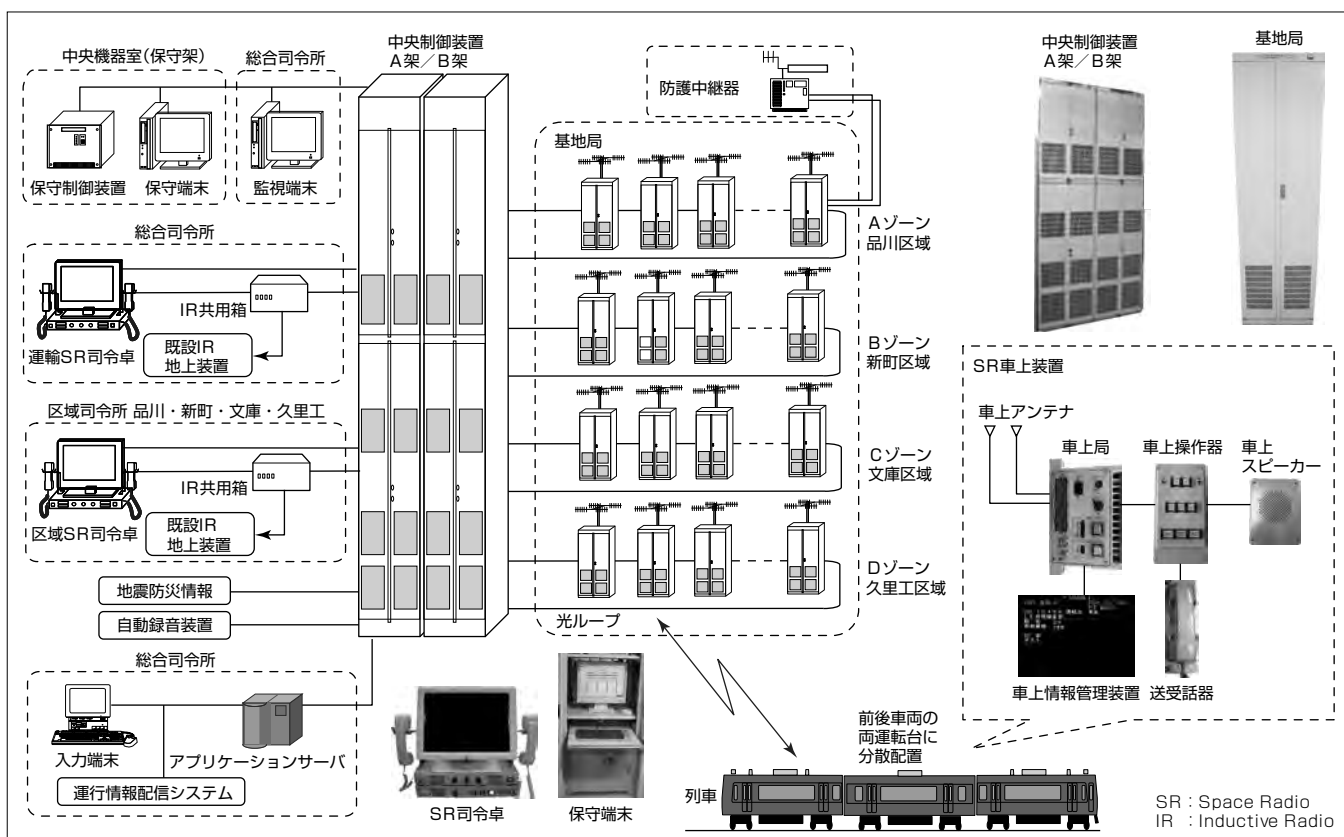
現在、私鉄の列車無線のほとんどは、アナログの空間波方式又は誘導無線方式で運用されているが、今後は、無線回線品質の向上、データ通信やアプリケーション連携によって、デジタル化が加速する見込みである。

三菱電機は、私鉄に割り当てられている150MHz帯向けに、最新の空間波無線技術を適用したデジタル列車無線システムを開発した。

2015年に京浜急行電鉄(株)の全線87kmへ納入した最新のデジタル列車無線システムは、高品質な音声通信や列車運行情報等のデータ通信の提供によって列車の安全・安定輸送に貢献するものである。

主な特長は次のとおりである。

- (1) 高品質な通信と雑音のないクリアな通話
独自の送信時間ダイバーシチ・適応等化受信技術や音声コーデックを適用して、高品質な無線通信と通話を実現した。
- (2) 自動無線チャンネル切替えによる安全性向上
区域境界で車上局のチャンネルを自動で切り替えるシステムを実現したことで、切替え漏れや誤切替えを防止して安全性を向上した。
- (3) 新旧システムのシームレスな運用
司令員や列車乗務員の操作性を考慮して、新旧システムを統合した司令卓等によるシームレスな運用を実現した。
- (4) 列車内の省スペース化
省電力パワーアンプの採用、高密度実装及び無線装置・共用器等を一体化して、装置の小型化を実現した。



大手私鉄向け150MHz帯空間波デジタル列車無線システム

京浜急行電鉄(株)向けのデジタル列車無線システムの構成を示す。中央機器室に中央制御装置、各司令所に司令卓、線路沿線に基地局やアンテナ、列車に車上装置を設置することで、電波を使用して地上と列車間に回線を構築して、司令員と列車乗務員間で通話や列車運行等のデータ通信を行う。トンネル区間等、列車間の直接防護電波が届かない場所に防護中継器を設置して防護電波を中継することで、防護受報エリアを確保している。

1. ま え が き

高速走行する列車と地上との間の無線通信には、安全・安心の厳しい要求に対応するため、高品質、高安定性、高速伝送等が求められる。当社は、これまでに列車無線システムの切替えに多く携わり、関連する技術・ノウハウを蓄積してきた。

京浜急行電鉄(株)の列車無線は、1968年以来、誘導無線(IR)のアナログ方式で運用していたが、通話品質を向上させて安全・安定輸送を確保するため、外来ノイズに強い当社の空間波(SR)方式のデジタル列車無線に更新することになった。

当社は、私鉄に割り当てられている150MHz帯向けに、最新の空間波無線技術を適用したデジタル列車無線システムを開発して、2015年に京浜急行電鉄(株)の全線87kmへ納入した。このシステムは、高品質な音声通信や列車運行情報等のデータ通信を提供して、列車の安全・安定輸送に貢献している。

本稿では、このシステムの概要と特長について述べる。

2. デジタル列車無線システム

2.1 システム構成

デジタル列車無線システムは、中央機器室に中央制御装置、各司令所に司令卓、線路沿線に基地局やアンテナ、列車に車上局やアンテナを設置することで、地上と列車間にデジタル無線回線を構築して、司令員と列車乗務員間で電波を使用して通話や列車運行等のデータ通信を行っている。

トンネル区間等、列車間の直接防護電波が届かない場所には、防護中継器を設置して防護電波を中継することで防護受報エリアを確保している。

また、全線を品川区域・新町区域・文庫区域・久里工区域の4区域に分割して運輸司令と各区域司令が連携して運行管理を行っているため、基地局のゾーンを4区域に分割して、司令卓を総合司令所と各区域司令所に分散した配置構成としている。

地上の基地局は数kmおきに設置して、区域ごとに光回線でループ接続することで中央制御装置と基地局間の回線を構築しており、基地局と車上局間は無線回線で通信を行っている。

装置の主要機能を表1に示す。

2.2 無線諸元

地上と列車間の列車無線通信は、FDMA(Frequency-Division Multiple Access)／SCPC(Single Channel Per Carrier)方式のデジタル無線回線で構築している。無線諸元を表2に示す。

2.3 機能

このシステムは、次の機能を備えている。

表1. 装置の主要機能

装置名	設置場所	機能
中央制御装置	中央機器室	・通話・データ通信の回線制御 ・基地局との回線接続 ・司令卓やサーバとのインタフェース
保守制御装置	中央機器室	・監視制御・保守運用情報の一元管理、制御
保守端末	中央機器室 区域機器室	・各機器の動作状態監視・制御用操作・モニタ表示
監視端末	総合司令所	・各機器の動作状態監視用操作・モニタ表示
司令卓	総合司令所 区域司令所	・通話・データ通信用操作・モニタ表示(司令員用)
IR共用箱	総合司令所 区域司令所	・新旧システムでの通話・モニタの共用制御
基地局	線路沿線	・車上装置との無線通信(通話・データ通信) ・中央制御装置との回線接続
防護中継器	線路沿線	・防護電波中継 ・基地局との回線接続
車上装置	列車内	・基地局との無線通信(通話・データ通信) ・司令員との通信制御 ・通話・データ通信用操作・モニタ表示(列車乗務員用)

表2. 無線諸元

項目	仕様
伝送路	空間波
アクセス方式	FDMA／SCPC方式
周波数帯	150MHz帯 4 対波
周波数間隔	6.25kHz
変調方式	$\pi/4$ シフトQPSK
伝送速度	9.6kbps
基地局ダイバーシチ構成	送信時間ダイバーシチ 受信ダイバーシチ
車上局ダイバーシチ構成	受信ダイバーシチ

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

(1) 通話・放送機能

- ①一斉司令通話：司令員と在線している全列車乗務員との間の通話
- ②個別司令通話：司令員と指定列車乗務員との間の通話
- ③音声個別通話：司令卓の操作による一斉司令通話から個別司令通話への切替え通話
- ④緊急割り込み通話：列車から車上操作器を操作することで、通話中の司令員と緊急割り込み通知で通話
- ⑤時報放送：定時刻に列車で時報を放送

(2) 非常系機能

- ①防護発報：該当列車から在線している周辺の列車への通知
- ②防護中継：トンネル区間等、列車間の直接防護電波が届かない場所に防護中継器を設置することで、防護電波を中継
- ③防護発報司令通知：防護発報した該当列車から司令員への防護発報の通知
- ④自動地震放送：他システムからの地震防災情報を在線中の全列車へ通知する、列車乗務員への放送
- ⑤手動地震放送：司令卓の操作で地震防災情報を在線中の全列車へ通知する、列車乗務員への放送

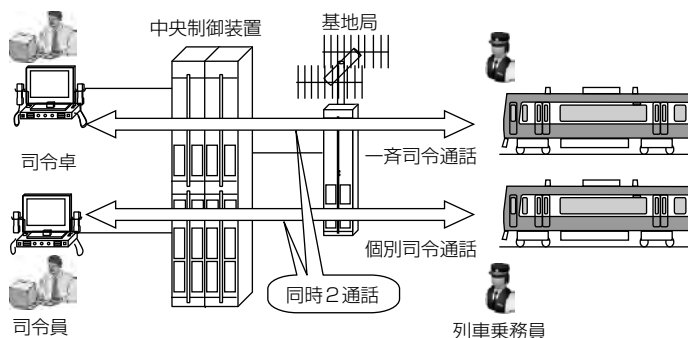


図1. 各区域での同時2通話の実現

(3) データ伝送機能

- ① 運行情報配信：列車の運行状況や沿線情報などを全車両のモニタ装置へ表示
- ② 乗務員支援情報配信：災害情報等の乗務員支援情報を全車両のモニタ装置へ表示
- ③ 故障情報配信：車両モニタ装置で検知した装置の故障情報や誤設定を地上側へ通知

(4) その他制御・保守機能

- ① 自動無線チャンネル切替え：列車が異なる区域を通過する際の、車上局の無線チャンネルの自動切替え
- ② 音声モニタ：司令員と列車乗務員との間の通話を、中央機器室や司令所及び駅へモニタ出力
- ③ 通話記録：司令員と列車乗務員間の通話の常時録音
- ④ 遠隔監視制御：監視端末及び保守端末で、各機器やネットワーク回線の動作状態を遠隔で監視制御

2.4 無線回線の構成

列車無線は、区域ごとに無線通信制御用の1回線、通話用の2回線、運行情報などのデータ通信用の1回線の合計4回線の構成である。

通話用回線を2回線持っているため、各区域で同時に2通話（斉司令通話と個別司令通話）実施可能である（図1）。

また、無線通信制御用回線及びデータ通信用回線を通話用回線と独立して設けているため、通話中であっても緊急割り込み通知、運行情報、乗務員支援情報などのデータ伝送を同時に行える。

3. システムの特長

3.1 高品質な通信と雑音のないクリアな通話

隣接する複数の基地局から同一周波数の電波を同時に送信すると、車上局で両方の電波を受信して無線が干渉（ビート干渉）を起こす。そこで、先行波に対して時間を遅らせて同一内容を送信する“送信時間ダイバーシチ”，及び波形歪（ひずみ）成分を適応的に推定して受信信号から波形歪の影響を回避する“適応等化受信技術”を適用することで、同一波電波干渉による通信品質劣化を防ぎ、全線にわたって高品質な無線回線を確保した（図2）。

また、当社が独自に開発した音質重視の符号構成とした

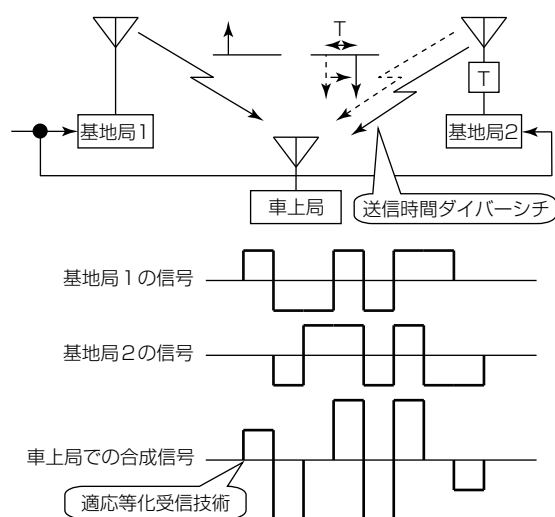


図2. 同一波干渉対策（ビート干渉対策）

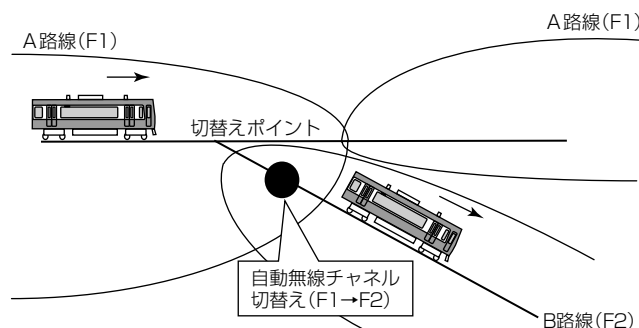


図3. 自動無線チャンネル切替え

“列車無線専用音声コーデック（Rail system-Code Excited Linear Prediction：RL-CELP）”を適用することで、全線に雑音のない高音質な通話を実現して、地上の司令員と列車乗務員との間の正確な通話をサポートしている。

3.2 自動無線チャンネル切替えによる安全性向上

全線を4区域に分割して区域ごとに異なる通話やデータ通信を行うため、それぞれ異なる無線チャンネル（周波数）での運用が必要である。

そこで、列車運行の安心・安全性、運用利便性向上を図るため、列車が区域境界を通過する際に車上局の無線チャンネルを自動的に切り替えて列車乗務員のチャンネル切替え漏れや誤切替えを防止するシステムを構築した（図3）。

3.3 新旧システムのシームレスな運用

車上設備は、数年をかけて全編成更新予定であり、システム移行期には、地上設備は既設IRシステムを併設して既設IRシステムとSRシステムを併行運用する。

司令員や列車乗務員の操作性を考慮して、新旧システムを統合した司令卓や車上操作器等を導入したシームレスな運用を実現した（図4）。

3.4 列車内の省スペース化

車上局は、列車無線、防護無線及びこれらを1つのアンテナで運用するための共用器で構成され、従来はそれぞれ

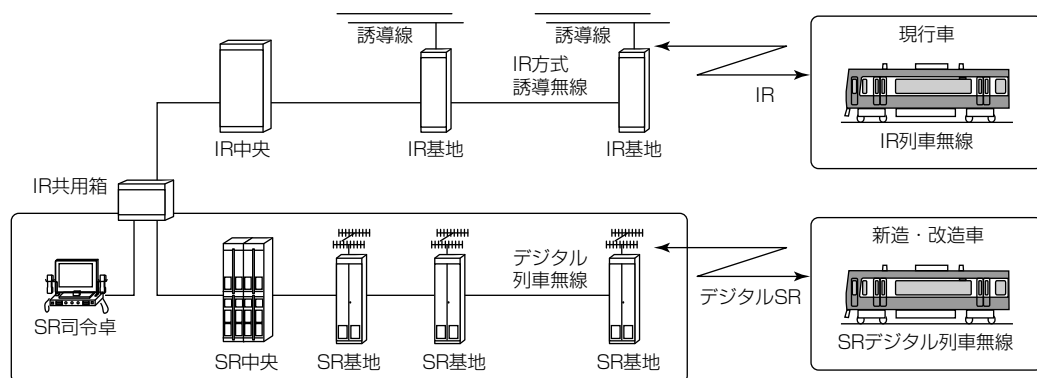


図4. 新旧システムの併行運用

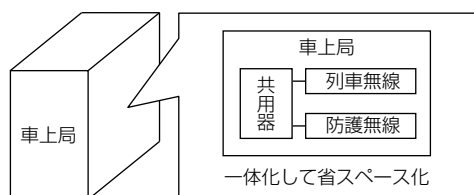


図5. 車上局構成

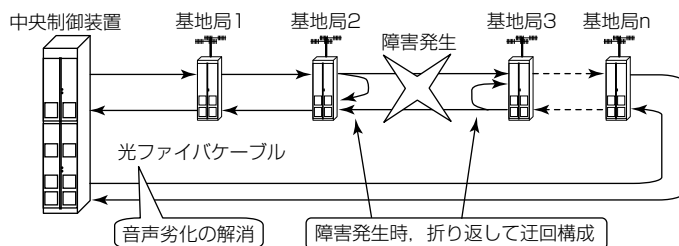


図8. アプローチ回線の光ネットワーク化

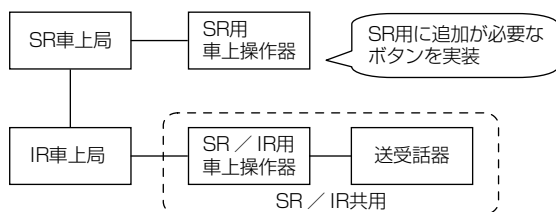


図6. 装置の共用化

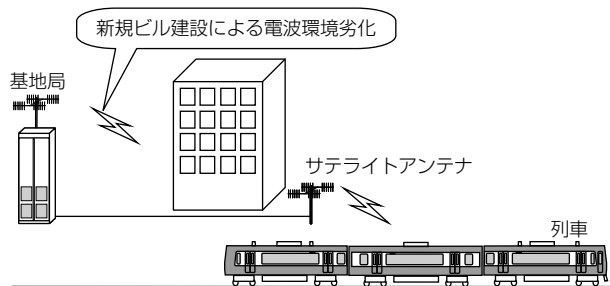


図7. サテライトアンテナによるエリア拡張

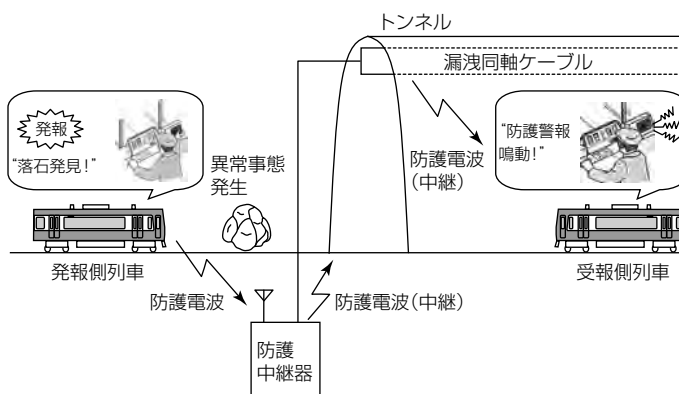


図9. 防護電波の発報及び中継

を別装置としていたため列車内のスペース及び配線が多く必要であった。そこで、車内の限られた空きスペースに設置可能とするため、装置の一体化を行って省スペース化を図った(図5)。

