

MITSUBISHI
Changes for the Better

家庭から宇宙まで、エコチエング

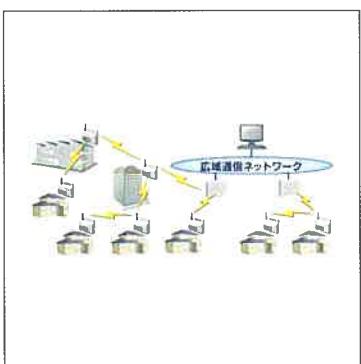
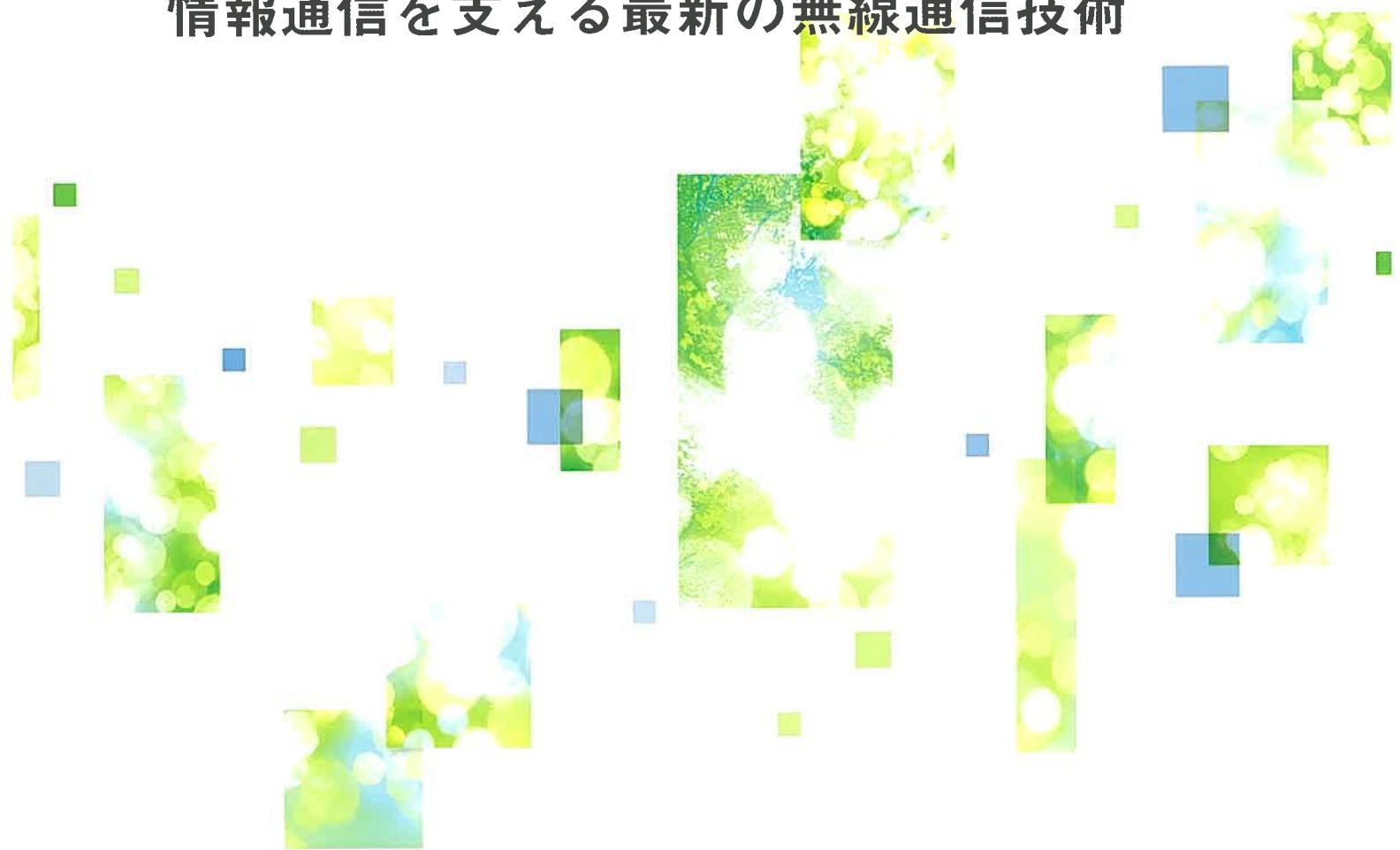


三菱電機技報

11 | 2012

Vol.86 No.11

情報通信を支える最新の無線通信技術



目 次

特集「情報通信を支える最新の無線通信技術」

情報通信を支える最新の無線技術特集に寄せて	1
安達幸史	
情報通信を支える最新の無線通信技術	2
千葉 男・宮崎守泰・渋谷昭宏	
高速移動体通信対応大容量LCX無線通信技術	7
大橋章範・西本 浩・岡崎彰浩・石津文雄・田中謙一郎・坪 浩行	
衛星通信用マルチチャネル伝送技術	11
富塚浩志・長谷川文大・岡崎彰浩・石津文雄・井戸康浩	
特定小電力無線技術	15
山内尚久・大塚 見・藤江良一・友江直仁・工藤 銑	
スマートメータ向け無線メッシュネットワーク技術	19
石橋孝一・八木章好・阿部伸・城倉義彦	
カーナビゲーション用無線通信技術	23
横山陽介・清水直樹	
通信用小形アンテナ技術	27
西本研悟・深沢 敏・宮下裕章・小西善彦	
自己ベース電流制御形アナログ	
プリディストーションリニアライザ	31
新庄真太郎・森 一富	
コグニティブ無線向けSiGe-BiCMOS直交変調器	35
堤 恒次・新庄真太郎・谷口英司	
高周波ノイズ伝搬経路評価技術	39
渡邊陽介・安藤雄二・内田 雄・岡 尚人・大橋英征	
人工衛星向け高速デジタル伝送技術	43
瀧谷幸司・小田木 功・山岸圭太郎・明星慶洋	
無線メッシュネットワーク対応セキュリティ技術	47
小林信博・山口晃由・村上ユミコ	
通信システム向け高品質映像伝送ボード	51
中田浩志・山本好彦・猪股英樹・松田幸成・川畠幸保	

特許と新案

「アンテナ特性測定方法」	55
--------------	----

Latest Wireless Communication Technologies for Information and Telecommunication Systems

Forward to Special Issue on Recent Wireless Technologies Supporting Information and Communications Networks
Fumiaki Adachi

Latest Wireless Communication Technologies for Information and Telecommunication Systems

Isamu Chiba, Moriyasu Miyazaki, Akihiro Shibuya

High-Data Rate Leaky Coaxial Cable Communication Technologies for High-speed Vehicles

Akinori Ohashi, Hiroshi Nishimoto, Akihiro Okazaki, Fumio Ishizuka, Kenichiro Tanaka, Hiroyuki Akutsu

Multi-channel Transmission Technologies for Satellite Communication Systems

Koji Tomitsuka, Fumihiro Hasegawa, Akihiro Okazaki, Fumio Ishizuka, Yasuhiro Ido

Technologies for Specified Low Power Radio

Takahisa Yamauchi, Akira Otsuka, Ryōichi Fujie, Naohito Tomoe, Sen Kudo

Wireless Mesh Network Technology for Smart Meter Networks

Koichi Ishibashi, Akiyoshi Yagi, Mitsuobu Abe, Yoshihiko Shirokura

Wireless Technology for Car Navigation System

Yosuke Yokoyama, Naoki Shimizu

Small Antenna Technology for Communications

Kengo Nishimoto, Toru Fukasawa, Hiroaki Miyashita, Yoshihiko Konishi

Analog Pre-distortion Linearizer Using Self Base Bias Controlled Amplifier

Shintaro Shinjo, Kazutomi Mori

SiGe-BiCMOS Quadrature Modulator for Cognitive Radio

Koji Tsutsumi, Shintaro Shinjo, Eiji Taniguchi

Technology for Evaluating Propagation Path of High Frequency Noise

Yosuke Watanabe, Yuji Ando, Takeshi Uchida, Naoto Oka, Hideyuki Ohashi

High-speed Digital Transmission Technologies for Artificial Satellites

Koji Shibuya, Isao Odagi, Keitaro Yamagishi, Yoshihiro Akeboshi

Security Technologies for Wireless Mesh Network

Nobuhiro Kobayashi, Teruyoshi Yamaguchi, Yumiko Murakami

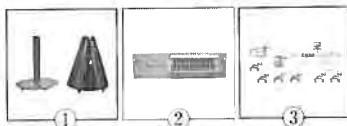
High-quality Video Transmission Board for Video Communication System

Hiroshi Nakata, Yoshihiko Yamamoto, Hideki Inomata, Yukinari Matsuda, Yukiyasu Kawahata

表紙：無線通信技術

三菱電機は、無線通信技術を、衛星・移動体通信事業や列車無線事業の中で鍛え、磨き上げてきた。この無線通信技術を基盤技術として適用範囲を広げていく。

表紙は、無線通信技術を構成する4つの技術領域“大容量無線伝送技術”“無線ネットワーク技術”“アンテナ・EMC(Electro Magnetic Compatibility)技術”“高周波回路・デバイス技術”の中から、①は小形アンテナ技術、②は無線伝送技術、③は大規模無線メッシュネットワークを示す。



巻/頭/言

情報通信を支える最新の無線技術特集に寄せて

Forward to Special Issue on Recent Wireless Technologies
Supporting Information and Communications Networks

安達文幸
Fumiyuki Adachi



私たちは車や電車で移動中であっても無線ネットワークを介して、オフィスや家にいるときと同じようにテキストや動画像など様々なデータをやり取りできるようになった。更なる無線通信の高速化が期待されているが、利用可能な無線帯域幅は限られている。また、通信速度の高速化は、送信電力や無線デバイスの消費電力の増大につながるから、携帯端末などバッテリー駆動の無線局にとって厳しい。また、限られた帯域幅を有効利用するために、同一周波数を地理的に離れた場所で再利用しなければならない。無線技術の究極の目標は、ある程度の同一周波干渉を許容しつつ、できるだけ狭い帯域幅とできるだけ少ない消費電力のもとで、できるだけ高速の無線通信を可能とすることであろう。この目標を達成するためには、無線技術の新たな挑戦が求められている。

高速無線通信の信号帯域幅は数十MHz以上になる。無線チャネルは周波数選択性の強いフェージングチャネルとなり、受信信号スペクトルが歪(ひず)み、伝送特性が劣化してしまう。これを解決するため、第3世代Long Term Evolution(LTE)下りリンク(基地局送信)や無線LANでは、多数の直交サブキャリアを用いて並列伝送するOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)が採用されている。ピーク対平均電力比(PAPR)が高くなるのが欠点であり、様々なピーク低減技術の研究が行われてきた。上りリンク伝送では低PAPRの信号波形が望ましい。そこで登場したのが、周波数領域等化を用いるシングルキャリア(SC)ブロック伝送である。これを応用したのがLTE上りリンク(端末送信)に採用されたSC-FDMA(Single-Carrier Frequency Division Multiple Access)である。上りと下りリンクに異なる無線伝送技術が採用されたのはLTEが初めてである。

OFDMやSC-FDMAは周波数領域信号処理を導入することで周波数選択性フェージングを克服する。また、複数の送受信アンテナを用いるMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)空間多重などは、周波数選択性フェージングを克服しながら限られた帯域幅のもとで高速伝送を実現する極めて有効な無線技術として脚光を浴びている。今後は

このような周波数領域信号処理が重要になる。また、LTE-Advanced(第4世代携帯とも呼ばれている)では複局連携協調送受信(Coordinated Multi-Point transmission/reception: CoMP)が採用されているが、これは高速化のための無線ネットワークが今後、分散アンテナネットワークの方向に向かうであろうことを示唆している。

送受信される情報は、テキスト、音声から動画像の広い範囲にわたっている。すべての伝送レートに最適な無線ネットワークは存在しないだろう。様々な用途、伝送レートに最適化された複数のネットワークが共存するのが自然ではないか。一つの流れはLTEフェムト基地局やWiFiネットワークへの携帯電話トラフィックのオフロード技術に見られる。様々なネットワークを協調運用するようにネットワークが進化していくためには、ネットワークの状況を検出し最適ネットワークを選択して接続するコグニティブ無線技術が重要になってくる。

ところで、2011年3月11日に東日本を襲った巨大地震・津波は広域にわたって通信障害を引き起こした。通信ケーブル切断と基地局電源喪失による通信不能、加えて安否確認の膨大な量の通信トラフィックの発生による通信規制など、大規模災害に対する現代の通信ネットワークの脆弱(ぜいじやく)性が明らかになった。これを契機に無線ネットワークの在り方にに関する議論が数多く沸き起こった。今後、無線ネットワークは更なる高速化に向かうのは間違いないが、いかに災害に強くするかも重要な課題となっている。例えば、衛星通信ネットワークや無線メッシュネットワーク、WiFiネットワークなど通常は独立運用しているネットワークを協調運用させ、災害時の膨大な量の通信トラフィックの一部を運ぶ。このような異種無線ネットワークの共存と災害時のネットワークの協調運用が、災害に強い無線ネットワーク実現の鍵になるだろう。この時に重要なのがコグニティブ無線技術である。

この特集号は、上記の技術課題を含む広範な無線技術を扱ったタイムリーな企画であり、今後の無線技術のますますの高度化に寄与することを期待したい。

巻頭論文

情報通信を支える
最新の無線通信技術

千葉 勇*



宮崎守泰**



渋谷昭宏***

Latest Wireless Communication Technologies for Information and Telecommunication Systems

Isamu chiba, Moriyasu Miyazaki, Akihiro Shibuya

要 旨

無線通信技術は、1990年代以降、携帯電話の急速な普及によって人々の身近なものになった。その一方で、メールやインターネットアクセスなどのデータサービスの増加によって、無線ネットワークにかかる負荷の急増に対して十分対処できていないなどの問題が生じている。衛星通信や列車無線でも同様の問題を抱えており、この問題を解決するためには、限られた無線リソースの中でモバイルトラフィックを効率良く収容する無線通信技術の高度化が必須である。

一方、無線通信技術は、高速化とは別に新たなサービスや価値を創出するための技術としても注目されている。社会・産業用途向けの省配線化、センサ情報収集ネットワーク構築のために無線通信技術を積極的に活用しようとする取組みが行われている。しかしながら、実用化に向けては有線並みの通信安定性確保や電源供給が困難な環境での使用等解決しなければならない課題も多い。

この特集号ではこれらの現状を踏まえ、三菱電機における

無線通信技術の最新の取組み状況について述べる。

(1) 無線伝送技術

無線通信の大容量化、通信機器の低コスト化、高性能化の要求にこたえる当社独自の無線信号処理技術について示す。

(2) 無線ネットワーク技術

無線ネットワーク利用分野が産業用途に広がる中、一層の普及に向けて高信頼性、低消費電力化、導入容易性、セキュリティを実現する技術について示す。

(3) アンテナ・EMC(Electro Magnetic Compatibility)技術

高速化・多様化の要求に応えるアンテナ広帯域化技術、マルチアンテナ技術、及び高精度なEMC測定技術について示す。

(4) 高周波回路・デバイス技術

デバイスの進化を展望しつつ、低消費電力化、小型化、及び低歪(ひず)み化の課題を克服する高周波回路・デバイス技術について示す。

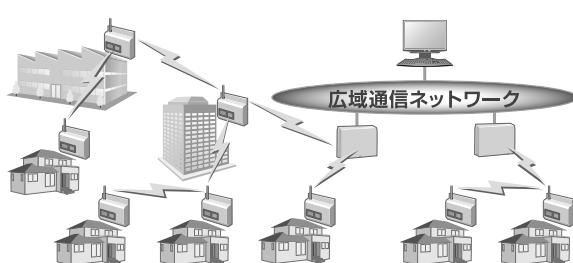


無線伝送技術

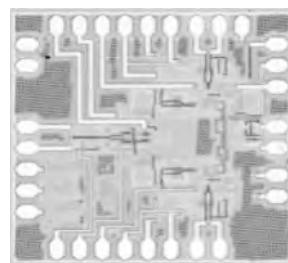


アンテナ・EMC技術

無線通信技術



無線ネットワーク技術



高周波回路・デバイス技術

無線通信技術開発と事業への展開

無線通信技術の適用分野が広がりつつある。衛星通信、列車無線、移動体通信等の無線が必須な事業領域に加えて、有線の代替手段として事業分野で導入が始まっている。高速・広帯域化、周波数利用効率の向上等に資する技術開発を継続しつつ、事業分野での利用に応える高信頼、低消費電力、導入容易性にかかる技術開発も幅広く継続的に進めていく必要がある。

1. まえがき

近年、無線通信の高速・大容量化の進展は目覚しく、図1に示すように、OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式やSC-FDMA(Single Carrier Frequency Division Multiple Access)方式といった高度な変復調方式とMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)伝送技術などが相まって、100Mbpsを超える伝送速度を実現するに至っている。一方で、無線通信のもつ利便性を様々な環境下で活用するためには、耐干渉性の向上、消費電力の低減、高速移動への対応、及び装置の小型・軽量化といった課題がある。

本稿では、これらの課題解決に向けた当社の取組みを、無線伝送、無線ネットワーク、アンテナ・EMC、及び高周波回路・デバイスの各技術に分類しながら述べ、この特集号を俯瞰(ふかん)する。

2. 無線伝送技術

大容量化の進む無線通信機器の、飛躍的な低コスト化と高性能化を可能としたデジタル無線信号処理技術について述べる。

無線通信機器の低コスト化は、デジタル化とともに進んでいる。図2にデジタル無線機における無線信号処理構成を示す。デジタル化当初では、デジタル回路の動作速度の制約からベースバンド処理のみにデジタル回路を適用していた。デジタルデバイスの進化に伴い、IF(Intermediate Frequency)信号処理までがデジタル化され、アナログ部品点数の削減、回路無調整化が実現された⁽¹⁾。さらに、デジタルで複数チャネルを処理するマルチチャネル無線機が実用化され、アナログ分配器/合成器の削減、無線機台数の削減によって、大幅な省スペース化、低コスト化が実現されている。この特集号では、マルチチャネル技術を適用した衛星通信モデルについて述べる(本号11ページ)。

一方、高性能化では、モバイルインターネットの普及に伴い、“いつでも、どこでもつながる通信”が求められ、無線伝送に要求される性能が急速に高まっている。図3に無線伝送に要求される性能と各種通信方式(代表的な伝送速度、移動速度を例示)を示す。横軸は単位周波数あたりの伝送速度(周波数利用効率)、縦軸は伝送速度で正規化した移動速度を示しており、数値が大きくなるほど高度な無線信号処理が必要となる。すなわち、無線通信の高性能化では、この2つの指標が重要である。

無線信号処理で周波数利用効率を高めるためには、変調方式の多値化と複数アンテナを用いた空間多重が有効である。変調方式の多値化では、移動体通信でも、64値(6ビット)が実用化されつつある。これは、アナログ歪み補償、ピーク抑圧、誤り訂正等の無線信号処理技術によって高感