また、システム移行期におけるIRシステムの併用を考慮して、IRシステムの車上操作器と送受信器を共用する構成にすることで、運転台への実装が必要な機器の省スペース化を図った(図6)。

3.5 その他の特長

(1) 周辺環境の変化に柔軟に対応

沿線のビル建設など、通信環境の変化による無線品質劣

化の際には、必要な箇所にサテライトアンテナを追設するだけで容易にエリアを拡張できる(図7)。導入時も山間部にサテライトアンテナを適切に配置して、サービスエリアを確保した。

(2) アプローチ回線の光ネットワーク化

中央制御装置と基地局との間のアプローチ回線を、デジタル信号によって光ネットワーク化することで、従来のアナログ方式の課題であった音質劣化を解消した。さらに、中央制御装置からゾーン内全基地局を光ファイバケーブルで直列に接続した2重化ループ構成にすることで、ケーブルなどの回線障害発生時でも継続運用が可能となる迂回(うかい)構成で信頼性を向上させた(図8)。

(3) 防護電波中継による防護受信エリア確保

トンネル区間など列車間の直接防護電波が届かない場所に防護中継器を設置して漏洩(ろうえい)同軸ケーブル及び

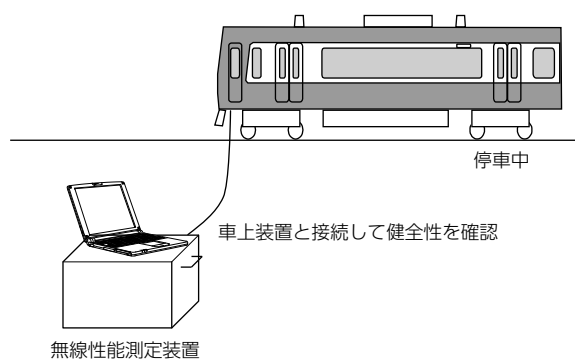


図10. 車上装置の健全性の確認

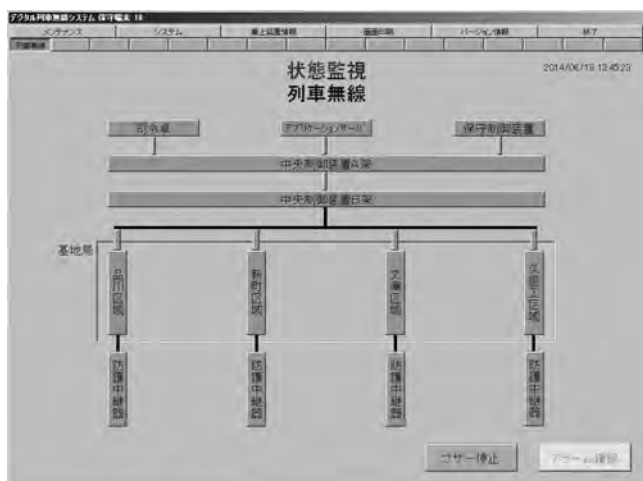


図11. 監視端末／保守端末画面イメージ

サテライトアンテナを介して防護電波を中継することで、防護受報エリアを確保した(図9)。

(4) 無線性能測定装置による装置健全性の確認

デジタル更新した車上装置の健全性を確認するため、無線性能測定装置を各車両検車区に導入して、車上装置の故障や無線性能の劣化などを早期に発見して対処できるようにした。

無線性能測定装置を車上装置近傍に持ち込み、車上装置

を取り外すことなく無線性能を自動で測定できる。併せて、音声導通確認、車上操作器のスイッチ動作確認機能も実装して、車上装置の健全性や迅速な故障要因の特定を確認可能としている(図10)。

(5) 遠隔監視制御によるメンテナンス性の向上

監視端末及び保守端末では、各装置やネットワーク回線の動作状態の遠隔監視、各装置の冗長構成部位の系切替えなどの遠隔装置制御、各装置の遠隔ログ収集機能を備える(図11)。この機能によって、司令員、保守員が司令所及び中央機器室で各装置やネットワーク回線の集中監視や遠隔制御を行うことができ、メンテナンス性を向上させた。

4. む す び

2015年に京浜急行電鉄(株)の全線87kmへ納入した150MHz帯空間波デジタル列車無線システムの概要と特長について述べた。

今後も、これまで培ったデジタル列車無線の技術を活用して周波数資源の有効利用を図り、高品質な無線回線を提供することで、列車の安全・安定輸送に寄与する。また、新たなサービス、アプリケーションとの連携で付加価値を創造して、鉄道分野の発展や社会インフラの構築に貢献していく。

このシステムの開発に当たり、多大なご指導をいただいた京浜急行電鉄(株)を始めとする関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 富岡勇人, ほか: 京浜急行電鉄におけるデジタル列車無線の導入, 鉄道と電気技術, 27, No.1, 43~47 (2016)
- (2) 三瀬敏生, ほか: デジタル列車無線システム—東日本旅客鉄道(株)首都圏在来線への導入—, 三菱電機技報, 82, No.2, 167~170 (2008)

MCAシステムの接続回線IP化対応

永野好昭* 三井茂太**
山本正幸*
西出和弘*

IP Line Implementation in MCA System

Yoshiaki Nagano, Masayuki Yamamoto, Kazuhiro Nishide, Mota Mitsui

要 旨

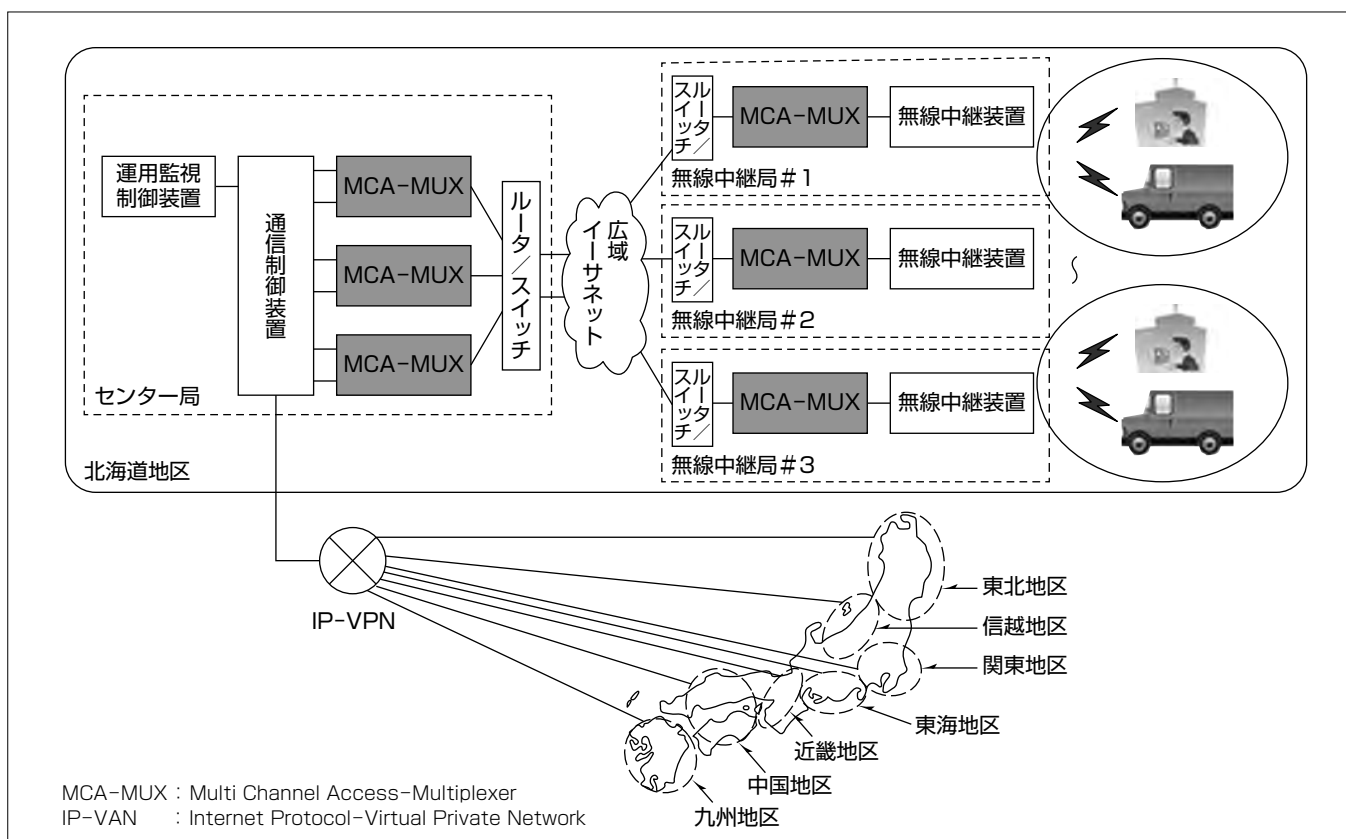
800MHz帯デジタルマルチチャネルアクセスシステム（以下“MCAシステム”という。）は、複数の周波数を多くの利用者と共用する業務用移動通信システムである。MCAシステムでは、各地区のセンター局に設置した通信制御装置と、山頂などの複数の拠点にある無線中継局内に設置されている無線中継装置との間を、デジタル専用線でスター型（集線装置を中心として放射状に端末を接続する方式）に接続し、各地区内での通信を実現している。

昨今、デジタル専用線通信機器の保守継続の困難化とIP通信のコスト低廉化等によって、各電気通信事業者にデジタル専用線サービスの終了に向けた動きがあり、デジタル専用線を利用しているMCAサービスへの影響が懸念される状況となってきた。このため、接続回線を、広

域イーサネット^(注1)(IP)回線に置き換える開発を実施した。

従来の回線交換型のデジタル専用線とは異なるパケット交換型の広域イーサネット回線に対応するため、次の課題解決を行った。①伝送遅延対策について、データのペケット化時間間隔や、揺らぎ吸収バッファサイズを変更可能な設計とした。②網同期実現の方法について、GPS(Global Positioning System)の1PPS(Pulse Per Second)信号から基準クロックを生成する方式とした。③回線及び装置の冗長構成について、冗長構成のカードの、IPアドレス、MAC(Media Access Control)アドレスを仮想アドレスとして共通化することによって実現した。

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。



広域イーサネット接続による800MHz帯デジタルMCAシステム

800MHz帯の周波数を使用した業務用無線で、無線中継局の無線エリア内であればMCAシステムに登録された無線機間で通信可能な広域の無線サービスである。複数の通信チャンネルを多数の利用者が共用することで、電波の有効利用と利便性を実現した業務用移動通信システムである。

1. ま え が き

MCAシステムは、複数の周波数を多くの利用者で共用する陸上移動通信システムであり、ARIB STD-T85⁽¹⁾に準拠した業務用移動通信サービスとして2003年からサービスが開始され、2011年公示の周波数割当て計画による再配備を経て現在に至っている。

図1に各地区内のMCAシステムの構成を示す。MCAシステムは全国を8地区に分割して運用されている。それぞれの地区のセンター局に設置した通信制御装置と、山頂などの複数の地点にある無線中継局内に設置されている無線中継装置が、MCA-MUX(MCA Multiplexer/demultiplexer)という多重／分離装置を介して、電気通信事業者が提供するデジタル専用線によって接続され、各地区内の通信を行っている。

2014年ごろから、デジタル専用線通信機器の保守継続の困難化とIP通信のコスト低廉化等によって、デジタル専用線サービスの終了に向けた動きが各電気通信事業者にあり、デジタル専用線を利用しているMCAサービスへの影響が懸念される状況となってきた。これを受け、MCAサービス継続のため対策が必要となった。そこで、MCAサービスを継続するために、デジタル専用線を広域イーサネット(IP)回線に代替える開発を行った。

2. 機 器 構 成

2.1 従来の機器構成

従来機器の回線接続構成を図2に示す。PRI(Primary Rate Interface: 1.544Mbps)やBRI(Basic Rate Interface: 144kbps)のデジタル専用線が回線インタフェースカードに接続され、ユーザー端末の音声用データ(V.24インタフェース)や制御用データ(X.21インタフェース)が端末インタフェースカードに接続され、これらのデータが多重・分離される構成となっている。

2.2 開発品の機器構成

現在のMCAシステムは長年安定運用されていることから、システム構成や運用保守作業の変更量を小さくすること、また、連続運転されているシステムであることから、回線切替えに伴う断時間を短くすることが必要であった。

広域イーサネット回線対応するWAEI(Wide Area Ethernet Interface)カードをMCA-MUX内の回線インタフェースカードとして新規設計した。図3に開発機器のWAEIカード使用時の回線接続構成を示す。

WAEIカードでは多重化されたデータを、一定周期ごとに、シーケンス番号等のヘッダを付加しパケット化して、UDP(User Datagram Protocol)伝送を行う。データ伝送に関わる処理はハードウェアで実現し、ARP(Address Resolution Protocol)処理やログ機能はソフトウェアで実現する。

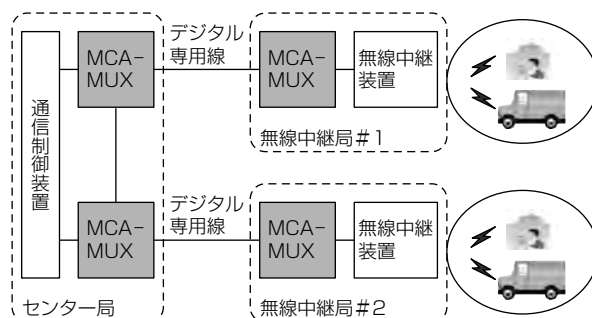
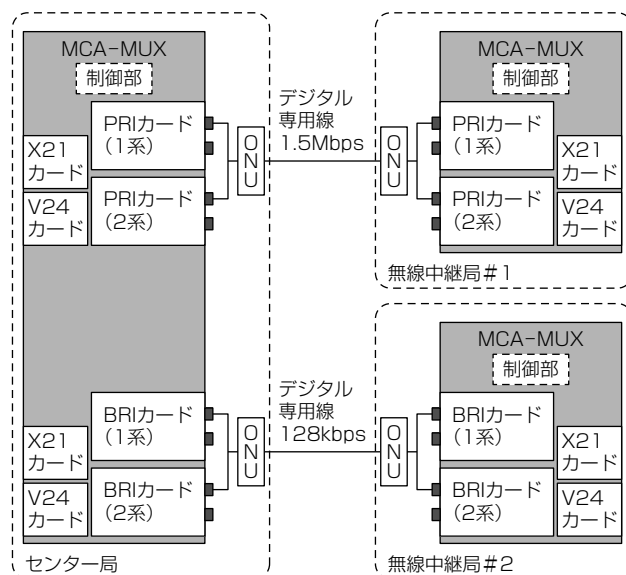
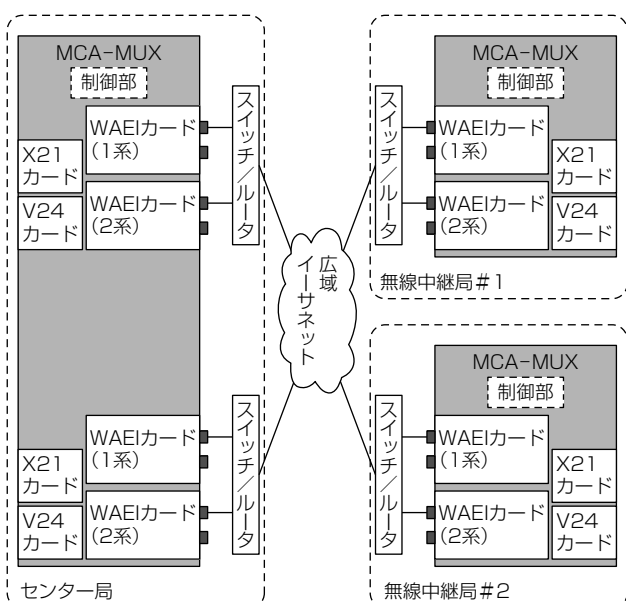


図1. 従来のMCAシステム構成



回線インタフェースカード：PRIカード／BRIカード
 端末インタフェースカード：V24カード／X21カード
 制御部：制御、多重／分離
 ONU：Optical Network Unit

図2. 従来機器の回線接続構成



回線インタフェースカード：WAEIカード
 端末インタフェースカード：V24カード／X21カード
 制御部：制御、多重／分離

図3. 開発機器の回線接続構成

3. 開発の課題

MCA-MUXはデジタル専用線を利用することで、次の特長を持っている。

(1) データ伝送時の低遅延

MCA-MUXでは、入力されたデータをビット単位で多重／分離を行い転送する方式をとっており、装置内での遅延時間は2.6ms以下で実現している。

(2) クロックの網同期を実現

デジタル回線のデータ伝送クロックから基準クロック(8kHz)を抽出して、システム内のクロックを生成し、MCAシステム全体のクロックの網同期を実現している。

(3) 瞬断のない二重化切替え

MCA-MUX内の二重化されている回線インタフェースカードは、両系のカードを稼働状態として回線からの入力を両系に供給し、出力をスイッチで切り替える構成とすることで、瞬断のない二重化切替えを実現している。

回線交換型のデジタル専用線から、パケット交換型の広域イーサネット回線に代替えるためには、従来前提としていた低遅延とクロック伝送が得られないこと及び瞬断のない二重化切替えが不可能なため、次の課題の解決が必要である。

- ①データの伝送遅延増大と伝送時間の揺らぎへの対応
- ②網同期実現の方法
- ③装置及び回線の二重化構成の手法

4. 課題の解決策

4.1 伝送遅延及び伝送時間の揺らぎ対策

伝送の遅延や揺らぎの発生は不可避であり、それらがMCAシステムの動作に影響を及ぼさない範囲にとどめる必要がある。

4.1.1 MCA-MUXの遅延許容量の算出

MCAシステムではユーザーの音声通信(双方向通話及び同報通信)及びデータ伝送サービスが提供されている。伝送遅延時間増大の影響を評価するために、現行システムに意図的に回線遅延を挿入し、音声通話品質とデータ伝送を利用するアプリケーションの動作を検証した。その結果、遅延量を順次増大させ、60ms(往復)を超過すると、音声通話品質では問題はないが、一部のアプリケーションが正常に動作しなくなることが判明した。

この評価試験結果から、今回の回線変更によって増大する遅延量の設計上の許容最大値は54ms(往復)と設定した。

また、各電気通信事業者から、サービス品質保証制度(Service Level Agreement)として表明されている往復の遅延時間は県内10ms、県間30ms程度であり、これを正常な回線上で発生し得る最大値と想定した。回線とMCA-MUXとの間のルータ等の機器による遅延発生量は

1ms/通過とし、計4msと想定した。

これらから、MCA-MUX内の遅延許容量は、全許容量(54ms)から装置外の遅延量(最大34ms)を減算したものとなり20msと設定した。

4.1.2 MCA-MUX内で発生する遅延量の制限値設定

MCA-MUX内の遅延要因を次の3つに分類し、それぞれの遅延量の制限値を設定した。

(1) 送信データのバケット化による遅延

連続データを一定時間間隔でバケット化すると、そのバケット時間間隔分の遅延が発生する。バケット化する間隔を短くすると遅延は短くできるが、データをバケット構造化した際に必要なヘッダ等のオーバーヘッドが大きくなり、データ伝送に必要な帯域が増大する。回線のコストは、契約する帯域が増大するに従い高くなる。そのためにデータ発生量に応じて、適切な間隔(帯域が512kbps以下の場合は、2.5ms、512kbpsより大きい場合は1.25msを標準の選択値とする)でバケット化する必要がある。MCA-MUX内では2.5msのマルチフレームタイミングを基準として動作しているため、この時間を基本に0.5倍と2倍のパケット化時間間隔を選択可能な設計とした。表1に元データレートに対する生成データレートとその増大倍率とパケット化間隔との関係を示す。

(2) 揺らぎ吸収による遅延

回線からの受信データを即座に転送する方式とした場合、回線上での伝送時間の揺らぎによって、データ受信が少しでも遅れると、データ未達によるエラー(Underrun)が発生する。これを防ぐために、受信データを一旦揺らぎ吸収バッファに格納してから処理をする。この機能によって吸収バッファ内でのパケット到着順序逆転、及び重複到着パケットの破棄の対応も可能となっている。吸収バッファサイズは5msに相当する量(2.5ms単位の場合は2個分)を標準をとして、設定によって可変可能な設計とした。また、WAEIカードの運用中の統計情報として、パケット通信情報(受信パケット数/パケットロス数)や受信バッファの状態(オーバー・アンダーフロー発生有無/バッファの使用量)等のログを最大1か月分内部保存する仕組みを備えた。

(3) 回路実装による遅延

回路実装によって発生する遅延は1.0ms以下で設計した。

表1. パケット化時のデータレート変化

元データレート	生成データレート					
	1.25ms間隔		2.5ms間隔		5ms間隔	
kbps	Mbps	倍率	Mbps	倍率	Mbps	倍率
64	0.74	11.6	0.50	7.8	0.38	5.9
128	0.81	6.3	0.56	4.4	0.44	3.5
256	0.93	3.7	0.69	2.7	0.57	2.2
512	1.19	2.3	0.95	1.9	0.83	1.6
1,152	1.83	1.6	1.59	1.4	1.47	1.3
1,536	2.21	1.4	1.97	1.3	1.85	1.2

これらの遅延量の制限値設定によってMCA-MUX内で増加する遅延量は標準設定値の場合に $17\text{ms} = ((\text{パケット化時間間隔: } 2.5\text{ms}) + (\text{吸収バッファサイズ: } 5.0\text{ms}) + (\text{回路実装による遅延: } 1.0)) \times (\text{対向機器: } 2\text{台})$ となり、 20ms 以下を満足する。回線遅延が小さくMCA-MUX内の許容遅延量が多い場合には、パケット化間隔を 5ms として、伝送量を低減し、データ伝送間隔を小さくすることが可能である。

4.2 網同期実現の方法

従来はデジタル専用線のデータ伝送クロックから基準クロック(8kHz)を抽出して、PLL(Phase Locked Loop)によって生成したクロックでMCAシステム全体のクロックの網同期を実現していた。広域イーサネット回線ではクロックを送出できないため、対策が必要となる。GPS信号を受信し、GPS受信ユニットから出力される1PPS信号から基準クロック(8kHz)を生成する方式を採用した。

GPS受信は設置環境や天候の影響を受けやすいので可用性(availability)の向上を図るために次の対策を実施した。

(1) 降雪によるGPS受信への影響対策

北日本／東日本等の山頂にあるMCA無線中継局では降雪が多く、GPS受信への考慮が必要となるため、雪山用のGPSアンテナを採用した。また、GPSアンテナ設置箇所は、GPS受信に適した全空に対しての見通しのよさだけではなく、落雪を受けにくい、積雪に埋まらないなどの条件を考慮して選定する必要がある。

(2) 落雷対策

MCA無線中継局は落雷がよく発生する山頂等に設置されることが多く、落雷によるGPSユニットやMCA-MUX本体の障害発生の可能性を低減するために以下の方策をとった。

GPSアンテナとGPSユニットの接続構成を図4に示す。

①GPSユニットの保護

GPSアンテナからGPSユニット間にアレスタを取り付けGPSユニットの故障のリスクを低減する。

②MCA-MUX本体の保護

GPSユニットの出力ポートにアイソレータを使用し、GPSユニットとMCA-MUX本体間のクロック信号の直流的な回路分離を実施した。またGPSユニッ

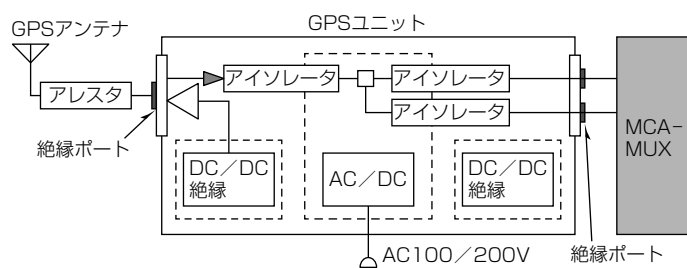


図4. GPSアンテナとGPSユニットの接続構成

トの入出力部には絶縁ポートを使用し、GPSアンテナ側からGPSユニットに雷サージが印加した場合でも、MCA-MUX本体に雷サージを流さない構造とした。

落雷等によってGPSユニットが故障し、1PPS信号が出力不可となった場合でも、MCA-MUXの自走クロックの精度を 0.03ppm とすることで、クロックスリップの発生等の影響が限定的になるように対応した。

4.3 装置及び回線の二重化構成

4.3.1 装置の二重化構成

WAEIカード2枚構成による現用／予備切替え方式とし、1枚をプライマリカード、もう1枚をバックアップカードとする。2枚のカードでIPアドレス及びMACアドレスを仮想アドレスとして共通のものを使用し、カードがStandbyからActive状態に変化する際に、GARP(Gratuitous Address Resolution Protocol)を送信することで、接続先に通知する方式を採用した。

IP対応で従来と同様の無瞬断でカード切替えを実現するには装置規模が大きくなるため、カード切替え時の一部パケット消失は、許容する仕様とした。

4.3.2 回線の二重化構成

回線の二重化は信頼性向上のためには望ましい手段であるが、回線費用の増大を伴うために、その回線の重要度とコストのバランスで二重化を適応するかどうかを選択することが必要である。今回はシステム構成の変更規模を最小に抑制する観点から、MCA-MUX内では複雑な回線二重化を行わず、接続するルータの機能を利用して回線の二重化を実現できるようにした。

5. 回線の特性・性能の事前評価

デジタル専用線からの円滑な移行を図るため、広域イーサネット回線の仕様・品質を事前に正確に把握した。3か所異なる電気通信事業者の回線を敷設し回線の評価環境を構築し、回線帯域、回線遅延／揺らぎ、回線切替え時間等の評価試験を行った。開発品の動作を模擬するために、指定したサイズのUDPを定周期($1.25\text{ms}/2.5\text{ms}/5\text{ms}$ 等)で送信し、パケット受信側で到達の有無、到着順序逆転、伝送遅延時間等を評価する装置を試作した。

5.1 回線帯域の評価

回線の契約帯域に対して、伝送可能な通信量を評価した。評価は、特定のサイズの packets を一定間隔で継続して送信し、全送信パケットに対して正常に受信できたパケット数を基に実伝送容量を算出して行った。1つのパケットサイズにおける測定時間は30秒とし、パケットサイズを変更して同様の測定を行った。これを双方向で同時に実施した。その結果例を図5、図6に示す。それぞれ送信レートが契約帯域までは、受信欠落は発生せず、送信レートと受信レートが完全に一

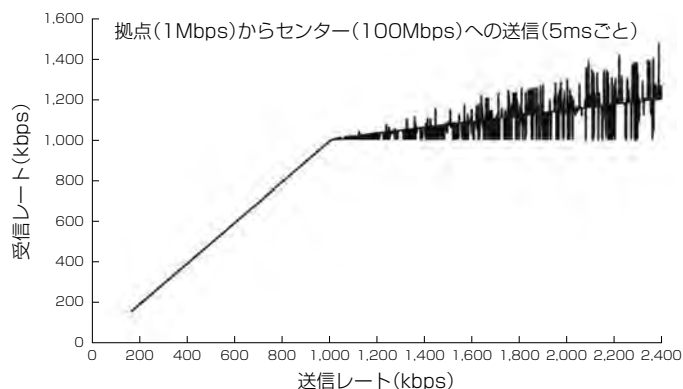


図5. 受信-送信レート評価結果 例1

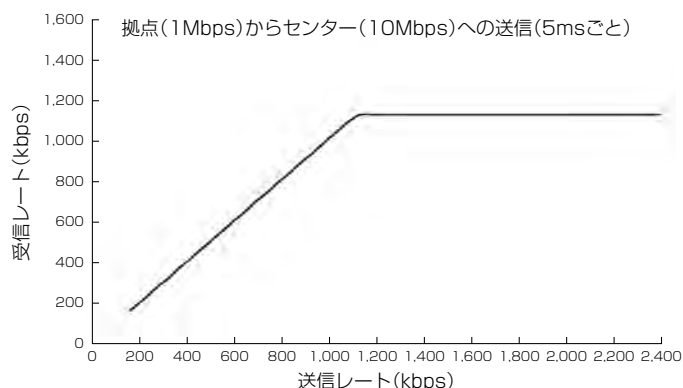


図6. 受信-送信レート評価結果 例2

致している。送信レートが契約帯域を少し超えたところから、受信欠落が発生し始め、超過パケットが破棄され、帯域制御が機能していることが読み取れる。UDPデータ送信周期を1.25ms、2.5msと変更した場合も同様の結果が得られ、送信周期の違いによる差は見られなかった。

このように広域イーサネット回線では、回線帯域の制御は厳密に行われており、契約帯域を超える通信は不可能と判断できる。よって必要となる帯域量算出時には、MCA-MUX間で必要となる回線帯域に加えて、ルータ／スイッチのリモート保守、各機器のブロードキャスト等の運用に伴い発生するデータの伝送量変動を考慮する必要がある。

5.2 回線遅延／揺らぎの評価

回線対向で遅延時間を測定できる機器を用意し、遅延時間とその揺らぎを評価した。L2スイッチのみで接続(ルータを使用せず)した場合の伝送遅延は1ms程度、ルータを

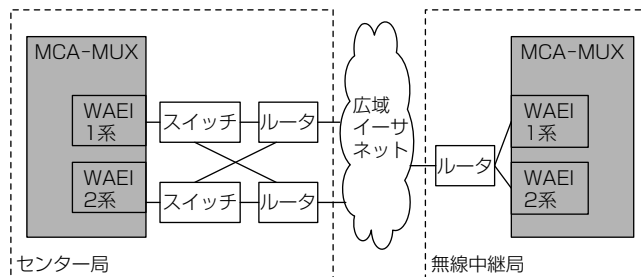


図7. 回線とルータ接続構成

経由した場合の遅延時間は2.2~2.9msで、今回の評価試験を行った試験用回線は、試験場所近隣の回線収容局から敷設されていたと推測されるものの、回線遅延に関するSLAの規定(県内10ms、県間30ms)は十分に満足されていると考えてよい。

5.3 回線切替え時間の評価

図7に回線とルータの接続構成を示す。図の左側は回線が二重化されており、右側は一重である。

MCA-MUX側がWAEIカード切替えを主導する場合はGARPによる切替え通知がルータに到着して切り替えが100msで完了し、回線の不通などでルータが回線を切り替える場合はルータの冗長化プロトコルによって差異があるが、数十秒から1分程度を要して切り替わることを確認した。

6. む す び

MCA-MUXのIP回線対応開発を実施し、フィールド試験で設計通りの良好な動作を確認した。今後デジタル専用線から広域イーサネット回線へ切替え工事の順次実施が予定されており、MCAシステムの継続運用に支障は発生しない。

現在デジタル専用線を利用している他のシステムでも、デジタル専用線からIP回線への変更は必然的な流れである。今回のMCAシステムの広域イーサネット対応開発での成果は、他のシステムのIP回線への変更を行う際にも活用可能であり、円滑なIP回線への移行に貢献可能なものである。

参 考 文 献

- (1) ARIB標準規格 STD-T85：800MHz帯 デジタル MCAシステム、一般社団法人 電波産業会 (2003)

広域監視ネットワーク向け HD・IP複合一体型カメラ

笠井康行*
岸田教敬*
沖西佳雄*

PTZ Camera with HD and IP for Wide Area Surveillance System

Yasuyuki Kasai, Yukinori Kishida, Yoshio Okinishi

要 旨

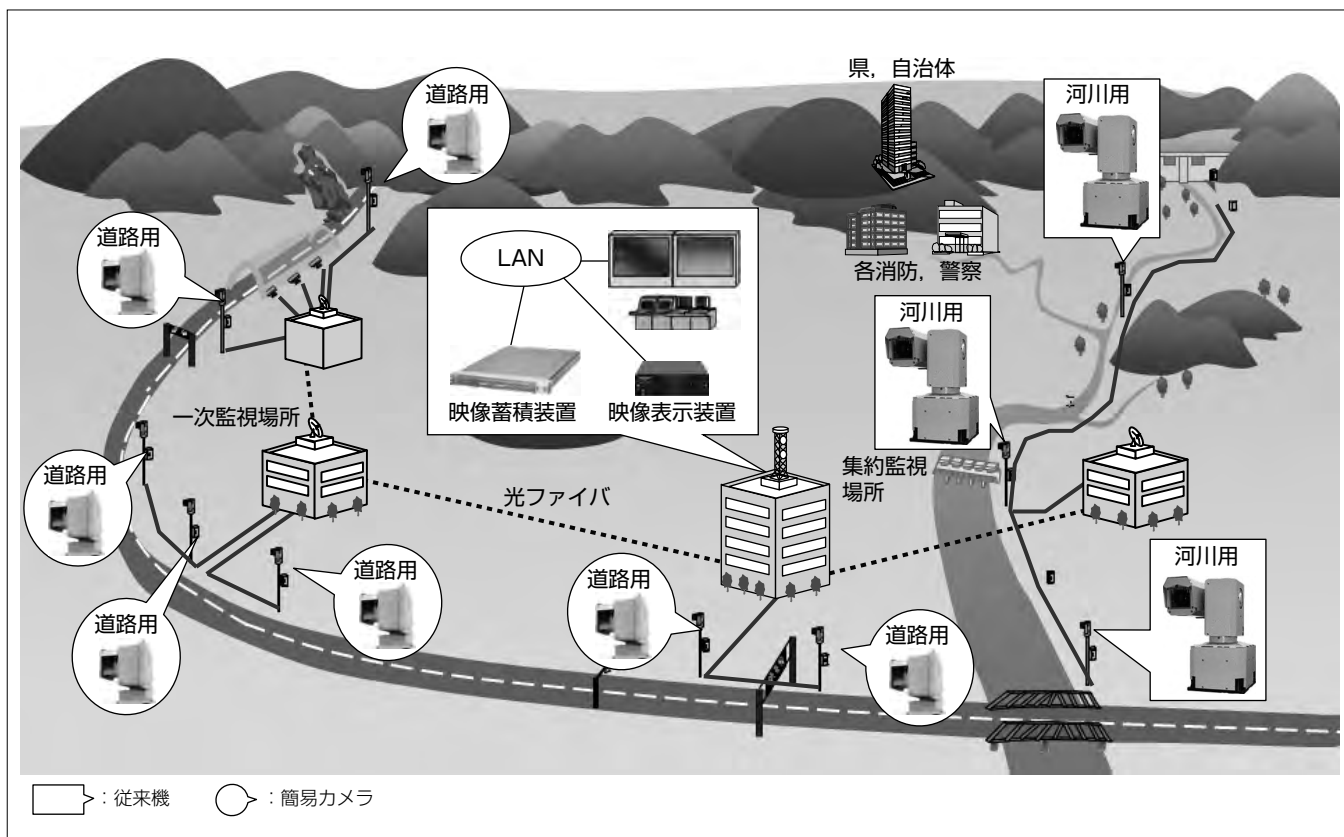
国土交通省(以下“国交省”という。)では、国土強靱(きょうじん)化や、より安全・安心な社会を目指すインフラ管理に向けて、広域監視カメラ配備の充実を図っている。その一環として、2020年の東京五輪開催も見据え、道路監視用途に特化した複合一体型カメラ(注1)(以下“簡易カメラ”という。)の配備が計画されている。