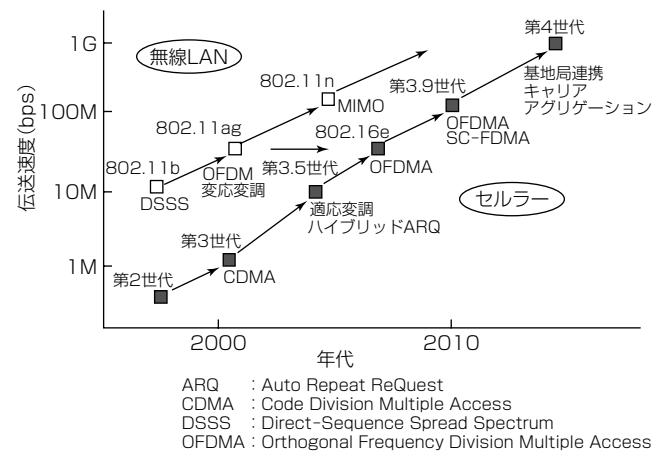


図1. 無線通信技術の変遷

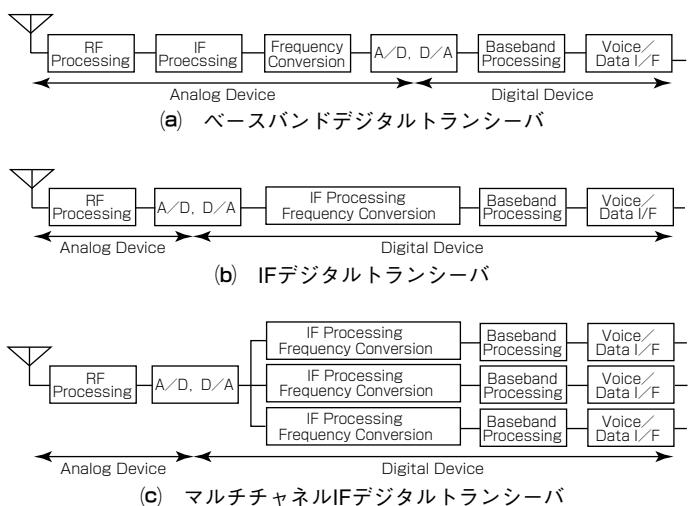


図2. デジタル無線機における無線信号処理構成

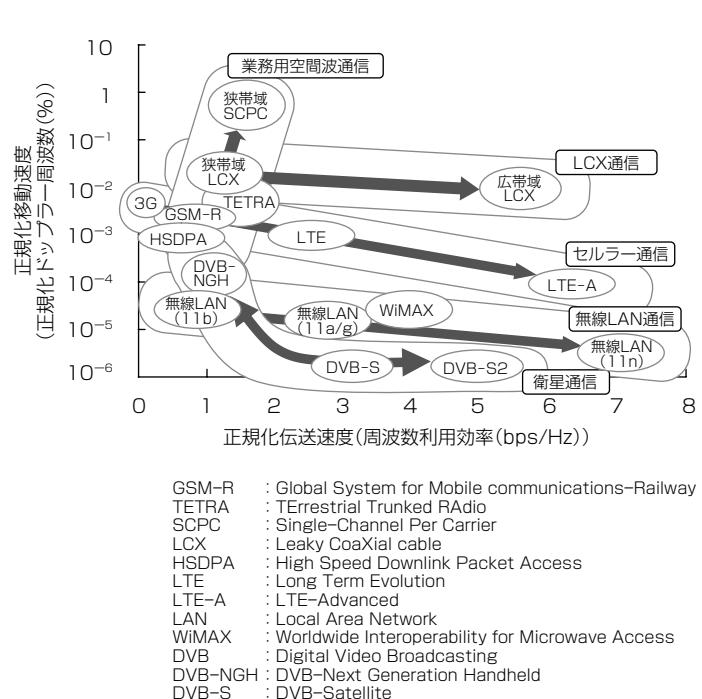


図3. 無線信号処理に要求される性能と各種通信方式

度化が進んだためである。また、複数アンテナを用い、空間を仮想的に分離して多重伝送を行うMIMO技術は、周波数利用効率を倍増し、送受信各4本のアンテナを用いた4空間多重を実現している。この特集号では、安定した電界が得られるLCX(Leaky Coaxial cable)通信で、最大1,024値(10ビット)伝送、空間多重(LCX-MIMO技術)による大容量LCX無線通信技術について述べる(本号7ページ)。

もう1つの指標である移動速度については、高速な無線環境の変動に追随する伝送路推定技術が必要である。当社では、狭帯域通信で高速の伝送路変動に追随可能な適応等化技術によって、高速移動に対応できるセルラー通信、LCX通信、業務用空間波通信をこれまでに実用化してきた⁽²⁾。さらに、広い周波数を利用する広帯域通信で、時間と周波数の二次元で高速の伝送路変動に追随する技術を開発し、広帯域通信でも高速移動を実現した。この技術は、今後実用化される高速移動体向け広帯域LCX通信、及び高速移動体向け衛星放送(DVB-NGH)に適用する。

3. 無線ネットワーク技術

当社は、1970年代のデジタル衛星通信システム開発を源流として無線ネットワーク技術開発に継続的に取組み、無線IP化技術や無線リソース管理技術を磨いてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの技術は、衛星移動通信システム対応の無線装置やフェムトセル基地局装置⁽⁶⁾等、移動体通信関連インフラ装置の実用化に適用されている。

一方、これまで無線ネットワーク技術が積極的に用いられてこなかった分野で無線LANや特定小電力無線などを活用しようとする動きが高まっている。無線ネットワーク利用分野の拡大について、図4に示す。省配線化、早期ネットワーク構築の観点から産業用途向けのニーズが高まっており、特に900MHz帯を用いた無線ネットワークは、消費電力を抑えた低コストな無線ネットワークを実現することができるため期待が大きい。しかし、産業用途では既存有線ネットワークからの置き換えニーズが主であることから、既存無線LAN、特定小電力無線を用いた無線ネットワークに対して消費電力、導入容易性、セキュリティ、信頼性を一段と高める必要がある。当社は、これらの課題を克服し車載機器、住設機器、スマートグリッド等の分野に無線ネット

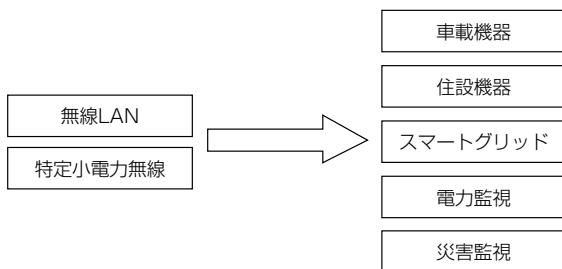


図4. 無線ネットワーク利用分野の拡大

ワークの適用領域を広げるための技術開発を進めている。

特定小電力無線は、電源供給が困難な環境での利用ニーズにも応えるため、電池駆動10年を目標とする低消費電力化技術開発に取り組んでいる(本号15ページ)。導入容易性の観点からは、ネットワーク敷設コストを低減し早期ネットワーク構築が可能な無線メッシュネットワーク技術の開発を進めている。ネットワークの状態に応じて端末間のパケット衝突を大幅に低減し500台超の端末を安定に収容する送信タイミング制御技術⁽⁷⁾を開発し、特定小電力無線、無線LAN媒体によるフィールド実証で性能評価と実用化開発に取り組んでいる(本号19ページ)。また、無線免許不要バンドを用いる無線システムは、利用の拡大と相まって増大するシステム間の周波数干渉による通信品質劣化への対応が課題である。この課題を克服するため、カーナビゲーションシステム向けに搭載機器(Bluetooth^(注1)、無線LAN)と持込機器(無線LAN搭載)間の干渉対策技術を開発した(本号23ページ)。

無線ネットワークの普及に伴って予想される不正アクセスやサイバー攻撃に対するセキュリティ対策技術の確立も大きな課題である。産業用途向けにセキュリティ機能を実装する場合、安全性に加えて低リソース環境での動作を考慮した設計が不可欠であり、無線メッシュネットワークへの適用を意識したセキュリティ技術開発に取り組んでいる(本号47ページ)。

(注1) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc. の登録商標である。

4. アンテナ・EMC技術

当社は、移動体通信基地局・携帯端末、RFID(Radio Frequency IDentification)に代表される無線通信用途に対応した小形アンテナの開発に継続的に取り組んでいる。

図5が、アンテナに要求される最新技術である。無線通信の高速化・多様化に対応するための方策の一つとして、周波数の広帯域化がある。広帯域化手法としては、非励振素子を装荷することで複共振とする方法⁽⁸⁾や、携帯端末内の地導体を放射体として利用して地導体形状を工夫する方法⁽⁹⁾を当社は開発済みである。さらに、非常に離れた2つの周波数帯に対応する手段として、低周波用アンテナを高周波用アンテナの地導体として利用することで高効率化する方法も開発している⁽¹⁰⁾。

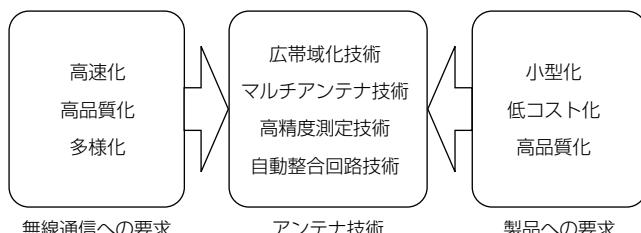


図5. 無線通信用アンテナに要求される最新技術

近年、特に要求が高まっている小形アンテナのもう1つのトレンドとして、アンテナを複数配置するマルチアンテナ技術がある。低相関なマルチアンテナを用いたダイバーサシ・MIMOによって、無線通信の高速化・高品質化を実現できる。一般に、マルチアンテナを小形化するとアンテナ相関の劣化や放射効率の低下を招くため、小形で高性能なマルチアンテナの開発が必要となる。この特集号の中では、当社が開発中の直交する2つのモードを利用する方法と、減結合回路を用いる方法について述べる(本号27ページ)。

アンテナ・EMC共通の基盤技術として、高精度な測定法の確立が必須である。小形アンテナでは、測定用のRFケーブルがアンテナ特性に大きく影響してしまうという問題がある。これを回避するために、当社は独自の測定法である光ファイバを用いる方法を確立している⁽¹¹⁾。光ファイバは電波からは透明に見え、測定用ケーブルの影響が除去できるとともに、位相パターンの測定や多周波同時測定にも対応可能である。超小形アンテナを手がける場合、光ファイバ測定系で必要なフォトダイオードがアンテナに比べて無視できない大きさとなることもあり得る。この対策として、当社はSパラメータ法を提案している⁽¹²⁾。この方法はアンテナ給電点に2本の同軸ケーブルを接続して2ポートのSパラメータを測定することで、測定用ケーブルの外導体を流れる不平衡電流を数学的に除去するものである。汎用性があり、アンテナ1素子だけでなく複数素子に拡張し、マルチアンテナの測定にも適用可能である⁽¹³⁾。これらの測定方法は、この特集号に記載している多くの通信機器の汎用測定法として当社製品に広く適用中である。

以上のように、当社は、高速化に向け進化し続ける無線通信に対応した無線通信用アンテナ技術の開発に精力的に取り組んでいる。さらに将来の技術としては、人体の動き、通信端末の位置等、周囲環境の刻々とした変化に自動的に追従する自動整合アンテナの開発が期待されている⁽¹⁴⁾。

5. 高周波回路・デバイス技術

当社は、移動体通信基地局・携帯端末、衛星通信装置、及びETC(Electronic Toll Collection system)などに代表される無線通信用の高周波回路・デバイス技術の開発にも継続的に取り組んでいる。高周波回路・デバイスにおける主な開発課題としては、①低消費電力化、②小型化が挙げられるが、無線通信用では、さらに、デジタル変調方式に対応した③低歪み化が重要となる。低消費電力かつ低歪みな特性を実現する技術として、これまで、当社は移動体通信基地局用途では、デジタルプリディストーラ⁽¹⁵⁾、携帯端末用途では、整合回路の工夫による低消費電力、低歪み携帯端末用増幅器⁽¹⁶⁾、小型なプリディストーション形リニアライザ⁽¹⁷⁾を開発してきた。

一方、高周波回路に用いるデバイスの観点では、これま

でGaAsデバイスを用いてきたが、図6の高周波デバイスの棲(す)み分けに示すように、複数の高周波回路を一体化可能で、かつ、バイアス回路、制御回路等と集積化可能なSiGe Bi-CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor), Si CMOSや、高出力が期待できるGaN HEMT(High Electron Mobility Transistor)が台頭してきている。当社は、SiGe Bi-CMOSについては、小型化、低コスト化のために複数の高周波回路を一体化した無線通信用RFフロントエンドMMIC⁽¹⁸⁾ (Monolithic Microwave Integrated Circuit)を開発している。GaN HEMTについては、高出力、高効率化を目指して無線通信用のGaN内部整合トランジスタ⁽¹⁹⁾を開発している。

SiGe Bi-CMOS, Si CMOSデバイスを用いた高周波回路では、バイアス回路、制御回路を一体化し、インテリジェントな機能を取り入れた高周波回路の開発が可能であり、開発が進められている。低消費電力、低歪みの観点ではバイアス回路にインテリジェントな機能を取り入れ、低歪み、高線形を実現する回路開発も行われている。当社では、受信系に対しては、デュアルバイアスフィード回路によって低消費電力と高飽和出力電力を実現した低雑音増幅器⁽²⁰⁾を開発している。

この特集号の中では、SiGe Bi-CMOSを用いて送信系に対してバイアス回路にインテリジェントな機能を取り入れ、低歪み、高線形な高周波回路を実現した2件について述べる。具体的には、電流をバイアス回路に帰還することで、歪み補償回路として動作するベース電流制御形アナログプリディストーションリニアライザと、線形性を改善したベース電流制御形ミクサを用いた直交変調器の2件である。

以上のように、当社は、使用するデバイスの変化をとり入れながら、無線通信用の高周波回路・デバイスに求められる低消費電力・低歪みの技術開発を進めている。さらに将来の技術として、よりインテリジェントな機能を合わせ持った高周波回路を開発し、高機能な無線通信機器へ適用することを目指している。

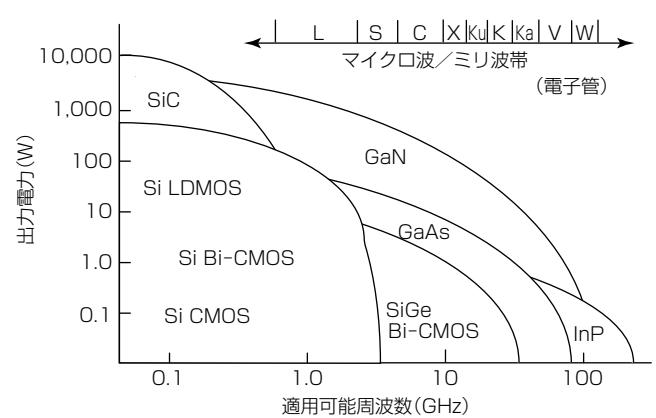


図6. 高周波デバイスの棲み分け

6. む す び

安心・安全で快適な社会の更なる高度化を目指す上で、情報通信技術の果たす役割は計り知れず、その中で無線通信技術への期待がますます高まっている。

本稿では、システム全体を網羅する形で、当社における最新の無線通信技術開発の概要を示した。以降の各論文では、個別技術の詳細を述べる。

参考文献

- (1) 岡崎彰浩, ほか: ソフトウェア無線指向受信プラットホームとそのアプリケーション開発, 電子情報通信学会論文誌(B), **J92-B**, No.7, 981~990 (2009)
- (2) 久保博嗣: 無線通信における適応等化技術とその応用, 電子情報通信学会技術研究報告, **111**, No.404, RCS2011-283, 97 (2012)
- (3) Fukui, N., et al.: Performance of Combined ARQ with SR and GBN for Broadband Wireless Systems on a 40GHz Band Radio Channel, IEEE Commun. Mag., Sep, 122~126 (2001)
- (4) 武啓二郎, ほか: IP RANゲートウェイ, 三菱電機技報, **78**, No. 2, 131~134 (2004)
- (5) 安田周平, ほか: 衛星移動通信システム対応無線装置開発, 三菱電機技報, **84**, No.8, 441~444 (2010)
- (6) 中澤正幸, ほか: 高性能フェムトセル無線基地局装置, 三菱電機技報, **84**, No.8, 445~448 (2010)
- (7) 石橋孝一, ほか: 大規模メッシュネットワーク実現に向けた検討, 電子情報通信学会技術研究報告, CS2011-26, 91~96 (2011)
- (8) Fukasawa, T., et al.: Triple-bands broad bandwidth dipole antenna with multiple parasitic Element, IEICE Trans. Commun., **E84-B**, No.9, 2476~2481 (2001)
- (9) Nishimoto, K., et al.: A wideband mobile terminal antenna using the resonance of a slide structure, ISAP 2009, 971~974 (2009)
- (10) 西岡泰弘, ほか: コイルを地導体とするHF/UHF共用RFIDタグ用UHFモノポールアンテナに対する巻線間容量結合の効果, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2009-161, 33~38 (2010)
- (11) 深沢 徹, ほか: 小形無線端末用のアンテナ測定における高精度測定法, 電子情報通信学会論文誌(B), **J86-B**, No.9, 1895~1905 (2003)
- (12) Fukasawa, T., et al.: Extended S-parameter method including radiation pattern measurements of an antenna, IEEE Trans. Antennas Propag., **60**, No.12 (2012) (掲載予定)
- (13) 柳 崇, ほか: Sパラメータ法を用いた小形無線端末上の2素子アンテナのインピーダンス特性およびアンテナ間相互結合の測定, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2011-178, 179~184 (2012)
- (14) 牧村英俊, ほか: アンテナ自動整合回路用反射位相測定法, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-193 (2012)
- (15) Horiguchi, K., et al.: A wideband digital predistorter for a Doherty power amplifier using a direct learning memory effect filter, IEICE Trans. Electron., **E93-C**, No.7, 975~982 (2010)
- (16) Mori, E., et al.: An L-band High Efficiency and Low Distortion Power Amplifier Using an HPF/LPF Combined Interstage Matching Circuit, IEEE Trans. on MTT, **48**, No.12, 2560~2566 (2000)
- (17) Yamauchi, K., et al.: A Microwave Miniaturized Linearizer Using a Parallel Diode with a Bias Feed Resistance, IEEE Trans. on MTT, **45**, No.12, 2431~2435 (1997)
- (18) Shinjo, S., et al.: ASK and Pi/4-QPSK Dual Mode SiGe-MMIC Transceiver for 5.8GHz DSRC Terminals having Stabilized Amplifier Chain, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1071~1074 (2008)
- (19) Kosaka, N., et al.: An S-band GaN on Si High Power Amplifier with 170W Output Power and 70% Drain Efficiency, IEEE Compound Semiconductor IC Symposium, Session B.1 (2012)
- (20) Taniguchi, E., et al.: A dual bias-feed circuit design for SiGe HBT low-noise linear amplifier, IEEE Trans. on MTT, **51**, 414~421 (2003)

高速移動体通信対応 大容量LCX無線通信技術

大橋章範* 石津文雄*
西本 浩** 田中謙一郎***
岡崎彰浩* 坪 浩行***

High-Data Rate Leaky Coaxial Cable Communication Technologies for High-speed Vehicles