今回、三菱電機ではこの需要に応えるため、広域監視ネットワーク向けHD(High Definition)・IP(Internet Protocol)複合一体型カメラ“デジタルRoboty HM-7000”を開発した。デジタルRobotyは、従来の複合一体型カメラで使用している各種技術を踏襲すると同時に、民需用カメラ向けとして新規採用した配信性能に優れた信号処理LSIを組み合わせ、インナーフォーカスレンズ制御などの

新技術を導入して開発した製品である。主な機能と特長を次に示す。

- (1) 施工性を考慮した小型化の実現
- (2) 従来機からの更なる耐環境性能向上
- (3) 国交省簡易カメラ仕様に準拠
 - ①フルHD(1920×1080ピクセル)
 - ②最低被写体照度0.5ルクス
 - ③画像圧縮方式H.264、多重化方式TS(Transport Stream)／TTS(Timestamped TS)
- (4) 広範囲な監視エリアを確保するための水平360度エンドレス、垂直±90度旋回

(注1) 国交省の名称は“巡回式簡易カメラ装置”



広域監視ネットワークのイメージ

現場に設置されたカメラで符号化された映像ストリームは、光ファイバで集約監視場所に配信される。集約監視場所では目的に合わせた映像蓄積や映像表示を行い、現場状況の迅速な把握や住民サービスの向上に利用している。

1. ま え が き

国交省では豪雨などによる自然災害に対し初動迅速化が喫緊の課題であり、被災状況を正確に把握するために監視映像のハイビジョン化を推進しており、カメラにおけるアナログからデジタルへの置き換え、伝送装置におけるMPEG-2からH.264への置き換えが進んでいる。また東京五輪に向けた監視強化の一環として、一般国道や有料道路へのカメラ追加を行うために、簡易カメラ導入の方針を打ち出した。簡易カメラは標準仕様が2016年3月に決定され、調達に向けた準備が進められている。性能の基準となる最低被写体照度を道路用途に合わせて見直すことによる調達コストの低減を図っている。

当社では早くから簡易カメラについて市場調査を行っており、求められる機能・性能・価格を分析し、新製品の開発が必要であると判断した。図1に製品マップを示す。簡易カメラは製品マップの中央のゾーンに該当する。このゾーンは従来の複合一体型カメラから仕様は制限されているものの、価格が民需製品に近い。屋外カメラケースに実装したドーム型カメラが考えられるが、ドーム型カメラはワイパーがないため雨天時の視認性が悪く、垂直旋回範囲も限定されるという問題があった。

これらの状況から当社では、従来の複合一体型カメラに使用している耐環境性(ワイパー)や旋回動作(垂直±90度)などの各種技術と、民需向けで採用したカメラ信号処理LSIを組み合わせ、インナーフォーカスレンズ制御などの新技術を導入したデジタルRoboty HM-7000をラインアップに加えるため開発した。

2. デジタルRoboty

2.1 仕 様

表1にデジタルRobotyの仕様を示す。

2.2 特 長

(1) 小型化

図2にデジタルRobotyの外観、図3に従来のIP複合一体型カメラとの外形比較を示す。

デジタルRobotyは市場での施工性を考慮し、小型化を実現した。次に挙げる部品の採用によって、当社従来のIP複合一体型カメラと比較して容積66%削減、質量60%

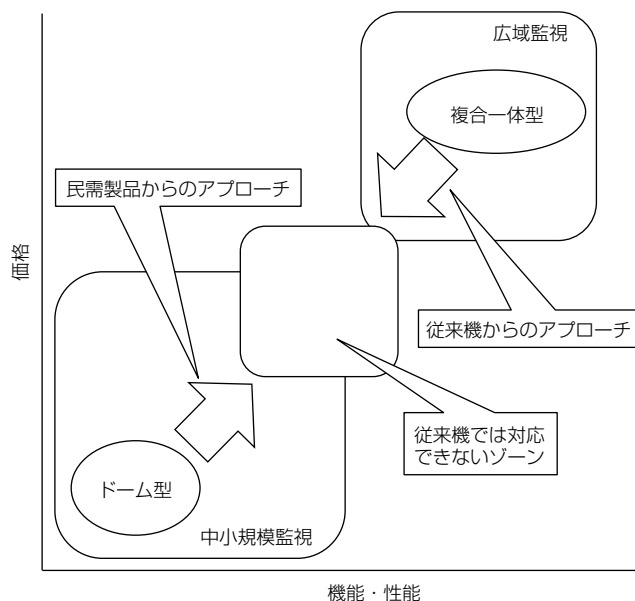


図1. 製品マップ

表1. 仕様

項目	仕様
型名	HM-7000
撮像素子	1/2.8型CMOSセンサ, 208万画素
最低被写体照度	0.5lx(電子増感OFF時)/0.03lx(電子増感16倍)
有効画素数	1920(H)×1080(V), 有効208万画素
焦点距離/最大口径	f=4.5~135.0mm/F=1.6~4.4
ズーム倍率	光学30倍/電子ズーム16倍
白黒切替え	あり
オートフォーカス	あり
旋回範囲	水平360度エンドレス, 垂直±90度
最大旋回速度	水平180度/s, 垂直90度/s
ワイパー	あり
デフロスター	あり
画像圧縮方式	H.264
多重化方式	MPEG-2 TS/ARIB STD-B24 TTS
文字表示機能	あり(英数かな)
設置状態	据置き/天吊
温度・湿度	-20~+40℃, 90%RH以下
耐風強度	動作可能 ^(注2) 40m/s以下/非破壊 ^(注3) 60m/s以下
防水性・防塵性	IP66
外形寸法	308(W)×338(H)×294(D)(mm)
質量	12kg以下

(注2) 正常動作する保証範囲上限風速

(注3) 機器が破損しない保証範囲上限風速

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor



図2. デジタルRoboty

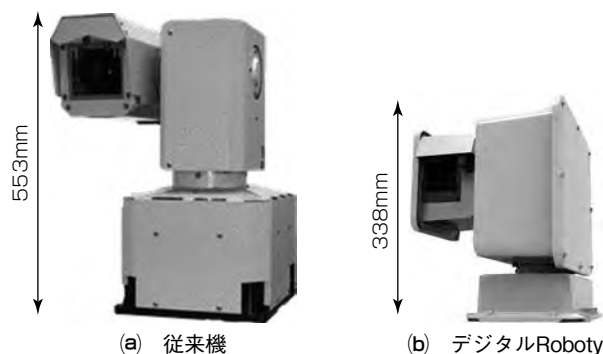


図3. 従来機との外形比較

削減を達成した。

- ①インナーフォーカスレンズの採用
- ②1チップLSIの採用
- ③小型モータの採用
- ④汎用スリップリングの採用

(2) 耐環境性能

デジタルRobotyは市場での設置環境を考慮して次に挙げる耐環境性能向上を実現した。

- ①防水性能IP66の確保
- ②耐風強度(非破壊) 60m/sの確保
- ③高温環境に耐えうる放熱構造

(3) その他特長

- ①水平360度エンドレス、垂直±90度で旋回してドーム型では困難な水平から上方向監視が可能
- ②ワイパーやデフロスターを搭載し悪天候下での監視が可能
- ③H.264方式でフルHD(2~12Mbps)の映像伝送が可能
- ④国交省映像ストリームに準拠し、TS伝送／TTS伝送の切り替えにも対応
- ⑤カメラ制御コマンドは国交省“CCTV(Closed Circuit TeleVision)設備制御インタフェース仕様書(案)”に準拠
- ⑥カメラ地点名など、映像への文字重畳が可能(英数／記号／かな／カナ／JIS第一／第二に対応、最大4行)
- ⑦設置環境に応じ、据置き／天吊両方の設置が可能

3. 開発内容

3.1 開発要素

表2に開発要素と実現方法を示す。

3.2 小型化

(1) インナーフォーカスレンズの採用

カメラ部で最も大きな部品はズームレンズである。従来機では明るさに優れたフロントフォーカス方式のズームレンズを採用しているが、デジタルRobotyではインナーフォーカスレンズを採用する。一般的なレンズの内部構成を図4に示す。

フォーカスを合わせる際、フロントフォーカス方式はフロントレンズが移動するため、レンズ全長が変化する。イ

ンナーフォーカス方式はインナーレンズが移動するため、レンズ全長が変化しないことから、小型化が可能となっている。ただし、インナーフォーカス方式はズーム時にフォーカス位置が変わることから、ズーム倍率に応じたフォーカス位置補正(ズームトラッキング制御)が必要で制御が複雑になる問題があった。そこで制御反応速度維持のため、独立したCPUを搭載して、ズームトラッキング制御をメインCPUから分離し、メインCPUの処理が複雑になる問題を解決した。従来機のレンズと比較して容積74%、質量80%削減した。

(2) 1チップLSIの採用⁽¹⁾

従来機では、IP伝送処理を行うためにIP伝送用の専用基板を搭載しており、小型化が困難であった。デジタルRobotyでは、カメラ信号処理とIP伝送処理を1チップ化したLSIを採用した。その結果、IP伝送用の専用基板が不要となり、IP伝送部の容積を86%削減した。また、映像信号処理の回路規模も削減され、これらのインナーフォーカスレンズの採用と合わせてカメラ部の容積を65%削減した。

(3) 小型モータの採用

従来機のカメラ部のサイズと質量では旋回に大きなトルクが必要であり、大型モータを採用している。デジタルRobotyではカメラ部の小型化を実現したことによって、旋回に必要なトルクを減少させたことで、従来機より小型なモータの採用が可能となり、回転部の容積を26%削減した。

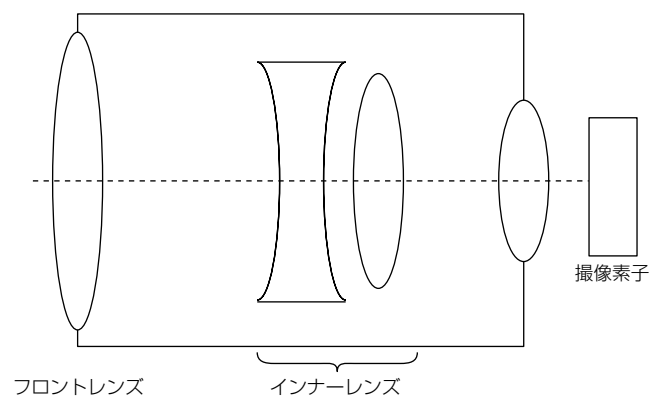


図4. レンズの内部構成

表2. 開発要素と実現方法⁽²⁾

特長	従来機種(HM-3000)	デジタルRoboty(HM-7000)	実現方法
小型化	フロントフォーカスレンズ	インナーフォーカスレンズ	レンズ制御用CPUによるトラッキングカーブ制御
	カメラ信号処理とIP伝送処理が独立	1チップ化LSIの採用	カメラ信号処理とIP伝送処理の統合
	大型モータ	小型モータ	カメラ部小型化による必要トルクの減少
	カスタムのスリップリング(□50×107)	汎用スリップリング(φ44.5×42.9)	伝送電力削減
耐環境性能向上	防水性・防塵性 IP65(JIS C 920)防噴流形、防塵形	防水性・防塵性 IP66(JIS C 920)耐水形、耐塵形	防水部品の見直し
	防雪フード	防雪フード(耐風強度を風速比で50%向上)	構造シミュレーションによる保持構造の見直し
	温度仕様40℃(日除け板あり)	温度仕様40℃(日除け板なし)	熱流体シミュレーションによる部品配置最適化

(4) 汎用スリップリングの採用

複合一体型カメラでは、360°エンドレス旋回を実現するため、IP伝送部と回転部の接続にスリップリングを採用している。スリップリングは、ブラシの接触で信号や電力を伝送することによって、伝送を維持したまま回転を実現した部品である。従来機のスリップリングは大型なカスタム品を採用していたが、デジタルRobotyでは伝送電力を従来機より30%以上削減したことによって、小型で安価な汎用品の採用が可能となった。

これら小型化を実現することによって、デジタルRobotyとして従来機と比べ容積を66%削減し、質量を60%削減した。

3.3 耐環境性能の向上

デジタルRobotyでは、耐環境性能の向上として防水性能の向上、耐風強度の確保、高温環境に耐える放熱構造実現を図った。次にそれぞれの項目に対する取組みを述べる。

(1) 防水性能IP66の確保

防水性能を従来機のIP65からIP66に上げると、12リットル/分から100リットル/分に水量が増加する(注4)。そのため、可動部の防水部品に水が直接かからない構造であっても、筐体(きょうたい)に当たった噴流水が跳ね返り、防水部品を配置している部位まで水がまわり込むことになる。この水のまわり込みに対して長期にわたり防水性能を確保するためには、従来機以上に防水部品の摺動(しゅうどう)面の信頼性を高めておく必要がある。特に次に述べる耐オゾン性に対して十分に備えを行うことが重要である。

デジタルRobotyが設置される工場地帯や自動車の交通量が多い地域では、窒素酸化物が排出されており、窒素酸化物の光化学反応によってオゾンが生成される。防水用ゴム材には分子構造に二重結合を持つ材料を使用することが一般的である。その場合、材料に応力が生じ、長期間オゾンが作用すると亀裂が発生する可能性がある。可動部の防水部品にはゴム材を使用しており、亀裂が発生すると亀裂部から微小な塵(ちり)が侵入して製品動作時に塵を巻き込み、可動部の摺動面を防水する部位に微小な傷が生じる。塵を巻き込んだ状態で旋回動作を繰り返すと傷が拡大して装置内部に水が浸入する。

デジタルRobotyでは、長期間の装置運用に耐えうる防水部品材料を複数候補の中から選定している。その選定方法としてオゾン濃度をストレスとしたアイリングモデルによる寿命推定試験を実施した。図5は今回採用した防水部材の寿命推定の概念図である。濃度の異なるオゾン環境に一定の応力を加えた材料を投入して亀裂発生時間を確認し、外挿によって期待寿命を確認した結果、製品寿命以上であることが分かった。オゾン耐性が優れている要因を調査したところ、防水部品表面にある保護膜がオゾン環境に暴露されることを防いでいるためであることが分かった。

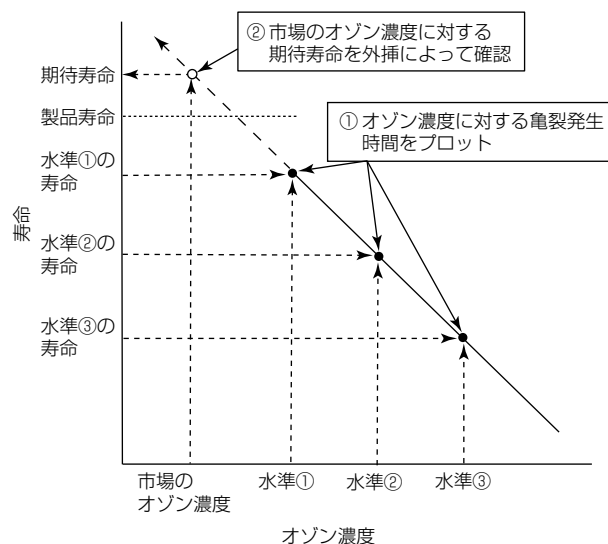


図5. 耐オゾン環境での防水部材寿命推定の概念図

選定した材料で防水部品の形状に成形し、高濃度のオゾン環境下に暴露した状態で旋回耐久試験を行い、試験後の防水性能を確認している。

なお、低温環境では防水部品の硬度が高くなる。その結果、摺動部の摩擦トルクが大きくなり、防水性能に影響する。これに対して選定部品は製品使用環境以下の温度条件で旋回耐久試験を行い、試験後の防水性能に問題がないことを確認している。

(注4) 電気機械器具の外郭による保護等級(JIS C 0920)で指定された水量を示す。

(2) 耐風強度(非破壊) 60m/sの確保

デジタルRobotyは積雪地域に設置する場合に備え、防雪フードを取り付け可能な構成としている。この防雪フードは最も面積の大きい側面から受風した際に大きな荷重を受けるため、耐風強度の確保が課題であった。

この課題を解決するため、強度設計検証技術(3)を複合一体型カメラへ適用して検討した。強度設計検証技術は、計算精度を向上させるために必要な解析モデルの作成ルールや各種物性値のデータベースなどで構成されており、ものづくり前に製品の強度を検証することが可能である。

図6中央に示すとおり、従来型構造は、類似機種の方雪フード構造を参考にして保持フレームと防雪フードが長手方向に平行する構造にしていた。この構造は、構造シミュレーションによる強度確認の結果、デジタルRobotyのサイズでは、仕様(耐風強度)に対するマージンが小さい結果となった。そこで開発構造(図6右)では、受風面に対して直行する保持フレームを構成して、風荷重に対する剛性を高めた。図7に示すとおり、保持フレームと側面板金の接合点が最大応力を示すが、仕様(耐風強度)に対するマージンを確保することができた。

デジタルRobotyでは従来機に対して耐風強度を風速比で50%向上させた。

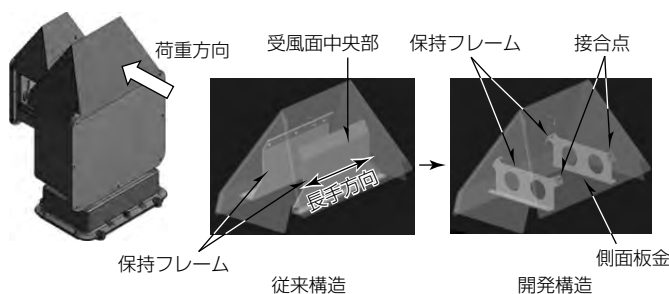


図6. 防雪フードの保持構造

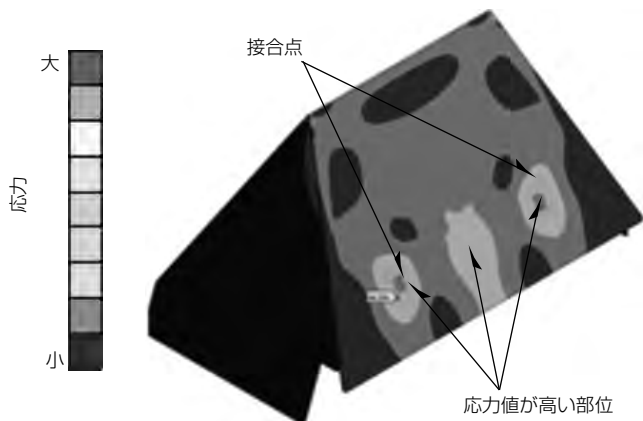


図7. 構造シミュレーション

(3) 高温環境に耐えうる放熱構造

デジタルRobotyでは小型化のため、従来機に設けられている日除けフード全廃と放熱フィンのような熱対策部品を用いない構造を実現した。日除けフードを全廃すると日光によって筐体が温められ、筐体内温度が上昇する。したがって、筐体内温度上昇に影響されにくい部品配置の設計が求められる。

この開発の設計段階で精度の高い熱流体シミュレーションを行うため、放熱設計検証技術⁽¹⁾を複合一体型カメラに適用して検討した。この放熱設計検証技術は、(2)と同様にものづくり前に製品の放熱性能を検証することが可能となっている。

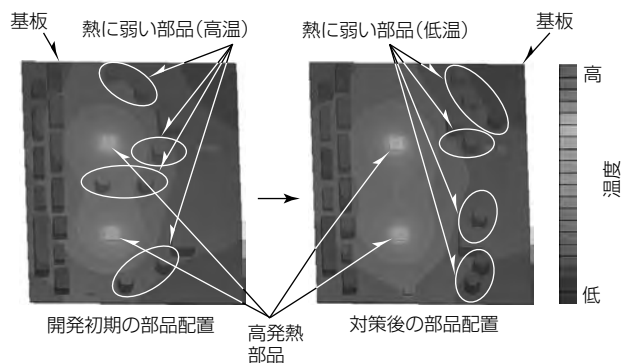


図8. 基板の熱流体シミュレーション

図8に、対策前後の基板の熱流体シミュレーションの結果を示す。開発初期の部品配置では高温部品の近傍に熱に弱い部品を複数配置しており、同部品が基板からの伝熱によって熱的な影響を受けていることが分かる。一方、対策後の部品配置では、高発熱部品と熱に弱い部品の距離を離すことで部品温度を低減している。

4. む す び

今回開発したデジタルRoboty HM-7000によって、道路監視用途に特化した安価な屋外旋回カメラ(簡易カメラ)分野で、更なる安心・安全の追求に貢献する。また今回開発したレンズ制御や回転台制御技術を民需製品にも展開して製品ラインアップ強化を図り、社会全体のインフラ整備を支えていく。

参 考 文 献

- (1) 蓬田 仁, ほか: “MELOOK3”カメラ, 三菱電機技報, 89, No.6, 343~347 (2015)
- (2) 田村 聡, ほか: HD対応広域CCTV監視システム, 三菱電機技報, 89, No.6, 353~357 (2015)
- (3) 吉沢二郎, ほか: 制御盤の放熱・耐震設計検証技術, 三菱電機技報, 87, No.4, 244~248 (2013)

CC-Link IEフィールドネットワーク対応 インテリジェントHUB

中安俊行* 川手竜介**
笠原三郎* 谷口幸子**
酒井謙行*

Intelligent HUB Applicable for CC-Link IE Field Network

Toshiyuki Nakayasu, Saburo Kasahara, Kaneyuki Sakai, Ryusuke Kawate, Sachiko Taniguchi

要 旨

近年、Ethernet^(注1)の汎用性・高速性・廉価性を背景としてEthernetベースの産業用ネットワークが増加している。特に、ネットワークの中継機能を担うHUBには能動的にネットワークを構築することが要求されており、今後インテリジェント機能を持つHUBの需要増加が予測される。

三菱電機はEthernet技術を用いた産業用ネットワークであるCC-Link^(注2) IE(Industrial Ethernet)フィールドネットワーク(以下“CC-Link IE”という。)を開発し、当社が幹事を務めるCC-Link協会を通じて普及を推進している。

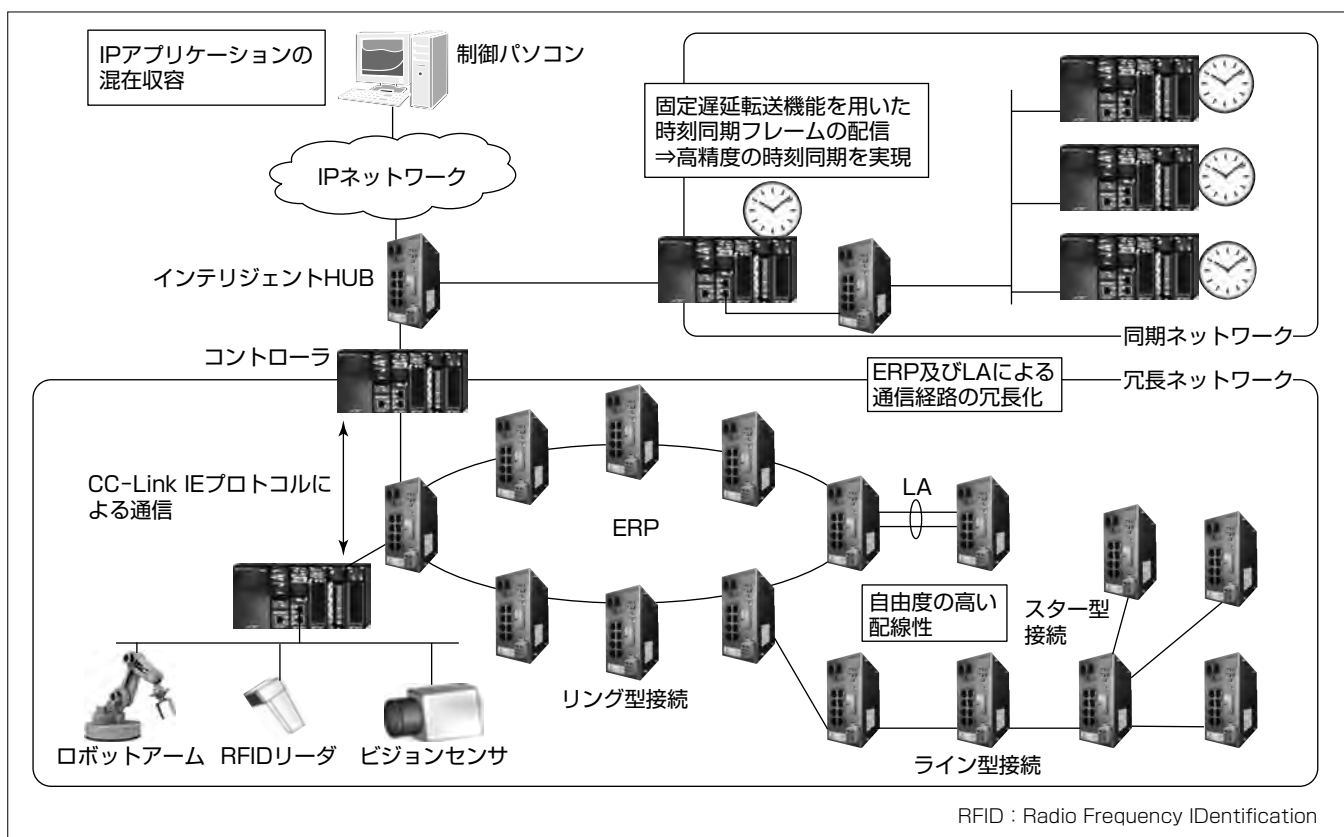
今回、CC-Link IEに適用可能なインテリジェントHUBを開発した。この装置は、産業用ネットワークに必要な

る高精度時刻同期やネットワークの冗長化／高信頼化を実現するために固定遅延転送機能、ERP(Ethernet Ring Protection switching)機能、LA(Link Aggregation)機能、及びループ検出機能をハードウェアで実装した。

また、この装置はFPGA(Field-Programmable Gate Array)によってハードウェアプラットフォームを実現しているため、特定機能を選択的に実装できるとともに、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能であるという特長がある。今後、この特長を最大限に活用して次世代産業用ネットワークや産業用途以外のネットワークに適用を進めていく。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

(注2) CC-Linkは、CC-Link協会の登録商標である。



インテリジェントHUBの運用形態

CC-Link IE対応インテリジェントHUBでは、産業用ネットワークで必要となる高精度の時刻同期を実現するために時刻同期用フレームの“固定遅延転送機能”や機器の故障やネットワークの一部障害が発生した場合でもネットワーク全体をダウンさせない冗長化／高信頼化機能として“ERP機能”及び“LA機能”を実装している。また、開発したインテリジェントHUBでは、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能であり、交通ネットワークや公共ネットワーク等の様々な用途への適用が可能である。

1. ま え が き

近年、Ethernetの汎用性・高速性・廉価性を背景としてEthernetベースの産業用ネットワーク(以下“N/W”という。)が増加している。

特に、N/Wの中継機能を担うHUBには、能動的なN/W構築が要求されており、インテリジェント機能を持つHUBの需要増加が予測される。今回、当社が推進するEthernetベースのFA(Factory Automation) N/WであるCC-Link IEに適用可能なインテリジェントHUBを開発した。

本稿では、開発したインテリジェントHUBによって実現される適用事例とシステム要件、機能の特長と構成技術について述べる。

2. 開発の背景

産業用Ethernet機器は、国内外で普及が拡大しており、Cisco, Siemens, Hirschmann, PHOENIX CONTACT等の海外メーカーがインテリジェント機能を持つHUBを先行して展開している。市場要求としては、高速通信、同期通信機能の精度向上、耐障害性、保守性の向上、冗長比機能による高信頼化等があり、シームレスなN/Wの構築と自由度の高い配線を実現するとともに当社が推進するFA統合ソリューション“e-F@ctory”やIIoT(Industrial Internet of Things), 又はIndustrie 4.0への展開を見据えた拡張性が求められている。

今回、これらの市場要求を満足するCC-Link IE対応のインテリジェントHUBを開発した。

3. FA N/Wの要件整理

オフィスや家庭向けに広く普及しているEthernetとFA N/Wに適用するEthernetでは、用途の違いに伴って様々な要件差異⁽¹⁾がある。FA N/Wの主な要件を次に述べる。

(1) 高精度の時刻同期

FAシステムでのコントローラ間の通信やモーション制御通信では、高速・高精度な同期制御が必要。

(2) IPアプリケーションの混在収容

FAシステムで固有のアプリケーションに加え、ファイル転送用途のFTP(File Transfer Protocol), 監視制御用途のSNMP(Simple Network Management Protocol)等、IPプロトコルを利用するアプリケーションの収容が必要。

(3) 冗長化／高信頼化

機器の故障やN/Wの一部障害が発生した場合でも、N/W全体がダウンしないような冗長化／高信頼化が必要。

(4) 自由度の高い配線性

製造現場の環境に応じて、FAシステムを構成する機器をライン型、スター型、リング型及びこれらの形態を組み合わせた柔軟なトポロジーで接続できることが必要⁽²⁾。

4. インテリジェントHUBの主要機能

図1に装置の外観、表1にCC-Link IEに適用するインテリジェントHUBの主要諸元を示す。



図1. インテリジェントHUB

表1. インテリジェントHUBの主要諸元

項目		内容	
伝送速度(通信方式)	10BASE-T	10Mbps(全二重)	
	100BASE-TX	100Mbps(全二重)	
	1000BASE-T	1 Gbps(全二重)	
	1000BASE-SX		
	1000BASE-LX		
通信インタフェース	Ethernetポート(RJ-45)	8ポート	
	光ファイバポート(SFP)	2ポート(Ethernetポートと排他設定)	
フレームサイズ(ジャンボフレーム対応)		64~9,022byte(VLAN含む)	
転送方式		カットスルー方式(固定遅延転送) ストア&フォワード方式	
MACアドレス学習数		最大2,048個	
MACアドレスエージングタイム		300s	
VLAN機能	VLAN ID	0 ~4,095	
	ポートVLAN VLAN ID設定数	1ポートにつき1個	
	タグVLAN VLAN ID設定数	1ポートにつき最大4,096個	
	高信頼化／ 冗長化機能	ERP	ERP設定可能ポート数
ERP経路切替え時間			障害発生から10ms以内 (接続性確認用フレームの送信周期を1msに設定時)
LA		LA設定可能ポート数	4ペア(1ペア2ポート)
		LA経路切替え時間	障害発生から1s以内
ループ検出		ループ検出フレーム方式 CC-Linkフレーム方式	最大8個(VLANごと)
保守機能	ログ管理	操作ログ, アラームログ	
	遠隔保守	Telnetによるリモート操作, 遠隔バージョンアップ, SNMP	
	その他	ミラーリング, SDカードメモリによる初期設定及びログ保存	
ハードウェア諸元	動作環境条件	0 ~60℃, 5 ~95% (結露なきこと)	
	定格入力電圧	DC24V(許容電圧範囲 DC20.4~28.8V)	
	定格入力電流	1.20A	
	外形寸法	147(H)×70(W)×122(D) (mm)	
	質量	0.95kg	

RJ45: Registered Jack 45, SFP: Small Form-factor Pluggable,
MAC: Media Access Control, VLAN: Virtual LAN,
ERP: Ethernet Ring Protection Switching, LA: Link Aggregation,
Telnet: Teletype network

この装置は、10/100/1000BASE-T対応のEthernetポートを8ポート、Ethernetポートと選択して使用可能な光ファイバポートを2ポート持っており、最大8ポートを同時に使用した8Gbpsの通信が可能である。

この装置では、高精度な同期制御が求められる時刻同期用の制御フレームを識別し、常に一定の遅延時間で転送が可能なカットスルー方式(固定遅延転送機能)を採用して高精度時刻同期を実現する。さらに、カットスルー方式とストア&フォワード方式を併用することでCC-Link IEとEthernetを混在させて収容することが可能である。

また、この装置は、冗長化機能としてERP機能及びLA機能、高信頼化機能としてループ検出機能を具備し、ケーブル断線等のN/W障害が発生しても通信経路を切り替えることで通信を維持することができる。

この装置は、FPGAによってハードウェアプラットフォームを実現しており、特定機能を選択的に実装できるとともに、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能である。

4.1 固定遅延転送機能

一般的なHUBは、Ethernetフレームを一旦蓄積して優先順に送信するストア&フォワード方式で転送する。ストア&フォワード方式は、可変長のフレームを転送する場合にフレーム長に依存して処理時間が変動し、フレームが出力されるまでの遅延時間の揺らぎ(以下“遅延揺らぎ”という。)が大きくなる。これに伴い、一般的なHUBでスター型のFA N/Wを構成した場合、時刻同期用途のフレームの遅延揺らぎが大きく、FA機器間で高精度の同期制御ができないという課題があった。

図2に開発したインテリジェントHUBの転送方式を示す。この装置は、低遅延かつ高精度が求められる時刻同期用途の高優先フレーム(以下“制御フレーム”という。)を識別し、転送ポートを決定した後に内部処理に必要な固定時間分だけ遅延させてカットスルー方式で転送する(固定遅延転送)。これによって、制御フレームを低遅延で転送するとともに遅延揺らぎを最小限に抑えるようにした。一方、精度が要求されない制御系フレームや転送時間の要求がない情報系フレーム(以下“一般フレーム”という。)は一般的なHUBと同様にストア&フォワード方式で転送する。

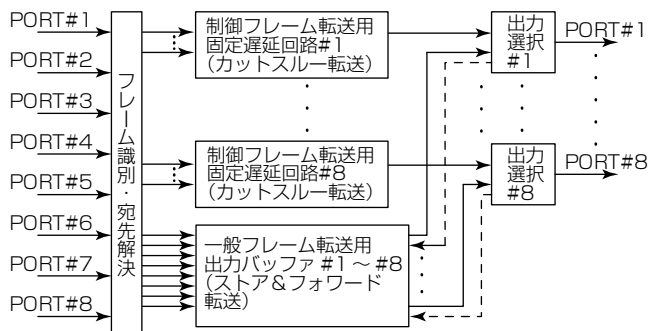


図2. インテリジェントHUBの転送方式

しかし、2種類の転送方式を併用することで一般フレーム送信中に制御フレームの送信タイミングが重なる場合がある。また、この装置は複数ポートから制御フレームを受信する可能性があり、1つの転送ポートで複数の制御フレームの送信タイミングが重なる場合もある。これらの送信タイミングの競合時の処理として、前者の場合は一般フレームの送信を中断して優先度の高い制御フレームを送信することとし、後者の場合にはより優先して固定遅延で転送したい制御フレームを転送できるようにした。