Akinori Ohashi, Hiroshi Nishimoto, Akihiro Okazaki, Fumio Ishizu, Kenichiro Tanaka, Hiroyuki Akutsu

要 旨

漏洩(ろうえい)同軸ケーブル(Leaky Coaxial cable: LCX)無線通信は高品質な通信を実現するシステムであり、列車無線、高速道路等の移動体通信に用いられている。

現在、これらのサービスの多様化に伴い、LCXシステムの大容量化が求められている。しかし、LCXシステムでは、十分な受信強度が得られるが利用できる周波数が限られているという制約があり、大容量化には周波数利用効率の向上が必要である。

三菱電機は、低演算量で高速移動体通信に対応する高精度伝送路推定技術を確立した。これによって、多値変調(256QAM(Quadrature Amplitude Modulation))を用いたLCX無線通信技術を開発し、高速移動体通信対応LCXシステムで世界最高水準の周波数利用効率4.3bps/Hzを実現

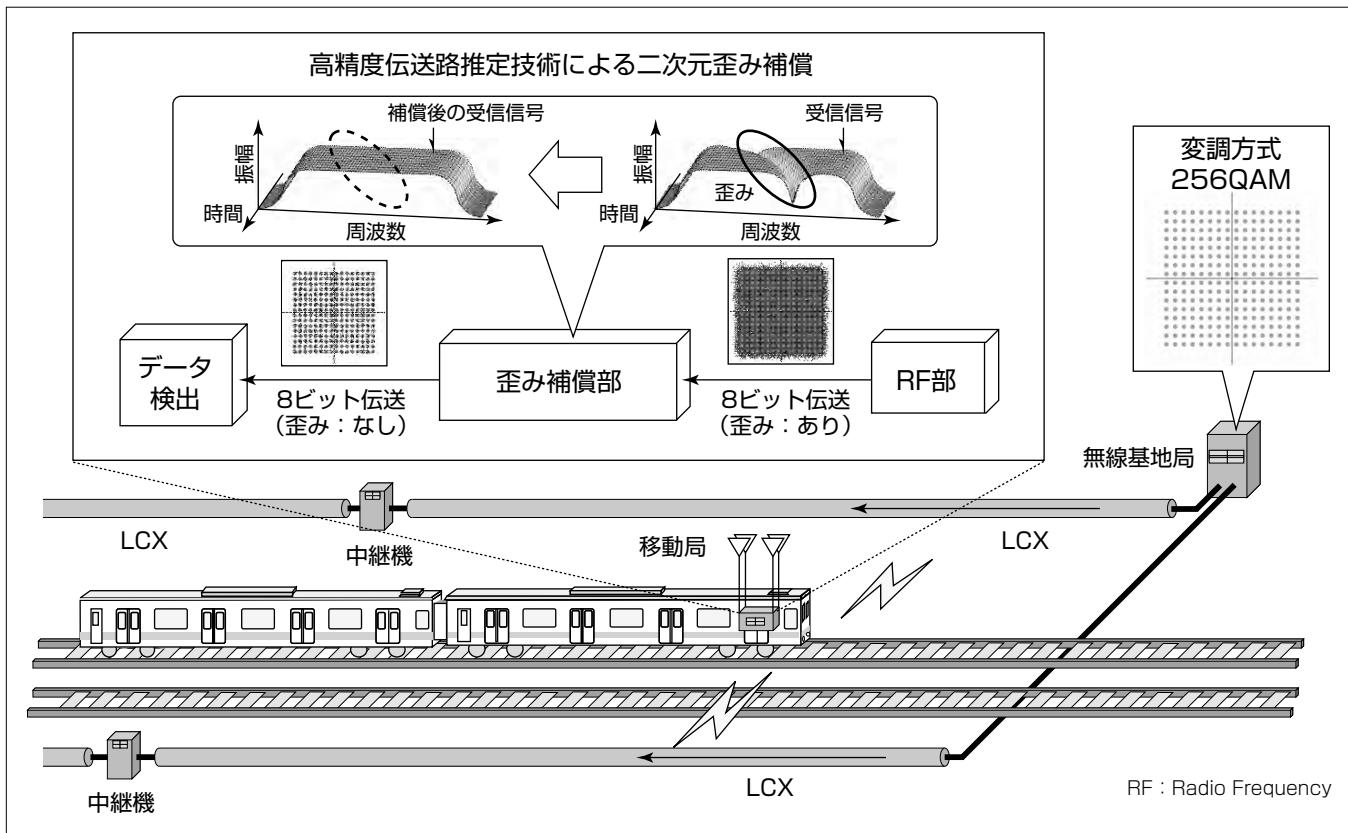
した。

また、LCXシステムの更なる大容量化、高信頼化を図る将来技術として、次の要素技術を開発した。

- (1) LCX-MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)技術
複数の送受信アンテナを用いた大容量化技術
- (2) 高効率多値化技術
ピーク電力を低減するSC(Single-Carrier)ブロック伝送技術
- (3) 一般化階層変調技術

高信頼回線と大容量回線を同時に実現する変調技術

本稿では、大容量LCX無線通信技術と、更なる大容量化・高信頼化を図る将来技術について述べる。



高速移動体通信対応大容量LCX無線通信システム

移動局の両側に敷設されたLCXを用いて無線基地局と移動局間で無線通信するLCX無線通信システムの構成を示す。この構成は、無線基地局から移動局への下り通信を示しており、無線基地局から送信された256QAM変調信号はLCXを介して移動局で受信される。移動局では復調する際に受信信号の時間、周波数の二次元歪(ひず)みを補償する。歪み補償には、新たに開発した高精度伝送路推定技術を用い、最小自乗フィルタによって時間、周波数の二次元歪みを高精度に推定する。これによって、256QAM変調信号による大容量無線通信が可能となる。

1. まえがき

漏洩同軸ケーブル(LCX)無線通信の多様化に伴い、LCXシステムの大容量化が求められている。しかし、LCXシステムでは、十分な電界が得られるが利用できる周波数が限られているという課題があり、大容量化には周波数利用効率の向上が必要である。

本稿では、新たに開発した大容量LCX無線通信技術と、更なる大容量化・高信頼化を図る将来技術について述べる。

2. LCX無線通信システム

LCX無線通信システムは、主に無線基地局、移動局、中継機で構成し、敷設したLCXを介して、その区間内を移動する移動局と区間内に設置する無線基地局との間で通信を行う⁽¹⁾。LCX無線通信システムの利点は、LCX周辺を通信エリアとすることから一次元移動する移動局との無線通信に適しており、安定した通信が可能である。現在、この利点を活用して、列車無線や、高速道路等にLCX無線通信システムが用いられている。

3. 大容量LCX無線通信技術

一般的な無線通信では、反射波が存在すると周波数歪みが発生する。さらに、この環境で無線機が移動すると、移動速度に比例して信号が変動し、時間・周波数の二次元歪みが生じる。そのため、高速移動時での大容量通信を実現するためには、この二次元歪みを高精度に補償する必要がある。

この課題を解決するため、高速な時間変動に対応し、周波数歪みを高精度に推定可能な伝送路推定技術⁽²⁾を開発した。

3.1 高精度伝送路推定技術

図1に高精度伝送路推定における歪み補償方法を示す。受信局では、受信信号から分散配置されたパイロット信号だけを抽出し、送信局と受信局間で発生した歪みをパイロット信号の変化量から算出する。この歪み情報は時間、周波数方向の離散データであるため、パイロット信号以外の受信信号に対する歪みを補間する必要がある。

一般的な補間方法として線形補間があるが、大容量化を実現するためには、平均2乗誤差を最小化する二次元MMSE(Minimum Mean Square Error)フィルタが有効である。二次元MMSEフィルタは伝送路パラメータである正規化ドップラー周波数、最大遅延サンプル数、平均信号受信電力対雑音電力比(Signal-to-Noise power Ratio: SNR)を用いて設計する⁽³⁾。一方、移動体通信では、これらの伝送路パラメータは環境によって変動するため、最適なフィルタ係数算出が困難である。この解決策として、あらかじめ複数の伝送路を想定し、伝送路パラメータ推定と

伝送路推定を同時に実現する伝送路推定方式を開発した。これによって、リアルタイムにおけるフィルタ係数算出が不要となり、従来の二次元MMSEフィルタによる伝送路推定よりも約1/100に演算量を削減した⁽²⁾。

3.2 推定精度

図2に伝送路推定の平均2乗誤差(Mean Square Error: MSE)特性を示す。この特性は、計算機によって、正規化ドップラー周波数0.50%の移動環境で評価した。提案方式は、従来方式である線形補間と比較して大きく特性を改善し、理想特性(MMSE)に近い推定精度を達成している。

3.3 伝送実験

高精度伝送路推定技術を搭載したOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)無線通信試作機を開発し、伝送実験によって実現性を検証した。

表1に伝送実験の諸元、図3に伝送実験系の構成を示す。試作機のデジタル信号処理部は、FPGA(Field Programmable Gate Array)に実装した。変調方式には多値変調(256QAM)を用いた。また、高速移動に伴う時間、周波数の二次元歪みはフェージングシミュレータによって模擬した。

図4に、正規化ドップラー周波数対ビット誤り率特性の伝送実験結果を示す。正規化ドップラー周波数はRF周波

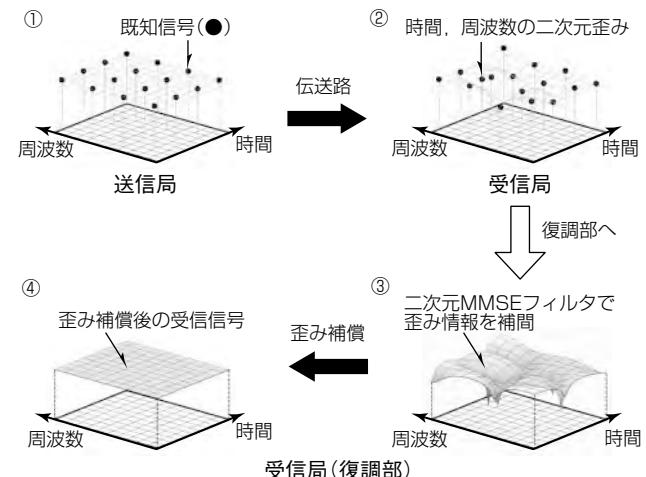


図1. 高精度伝送路推定技術による歪み補償方法

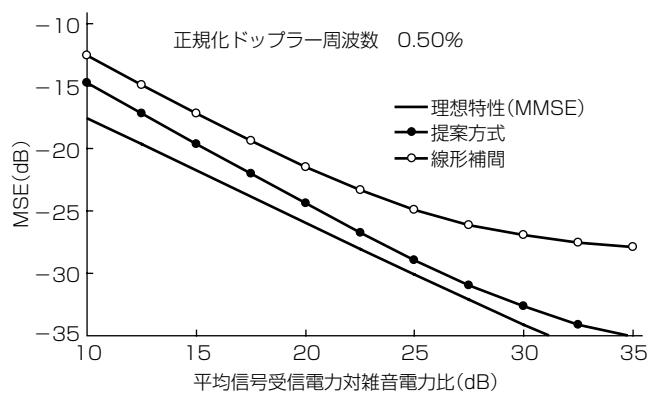


図2. 伝送路推定MSE特性

表1. 伝送実験の諸元

項目	諸元
変調方式	256QAM
伝送方式	OFDM
誤り訂正符号	ターボ符号(符号化率:3/4)
フレーム利用効率	72%
アンテナ構成	1送信, 4受信
周波数利用効率	4.3bps/Hz

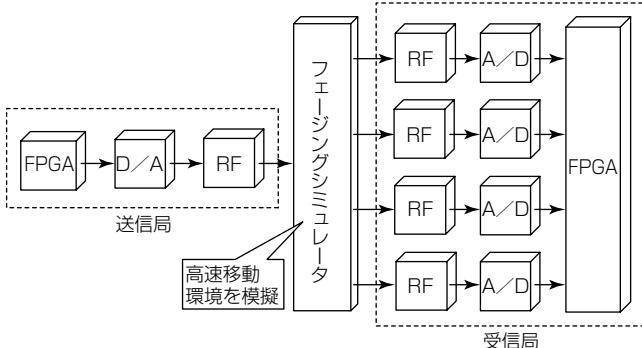


図3. 伝送実験系の構成

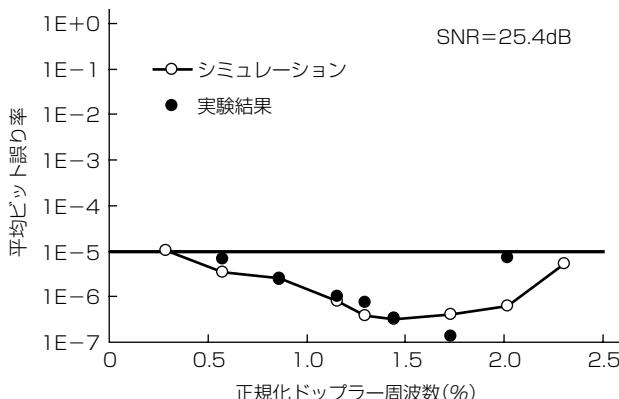


図4. 正規化ドッpler周波数対平均ビット誤り率特性

数, 移動速度, シンボル周期によって決定される伝送路パラメータであり, RF周波数500MHz, 移動速度500km/h, シンボル周期50μsの場合, 正規化ドッpler周波数は約1.16%である。実験結果から, 正規化ドッpler周波数2.0%の高速移動環境まで高精度な歪みを補償でき, 平均ビット誤り率10⁻⁵以下を達成した。これによって, 周波数利用効率4.3bps/Hzを実現できることを実証した。

4. LCX無線通信の将来技術

この章では, LCX無線通信で, 更なる大容量化と高信頼化を図る将来技術について述べる。

4.1 LCX-MIMO技術

無線通信の大容量化技術として, 送受信に複数のアンテナを備え, 空間資源を有効利用するMIMO技術⁽⁴⁾がある。図5に, 4本のLCXから異なる信号を送信する4多重のLCX-MIMO伝送システムの構成を示す。

図6に, LCX-MIMO技術における周波数利用効率を示

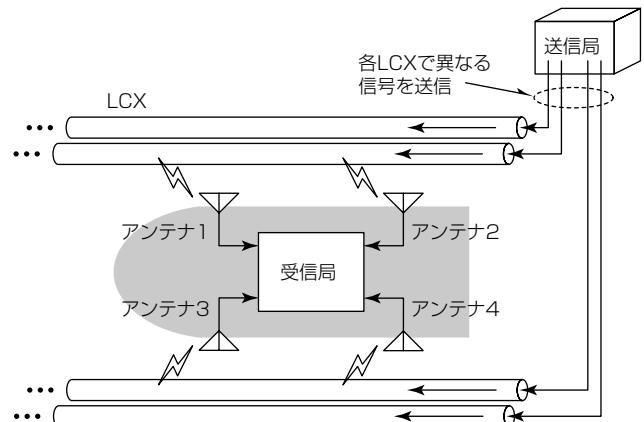


図5. LCX-MIMO伝送システム(4LCX · 4多重)

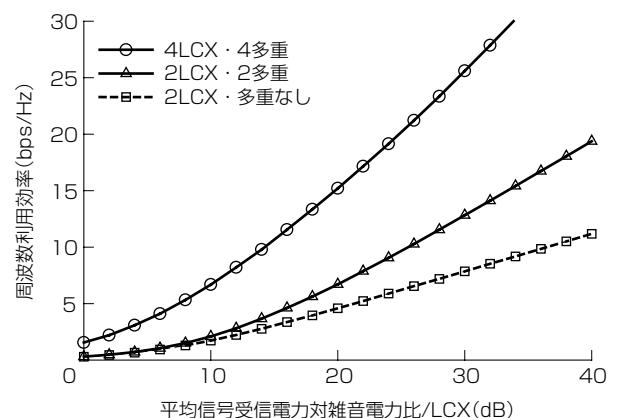


図6. 場所率99.99%以上での周波数利用効率特性

す。横軸はLCX 1本に対するSNRであり, 縦軸は場所率99.99%以上を実現する周波数利用効率(シャノン限界)⁽⁴⁾である。ここで, 受信アンテナ数は4本としている。2LCX · 多重なしは2本のLCXから同一信号を送信するSIMO(Single-Input Multiple-Output)構成であり, 2LCX · 2多重は2本のLCXから異なる信号を送信するMIMO構成である。同図から, SIMOに比べ, MIMOを適用することで大容量化が可能であり, 特にSNRが高いほど効果が大きいことが分かる。

4.2 高効率多値化技術

SCシンボル系列をブロック化して送信するSCブロック伝送は, 図7に示すように, OFDMと比べて低ピーク電力を維持しながら, OFDMと同等の周波数利用効率を実現する伝送方式である。一方, 高速移動環境では, 3.1節で示した分散パイロットが有効である。しかし, SCブロック伝送に分散パイロットを多重することによって低ピーク電力の利点が損なわれる。

この課題に対して, データとパイロットのタイミングをずらして多重することで, 通常のSCブロック伝送と同等のピーク電力まで抑圧可能な高効率送信技術を開発した⁽⁵⁾。受信機では, 3章で述べた二次元歪み補償によって受信信号の歪みを補償する。これらの技術を組み合わせることで,

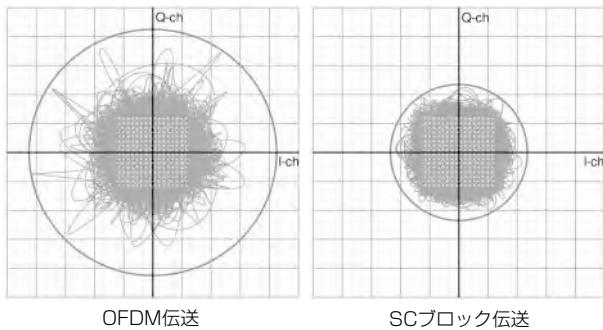


図7. 256QAM変調信号のコンスタレーション

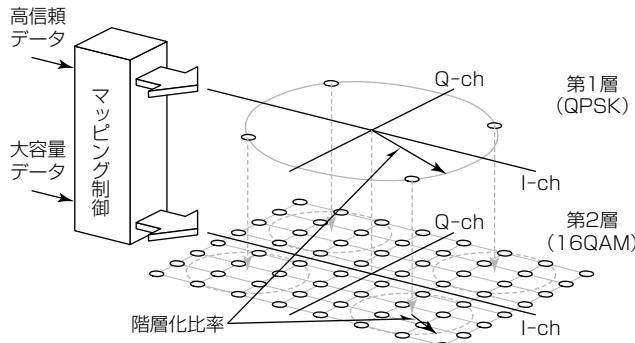


図8. 階層変調の概念(QPSK+16QAMの例)