制御フレームの固定遅延時間は、送信タイミングが重なったことで送信を中断した一般フレームを後段装置で廃棄できること、一般フレームの送信中断後に送信された制御フレームが後段装置で正常に受信できること、また、受信タイミングが重なり転送できない制御フレームを廃棄すること等を考慮して決定した。

その結果、この装置は一般的なHUBと比較して1台当たりの転送遅延時間を約1/4、遅延揺らぎを約1/165まで短縮し、制御フレームの高速かつ固定遅延転送を実現し、スター型のN/Wにおける高精度な同期制御を可能とした。

4.2 冗長化機能

経済的かつ高信頼なN/Wを実現するため、この装置では、リング冗長化機能として国際規格ITU-T G.8032に準拠したERPを実装した。この装置は、Ethernetポートと光ファイバポートを選択可能な2ポートでERP機能をサポートするため、この装置の設置間隔が100m以上と長くなる場合でも高信頼なネットワークを実現することができる。

図3にERP有効時の動作を示す。ERPでは、リングを構成するインテリジェントHUBの1台をRPL(Ring Protection Link)オーナーに設定し、RPLオーナーがリング上の片側ポートを閉塞することでリングN/W内をフレームが循環することを回避する。障害が発生した場合は、障害検出箇所を閉塞するとともにRPLオーナーの閉塞を解除し、リング

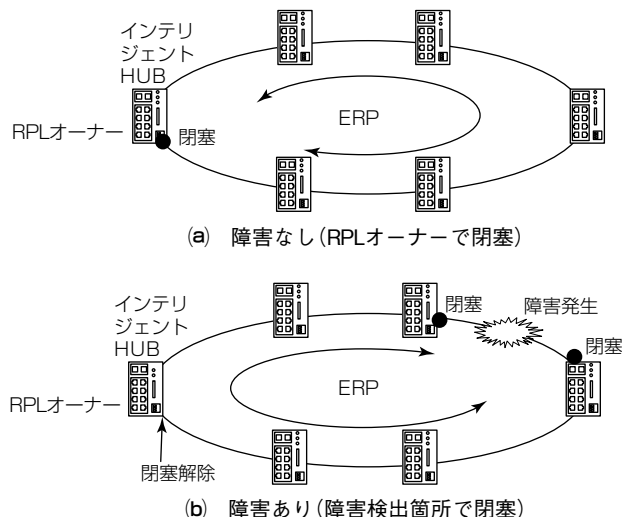


図3. ERP有効時の動作

内の閉塞箇所を切り替えることで通信を継続できる。

また、リング内で隣接するインテリジェントHUB間の接続性の確認やリングを構成する全てのインテリジェントHUBに障害検出／回復状態を通知するため、Ethernet OAM(Operation, Administration and Maintenance) (ITU-T Y.1731)の制御フレームを使用する。この装置は、障害検出用に最短3.33ms周期と規定されているEthernet OAMの接続性確認フレームの送信周期を1ms周期まで短縮することで障害検出時間の高速化を図った。その結果、インテリジェントHUB 16台で構成したリングで障害発生時の通信断時間(切替え時間) 5ms以内(実測値)を実現し、ITU-T G.8032で規定している切替え時間50msと比較して切替え時間を大幅に短縮した。

なお、この装置は、ERP以外にも回線冗長化機能として静的なLAにも対応し、2ポートのLAグループを最大4組サポートできる。LA動作時は、一般フレームをロードバランシングするが、固定遅延が要求される制御フレームはLAグループ内の片側ポートのみに転送することでフレームの順序逆転を回避し、高度な同期精度を保証する。

4.3 ループ検出機能

CC-Link IE N/W同様、インテリジェントHUBにも自由度の高い配線性の要求がある。このため、N/W構築や機器増設の際に作業者の誤配線等でループ経路が形成されることが考えられる。ループ経路形成時には、ブロードキャストトラフィックがループ経路上で増殖し(ブロードキャストストーム)、時刻同期制御に支障をきたすだけでなくシステム停止のような重大障害を引き起こす可能性がある。

この装置は、ループ状態を自律的に検知し、ループ経路上のポートを閉塞することでループ状態を解消し、システム運用を継続可能とするループ検出機能をハードウェアで実現した。

この装置では、インテリジェントHUBが自律的に送信するフレームを用いる“ループ検出フレーム方式”とCC-Link IEフィールド装置が送信するフレームを用いる“CC-Linkフレーム方式”の2種類のループ検出方式を具備する。ここでは、ループ検出フレーム方式について述べる。

4.3.1 従来のループ検出方式

代表的なループ検出方式として、STP(Spanning Tree Protocol)がある。STPでは、BPDU(Bridge Protocol Data Unit)をHUB間で交換することでルートブリッジと閉塞箇所を選出する。閉塞箇所は、自身とルートブリッジ間の通信経路の帯域幅やHOP数等の指標から算出した、通信経路の優先度を示すパスコストに基づいて決定する。STPでは、ルートブリッジを基準としたツリー型トポロジを構築することでループ経路の形成を回避する。

STPは、新規接続した経路のパスコストに伴って通信経路が切り替わり、同期通信に弊害を及ぼす場合がある。

図4を用いて具体例を述べる。

(1) ループ形成前

HUBを介してコントローラ間で同期通信している。

(2) ループ形成(HUB追加)

1台のHUBを追加することでループが形成される。

(3) ループ解除(ポート閉塞)

通信ポートのパスコストがリンクアップポートより大きい場合、当該ポートを閉塞する。

(4) 経路切替え

通信経路切替えが発生し、制御フレームの伝搬遅延時間が増加することで同期通信を維持できない。

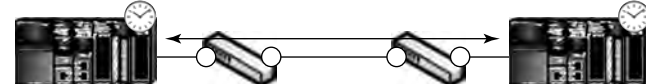
さらに、STPでは、一般的に閉塞ポート決定までに30～50秒の処理時間がかかるため、その間にブロードキャストストームが発生し、重大障害を引き起こす可能性がある。

4.3.2 ループ検出フレーム方式

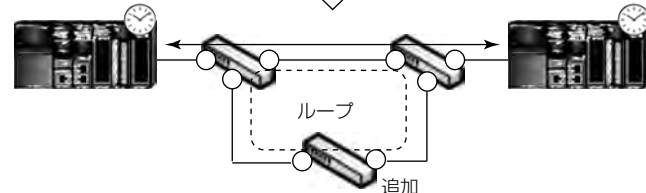
この装置は、ループ検出用に新規定義したフレーム(以下“ループ検出フレーム”という。)を1秒周期で自律的に送信し、自身が送信したループ検出フレームを受信した際にループを検出する。また、ループ検出フレームを用いて、ループ経路内の最低優先ポートの情報を収集し、ループ経路内の最低優先ポートのみを閉塞することで無作為なポート閉塞によるN/W分離を回避する。

ポート間の優先度を決定するため、インテリジェントHUBのポート状態として表2に示す3種類のポート状態を定義した。ポート状態の優先度は、優先度の高い順に運用状態>主信号フィルタ状態>全フレームフィルタ状態とした。

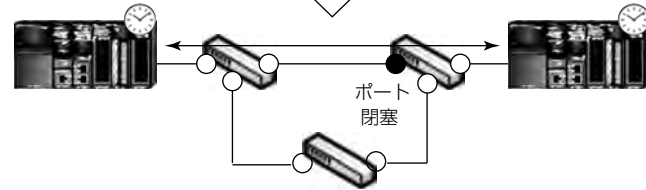
(1) ループ形成前



(2) ループ形成(HUB追加)



(3) ループ解除(ポート閉塞)



(4) 経路切替え

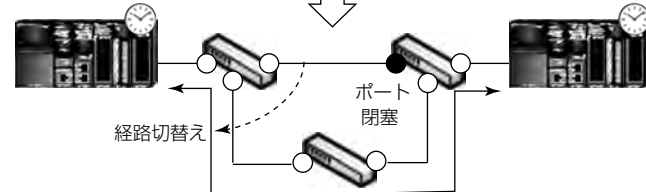


図4. STPによるループ検出の弊害例

インテリジェントHUB間でポート状態が同一の場合にはMACアドレスの大小を比較し、MACアドレスが小さいインテリジェントHUBを高優先とした。また、インテリジェントHUB内のポートの優先度は、若番ポートを高優先とした。

ループ検出フレーム方式は、ポート間の優先度を表2に示すポート状態で比較することで既存の同期通信に影響を及ぼすことなくループ経路の形成を回避することができる。図5を用いてループ解除の具体例を述べる。なお、3台のインテリジェントHUBのMACアドレスの内、インテリジェントHUB#2のMACアドレスを最大と仮定する。

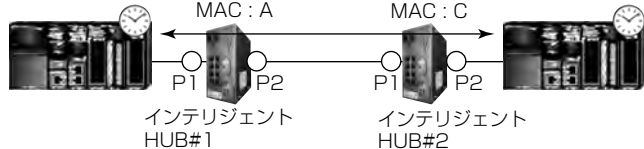
(1) ループ形成前

インテリジェントHUBを介してコントローラ間で同期通信している。通信経路上のポートは通信状態である。

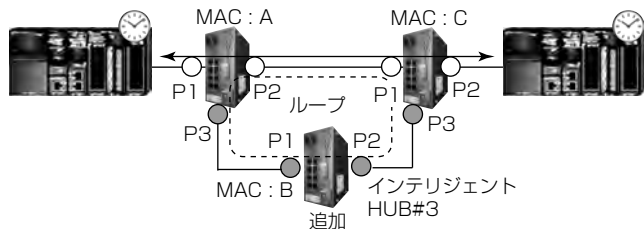
表2. ポート状態の定義

ポート状態	優先度	主信号転送可否	ループ検出フレーム	
			転送可否	送信可否
運用状態	高	可	可	可
主信号フィルタ状態	中	不可	可	可
全フレームフィルタ状態	低	不可	不可	可

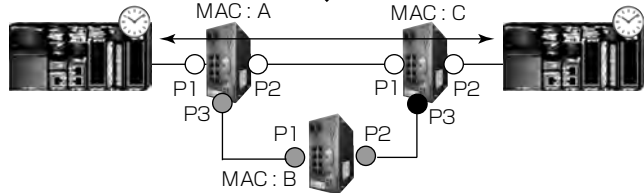
(1) ループ形成前



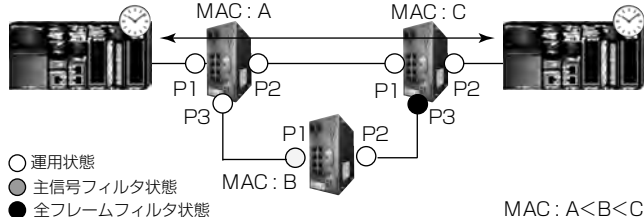
(2) ループ形成 (インテリジェントHUB追加)



(3) ループ解除(ポート閉塞)



(4) ポート状態変更



○ 運用状態
● 主信号フィルタ状態
● 全フレームフィルタ状態

MAC: A < B < C

図5. ループ検出フレーム方式によるループ解除例

(2) ループ形成(インテリジェントHUB追加)

インテリジェントHUB追加時、リンクアップしたポートを主信号フィルタ状態に遷移させる。ループ経路上の全てのインテリジェントHUBは、自身が送信したループ検出フレームを受信することでループを検知する。ループ検出フレームには最低優先ポートのポート状態と最低優先ポートを持つインテリジェントHUBのMACアドレス(以下“最低優先ポート情報”という。)が格納されている。

(3) ループ解除(ポート閉塞)

自身が送信したループ検出フレームを受信したインテリジェントHUBは、ループ検出フレームの最低優先ポート情報に基づき、自身が最低優先ポートを持っている場合、このポートを全フレームフィルタ状態に遷移させる。図5の例では、主信号フィルタ状態かつ優先度が最も低いインテリジェントHUB#2のP3が該当する。

(4) ポート状態変更

各インテリジェントHUBは、自身が送信したループ検出フレームを一定時間受信しないことで、主信号フィルタ状態のポートを運用状態に遷移させる。

ループ検出フレーム方式では、ループ形成前に通信で使用していたポートの優先度をリンクアップポートより高く設定することでループ形成前後での通信経路の切り替えを回避し、同期通信を維持できる。

また、この方式では“ループ検出フレームの送信周期(1秒)+ループ検出フレームの伝搬遅延時間”で閉塞ポートを決定することができ、ループ解消時間の高速化を実現した。

5. む す び

今回開発したインテリジェントHUBで特長的な機能として、固定遅延転送機能、冗長化機能(ERP, LA)及びループ検出機能について述べた。

開発したインテリジェントHUBはFPGAでハードウェアプラットフォームを実現しているため、特定機能を選択的に実装し、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能である。この特長を活用し、次世代の産業用N/Wへの適用に向けた機能拡張と併せ、耐環境性の向上や仕様拡張を実施し、産業用N/W以外の用途にも展開していくことでインテリジェントHUBの市場拡大を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 内藤辰彦, ほか: 産業用イーサネット入門, CQ出版(2009)
- (2) 河本久文: CC-Link IEフィールドネットワーク, 三菱電機技報, 84, No.3, 179~182 (2010)

100Gbps超級光コア・メトロ ネットワーク向け誤り訂正技術

杉原堅也* 松本 渉***
 宮田好邦** 杉原隆嗣***
 久保和夫**

Error Correction Technologies for Optical Transmission beyond 100Gbps

Kenya Sugihara, Yoshikuni Miyata, Kazuo Kubo, Wataru Matsumoto, Takashi Sugihara

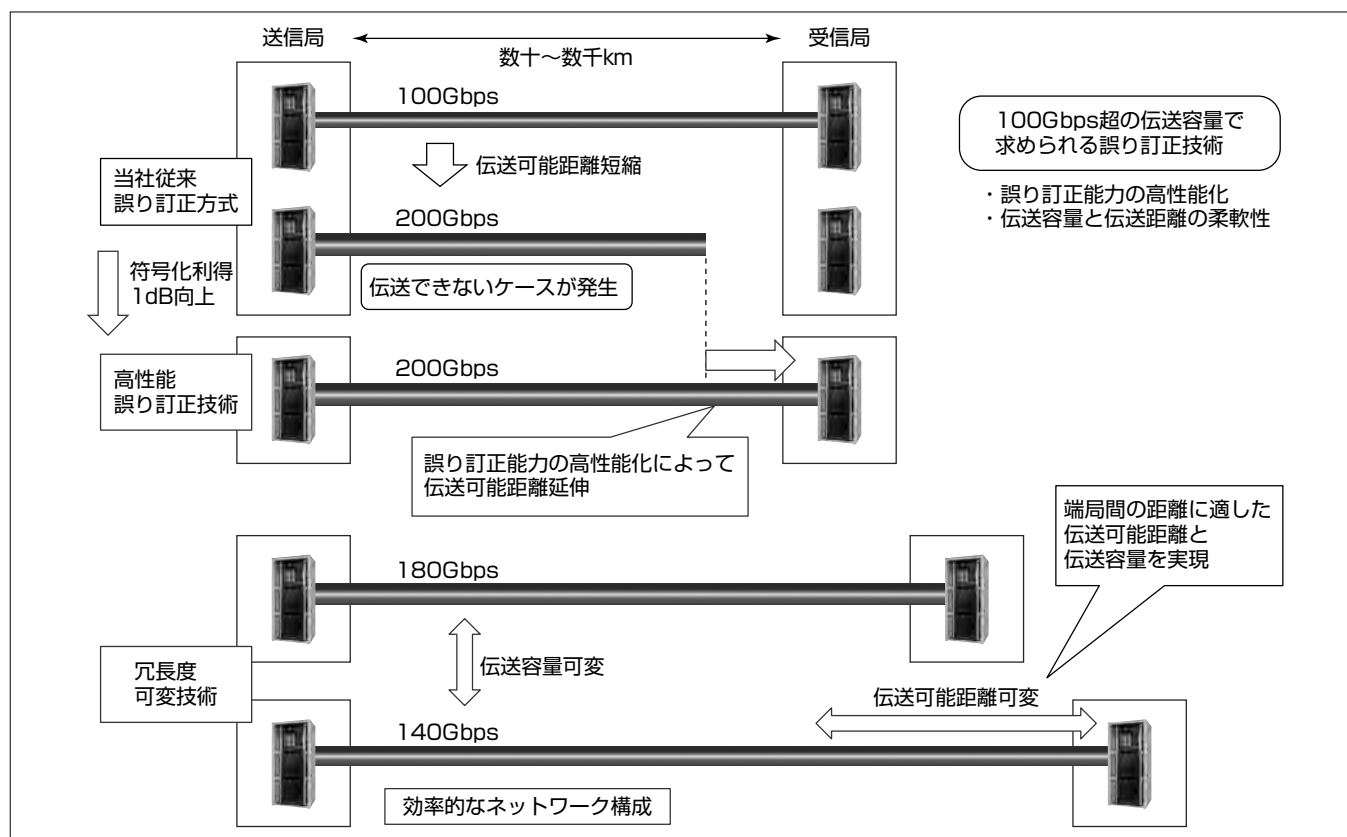
要 旨

スマートフォンの普及や映像配信サービスの拡大などを背景に、通信トラフィックは増大し続けている。今後も、年率1.4倍で増加するという予測もあり、コア・メトロネットワークや海底ケーブルネットワークの大容量化への要求が拡大している。これらを支える光波長多重伝送装置(Wavelength Division Multiplexing: WDM)では、1波長当たり100Gbpsを超える大容量化の検討が始まっている。

光通信の大容量化に必須な技術の1つである誤り訂正技術では、大容量化によって増大する伝送路雑音の影響に対応するため、誤り訂正能力の高性能化が要求されている。誤り訂正能力の高性能化によって伝送可能距離を延伸でき、中継器を増やさず大容量化できるなど効率的なネットワークが実現できる。

光通信では、誤り訂正後のビット誤り率を 10^{-15} 以下という極めて低い値にすることが要求される。大容量化によって雑音の影響が増大した環境で、この要求を実現することが課題であった。そこで、LDPC(Low-Density Parity-Check)符号の性能劣化要因を分析して、これに基づく改良に加えてBCH(Bose Chaudhuri Hocquenghem)符号と組み合わせることで、目標性能を実現した。その結果、三菱電機の従来方式に比べて符号化利得を約1dB向上させた。

さらに、誤り訂正能力に関する冗長ビット数を可変にして、トレードオフの関係にある伝送可能距離と伝送容量とを柔軟に調整可能とした。これによって、ネットワークの要求に応じて効率的なシステムを構築することができる。



100Gbps超の高速伝送を実現する誤り訂正技術

100Gbpsを超える伝送速度では100Gbpsと比べて伝送可能距離が短縮される。例えば、従来100Gbpsで伝送可能であった端局間でも200Gbpsでは伝送できないケースが発生する。誤り訂正技術の高性能化で伝送距離を延伸することによって、200Gbps通信が可能なエリアが広がる。また、冗長度可変技術によって伝送距離を伝送速度100～200Gbpsに対応して柔軟に調整すれば、伝送距離に応じた効率的な伝送容量のネットワークが構成できる。

1. ま え が き

スマートフォンの普及や映像配信サービスの拡大などを背景に、通信トラフィックが増大し続けている。今後も、年率1.4倍で増加するという予測もあり、コア・メトロネットワークや海底ケーブルネットワークへの大容量化要求は更に強まっている。これらを支えるWDMでは、従来の1波長当たり10Gbpsや40Gbpsから、1波長当たり100Gbps又は2波長で100Gbpsといった大容量システムへの移行が始まっている⁽¹⁾。さらに、1波長当たり100Gbpsを超える更なる大容量化の検討が既に始まっており、各要素技術の議論や方式提案が活発になっている。

本稿では、光通信の大容量化に必須な要素技術の1つである誤り訂正技術の誤り訂正能力の高性能化技術と、伝送容量と伝送距離とを柔軟に調整する冗長度可変技術について述べる。

2. 高性能誤り訂正技術

100Gbps長距離伝送は、デジタルコヒーレント技術によって実現した⁽²⁾。超高速LSI(Large Scale Integration)のデジタル信号処理で信号波形歪み(ひずみ)が低減でき、また偏波多重QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)などの多値位相変調方式が可能となり、周波数利用効率が向上している。

100Gbpsを超える大容量化の実現のため、変調方式を従来のQPSKから16QAM(16-ary Quadrature Amplitude Modulation)等の周波数利用効率がより高い方式を採用することが有力視されている。しかし、QPSKに比べて16QAMでは送信ビットを表す信号点間の距離が狭まり、伝送中に光信号が受ける雑音の影響が大きくなる。したがって、ビット誤りが増加して伝送可能距離が短縮してしまう。そこで、誤り訂正技術の高性能化が必要となる。

2.1 誤り訂正技術

誤り訂正技術は、データ送信時に冗長なビットを付加して送信することで伝送時に発生したビット誤りを受信側で訂正する技術である。どのような冗長ビットを付加するかは誤り訂正方式によって異なる。訂正可能なビット誤りの数や信号対雑音比劣化への耐性、つまり誤り訂正能力は、誤り訂正方式によって異なる。冗長ビットはパリティビットと呼び、通信対象のデータビットを情報ビットと呼ぶ。冗長ビットの数を情報ビットの数で割った値を冗長度と呼ぶ。

光通信では、極めて低いビット誤り率の通信品質が求められる。光通信での誤り訂正方式の性能は、誤り訂正処理後に残留するビット誤り率が 10^{-15} となる誤り訂正前のQ値(光信号品質の尺度)と、誤り訂正技術を用いない場合にビット誤り率が 10^{-15} となるQ値との差で評価されて、この差の絶対値を符号化利得(Gross Coding Gain : GCG)と呼ぶ。

GCGから冗長に伝送したパリティビット分の帯域ペナルティ $10\log_{10}(1 + \text{冗長度})$ を差し引いた値をネット符号化利得(Net Coding Gain : NCG)と呼ぶ。

2.2 技術課題と誤り訂正方式

デジタルコヒーレント方式は高性能な誤り訂正方式である軟判定誤り訂正技術との親和性が高く、その中でも高性能かつデジタル回路での高速処理が可能なLDPC符号が誤り訂正方式として広く採用されている。しかし、LDPC符号を含む多くの誤り訂正方式では、伝送路の信号対雑音比を高くしても高確率でビット誤りが残留するエラーフロア現象が発生する(図1)。一方、誤り訂正後のビット誤り率を 10^{-15} 以下と極めて低くすることがシステム要求としてあり、エラーフロアの除去が高性能化に向けた課題である。

エラーフロア除去のため、BCH符号をLDPC符号と組み合わせた接続符号が提案されている。ここでも、基本方式として接続符号を用いる(図2)。しかし、エラーフロアの低い従来のLDPC符号を用いるとBCH符号の冗長度を上げる必要があり、LDPC符号に割り当てる冗長ビットが相対的に減少して接続符号が性能劣化するという問題がある。そこで、高性能な空間結合LDPC符号⁽³⁾を用いて、さらに、パリティ検査行列に規則的な行置換を施して性能劣化要因を回避した“多重空間結合型”と呼ぶLDPC符号を提案して⁽⁴⁾、エラーフロアの軽減を図る(図1)。

これらの対策によって、エラーフロアを誘因するLDPC符号単体の誤り訂正後残留誤りのビット数を16以下に抑えることができ、訂正可能ビット数が16で冗長度が僅か0.78%のBCH符号でエラーフロアが除去できることを確認した。

2.3 性能評価結果

今回の誤り訂正方式を、計算機シミュレーションで性能評価した(図3)。LDPC符号の符号長は38,400ビット、情報ビット長が30,832ビットで、これに16ビット訂

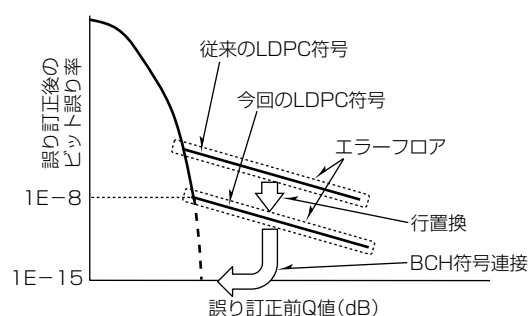


図1. エラーフロアと誤り訂正方式

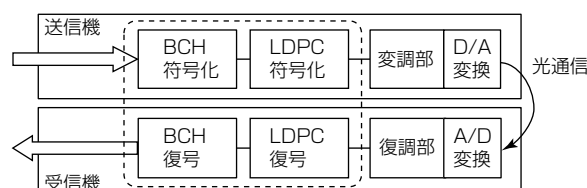


図2. 誤り訂正方式(LDPC+BCH接続符号)の構成

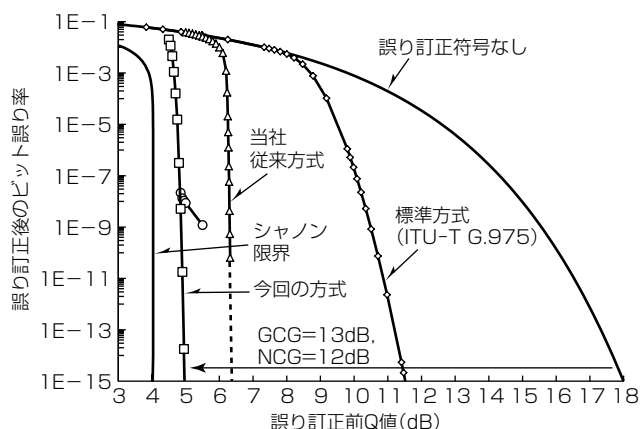


図3. シミュレーション結果

正BCH符号を接続させて、OTU4V(Optical-channel Transport Unit 4V)フレームに適した符号長38,400ビット、情報長30,592ビット、冗長度25.5%の接続符号を構成した。シミュレーション条件は、AWGN(Additive White Gaussian Noise)通信路として、4ビット軟判定、繰り返し32回の δ -min復号法⁽⁴⁾を用いている。

図3から、エラーフロアが除去されたことが分かる。誤り訂正後ビット誤り率 10^{-15} における誤り訂正前Q値は約5 dBであり、GCG 13dB, NCG 12dBが得られた。ITU-T G.975標準方式に対して約6 dB、当社従来⁽⁵⁾の3重接続方式⁽⁵⁾に対してNCGが約1 dB向上して、理論的に到達可能な上限であるシャノン限界に約1 dBまで迫る高い性能となっている。

3. 冗長度可変技術

大容量化のために変調方式をQPSKから16QAMにすると、周波数利用効率が倍になるが、雑音耐性は大きく下って伝送可能距離も大きく短縮されてしまう。変調方式の違いによる伝送可能距離のギャップは大きく、16QAMで伝送可能か否かが周波数利用効率を大きく左右する(図4)。

このトレードオフに柔軟性を持たせることができれば、誤り訂正能力を伝送距離などの条件に適した性能として、十分な通信品質を確保した条件の下で伝送容量をできる限り向上させるネットワーク構成が可能となる。図4に、100Gbps伝送では十分近い距離にあり、200Gbps伝送では遠い位置にある端局同士を140Gbpsで伝送する例を示す。このような柔軟性を実現する技術として、冗長度を可変にして誤り訂正能力と伝送容量を適用環境に応じて調整できる冗長度可変技術を提案する。今後の大容量化に向けて重要となる技術である。

3.1 冗長度

誤り訂正技術では、パリティビットと呼ばれる冗長ビットを多く伝送するほど高い誤り訂正能力が得られる。先に述べたとおり、パリティビット数を実質的な通信データビット数で割った値を冗長度と呼び、多くの場合は百分率

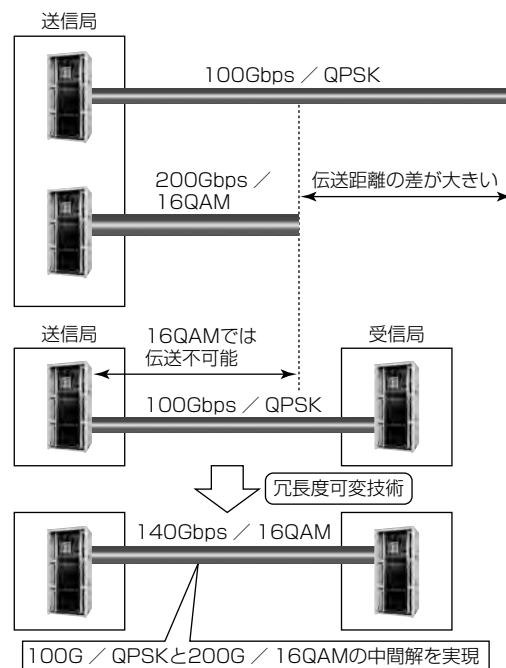


図4. 冗長度可変技術

(%)で表現する。冗長度が高いと伝送される情報量は相対的に小さくなり、伝送容量が低下する。QPSKと16QAMとにある周波数利用効率と伝送可能距離のトレードオフのギャップを埋めるには、冗長度を可変にして、伝送するビット内のパリティビットが占める割合を調整可能にすればよい。

3.2 技術課題

誤り訂正技術の冗長度可変に関する研究開発事例は古くからあり、例えば移動体無線通信では、様々な環境で効率的な通信を可能にする必須技術となっている。しかし、移動体無線通信で用いられる畳み込みターボ符号は冗長度を容易に可変にできる一方で、効率的な高速処理が難しく、光通信の高速な伝送速度に対応するとLDPC符号の数倍の回路規模が必要となる。光通信では、100Gbpsの高速な伝送速度を実現するため、高速処理に適したLDPC符号が広く用いられているが、LDPC符号は冗長度を容易に可変にはできない。性能劣化と回路規模増大化を抑制しつつ、LDPC符号の冗長度を可変にすることが課題である。

3.3 冗長度可変技術

冗長度可変技術実現のためには、フレーム構成も可変にする必要がある。そこで、従来のOTUkVフレームと互換性を持つOTN(Optical Transport Network)転送フレーム構造可変方式⁽⁶⁾を用いる。図5(a)のように、OTU4Vフレームのペイロードには80のTS(Tributary Slot)がアサインされている。その一部をTS単位で可変のパリティビット領域とすることで、冗長度が調整可能となる。

このフレーム構成に適した冗長度可変技術では、符号長を一定に保ちながらパリティビット数を増減させる必要がある。LDPC符号はパリティビット検査行列の列数が符号長に対応して行数がパリティビット長に対応するため、一

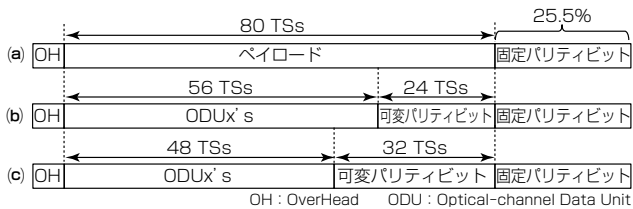


図5. OTN転送フレーム構造可変方式

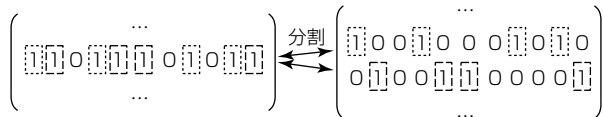


図6. LDPC符号の行分割方式

表1. 冗長度可変誤り訂正方式の諸元

	情報ビット数	パリティビット数	符号長	冗長度	可変パリティビット領域
原レート	30,592	7,808	38,400	25.5%	—
レートA	27,552	10,848	38,400	39.4%	8TS
レートB	24,512	13,888	38,400	56.7%	16TS
レートC	21,472	16,928	38,400	78.8%	24TS
レートD	18,432	19,968	38,400	108.3%	32TS
レートE	15,392	23,008	38,400	149.5%	40TS

部の行を分割して行数を増やす行分割方式による冗長度可変技術がこのフレーム構成に適している(図6)。LDPC符号の冗長度可変は一般的に性能劣化を伴うが、行分割方式にはLDPC符号の性能劣化要因となり得るタナーグラフの短閉路を減らす特長があるため比較的性能劣化が小さい。また、分割する行の選択、分割行の要素“1”の分配の仕方を注意深く検討することで性能劣化を抑えられる。なお、行分割方式はセレクトタ等の小規模回路の追加で実装できる⁽⁷⁾。

3.4 誤り訂正方式と性能評価結果

2.2節で述べたLDPC符号に行分割方式を適用して冗長度可変誤り訂正方式を構成した。表1に示すように、パリティビット数を3,040ビット刻みで可変とした。OTU4Vフレームには4個の符号語が格納されるため、8TS単位での可変パリティビットとなる。従来のOTU4Vフレームは100Gbps伝送を前提としており、8TSは10Gbpsに相当して、200Gbps伝送に2つのOTU4Vフレームを用いる場合は、この方式によって100Gbpsから200Gbpsの伝送容量を20Gbps単位で可変にできる。

各冗長度における性能を2.3節と同じ条件で評価した。図7にシミュレーションで得た誤り訂正後ビット誤り率 10^{-8} における誤り訂正前Q値から推定したGCGとNCGを示す。

冗長度増加によるNCGの向上幅が飽和する一方で、GCGは原レートと比べてレートAで0.9dB、レートEで4.5dB向上した。この方式ではフレーム長を従来OTU4Vフレームと同じにしているため冗長度増加による帯域ペナルティはなく、NCGよりもGCGが伝送性能に対して重要である。この評価で高い性能は確認できたが、実運用では伝送路の条件に応じて様々な性能劣化が発生する。条件に

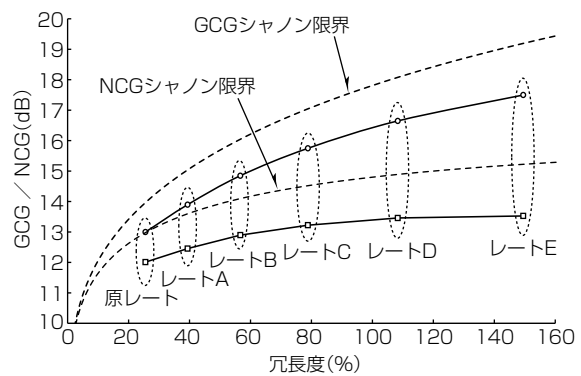


図7. 冗長度可変誤り訂正方式の性能評価結果

よっては高い性能が発揮できない可能性も考えられ、今後の検討課題である。

4. む す び

大容量化で重要な誤り訂正技術について、NCGを1dB向上させる高性能化技術と、伝送容量を100Gbpsから200Gbpsの間で可変とする冗長度可変技術を述べた。大容量化による高雑音環境に対応でき、100Gbps超級の伝送が実現できる。

この研究成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究“光トランスパレント伝送技術の研究開発(λリーチ)”によって得られたものである。

参 考 文 献

- (1) 宇藤健一, ほか: 三菱電機の光通信技術への取組み, 三菱電機技報, **89**, No. 6, 323~327 (2015)
- (2) 能松 忍, ほか: 40G/100Gbps大容量光通信装置, 三菱電機技報, **86**, No. 6, 319~322 (2012)
- (3) Kudekar, S., et al.: Threshold saturation via spatial coupling: Why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC, IEEE Trans. Inform., **57**, No. 2, 803~834 (2011)
- (4) Sugihara, K., et al.: A spatially-coupled type LDPC code with an NCG of 12 dB for optical transmission beyond 100 Gb/s, OFC/NFOEC2013, OM2B.4 (2013)
- (5) Miyata, Y., et al.: A triple-concatenated FEC using soft-decision decoding for 100Gb/s optical transmission, OFC/NFOEC2010, OThL3 (2010)
- (6) Kametani, S., et al.: A study of rate-adaptive forward error correction in OTU framing, OECC2013, ThR2 (2013)
- (7) Sugihara, K.: A practicable rate-adaptive FEC scheme flexible about capacity and distance in optical transport networks, OFC2016, M3A.5 (2016)