高速移動環境でも最大1,024QAMまでの多値MIMO伝送が可能であることを試作機によって実証している⁽⁶⁾。

4.3 一般化階層変調技術

データの優先度や伝送速度が異なる複数のデータストリームを同時送信する方法の一つとして、個別にマッピングされた各信号を階層的に重畳する階層変調がある。

図8に階層変調の概念を示す。階層変調によって2ストリームを多重する場合、QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)などの高信頼回線(第1層)と、第1層に重畳するQAMなどの大容量回線(第2層)に分かれる。図8の例では、第2層は一つの象限に16QAMが配置されるため、第1層と比較して、伝送速度は高いが回線品質は低い。これまでの階層変調技術では、各回線品質は重畳後のビット品質によって決定されるため、回線設計の自由度が低いという課題があった。この課題に対し、①重畳時の信号点サイズを規定する階層化比率、②各層へのビットマッピングを制御するマッピング制御、を導入することで階層変調を一般化した。これによって、図9に示すように、パラメータ調整によって第1層、第2層ともに柔軟な回線品質設計が可能となる⁽⁷⁾。

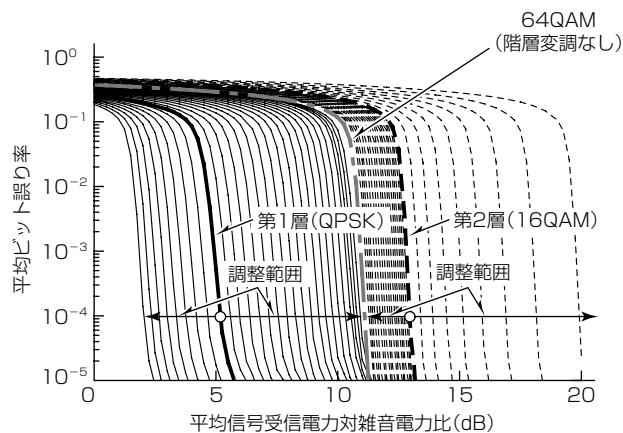


図9. 一般化階層変調適用時の平均ビット誤り率特性

5. むすび

LCX無線通信における高速移動体通信に対応する大容量化技術として、当社が開発した高精度伝送路推定技術について述べた。また、更なる大容量化、高信頼化を実現する将来技術として、LCX-MIMO技術、高効率多値化技術、一般化階層変調技術について述べた。今後、これらの技術を適用した大容量LCX無線通信システムを実現する。

参考文献

- (1) 佐々木 伸, ほか:LCX通信システム, 電子通信学会(1982)
- (2) 田中謙一郎, ほか:フェージング環境下における分散パイロットによる演算量削減型時間・周波数伝送路推定法, 電子情報通信学会論文誌B, J94-B, No.12, 1605~1610 (2011)
- (3) Hoeher, P., et al.: Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by Wiener filtering, IEEE ICASSP-97, 3, 1845~1848 (1997)
- (4) 大鐘武雄, 小川恭孝:わかりやすいMIMOシステム技術, オーム社 (2009)
- (5) Hasegawa, F., et al.: A novel PAPR reduction scheme for SC-OFDM with frequency domain multiplexed pilots, IEEE Commun. Lett., 16, No.9, 1345~1348 (2012)
- (6) 増田進二, ほか:パイロット多重型シングルキャリアブロック伝送の実験評価(1)~(3), 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-42~44 (2012)
- (7) 西本 浩, ほか:階層変調方式における回線品質調整に関する検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-62 (2012)

衛星通信用マルチチャネル伝送技術

Multi-channel Transmission Technologies for Satellite Communication Systems

Koji Tomitsuka, Fumihiro Hasegawa, Akihiro Okazaki, Fumio Ishizu, Yasuhiro Ido

富塚浩志* 石津文雄*
長谷川文大** 井戸康浩***
岡崎彰浩*

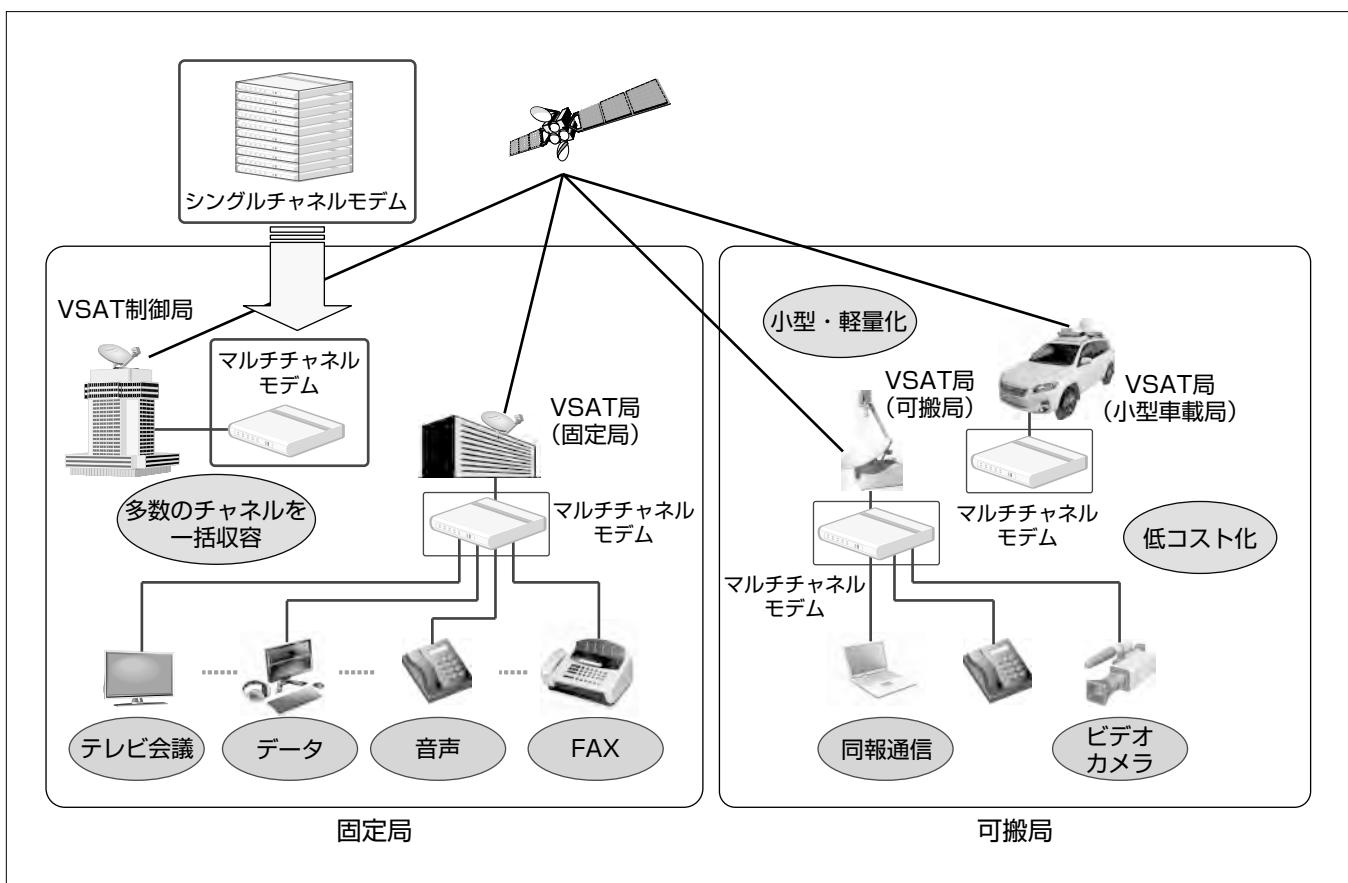
要 旨

近年、衛星通信システムは周波数利用効率向上と高速・大容量化の要求に伴い、音声通信から高速データ通信まで多様なサービスへの対応、変調信号の多値化や強力な誤り訂正符号の採用等、モデムの高機能化が進んでおり設備コストが増大している。現在、三菱電機では廉価な衛星通信ネットワークの構築を実現するための研究開発に取り組んでおり、今回、衛星通信用モデムの小型軽量化・低コスト化のために、複数チャネルの無線信号処理を1台のモデム装置に集約させたマルチチャネルモデムを開発した。これによって、VSAT(Very Small Aperture Terminal)システムなどで複数のモデム装置を用いて実現されていた多チャネル同時通信をこのモデム1台で実現することができる。このモデムの主な特長を次に示す。

(1) 情報速度にあわせて任意の変調速度・周波数配置をチャネルごとに独立に設定することができ、1台のモデムで最大6チャネル同時通信を実現した。

(2) 低CNR(Carrier power to Noise power Ratio)下で広い周波数カバレッジと高い周波数推定精度を同時に実現できる多重開ループ周波数推定技術を採用して、チャネルごとの初期同期時間の高速化、良好な受信特性を実現した。

また、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する次世代衛星システム向けの将来技術として、周波数領域等化技術を用いたSC/MC(Single Carrier/Multi Carrier)ブロック伝送技術、低PAPR(Peak Average Power to Ratio)マルチチャネル伝送技術について述べる。



衛星通信システム対応マルチチャネルモデム装置

衛星通信システムにマルチチャネルモデム装置を適用したときのサービスイメージを示す。マルチチャネルモデムは様々なサービスに対応した多数のチャネルを一括して処理できるため、衛星通信設備の小型軽量化・低コスト化を実現する。

1. まえがき

衛星通信ネットワークの需要拡大に伴い、高機能化する衛星通信設備の低コスト化が課題であり、当社は廉価な衛星通信ネットワークを構築し衛星通信インフラの普及促進に向け研究開発に取り組んでいる。今回、衛星通信用モードの小型軽量化・低コスト化のために、1台のモードで複数の無線チャネルを同時に通信可能なマルチチャネルモードを開発した。

本稿では、このモードについて述べるとともに、その技術的な課題と解決策について述べる。また、次世代衛星通信ネットワーク向けの将来技術として、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する周波数領域等化技術を用いたSC/MCブロック伝送技術、低PAPRマルチチャネル伝送技術について述べる。

2. マルチチャネルモード

2.1 モード主要諸元と特長

表1にマルチチャネルモードの主要諸元を示す。マルチチャネルモードは、変復調機能の回路規模を従来機と比較して約1/6以下に削減し、1枚のモード基板に6チャネルの機能を集約することで小型軽量化を実現した。また、このモードは変調速度・周波数設定機能をデジタル信号処理で実現することによって、クロック可変用のアナログ部品を削減するとともに32ksps~2.24Mspsの範囲を1spsステップでの可変調整を実現し、この1台で完全非同期のチャネルを最大6チャネルまで同時通信することを可能とした。なお、モード諸元は今後の市場ニーズに応じ、更なる高機能化に向け、追加していく予定である。

2.2 マルチチャネルモードの構成

衛星通信システムは、1つのシステム内で、音声・データ・映像等を異なる変調速度で通信するサービスが提供されている。そのため衛星通信用モードは、情報速度に応じて任意の変調速度切り換えを実現するマルチレート変換機能が要求される。従来、このマルチレート変換を実現する手法として、DDS(Direct Digital Synthesizer)によってクロック速度を切り換える方法が用いられていたが、複数の変調速度を扱うマルチチャネルモードの実現は困難であった。

図1に今回開発したマルチチャネルモードの構成を示す。図の構成によって、マルチレート変換をデジタル信号処理で実現し、DDSを不要とした。また、マルチチャネル伝送を行う分波・合波処理をデジタル化し、モード基板構成を簡素化した。さらに、チャネル数分必要であったアナログ部品(DDS, バンドパスフィルタ(BPF), D/A変換器, A/D変換器)を1つに共通化し、削減した。

また、受信性能では、低CNR下で広い周波数カバレッジと高い周波数推定精度を同時に実現できる多重開ループ

表1. マルチチャネルモードの主要諸元

項目	諸元
IF周波数	950~1,450MHz
周波数設定範囲	連続した周波数設定可能範囲 76MHz
周波数設定	1Hzステップ
変調速度設定範囲	32ksps~2.24Msps/1ch
変調速度設定	1spsステップ
同時通信チャネル数	6ch
変調方式	BPSK/QPSK
復調方式	同期検波
誤り訂正方式	畳み込み符号化/ビタビ復号 ターボ符号化/ターボ復号
符号化率	1/2, 3/4
ロールオフ率	0.2~0.35

IF : Intermediate Frequency SPS : Symbols Per Second

BPSK : Binary Phase Shift Keying

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

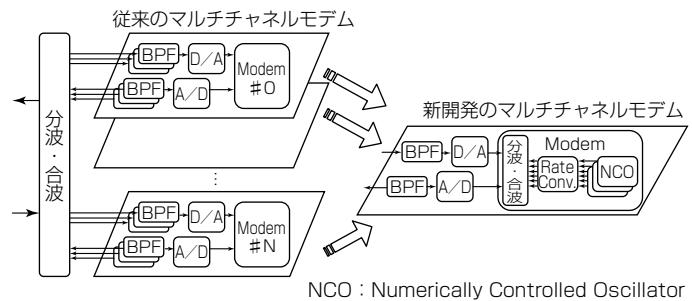


図1. マルチチャネルモードの基板構成

周波数推定技術を採用し、分散パイロットを挿入した無線フレームと併用することで1無線フレーム時間内という短時間での周波数引込みを実現した。また、安定した周波数オフセット補償によって低CNR下での同期検波時のチャネル推定精度の劣化を抑えることができ、誤り訂正符号適用時の理論特性にほぼ一致する良好な受信特性を実現した。

3. 主要要素技術

ここでは、マルチチャネル伝送を実現するための主要技術について述べる。

3.1 マルチチャネル対応のマルチレート伝送技術

図2に変調部におけるマルチチャネル対応のマルチレート変換方式のブロック図を示す。

今回開発したマルチレート変換方式は、リサンプルするタイミングを決定するNCO回路と、所望のサンプル点を生成する補間回路・位相誤差補正回路の2段階構成でサンプリングレート変換を実現している⁽¹⁾⁽²⁾。1段目の補間回路はフィルタ係数を低減するために比較的粗い精度で理想サンプル点に近い信号を生成し、2段目の位相誤差補正回路でその残留位相誤差を高精度に補正する。この構成によって、フィルタ係数のメモリ容量を大幅に削減しつつ、高精度なサンプリングレート変換を実現した。さらに、チャネルごとに時分割処理を行い共通化して回路規模を削減することで、マルチチャネルに対応したマルチレート伝送機能のFPGA(Field Programmable Gate Array)実装を実現した。

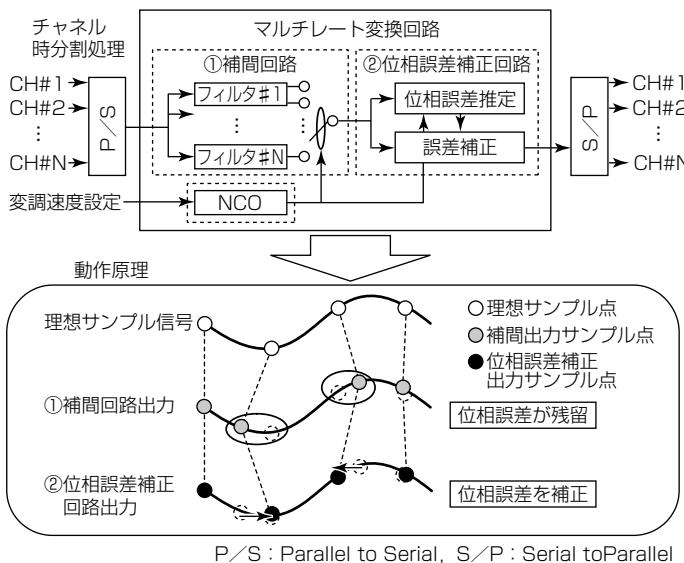


図2. マルチチャネル対応のマルチレート変換方式

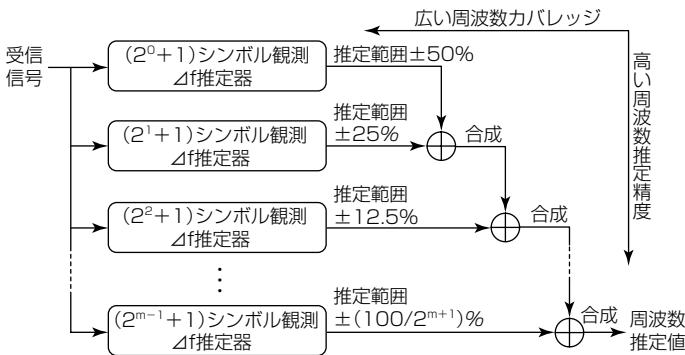


図3. 多重開ループ周波数推定方式

3.2 多重開ループ周波数推定技術

多重開ループ周波数推定技術は、周波数オフセットによる位相変動を観測シンボル数の異なる周波数推定器を用いてそれぞれ推定・合成することによって、広い周波数カバレッジと高い周波数推定精度を同時に実現する⁽³⁾。図3に多重開ループ周波数推定方式のブロック図を示す。 (2^0+1) シンボルから $(2^{m-1}+1)$ シンボルまでの観測シンボル数の異なる周波数推定器(Δf :周波数オフセット)を備えている。通常、周波数カバレッジと推定精度はトレードオフの関係にあり同時に満足することは困難であるが、この方式は図4に示すように周波数カバレッジの優れた推定値と推定精度の優れた推定値のそれぞれの特長を損なわずに合成することができる。

4. 次世代衛星通信システム向け技術

ここでは次世代衛星通信ネットワーク向けの将来技術として、更なる低コスト化に加えて高速・大容量伝送を実現する周波数領域等化技術を用いたSC/MCブロック伝送技術とマルチチャネル伝送下で低PAPRを実現するマルチチャネルSC-OFDM(Single Carrier-Orthogonal Frequency Division Multiplexing)伝送技術について述べる。

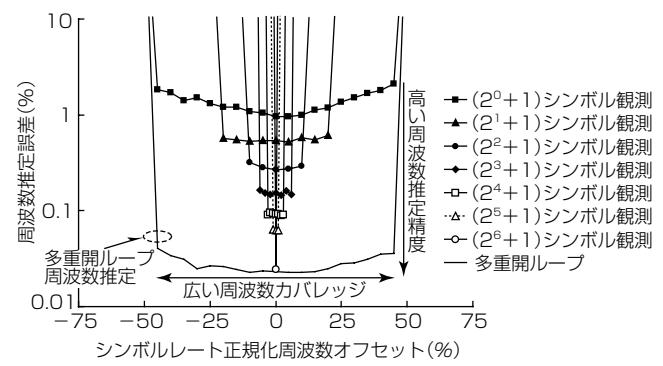


図4. 周波数推定精度

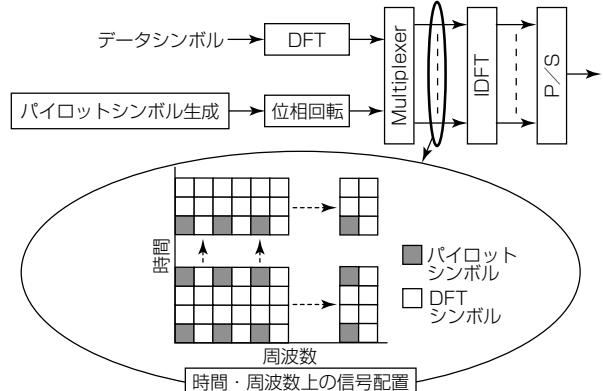


図5. SC/MCブロック伝送及びパイロット信号生成

4.1 SC/MCブロック伝送技術

衛星通信では、将来の高速・大容量伝送の実現に向けて広帯域化が進んでいる。広帯域伝送は、広い周波数帯域を用いて信号を送るため、周波数領域での信号の歪(ひずみ)みが問題となる。周波数領域歪みを補償する技術として、周波数領域等化(Frequency Domain Equalization: FDE)を用いたSC-OFDM伝送技術が有効である⁽⁴⁾。SC-OFDM伝送は、従来のSC伝送と同等の低PAPR特性を実現し、さらに、周波数領域歪補償が可能である。しかし、周波数領域等化に用いる伝送路推定値を高速、かつ高精度に推定するためにはパイロット信号の挿入が必要であるが、パイロット信号をSC-OFDM信号に多重するとピーク電力が増加してしまうという問題がある。また、MCブロック伝送であるOFDMでは、パイロット信号を柔軟に配置できるという特長があるが、ピーク電力が大きいといった問題がある。これらを解決するためにSC-OFDM信号に対して周波数軸上でパイロット信号を多重したSC/MCブロック伝送技術を提案する。この技術によって、ピーク電力を低減したパイロット多重伝送を実現できる。

図5にSC/MCブロック伝送の送信機構成を示す。DFT (Discrete Fourier Transform)処理によって周波数領域に変換されたデータシンボルと周波数領域で位相回転を加えたパイロットシンボルを多重する。ここで、パイロットシンボルは定包絡線信号系列を用い、多重シンボルにおけるデータシンボルとパイロットシンボルの比率を等しく設定

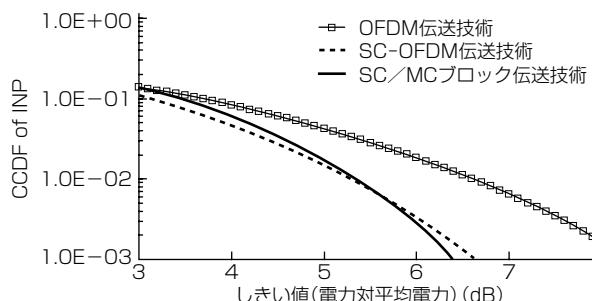


図6. SC/MCとSC-OFDM, OFDM伝送技術の電力特性比較

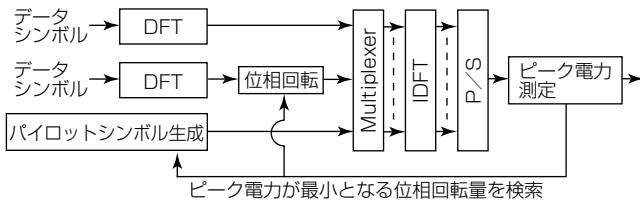


図7. SC/MC伝送方式：適応位相回転方式

する⁽⁵⁾。また、伝送路推定精度を高めるため、パイロットシンボルは一定の間隔で時間上に配置させる。

図6にSC/MCブロック伝送における電力特性(Complementary Cumulative Distribution Function of Instantaneous Normalized Power: CCDF of INP)を示す。ここで、SC-OFDM及びOFDM伝送はパイロットを挿入しないデータシンボルだけを伝送した場合の電力特性を示している。図から、提案するSC/MCブロック伝送技術を用いることでほぼSC-OFDM伝送技術と同等の優れた電力特性が得られることが分かる。この方式は、2013年にリリース予定の高速移動体向け放送技術規格であるDVB-NGH(Digital Video Broadcasting-Next Generation Handheld)で採択された⁽⁶⁾。

ピーク電力を更に抑圧する手法として、ピーク電力が最小となるように適応的に位相回転をデータシンボルに与える技術について述べる。図7に示すように、データシンボルを2グループに分割しそれぞれのグループに対しDFT処理を行う。そして片方のグループに対し、適応的に送信ピーク電力が最小となるように位相回転を加える⁽⁷⁾。位相回転量は事前に設定した候補の中から選ばれ、それぞれの位相回転量に対して異なるパイロットシンボル系列を用意し、受信機が位相回転量を判定できるようにする。この技術は、パイロットシンボルの比率に関する制約はない。

4.2 マルチチャネルSC-OFDM伝送技術

SC-OFDM伝送技術を用いてマルチチャネル伝送を行う場合、ピーク電力の増加が課題となる。このピーク電力の増加を抑える手法として、4.1節で述べたSC/MCブロック伝送向け位相回転技術を応用し、図8に示すように周波数領域で一方のチャネル信号に固定位相回転を与えるピーク電力抑圧手法の適用が有効である⁽⁸⁾。この技術は、ロールオフ

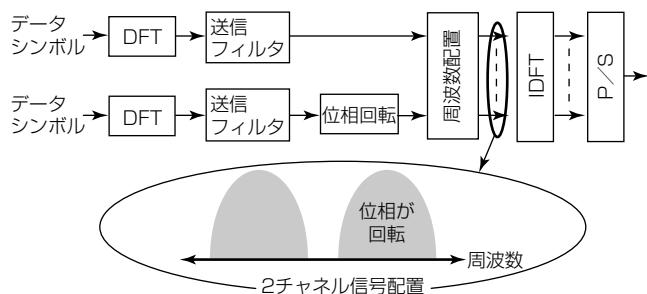


図8. マルチチャネルSC-OFDM送信及び提案技術

フィルタを用いたSC-OFDM信号にも適用可能な技術である。

5. むすび

廉価な衛星通信ネットワークを構築することを目的に開発したマルチチャネルモデムと、その技術的課題の解決方法について述べた。また、更なる低成本化に加えて高速・大容量伝送を実現する次世代衛星通信ネットワーク向けの将来技術について述べた。

参考文献

- (1) 富塚浩志, ほか: リサンプリングフィルタを用いた可変シンボルレート伝送技術に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告.SAT, 衛星通信110(426), 43~48 (2011)
- (2) 井浦裕貴, ほか: サンプリングレート変換における補間誤差低減に関する一検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会論文集, 2011年_通信(1), 304 (2011)
- (3) Kubo, H., et al.: A multiple open-loop frequency estimation based on differential detection for MPSK, IEICE Transactions on Communications, E82-B, No.1, 136~144 (1999)
- (4) Falconer, D., et al.: Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems, IEEE Commun. Magazine, 40, No.4, 58~66 (2002)
- (5) Ciochina, C., et al.: Satellite profile in DVB-NGH, Proc. ASMS 2012 (2012)
- (6) Digital Video Broadcasting(DVB)-Next Generation Handheld(NGH) : Commercial Requirements for DVB-NGH, SB1856 (2009)
<http://www.dvb.org/technology/dvb-ngh/DVB-NGH-Commercial-Requirements.pdf>
- (7) Hasegawa, F., et al.: A novel PAPR reduction scheme for SC-OFDM with frequency domain multiplexed pilots, IEEE Commun. Letters, 16, No.9, 1345~1348 (2012)
- (8) Hasegawa, F., et al.: Peak power reduction techniques for multi-channel SC-OFDM, Proc. PIMRC 2011, 1743~1747 (2011)

特定小電力無線技術

Technologies for Specified Low Power Radio

Takahisa Yamauchi, Akira Otsuka, Ryoichi Fujie, Naohito Tomoe, Sen Kudo

山内尚久* 友江直仁***
大塚 晃** 工藤 銃***
藤江良一*

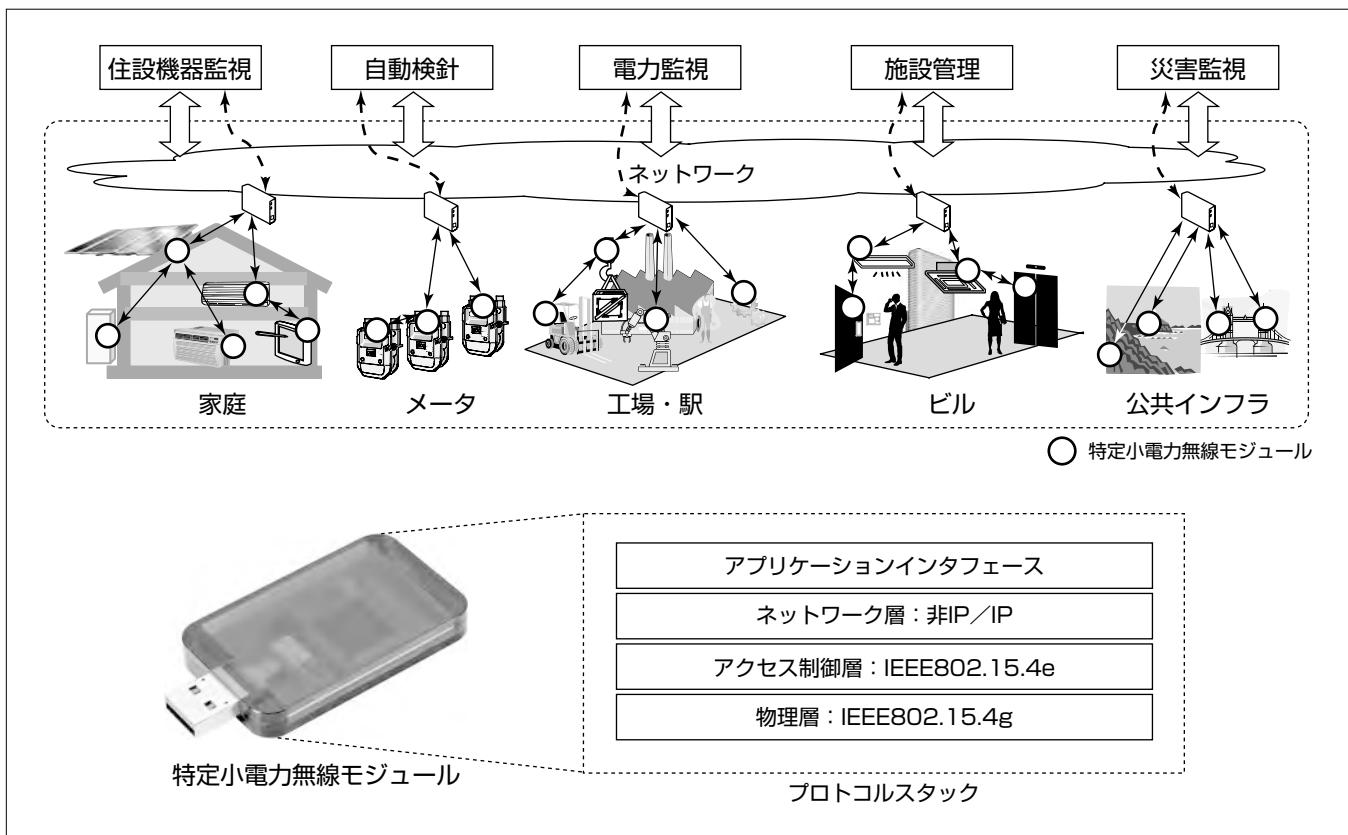
要 旨

テレメータリング、及び機器の監視・制御など、特定小電力無線を用いたネットワークによるデータ伝送に注目が集まっている。これらには無線通信規格IEEE802.15.4が適用され、中でも電波到達性が高い1GHz以下の周波数の利用に期待が高まっている。さらに、ネットワーク層にマルチホップ技術を適用することによって、広範囲な通信エリアの構築と多数の端末収容を実現する大規模ネットワークの構築が可能となる。

特定小電力無線は、国内では国際的に利用可能な920MHz帯への周波数移行と合わせて、帯域幅の拡張、及び送信出力制限の緩和等の法令改正が2012年7月から実施され、スマートメータやセンサネットワーク用の周波数として期待されている。

920MHz帯特定小電力無線は、2.4GHzや5GHz帯を用いる無線LANと比較して、伝送速度は遅いものの、電波到達性が高い、消費電力が小さい、電波干渉が少ないという特長があり、メータの自動検針の他、家庭、工場、ビル、及び公共インフラ等、様々な分野への応用が考えられる。

本稿では、様々な分野への応用を想定した小型・低消費電力な特定小電力無線モジュールの試作開発について述べる。特定小電力無線モジュールは、物理層・アクセス制御層は標準規格であるIEEE802.15.4g/eに準拠しながら、ネットワーク層は、非IP系、IP系のいずれにも対応可能としている。さらに、低消費電力化技術によって電池駆動10年を達成可能とし、広範なアプリケーションに適用されることが期待される。



特定小電力無線の適用システムと特定小電力無線モジュール

特定小電力無線は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することが可能な無線であり、センサネットワークやスマートメータなどへの適用が世界的にも期待されている。IEEE802.15.4で物理層、アクセス制御層が規格化されている。国内では2012年7月、世界的に利用可能な920MHz帯へ移行した。三菱電機は、住設機器監視、自動検針、電力監視、施設管理、災害監視等の幅広いアプリケーションへの適用を想定し、小型・低消費電力な特定小電力無線モジュールと用途に応じたプロトコルスタックの構築が可能な通信ソフトウェアプラットフォームを開発した。

1. まえがき

テレメータリング、及び機器の監視・制御など、特定小電力無線を用いたネットワークによるデータ伝送に注目が集まっている。これらには無線通信規格IEEE802.15.4⁽¹⁾が適用され、中でも電波到達性が高い1GHz以下の周波数の利用に期待が高まっている。さらに、ネットワーク層にマルチホップを適用することによって、広範囲な通信エリアの構築と多数の端末収容を実現する大規模ネットワークの実現が可能となる。

特定小電力無線は、国内では国際的に利用可能な920MHz帯への周波数移行と合わせて、帯域幅の拡張、及び送信出力制限の緩和等の法令改正が2012年7月に実施され、スマートメータやセンサネットワーク用の周波数として期待されている。

920MHz帯特定小電力無線は、2.4GHzや5GHz帯を用いる無線LANと比較して、伝送速度は劣るもの、電波到達性が高い、消費電力が小さい、及び低コストであるという特長がある。また、無線LANなどと比較して電波干渉が少ないこともあり、メータの自動検針の他、家庭、工場、ビル、及び公共インフラ等、様々な分野への応用が考えられる。

本稿では、様々な分野への応用を想定した小型・低消費電力な特定小電力無線モジュールの試作開発について述べる。

2. 920MHz帯特定小電力無線

2.1 920MHz帯の無線特性

900MHz帯の特定小電力無線は、国内では915.9～929.7MHz、米国では902～928MHzが割り当てられており、862～870MHzが割り当てられている欧州でも920MHz帯への移行が検討されている。920MHz帯を使用する特定小電力無線は、無線LAN、及びBluetooth^(注1)で使用されている2.4GHz帯と比較して、通信速度は劣るが、電波到達性に優れ、透過性や回折性が高いことから、障害物の多い場所、又は屋外での利用に向いている。また、無線LANなどと比較して、電波到達性に優れるため送信出力が低くて済むことから、消費電力を抑えることが可能である(表1)。さらに、無線方式が簡易であることから、低廉な無線デバイス、及びCPUで構成可能であり、今後世界的な普及が進めば、更に低コスト化が期待できる。

国内では、従来の950MHz帯から920MHz帯へ周波数が

表1. 特定小電力無線と無線LANの比較

項目	特定小電力無線	無線LAN
標準規格	IEEE802.15.4	IEEE802.11
通信距離	最大約100m	最大約50m
消費電力	50～150mW	1～2W
通信速度	100kbps	1Mbps以上

移行されたのと同時に、利用可能な無線チャネル数が増え、送信出力は従来の10mWから変更された最大20mWの免許不要な特定小電力無線局と最大250mWの簡易無線局が利用可能となり、スマートメータだけでなく、様々な分野への応用が期待されている。

(注1) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc. の登録商標である。

2.2 標準化動向

センサネットワーク用の無線マルチホップ通信の無線方式としてはIEEE802.15.4で物理層、及びアクセス制御層が国際標準規格として使われてきたが、パケット長の制限、又はバッテリー駆動に対する課題があった。これらに対して、スマートメータ向けの物理層、及びアクセス制御層の修正規格として、それぞれIEEE802.15.4g⁽²⁾、及びIEEE802.15.4e⁽³⁾が2012年3月に標準化され、920MHz帯を使用する無線方式の普及が期待されている。

ネットワーク層の国際標準規格としては、IETF(Internet Engineering Task Force)が、IEEE802.15.4上でIPv6ネットワークを実現するために必要な技術として、6LoWPAN(IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)やRPL(Routing Protocol for Low power and Lossy Networks)を標準化している。6LoWPANは、IPv6/TCP/UDPのヘッダの圧縮やパケット分割等を行う技術であり、RPLは、不安定な無線通信環境で、品質の良い通信経路を動的に選択するマルチホップルーティングを実現する技術である。

スマートメータやHEMS(Home Energy Management System)コントローラーの家庭への導入が見込まれる中、経済産業省は、スマートメータから家庭内に設置したHEMSコントローラーをつなぐ通信路“Bルート”，及びHEMSコントローラーと各種家電機器を接続する通信路“HEMSネットワーク”的通信ミドルウェアに“ECHONET Lite^(注2)”を使用することを推奨している。また、ECHONET Liteのネットワーク層には、IPを使用すること、伝送媒体には、920MHz帯特定小電力無線、無線LAN、及び電力線通信(Power Line Communications: PLC)を同じく推奨している。ECHONET Liteの下位層に920MHz帯特定小電力無線、及びIPv6を搭載したプロトコルスタック例を図1に示す。

(注2) ECHONET Liteは、エコネットコンソーシアムの登録商標(申請中)である。

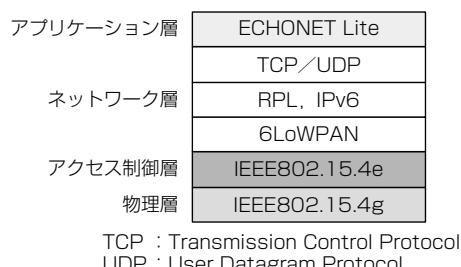


図1. ECHONET Liteの下位層のプロトコルスタック例

3. 特定小電力無線モジュールの試作開発

特定小電力無線は、様々な分野への応用が期待されるため、各アプリケーションが要求する性能、及び機能にそれぞれ応えるためのハードウェア、及びソフトウェア構成が必要である。

表2. 特定小電力無線モジュールの無線諸元

項目	諸元
周波数帯	920MHz帯
変調方式	GFSK
伝送速度	100kbps
送信出力	最大20mW
アクセス方式	CSMA/CA

GFSK : Gaussian Frequency-Shift Keying

CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance



図2. 特定小電力無線モジュール

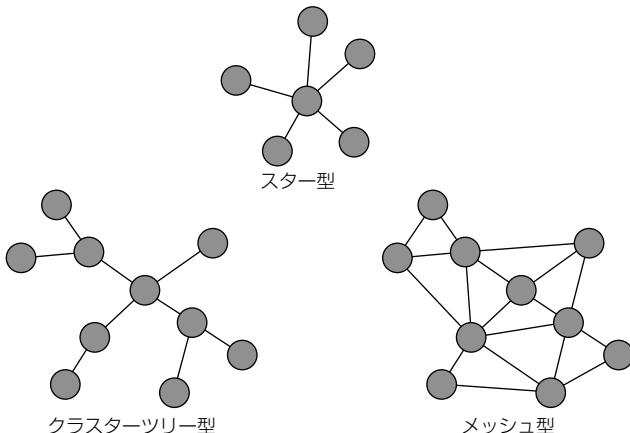


図3. ネットワークトポロジーの種類



図4. 通信ソフトウェアプラットフォームの構成

3.1 特定小電力無線モジュール

開発した特定小電力無線モジュールは、小型・低消費電力を特長としており、30(H)×40(W)(mm)の基板に、IEEE 802.15.4g、及びARIB STD-T108⁽⁴⁾に準拠した無線デバイス、CPU、並びにアンテナを実装している。表2に特定小電力無線モジュールの無線諸元、図2に、開発したUSB(Universal Serial Bus) ドングルタイプの特定小電力無線モジュールの外観を示す(72(W)×36(H)×13(D)(mm))。なお、USB ドングルタイプでは、USBインターフェースによる給電が可能なため、間欠受信制御は必ずしも必要ではないが、CPUに実装した通信ソフトウェアによる間欠受信制御によって、電池駆動で10年の動作も可能である。