1 Tbps光送受信技術

キーラン・パーソンズ* 小池俊昭*
デヴィッド・ミラー* 小島啓介*
ミルティン・パヨヴィッチ*

Detection of a 1 Tbps Superchannel with a Single Optical Receiver

Kieran Parsons, David S. Millar, Milutin Pajovic, Toshiaki Koike, Keisuke Kojima

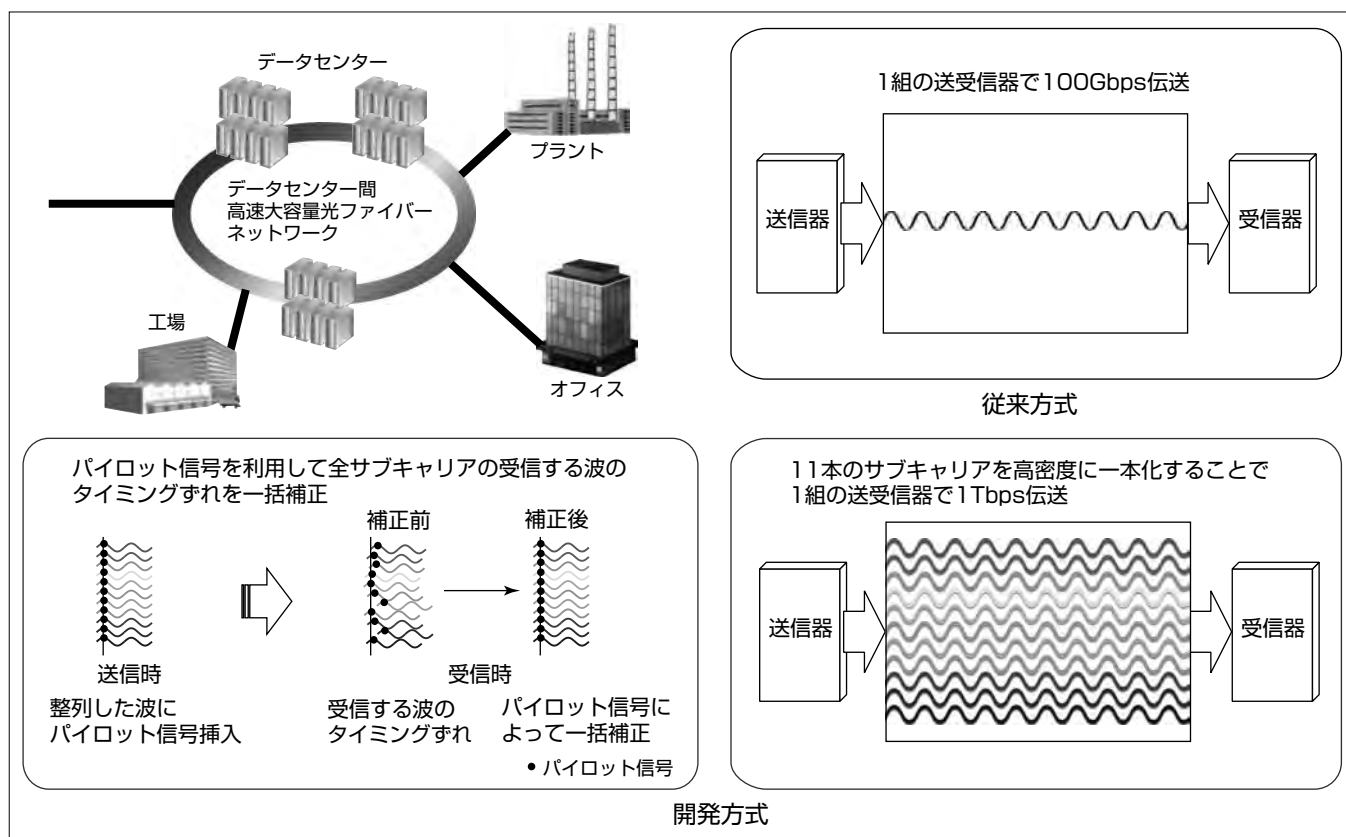
要 旨

インターネットやスマートフォンの普及に加え、IoT (Internet of Things)時代にはあらゆるモノとモノがネットワークを介して接続されるため、それに伴った通信量の爆発的な増大が予想されている。一方、使用した通信量に応じた課金の不要なOTT(Over The Top: SNS(Social Networking Service)や動画配信サービスなど)が多様なサービスを提供しており、通信量が増大してもそれに伴った課金収入増加が見込めなくなりつつある。今後は、データ通信の大容量化とともに高いコストパフォーマンスが問われるため、敷設済みの光ファイバー網を活用した容量拡大技術が重要となる。

従来の敷設済みの光ファイバー網では、1組の送受信器での伝送速度が100~200Gbpsであったが、今回その5~

10倍となるデータ伝送速度1 Tbpsを実現する技術の基本方式を確立した。開発方式は次の特長を持つ。

- (1) 11本のサブキャリアを高密度に一本化して送受信するマルチサブキャリア光送受信技術によって、既設の光ファイバーを用いて1組の送受信器で伝送速度1 Tbpsを実現した。
- (2) 送信器側で各サブキャリアにパイロット信号(送受信間で定められた信号パターン)を定期的に挿入し、受信器で全サブキャリアが受信するタイミングを一括補正することで受信性能を向上した。
- (3) パイロット信号に加え、高度なエラー訂正符号によって高い周波数利用効率を実現した。



光通信ネットワークの大容量化技術

データセンター間のコアネットワークは光ファイバーによる高速大容量通信で接続されている。敷設済みの光ファイバー網を置き換えるためには膨大なコストが必要となるが、開発技術を用いることによって敷設済みの光ファイバー網をそのまま用いて更なる大容量化が可能となる。今後実用化に向けた研究開発を進めていく。

1. Introduction

Optical fibers carry much of the world's data traffic, and the capacity requirements continue to grow at more than 20% annually to support connectivity among people and machines. The Cisco Visual Networking Index forecasts that annual global IP traffic will surpass⁽¹⁾⁽²⁾ 1 zettabyte(10^{21} bytes or 1 million million Gigabytes) for the first time in 2016, with the highest growth rates being for mobile and machine-to-machine(M2M) applications with 74% and 71% growth per year respectively.

One important factor restricting capacity is the data rate for each optical receiver, which is currently limited to 100-200Gbps for commercial systems. In this article, we describe recent work at MERL (Mitsubishi Electric Research Laboratories, USA) in which we experimentally achieved a capacity of 1Tbps (1,000Gbps) using a single optical receiver : a $5-10\times$ improvement over current commercial systems⁽³⁾. The technology is suitable for use with existing fiber plants allowing for a smooth upgrade path.

Obtaining the ultra-high capacity achieved in this work required innovation in the coherent optical transmitter and receiver, new pilot-aided digital signal processing algorithms⁽⁴⁾, and advanced error correction codes. We were able to transmit a gross bit rate of 1.32Tbps, which after removing overhead for coding and pilot symbols resulted in 1.01Tbps user data rate, with an estimated bit error rate (BER) of below 10^{-15} , the standard BER requirement for deployed optical systems. The experiment also achieved a spectral efficiency of 9.2bps/Hz, which as of January 2016, was the highest in the world in a 1Tbps transmission using a single optical receiver suitable for existing fiber.

The experimental portion of this work was performed in collaboration with the Optical Networks Group at University College London, UK.

2. Experimental Setup

A traditional coherent optical transmitter uses one laser and a single modulator that is used to impart

the data information onto the light wave. To increase the transmitted data rate requires a corresponding increase in speed of optical and electrical devices to avoid distortion, which is becoming increasingly difficult to achieve in practical systems. Instead, in this work, we used a multi-subcarrier approach, where a single laser output was applied to an optical comb generator which creates 11 sub-carriers with equally spaced frequency separation, allowing lower speed optical and electrical devices to be used to obtain the desired data rate⁽⁵⁾. Using an optical comb rather than separate lasers ensured that the subcarriers were very highly matched in terms of frequency and phase. This had two significant advantages. Firstly, it allowed the subcarriers to be very densely packed without causing interference between them and, in turn, increased capacity. Secondly, we were able to exploit the high degree of matching between the subcarriers at the receiver to improve the performance of the decoding process.

A traditional coherent optical receiver uses one laser per channel or subcarrier to convert the modulated light to electrical signals, each with an individual 4-channel analog-to-digital converter. However, recent advances in optical receiver devices and analog-to-digital converters used in this work enabled the conversion of the entire multi-subcarrier signal to be performed in a single step using a single laser at the receiver and a single high speed analog-to-digital converter. This ensured that the highly matched nature of the transmit signals from the optical comb was also maintained at the receiver.

Using these innovative transmitter and receiver architectures we successfully created an 11×10 Gbaud dual-polarization 64-ary quadrature amplitude modulation(DP-64QAM) multi-subcarrier transmit signal with a very dense spacing of 10.01GHz and detected the transmitted data using 70GHz bandwidth photodiodes and a 160G Sample/sec 4-channel analog-to-digital converter with 63GHz of bandwidth. The block diagram for the experimental setup is shown in Fig. 1, and a photograph of the transmitter equipment is shown in Fig. 2.

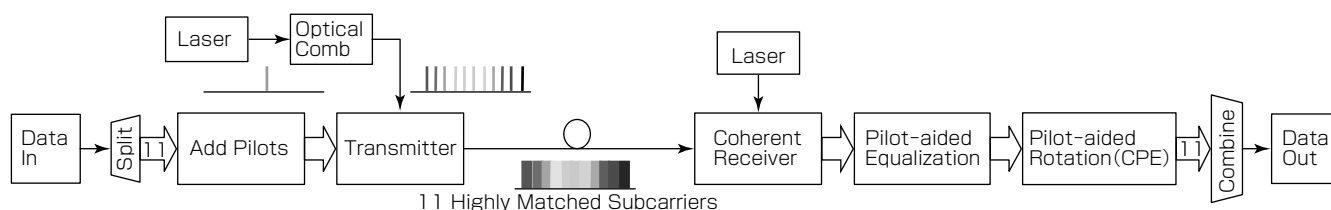


Fig. 1 Transmitter/Receiver Block Diagram

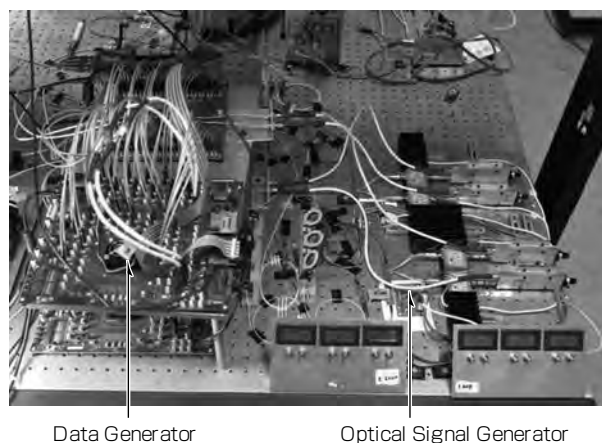


Fig. 2 Transmitter equipment

3. Digital Signal Processing Algorithms

Once the received optical signal is converted to the electrical domain and then captured to digital samples, a series of digital signal processing algorithms is used offline to compensate for numerous degradation factors caused by the imperfect optical and electrical components and propagation in the optical fiber. In this work, the most important algorithms are the equalizer, which compensates for the non-flat frequency response of the optical and electrical devices, and the carrier phase estimator (CPE), which compensates for the frequency offset and linewidth (random phase fluctuations) between the transmit and receive lasers⁽⁶⁾.

In most coherent optical transmission systems, so-called “blind” equalization and CPE algorithms are used, which make limited assumptions about the signal characteristics in the adaption processes⁽⁷⁾. The algorithms are simple to implement and are suitable for QPSK modulation. However, in this work we utilized 64QAM to increase data rate, and for these multi-level formats, blind algorithms suffer from very poor performance when there are significant symbol errors. Instead, we utilized an initial training mode where known data symbols are transmitted continuously, allowing the adaptive algorithms to converge accurately, followed by a pilot-aided mode where known data symbols are inserted into the random information data stream at a low rate (1%), allowing the adaptive algorithms to accurately track temporal variations.

Training and pilot-aided operations are well known in wireless communications but are not typically utilized in optical communications systems, partly due to the overhead of the pilots, which reduces available user data. A key innovation in this work was to utilize

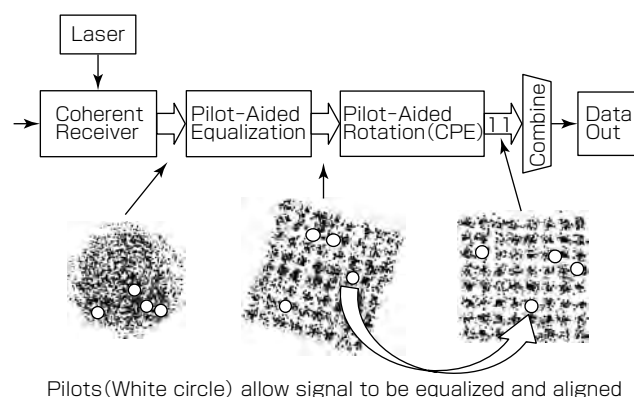


Fig. 3 Pilot-aided DSP for a single subcarrier

the highly-matched nature of the subcarriers created by the optical comb at the transmitter (and maintained at the receiver through the simultaneous conversion of all subcarriers using a single coherent receiver) to allow carrier phase estimation to be performed jointly across all subcarriers rather than individually. This allowed the phase of subcarriers with very poor error rate (up to 14% errors) to still be tracked with the assistance of other subcarriers with lower error rate, while still achieving a post-error correction BER of $<10^{-15}$. This joint processing allowed the pilot insertion ratio to be kept very low (1%), with only a small impact on data rate, while still achieving excellent adaptive algorithm performance. The algorithm was designed to be simple enough to be efficiently implemented in a practical ASIC (Application-Specific Integrated Circuit, the custom chip used to implement the digital signal processing (DSP) and forward error correction (FEC) at the high data rates needed for optical transmission systems). In addition, the superior performance of the pilot-aided CPE compared to blind methods allowed the use of lasers with 100kHz linewidth at the transmitter and receiver. Such lasers are substantially cheaper and smaller than the ultra-low linewidth lasers typically used for DP-64QAM experiments with blind algorithms.

The operation of the pilot-aided equalization and CPE is illustrated in Fig. 3 for a single subcarrier. The joint estimation process across subcarriers is not shown, for simplicity.

4. Forward Error Correction

The received symbols after the CPE still have significant levels of noise, which will introduce errors in the output data as shown in the right-hand constellation diagram in Fig. 3. In fact, the subcarrier shown has a relatively good error rate of

0.8%, allowing the 64 distinct constellation points to be seen, but the BER on other subcarriers was up to 14%, resulting in a constellation whose points cannot be distinguished visually. To correct the bit errors introduced by noise and other residual impairments requires strong forward error correction(FEC).

In this work, we used an optimized irregular low-density parity-check(LDPC) code⁽⁸⁾ with rate 0.78 (meaning that for each 78 bits of information that is sent, 22bits of parity code is added for error correction), achieving a theoretical threshold within 0.07dB of the Shannon limit. The information bits are interleaved(spread) over all the subcarriers and polarizations, and a finite block of time, to ensure that the probability of a bit error is approximately constant, which improves code error correction performance and that no bursts of errors occur. After LDPC decoding with 60 iterations, no errors were seen for the duration of the experimental transmission. However, to guarantee a bit error rate of $<10^{-15}$, as required in a practical system, requires $>10^{17}$ bits to be transmitted, which is not possible in an offline experiment, such as the one performed. Instead we added another(outer) code, using a 0.9922 rate BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) code with a minimum Hamming distance of 33, for which we can theoretically calculate that the output BER will be $<10^{-15}$ if the input BER is $<5 \times 10^{-5}$. We transmitted sufficient bits without error(7.8million bits) to ensure such a threshold and so can state that the output error rate after the concatenated code would be below 10^{-15} , as needed.

The addition of pilots and code parity reduces the rate available for user information data compared to the gross data rate. The gross data rate for the experiment is determined from the use of 11 subcarriers, each with a symbol rate of 10 Gbaud, carrying DP-64QAM, which provides 12bits per symbol, and equals 1,320Gbps, or 1.32Tbps. The net data rate available for user data is reduced by the overhead introduced by the pilots(0.99, determined from the 1% pilot insertion ratio), the LDPC inner code rate(0.78), and the BCH outer code rate(0.9922), and equals 1.01Tbps. The experiment achieved a spectral efficiency(SE) of 9.2bps/Hz(1.01Tbps transmission within a bandwidth of 110.11GHz, determined from 11 subcarriers with 10.01GHz spacing), which as of January 2016, was the highest in the world in a 1Tbps transmission using a single optical receiver suitable for existing fiber.

5. Conclusion

This paper has presented the experimental demonstration of a 1Tbps optical transceiver using a single optical receiver and described the novel pilot-aided digital signal processing algorithms and error correction codes that enable such performance. The practical development of such high rate transceivers would greatly aid the capacity of fiber optic links, particularly useful for high growth applications such as mobile backhaul and machine-to-machine communications.

References

- (1) Cisco Visual Networking Index : Forecast and Methodology, 2014–2019 White Paper (2015)
http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html
- (2) Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020 White Paper (2016)
<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- (3) D. S. Millar, et al. : Detection of a 1Tb/s super-channel with a single coherent receiver, 2015 European Conference on Optical Communication, Mo.3.3.1 (2015)
- (4) M. Pajovic, et al. : Multi-pilot aided carrier phase estimation for single carrier coherent systems, Proc. Sig. Process. Photon. Commun., SpT4D.4 (2015)
- (5) G. Bosco, et al. : On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers, Journal of Lightwave Technology, **29**, No.1, 53~61 (2011)
- (6) M. Pajovic, et al. : Experimental demonstration of multi-pilot aided carrier phase estimation for DP-64QAM and DP-256QAM, 2015 European Conference on Optical Communication, Mo.4.3.3 (2015)
- (7) I. Fatadin, et al. : Blind Equalization and Carrier Phase Recovery in a 16-QAM Optical Coherent System, Journal of Lightwave Technology, **27**, No.15, 3042~3049 (2009)
- (8) T. Koike-Akino et al. : Iteration-Aware LDPC Code Design for Low-Power Optical Communications, Journal of Lightwave Technology, **34**, No.2, 573~581 (2016)