3.2 通信ソフトウェアプラットフォーム

CPUに実装する通信ソフトウェアを機能ごとにモジュール分割することで、各種アプリケーションに応じたプロトコルスタック構築を可能とする通信ソフトウェアプラットフォームを開発した。

例えば、同じ自動検針でも、電力メータの自動検針は電源確保が可能だが、ガスマータの自動検針は電源確保が不可能なため、電池駆動が必要である。また、宅内のHEMSネットワークでは、マルチホップ通信は必要としないが、BEMS(Building Energy Management System)、又はFEMS(Factory Energy Management System)ネットワークでは、広範囲にノードを設置するため、マルチホップ通信は不可欠となる。さらに、マルチホップ通信でも、許容される伝送遅延が短く、また通信環境が安定しており通信経路の冗長性が不要な場合は、メッシュ型ではなく、クラスターツリー型が望ましい(図3)。

このようにアプリケーションによって、通信距離、許容伝送遅延、通信経路の冗長性、通信環境、及び電源確保可否が異なるため、アプリケーション要求に従い、通信ソフトウェアの機能、及びパラメータを組合わせて、適切なプロトコルスタックを構築可能とした。ただし、無線デバイスとインターフェースする無線通信ドライバ、及びアプリケーションとのインターフェースAPI(Application Program Interface)は共通とした。APIを共通化することで、通信ソフトウェアを意識せずに各種アプリケーションの実装を容易にした。通信ソフトウェアプラットフォームの構成を図4に示す。

4. 低消費電力化技術

マルチホップ通信を適用した特定小電力無線は、自動検針、及び公共インフラ等への応用が期待されている。特定小電力無線モジュールを接続する機器、又は設置環境によっては電源供給が困難な場合がある。このような環境で特定小電力無線モジュールを使用する場合には、長期間の電池駆動が可能な低消費電力化技術が要求される。特定小電力無線モジュールの消費電力を抑えるには、通信中だけアク

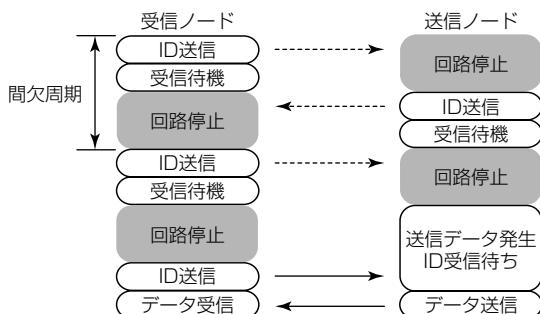


図5. 非同期型間欠受信制御の基本動作

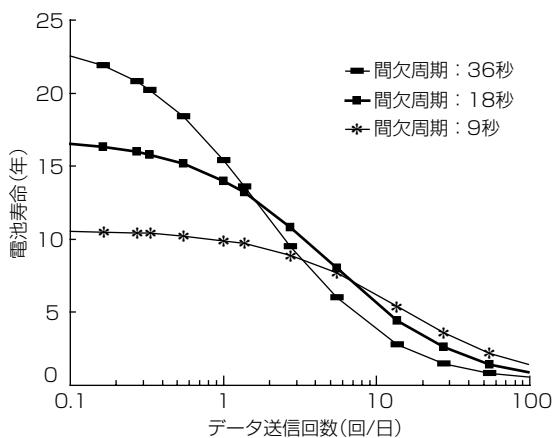


図6. データ送信回数と電池寿命の関係

ティブ状態とし、非通信中は無線デバイス、及びCPUをスリープ状態に移行する間欠受信制御が有効な手段である。

従来のマルチホップを適用した通信方式に対する間欠受信制御には、同期型と非同期型がある。同期型ではS-MAC (Medium Access Control)⁽⁵⁾、非同期型ではB-MAC⁽⁶⁾、X-MAC⁽⁷⁾と呼ばれる方式が知られている。複数ノードを設置するマルチホップ通信では、非同期型の間欠受信制御の方が、ノード間の複雑な同期制御を必要としないため、ネットワークトポロジーやノード数に依存せず、ネットワークの拡張性を維持したまま低消費電力化の効果を得ることができるため、非同期型の間欠受信制御を開発した。

開発した非同期型の間欠受信制御の基本的な動作を図5に示す。各ノードは周辺ノードに対し自ノードに対する送信データの有無を確認するためのID送信、及び受信待機を間欠的に繰り返す。ID送信、及び受信待機の期間以外は、無線デバイス、及びCPUのコアを停止し、CPUのRTC (Real-Time Clock)だけ起動しておく。送信データが発生した送信ノードは、受信ノードが間欠的に送信するIDを受信し、その直後にデータを送信することで、厳密な同期を必要としない間欠受信制御を行うことが可能となる。

開発した間欠受信制御によって1日1回のデータ送信であれば、4,800mAhの電池容量の電池駆動で約10年の動作を実現した。図6にデータ送信回数と電池寿命の関係を示す。

電池寿命は、データ送信回数と間欠周期によって決定されるため、トラフィック特性、及び要求される伝送遅延に応じて、間欠周期、及び電池容量を選択する。

5. む す び

920MHz帯特定小電力無線は、電波到達性に優れ、障害物の多い場所、又は屋外での利用に向いているため、テレメータリング、及び機器の監視・制御など様々な分野への応用が期待されている。国内外問わず、標準化団体、企業、及び政府の取組みも活発である。

小型・低消費電力な特定小電力無線モジュール、及び通信ソフトウェアプラットフォームの試作開発を行った。試作開発した特定小電力無線モジュールは、小型・低消費電力なハードウェア、及び通信ソフトウェアを実装したものであり、非IP系、又はIP系の選択、電池駆動の有無、又はルーティングプロトコルの選択等が可能である。電池駆動の場合、10年の動作が可能である。開発した特定小電力無線モジュールは、メータの自動検針の他、家庭、工場、ビル、及び公共インフラ等、様々な分野への応用が期待される。

参 考 文 献

- (1) IEEE Std 802.15.4-2011 Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) (2011)
- (2) IEEE Std 802.15.4g-2012 Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks (2012)
- (3) IEEE Std 802.15.4e-2012 Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer (2012)
- (4) ARIB STD-T108 : 920MHz帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備、一般社団法人 電波産業会 (2012)
- (5) Ye, W, et al. : An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, IEEE INFOCOM 2002, 3, 1567~1576 (2002)
- (6) Heinzelman, W. R., et al. : Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences (2000)
- (7) Buettnner, M., et al. : X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks, Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 307 ~320 (2006)

スマートメータ向け 無線メッシュネットワーク技術

石橋孝一* 城倉義彦**
八木章好*
阿部充伸*

Wireless Mesh Network Technology for Smart Meter Networks

Koichi Ishibashi, Akiyoshi Yagi, Mitsunobu Abe, Yoshihiko Shirokura

要 旨

地球温暖化防止に向けた太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの大量導入に備えて、電力系統の安定性を維持するためスマートグリッド及びスマートメータが検討されてきた。特に、国内では、2011年3月11日の東日本大震災以降、電力需給が厳しくなり、節電要請が広く行われる中、情報通信技術によって電力需給制御をスマートに実施可能なスマートメータシステムに対する期待が高まっており、スマートメータの導入加速も示されている。

三菱電機でも、スマートメータネットワークの実現に向けた技術開発を強化しており、本稿では、スマートメータネットワークの実現に向けて有力な通信方式である無線メッシュネットワーク技術について述べる。なお、スマートメータネットワークについては大規模化や安定性向上が求められており、次に示す対策が必要である。

(1) 伝送品質の向上

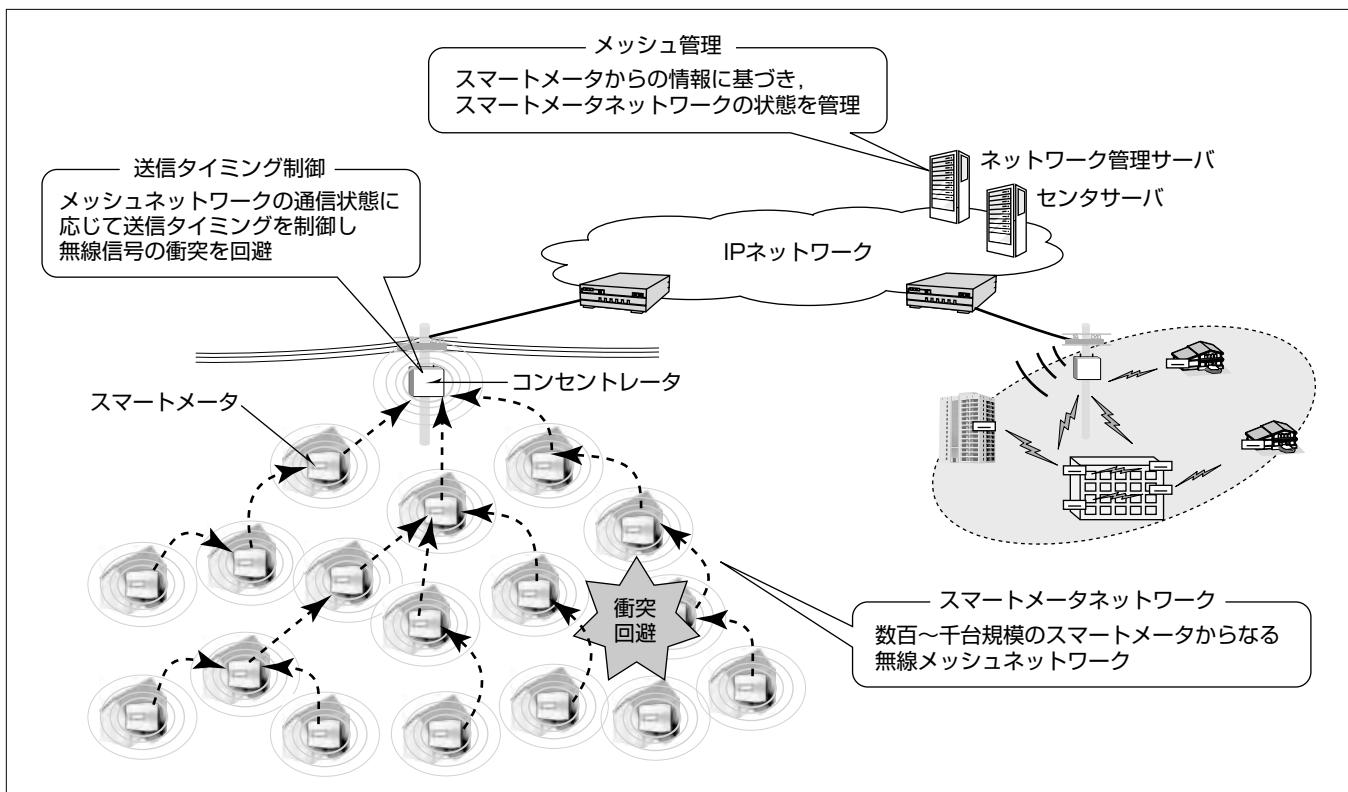
無線伝搬変動を考慮し経路構築時に安定した無線リンクを選択することによって、ネットワーク内の伝送品質の向上を実現

(2) ネットワーク上のパケット衝突の回避

ネットワークのトポロジー情報などに基づき実施するコンセントレータによる送信タイミング制御やネットワーク構築時の端末参入手順の改良によって、パケット衝突の頻度を大幅に削減

(3) 安定した運用

スマートメータの持つ経路情報や無線状態等をネットワーク管理情報として効率的に収集することによって、ネットワークの安定運用を実現



無線メッシュネットワーク技術によるスマートメータシステム

スマートメータからの情報を収集するとともに、個々のスマートメータに対する情報通知や制御を実現するためのスマートメータシステムである。各需要家に設置されるスマートメータ間を接続するために無線メッシュネットワーク技術を適用している。

1. まえがき

近年の無線テクノロジーや電子デバイスの進展に伴い、固定的な通信インフラを必要とせず、無線ノードによってネットワークを構築できるマルチホップネットワーク又はメッシュネットワークと呼ばれる無線メッシュネットワーク(以下“メッシュネットワーク”という。)が注目されている。メッシュネットワークは、無線通信機能を持つノードによって構成されるネットワークであり、必要とするエリアに必要とするタイミングで任意に構築可能な自律分散型のネットワークである。メッシュネットワークの実現に向けては、想定する適用シナリオや種々の制約条件のもとで様々な経路制御プロトコルが提案されてきている。

一方、低炭素社会の実現に向けてスマートグリッドやスマートメータへの取組みが国内外で加速されている。特に、国内では、2011年3月11日の東日本大震災以降、電力需給が厳しくなり、節電要請が広く行われる中、情報通信技術によって電力需給制御をスマートに実施可能なスマートメータシステムに対する期待が高まっており、スマートメータの導入加速も示されている⁽¹⁾。

本稿では、各需要家に設置されるスマートメータ間を接続するスマートメータネットワークの実現に向けて、有力な通信方式であるメッシュネットワーク技術について述べる。

2. スマートメータネットワーク

スマートメータネットワークは、各家庭に設置されるスマートメータ間を接続し、スマートメータからの情報を収集するとともに、個々のスマートメータに対する情報通知や制御を実現するためのネットワークであり、低コストかつ短期間で構築可能なシステムであることが求められる。また、スマートメータについては各家庭に設置されることから、通信部分については、その消費電力が十分に小さいことが求められる。これらに対して、無線メッシュネットワーク技術を用いた無線センサネットワークの一形態として、スマートメータネットワークへの適用が検討されている⁽²⁾。

図1にメッシュネットワーク技術を適用した際のスマートメータシステムを示す。メッシュネットワーク技術を適用した数百台規模の無線ノード(スマートメータ)によって、スマートメータネットワークが構成される。スマートメータネットワークは、ゲートウェイ機能を持つ特定の無線ノード(以下“コンセントレータ”という。)によって、IPネットワークを介してセンタサーバに接続され、複数のスマートメータネットワークとセンタサーバによって、スマートメータシステムが構成される。

ここで、スマートメータシステムが実現すべき基本的な

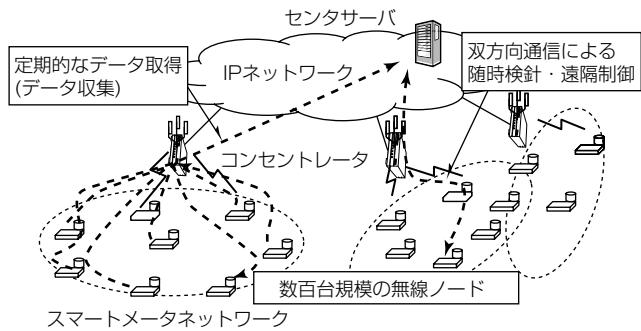


図1. スマートメータシステム

機能は、①コンセントレータを介したスマートメータが持つ検針データの定期的な取得(データ収集機能)、②指定したスマートメータに対する制御メッセージの通知による随時検針や遠隔制御(制御機能)、及び③スマートメータ(通信部)のファームウェアの更新(配信機能)であり、従来のメッシュネットワークに対して、次の要求条件がある。

(1) スケーラビリティ

スマートメータネットワークあたり数百台規模のスマートメータの収容

(2) 自動構成

スマートメータ設置時の識別子やパラメータ等の手動設定の回避

(3) 安定した運用

無線環境の変化によらないサービスの継続性

(4) 多様なサービスへの対応

定期的なデータ収集に加えて、センタサーバからの監視・制御のサポート

(5) セキュリティ

課金情報に対する認証や改ざん防止

(6) 省消費電力

配電ロス低減に向けた省消費電力

3. メッシュネットワーク技術

メッシュネットワークの実現に向けては各所で研究開発が行われている。この章では、最初にメッシュネットワークを実現するための経路制御プロトコルについて述べ、スマートメータネットワークへの適用に向けた議論を行う。

3.1 メッシュネットワーク向け経路制御プロトコル

メッシュネットワークを構築するための経路制御プロトコルについては古くから研究開発が行われており、軍事用途への適用や環境モニタリング等の多様なアプリケーションに対して、多種多様な提案がなされている。図2は代表的な経路制御プロトコルを示しており、On-demand(Reactive)型、Proactive型、階層型、位置情報利用型プロトコル等がある。

On-demand型プロトコルは、各無線ノードがデータ転送の開始時に経路を確立する方式であり、一般に、“フラン

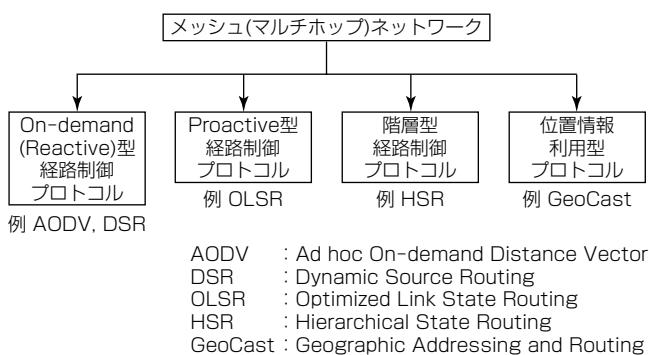


図2. メッシュネットワーク向け経路制御プロトコル

ディング”と呼ばれる手法によって、送信先ノードに対する経路探索を実施する。このフランディングに基づく経路探索では、ネットワーク内の全無線ノードに制御情報を伝播する必要があり、スケーラビリティの確保に向けては大きな課題となる。

Proactive型プロトコルは、近接ノードとの間で定期的にメッセージを交換し、自身の持つ経路情報を更新する方式であり、ネットワークを構成する全ノードに対する経路を常時、保持している。また、経路情報のメンテナンスのため、定期的にメッセージを交換する必要があり、制御トラフィック量が増える傾向にある。そのため、スマートメータネットワークのように数百台規模でのスマートメータの収容を考えると、個々の無線ノード(スマートメータ)で必要となるメモリ量の増大や経路情報のメンテナンスに伴うトラフィック量の増大が課題となる。

階層型プロトコルは、On-demand型とProactive型のプロトコルを組み合わせた方式である。この方式では、ネットワークを階層化することによって、近隣の無線ノードとの通信に対してはProactive型を、階層間の通信に対してはOn-demand型を適用することによって、各プロトコルの短所を補っている。しかし、ネットワークの階層化とその管理が必要であり、継続的にスマートメータが導入されるスマートメータシステムでは、スマートメータの導入の都度、ネットワークの階層化・管理を見直す必要があり、ネットワークの階層化実現が大きな課題となる。

位置情報利用型プロトコルは、無線ノードの位置情報を利用する方式である。この方式では、GPS(Global Positioning System)などによる位置情報の取得が必要であり、低コストが要求されるスマートメータシステムでは、どのようにして各スマートメータの位置情報を取得するかが課題となる。

また、近年では、インターネット技術に基づく無線センサネットワーク実現の研究開発も進められている。例えば、インターネット技術の標準化を議論するIETF(Internet Engineering Task Force)では、工場内のネットワークやホームネットワーク、ビルのオートメーション、市街地の

ネットワーク等の実現に向けて、省電力で不安定な通信環境下で動作する経路制御プロトコルの議論を行っており、IETF ROLL(Routing Over Low power and Lossy networks) WG(Working Group)では、RPL(IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy networks)と呼ばれる経路制御プロトコルが提案されている⁽³⁾。このプロトコルは、ゲートウェイ機能を持つ代表ノードを根とするツリー型のネットワークを前提とし、On-demand型とProactive型のプロトコルの特徴を併せ持つプロトコルとなっている。

これらに対して、個々の無線ノードにおける低コスト化を目的とし、必要メモリ量の削減を可能とするメッシュネットワーク技術を開発した。開発したメッシュネットワーク技術は、RPLと同様にコンセントレータを根とするツリー型のネットワークを前提としたプロトコルであり、通信エラー発生時に絞りOn-demand型プロトコルに従い経路探索を実施することによる制御トラフィック量の削減や、狭帯域～広帯域な無線媒体によらず適用可能であることを特長としている。また、シンプルな通信プロトコルとすることによって、ソフトウェアのプログラムサイズを抑えて、組み込み型CPUでの実装を実現している。

3.2 スマートメータネットワークへの適用

2章述べたように、スマートメータネットワークでは、特有の要求条件があり、幾つかの課題がある。次に課題を示すとともに、開発したスマートメータ向けメッシュネットワーク技術での対応を述べる。

3.2.1 伝送品質の向上

無線リンクでは電波の受信状態によって通信性能が変動し、一般に、有線リンクに比べて高いパケット・エラー率となる。また、途中の中継ノードを介して通信を行うマルチホップ型のスマートメータネットワークでは、無線リンクにおけるパケット・エラー率の要因に加えて、送信先ノードに向けた複数回のパケット転送に伴うメッセージの到達率低下を考える必要がある。

これに対して、①受信電波強度や無線リンクの信頼性を考慮することによる経路構築時の安定した経路の確保や②MAC(Media Access Control)レベル及びスマートメータネットワーク内での再送制御による無線伝搬変動への対応によって、スマートメータネットワーク内の伝送品質の向上を図った(図3)。

3.2.2 ネットワーク上のパケット衝突の回避

無線ネットワークでは、隠れ端末問題などによるパケット衝突の考慮が必要である。特に、スマートメータネットワークでは、コンセントレータに向けて各スマートメータがパケットを送信するため、コンセントレータ周辺で通信が混み合い、パケットの衝突発生確率が増大する。このパケット衝突は、狭帯域の無線媒体を用いる時には顕著となる。

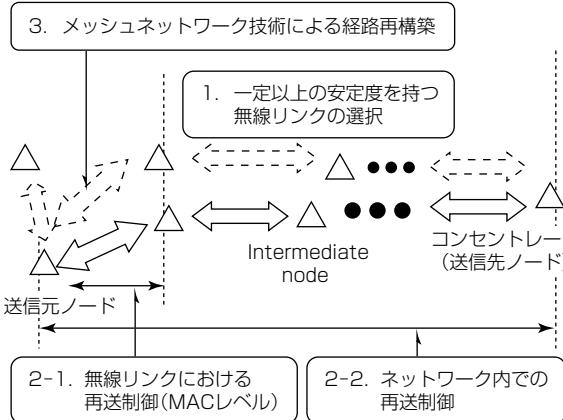


図3. 伝送品質の低下に対する対応

これらには、コンセントレータによる送信タイミング制御によって、ネットワーク上のパケット衝突を回避している。さらに、コンセントレータにおける制御アルゴリズムを改良することによって、パケット衝突の回避を維持しつつ、データ収集に要する時間を短縮するための実現方式の検討を進めた。

また、スマートメータネットワークでは、停電復旧時の動作についても考慮が必要である。すなわち、停電からの復旧時では、数多くのスマートメータが同時に再起動される。そのため、各スマートメータが個々にネットワーク再構築に向けてコンセントレータとの間で経路の再構築を実施する場合、経路探索などに要するパケットによってネットワークの輻輳(ふくそう:パケット衝突の頻発)が発生し、ネットワークの構築に時間を要することになる。

これに対して、停電復旧時や新規設置時のネットワーク構築については、各スマートメータが隣接するスマートメータから情報を取得することによって、コンセントレータ宛の経路を確立し、ネットワーク参入時の負荷の低減を図った(図4)。

3.2.3 安定した運用

無線通信システムでは、一般に、障害物などによる経路の一時的な遮断や新規無線ノードの追加に伴う最適経路の変動、他のシステムからの無線干渉の影響等を考慮する必要がある。また、スマートメータシステムでは、収集する情報は課金情報として利用されるため、無線環境変動による伝送品質低下の影響を最小限とする確実な収集が求められる。

これらに対しては、各スマートメータの持つ経路情報や無線状態等を効率的に収集し、センタサーバでメッシュネットワークの状態を管理する。また、各スマートメータは、コンセントレータに向けた複数の経路、又は(可能であれば)複数のコンセントレータに対する経路を保持し、コンセントレータに対する経路を一時的に利用できない時には別経路で転送することによって、迅速で確実なデータ収集を実現した(経路の冗長化)。

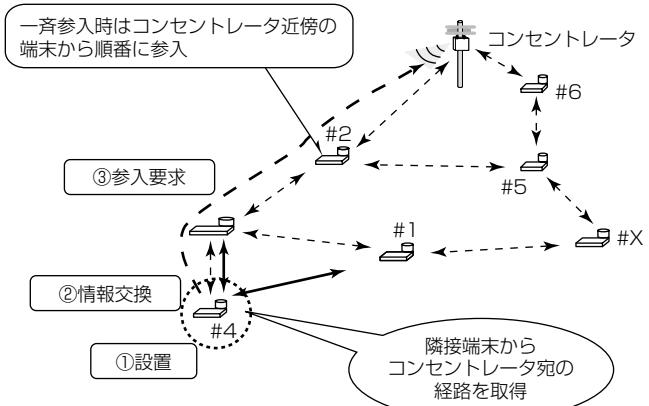


図4. ネットワークへの参入

4. む す び

スマートメータネットワークの実現に向けて、各家庭に設置されるスマートメータの収容(大規模化)や社会インフラとしての安定した運用(安定性)が求められるスマートメータネットワークの実現に向けたメッシュネットワーク技術に関する取組みについて述べた。

現在、当社では、無線特性の評価やネットワークの安定性評価等を目的として、大船地区内に500台規模のスマートメータ向け無線通信ノードからなるメッシュネットワークを構築している。今後は、社内実証実験などを通してメッシュネットワーク運用に向けた技術蓄積を図るとともに、スマートメータを中心とした室内通信ネットワークへの拡張に向けた技術開発に取り組んでいく。

また、メッシュネットワーク技術については、様々な用途への適用が議論されており、多様な用途への適用に向けた技術開発を展開する。

参 考 文 献

- (1) 国家戦略室 エネルギー・環境会議：エネルギー規制・制度改革アクションプラン～グリーン成長に向けた重点28項目の実行～ (2012)
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/gyoukakuhonbu/dai4/siryou6-3.pdf>
 - (2) Isaac, S. J., et al. : A Survey of Wireless Sensor Network Applications from a Power Utility's Distribution Perspective, IEEE Africon2011, 1~5 (2011)
 - (3) Winter, T., Ed. : RPL : IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks, RFC6550 (2012)
<http://solomon.ipv6.club.tw/Course/ProtocolEngineering/draft-ietf-roll-rpl-04.pdf>

カーナビゲーション用無線通信技術

横山陽介*
清水直樹**

Wireless Technology for Car Navigation System

Yosuke Yokoyama, Naoki Shimizu

要 旨

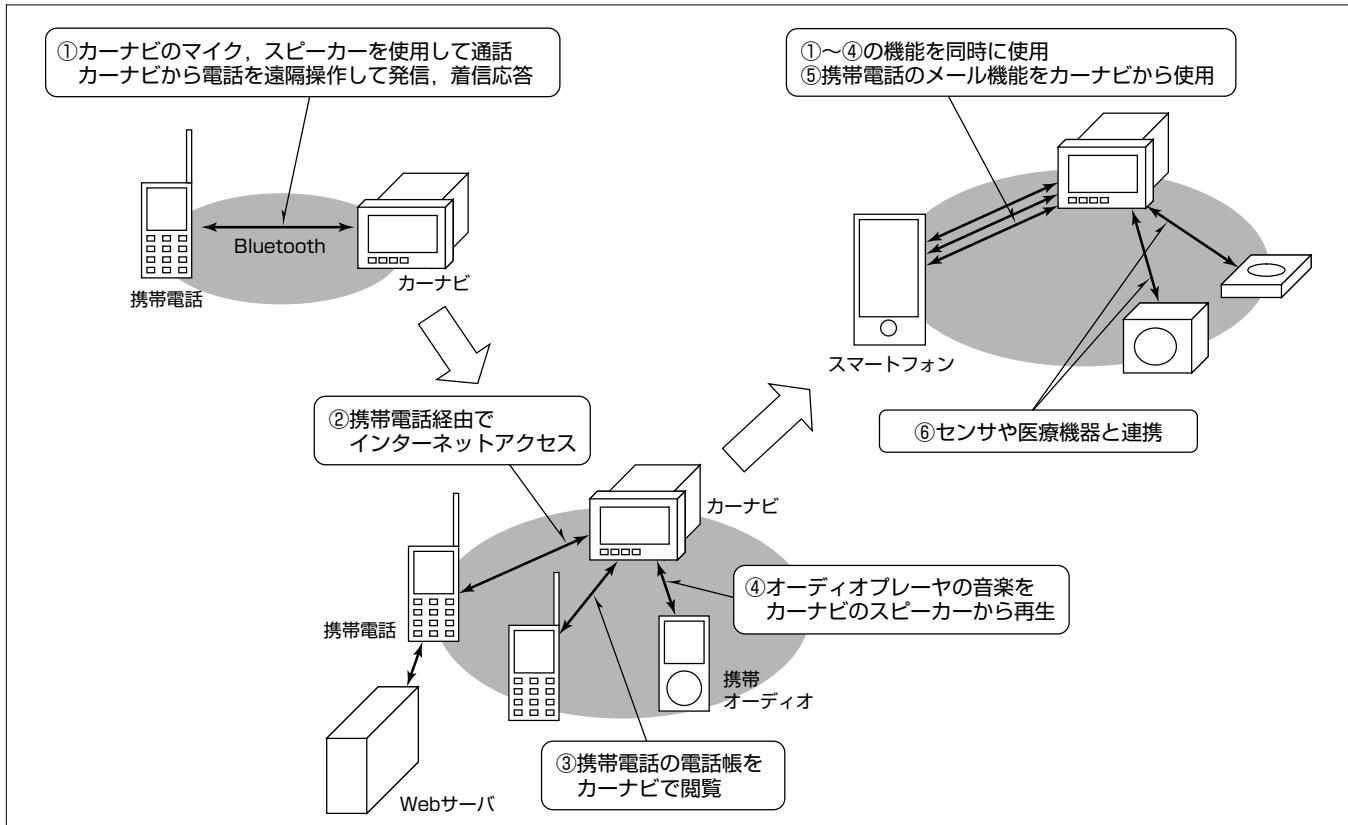
コンシューマー機器間の無線接続に用いられる近距離無線技術の1つであるBluetooth^{(注1)(1)}は、カーナビゲーションシステム(以下“カーナビ”という。)と携帯電話との無線連携方式のデファクトスタンダードとして普及が進んでいる。Bluetoothがカーナビに搭載された当初の用途はハンズフリー通話であったが、近年は携帯電話及びカーナビの高機能化に伴い用途が拡大しており、オーディオ再生、インターネット接続、メール管理等の様々な用途に使用されている。

Bluetoothの主な特長は、アプリケーションレベルの接続互換性の担保、他の無線との自動的な干渉回避である。これらの特長はカーナビと携帯電話の連携に有利である。アプリケーションレベルの接続互換性の担保によって、世界

各地で発売される多種多様な携帯電話とカーナビとの接続が可能となった。また、干渉回避によって、他社のBluetooth機器や無線LAN機器等の無線機器が存在する環境で、品質問題が発生する可能性は小さくなっている。

三菱電機は、カーナビ製品へのBluetooth機能の搭載を進めており、メモリカーナビゲーションシステム“NR-MZ50”には、ハンズフリー通話機能とオーディオ再生機能を搭載している。また、当社はBluetooth標準化団体に参加しており、仕様拡張の提案などの活動を行っている。特に近年は、複数のBluetooth機器を同時にカーナビに接続するという使用形態が増加し、新たな接続互換性やパフォーマンス問題が発生しているため、この問題を解決する方式の標準化に取り組んでいる。

(注1) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc. の登録商標である。



カーナビゲーションシステムにおけるBluetoothの用途とその拡大

Bluetoothは、カーナビへの導入初期は主にハンズフリー通話用途で使用されていた。その後、携帯電話網を利用したインターネット接続、オーディオ機器と連携した音楽再生、電話帳転送、ファイル転送、携帯電話メール送受信といった多様な用途に使用されるようになった。今後は、スマートフォンのような多機能電話機の普及によって、同時に複数の用途にBluetoothを使用する形態が増加すると考えられている。また、最新の規格でサポートされた低消費電力通信を利用した医療用デバイスやセンサデバイスとの連携への用途拡大が期待されている。

1. まえがき

Bluetoothは、免許不要の2.4GHz帯を使用する近距離無線規格であり、機器間接続配線の無線化を目的として開発された。Bluetoothは主に、携帯電話、ヘッドセット、持ち運び型パソコン、カーナビ等のコンシューマー機器に搭載されている。主な用途はハンズフリー通話、オーディオ再生、データファイル転送、インターネット接続、キーボードやマウス等の入力デバイス接続と多様であり、現在も新しい用途に対応するための仕様拡張が進行している。さらに、最新の規格では低消費電力通信に対応し、更に多種多様な機器への搭載が進むと考えられている。

当社は、カーナビ製品へのBluetooth搭載を進めており、Bluetoothを搭載したカーナビを出荷している。また、Bluetooth標準化団体に参加しており、近年増加しつつある複数のBluetooth機器を同時にカーナビに接続するという使用形態に対応した規格の提案をしている。

本稿では、Bluetoothの目的と特長、標準化、技術、カーナビで使用する機能、当社の取組みについて述べる。

2. Bluetoothの概要

2.1 目的と特長

Bluetoothは、携帯電話とヘッドセットを接続するオーディオケーブル、パソコンと携帯情報端末を接続するシリアルケーブルといった、機器間接続に使用されているケーブルの無線化を目的として開発された近距離無線規格である。規格策定でアプリケーション間の相互接続性の確保が重視されたため、図1に示すようにBluetooth規格⁽²⁾では、Core Specとして規格化された無線通信仕様だけなく、アプリケーションプロトコル、ユースケース、ユーザーインターフェース等のアプリケーション仕様についても、プロファイルとして規格化されている。そのため、同一のプロファイルを搭載したBluetooth機器間の互換性が保証されており、Bluetoothの大きな利点となっている。プロファイルはユースケースごとに個別に策定され、ハンズフリー、オーディオ音声転送等の個々のアプリケーション向けのプロファイルと、機器間接続・認証手順、機器がサポートしている

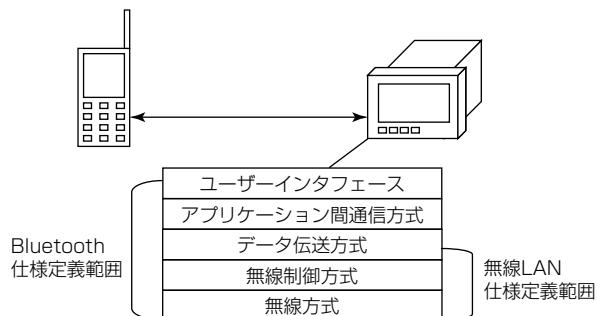


図1. Bluetooth仕様の範囲(無線LANとの比較)

プロファイルの検索といった機器接続管理機能向けのプロファイルが策定されている。

2.2 標準化

Bluetoothの標準化は、Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG) という標準化団体によって行われている。Bluetooth SIGには、無線半導体メーカー、プロトコルスタックメーカー、携帯電話やカーナビ等のBluetooth搭載機器メーカーなどが参加している。

Bluetooth SIGは、仕様策定、Bluetoothブランド管理(Bluetoothロゴ認証)等を行っている。Bluetooth仕様策定は、アプリケーション領域ごとにワーキンググループを形成し、プロファイル仕様の策定・変更及び試験仕様の策定を行うという方式をとっている。車載機器に関する領域を扱うワーキンググループに、無線仕様や機器接続管理機能を扱うCore、ハンズフリーなどの携帯電話・車載機器向けアプリケーションを扱うTelephony & Car、オーディオ再生などのAV(Audio Visual)機器向けアプリケーションを扱うAVがある。Bluetoothロゴ認証では、Bluetooth機器に対して仕様に適合していることを確認する試験を行い、試験を通過したデバイスにだけBluetoothロゴの使用許諾を行うことで、Bluetooth機器間の相互接続性を保証している。

3. Bluetooth技術

3.1 無線仕様

Bluetoothで使用される無線は、無線免許不要の2.4GHz帯を使用し1~100mの到達距離を持つ近距離無線である。接続形態は、1つの機器に複数の機器を接続可能な1対N接続であり、通信速度は最大3Mbpsである。

通信では他の無線との干渉回避についても考慮されており、図2に示す周波数ホッピングとAFH(Advanced Frequency Hopping)が使用されている。周波数ホッピングは、

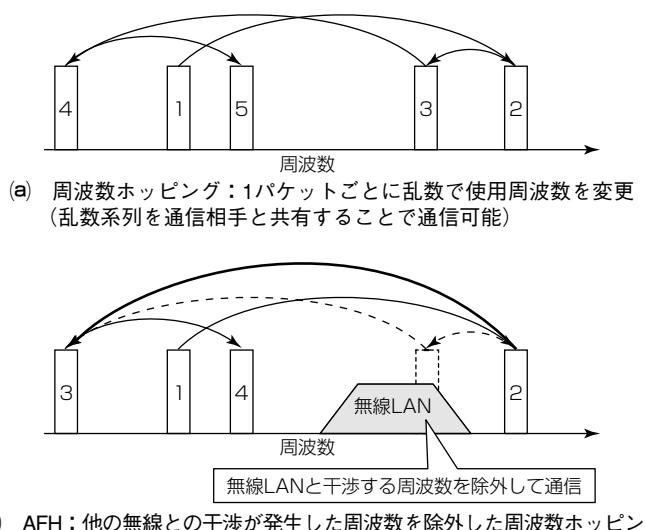


図2. 周波数ホッピングとAFH

パケットごとに異なる周波数を使用する通信方式である。これによって、近傍に他のBluetooth無線ネットワークが存在する場合にパケットの衝突確率を低下させ、干渉問題が発生しないようにしている。AFHは、無線LANなどの固定の周波数帯を使用する無線との干渉を回避するため、特定の周波数を通信に使用しないようにする方式である。

Bluetoothは、3Mbpsと比較的低速な通信速度で様々な用途に使用される一方、ハンズフリー通話という高品質・低遅延を必要とする通信を行う。そのため、図3に示すように、ハンズフリー通話音声用の通信時間を予約することで、音声データ遅延・欠落を防止する仕組みが導入されている。

最新のBluetooth仕様では、高速通信及び低消費電力通信のための無線仕様拡張が追加されている。高速通信では、無線LANなどのより高速な無線をBluetooth無線と併用することで、後方互換性を維持しつつ高速な通信を実現する。低消費電力無線では、パケット長の短縮化、通信シーケンスの単純化、無線チャネルの削減等を行った新たな無線仕様を導入することで消費電力の低減を実現している。

3.2 実装方式

Bluetooth規格では、ハードウェア実装される無線モジュールとソフトウェア実装される上位プロトコルスタックとの間のインターフェースをHCI(Host Controller Interface)として標準化している。HCIでは、無線モジュールと上位プロトコルスタックが動作するメインCPUとの接続方式(USB(Universal Serial Bus), UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter)等)と、無線モジュールと上位プロトコルスタック間のコマンド・イベント仕様が定義されている。この仕様に対応した実装を行うことは必須ではないが、対応することによって、無線モジュールとプロトコルスタックの一方だけを変更する際に、他方の改修が不要になるという利点がある。そのため、当社はこの仕様に対応した実装を行っている。一方、無線モジュールとプロトコルスタックの双方を1チップで実装したComplete Moduleという実装方法もあり、機器に無線チップを1個搭載すればBluetoothによる通信が実現可能であるという利点がある。

3.3 セキュリティ

Bluetoothはセキュリティ機能として、機器間接続認証機能と通信の暗号化機能を持つ。これまでの機器間接続認証は、接続を行う2つの機器にユーザーが同一のPIN(Personal Identification Number)コードを入力することで認証を行う方式であった。しかし、接続時にユーザーに対してPINコードの入力を要求するため利便性が低く、セキュリティ面での脆弱(ぜいじやく)性も発見されていた。この問題に対応するため、6桁の数字を自動生成して接続を行う2つの機器にそれぞれ表示し、数字の同一性を確認するという方式が導入され、現在の標準方式となっている。

4. カーナビ向けプロファイル

Bluetoothのプロファイルのうち、カーナビで使用されているものについて述べる。

4.1 現在の主要なプロファイル

- (1) HFP(Hands Free Profile)：カーナビやヘッドセット等の音声入出力機能を持つ機器と携帯電話を無線接続し、ハンズフリー通話と電話機の遠隔操作(発信、着信応答等)を実現する。
- (2) PBAP(PhoneBook Access Profile)：携帯電話と他の機器(カーナビやパソコン等)を無線接続し、他の機器から携帯電話に格納されている電話帳データへのアクセスを実現する。PBAPは、図4に示すように、電話アプリケーションでHFPと同時に使用されることが多い。
- (3) A2DP(Advanced Audio Distribution Profile)：オーディオ機器からカーナビやヘッドセット等の音声出力機能を持つ機器への音声転送を実現する。
- (4) AVRCP(Audio Video Remote Control Profile)：オーディオ機器の遠隔操作を実現する。通常は、図5に示す

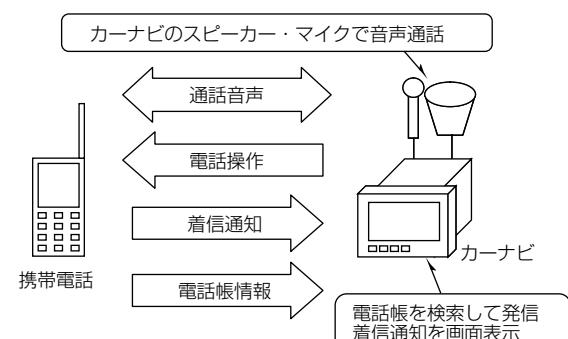


図4. HFP+PBAPのユースケース

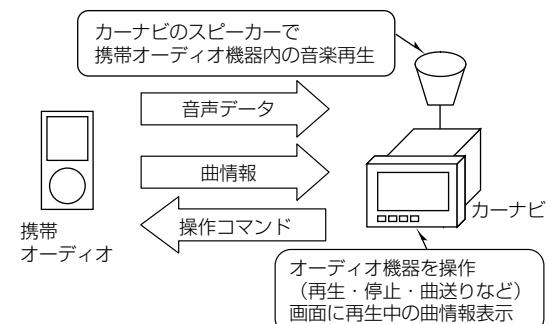


図5. A2DP+AVRCPのユースケース

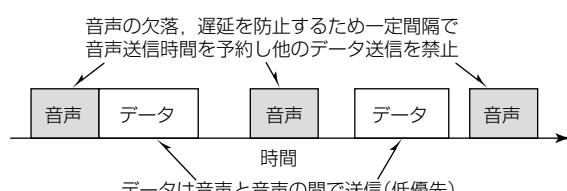


図3. ハンズフリー通話音声品質確保の仕組み

ようにA2DPと一緒に使用される。最新の仕様では、オーディオ機器に格納されているコンテンツ情報をアクセスする機能が追加された。

- (5) OPP(Object Push Profile) : vCard(電子名刺)形式の個人情報・画像等の機器間転送を実現する。
- (6) FTP(File Transfer Profile) : データファイルの機器間転送を実現する。
- (7) DUN(Dial-Up Networking profile) : カーナビやパソコン等から携帯電話にアクセスし、携帯電話網経由のダイヤルアップ接続を実現する。カーナビやパソコンのインターネット接続などに使用される。

4.2 今後の普及が期待されるプロファイル

- (1) MAP(Message Access Profile) : 携帯電話と他の機器(カーナビやパソコン等)を無線接続し、携帯電話のメール機能の遠隔操作(メールの送受信、新着通知等)を実現する。
- (2) PAN(Personal Area Networking profile) : 無線LANと同様の無線IPネットワークをBluetooth機器間で形成する。アクセスポイント機能の提供によって、インターネット接続も可能となる。
- (3) SAP(SIM Access Profile) : 携帯電話網に接続するための無線機能を持つ機器が、他の機器に格納されたSIM(Subscriber Identity Module)情報にアクセスし、そのSIM情報を使用した携帯電話網への接続を実現する。

5. 当社の取組み

当社は、開発・製造を行っているカーナビへのBluetooth搭載を進めている。現在製造・出荷を行っているメモリカーナビゲーションシステムNR-MZ50は、Bluetoothを搭載しており、カーナビのマイクとスピーカーを使用したハンズフリー通話、カーナビのスピーカーから携帯電話に格納されている音楽ファイルを再生するオーディオ再生、携帯電話のオーディオの再生・停止等のオーディオ制御機能を使用することができる。

また当社は、Bluetooth SIGの標準化活動に参加しており、カーナビ搭載のアプリケーションの仕様を策定しているTelephony & Car及びAVワーキンググループで活動してきた。これらに加え近年は、Multiprofileワーキンググループ(MP WG)での活動に注力している。

MP WGは、近年増加している複数のプロファイルを同時に使用する使用形態や、その使用形態で発生する互換性問題・性能問題の解決を目的として設立された。そのためMP WGには、多数のカーナビ製造事業者が参加している。

MP WGでは、複数のプロファイルを使用するときの初期化手順や、複数のプロファイルに影響するイベント発生時の挙動の標準化によって、互換性問題・性能問題の解決を行っている。MP WGにおける成果として、ハンズフリ

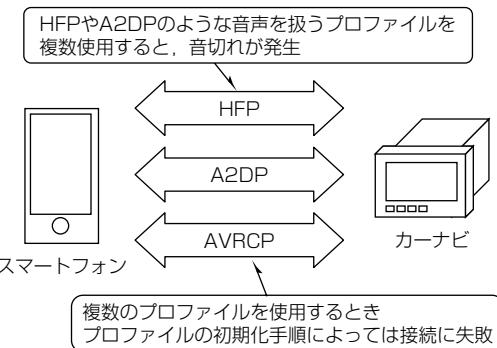


図6. 複数プロファイル使用時の代表的な問題

一機能とオーディオ再生機能を同時使用する使用形態の標準化が完了している。図6は、この標準化で解決した代表的な問題である。

次に、これらの問題を述べる。

- (1) ハンズフリー機能とオーディオ再生機能を同時に使用する機器を接続する場合、初期化手順の相異によって接続に失敗することがあった。この問題への対応として、初期化手順を規定した。
- (2) オーディオ再生中にハンズフリー機能で通話を開始した場合など、複数の音声が同時に伝送されるときに、通信帯域不足による音切れが発生することがあった。この問題への対応として、通話音声の伝送中はオーディオ再生を一時停止し、複数の音声が同時に伝送されることを回避する仕様を規定した。

6. むすび

ハンズフリー通話用途から始まったカーナビにおけるBluetoothは、カーナビや携帯電話の高機能化に伴って用途を拡大しつつあり、現在も新たなプロファイルの追加や既存プロファイルの拡張が続けられている。また、新たな動きとして、Bluetooth仕様への低消費電力通信機能の追加があり、今後は医療機器やセンサとの連携といった全く新たな用途へのBluetoothの適用が期待されている。このように、今後もBluetoothはカーナビにおける無線通信の中心であり続け、重要性は更に増加していくと考えられる。

このような状況を踏まえ、当社はBluetoothへの取組みを強化していく方針である。今後は特に、Bluetoothの新たな用途に対応するための検討を進めていく予定である。

参考文献

- (1) Bluetooth SIG Inc. : Bluetooth Technology Web Site <http://www.bluetooth.com>
- (2) Bluetooth SIG Inc. : Specification : Adopted Documents <https://www.bluetooth.org/Technical/Specifications/adopted.htm>

通信用小形アンテナ技術

Small Antenna Technology for Communications

Kengo Nishimoto, Toru Fukasawa, Hiroaki Miyashita, Yoshihiko Konishi

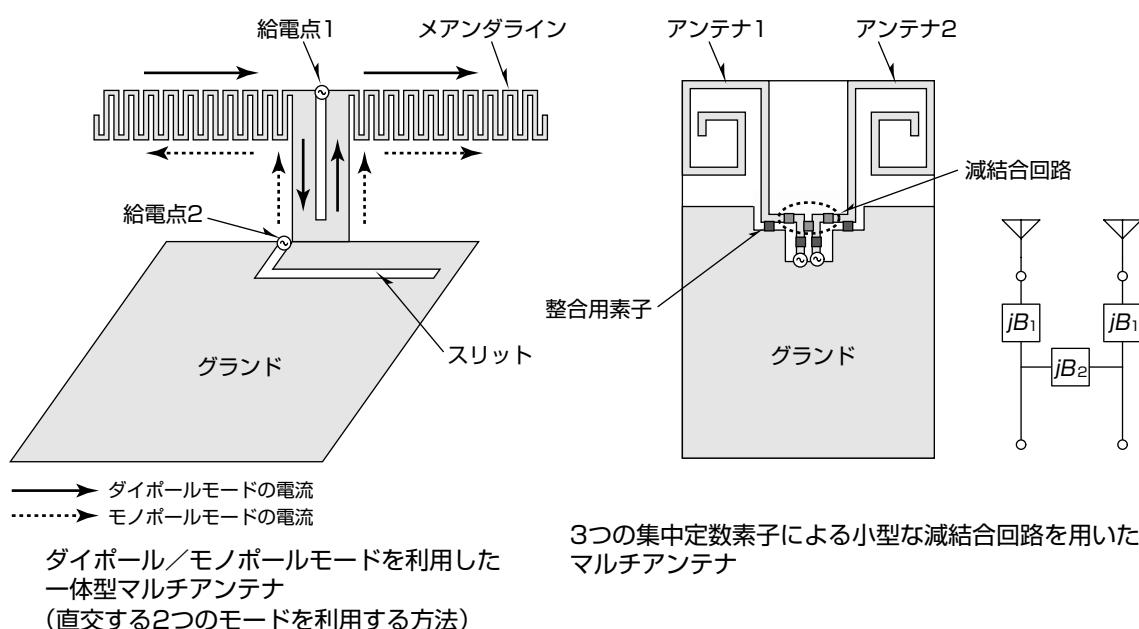
西本研悟* 小西善彦†
深沢徹** 宮下裕章***

要 旨

近年、無線通信の高速化・高品質化に伴って、ダイバーサシチやMIMO(Multiple Input Multiple Output)を適用するために、送受信に複数のアンテナを用いるマルチアンテナ技術への要求が高まっている。マルチアンテナでは、通信装置の小型化のため従来(アンテナ1本)と同程度のサイズが要求されるが、一般に、小さい領域内に複数のアンテナを設置すると、アンテナ間の相互結合が強いため通信性能が劣化するという問題がある。

本稿では、小形マルチアンテナ技術として、直交する2つのモードを使用する方法と、減結合回路を用いる方法について、新たに開発した方法を述べる。直交する2つのモードを使用する方法は、1つのアンテナ上に2つの低相関な

電流分布を実現させることで小形なマルチアンテナを得る方法であり、ここでは、ダイポール／モノポールモードを利用した一体型マルチアンテナについて述べる。小形アンテナはグランドや周囲金属物に近づくと特性が劣化するが、このアンテナでは主要放射部をグランドから離せるため、帯域が比較的広く、放射効率が高いアンテナが得られる。減結合回路を用いる方法は、アンテナを介した結合を回路を介した結合で打ち消す方法であり、ここでは、少数の集中定数素子だけで構成された簡易な減結合回路について述べる。小形アンテナでは周囲環境によって特性が変化するが、この減結合回路は、集中定数素子だけで構成しているので調整が容易である。



小形マルチアンテナ技術

小形マルチアンテナ技術として、直交する2つのモードを利用する方法と減結合回路を用いる方法を示す。ダイポール／モノポールモードを利用した一体型マルチアンテナでは、1つのアンテナ上に2つの低相関な電流分布を実現することで小形マルチアンテナを得ている。減結合回路は、3つの集中定数素子だけで構成しているため小型で調整が容易である。

1. まえがき

近年、無線通信の高速化・高品質化に伴って、ダイバーサチやMIMOを適用するために、送受信に複数のアンテナを用いるマルチアンテナ技術への要求が高まっている。マルチアンテナでは、通信装置の小型化のため従来(アンテナ1本)と同程度のサイズが要求されるが、一般に、小さい領域内に複数のアンテナを設置すると、アンテナ間の相互結合が強いため通信性能が劣化するという問題がある。小さい領域内に設置したアンテナ間の結合を低減する方法としては、直交する2つのモードを使用する方法が報告されている⁽¹⁾。文献(1)では、逆Fアンテナとノッチアンテナの一体構造によって、低姿勢で良好なアイソレーション特性を実現しているが、ノッチアンテナの帯域が狭い点が課題である。また、他の方法として、減結合回路を用いる方法がある⁽²⁾。文献(2)では、減結合回路を伝送線路と複数の集中定数素子で構成しているが、通信装置の設置環境が変化し、回路の調整が必要になった場合に、伝送線路長の変更が困難という課題がある。

本稿では、これらの課題を解決するために開発した、ダイポール／モノポールモードを利用した一体型マルチアンテナ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾と、少数の集中定数素子だけで構成された簡単な減結合回路を用いたマルチアンテナ⁽⁷⁾について述べる。

2. ダイポール／モノポールモードを利用した一体型マルチアンテナ

2.1 アンテナ構成と動作原理

アンテナの構成を図1に示す。 λ_c は、設計の中心周波数 f_c における波長である。グランドは、通信端末内の基板を模擬したものである。グランドの上端から、給電線路(マイクロストリップ線路)を介して、高さ h のメアンダ状のダイポールを給電する。給電線路のグランドにスリットAを空け、不平衡-平衡変換を行う。実際には給電線路とメアンダラインは基板上に作成するが、モデルを簡略化するため、給電線路のグランドを導体板でモデル化し、スリット

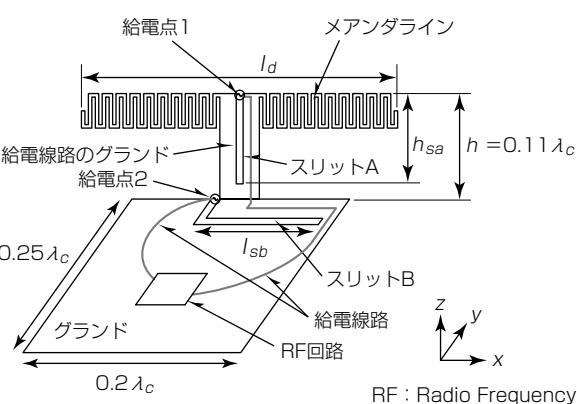


図1. アンテナの構成

トAの端部に給電点1を設置する。また、給電線路のグランドとメアンダラインをモノポールとして動作させるため、グランドにスリットBを空け、その端部に給電点2を設置する。このダイバーサチアンテナは1枚の基板上に作成でき、この基板を通信基板(グランド)にコネクタなどを介して接続することで、簡易な構成で実現できる。

アンテナの動作原理を図2に示す。給電点1を励振した場合には、メアンダラインに同相、給電線路のグランドに逆相の電流が流れ、主としてメアンダラインから放射する(ダイポールモード)。一方、給電点2を励振した場合には、メアンダラインに逆相、給電線路のグランドに同相の電流が流れ、主として給電線路のグランドから放射する(モノポールモード)。提案するアンテナでは、主要放射部をグランドから離せるため、帯域が比較的広く、効率が高いアンテナが得られる。

2.2 設計方法

給電点1を励振した場合は、メアンダラインの長さ l_d とスリットAの高さ h_{sa} を調整することでインピーダンス整合を取る。給電点2には、直近に整合回路を設ける。また、図3にスリットBの長さ l_{sb} とアンテナ間結合 $|S_{21}|$ の関係を示す。 l_{sb} を大きくするほどアンテナ間結合を低減できる。

2.3 設計例

例えば、 $l_d = 0.29\lambda_c$ 、 $h_{sa} = 0.10\lambda_c$ 、 $l_{sb} = 0.12\lambda_c$ とした場合の反射特性とアンテナ間結合特性を図4に示す。図4から、アンテナ間結合 $|S_{21}|$ は f_c で-13dBであり、結合量は小さいことが分かる。また、反射は、 $|S_{11}|$ 、 $|S_{22}|$ と

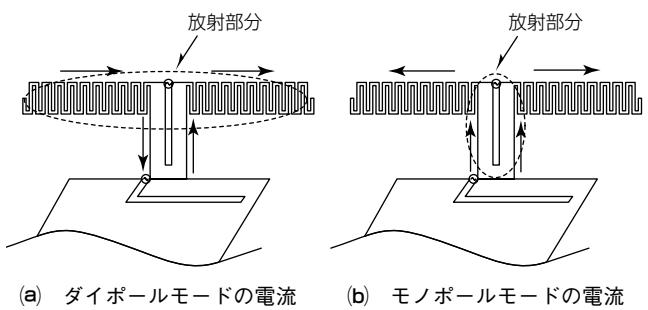


図2. アンテナの動作原理

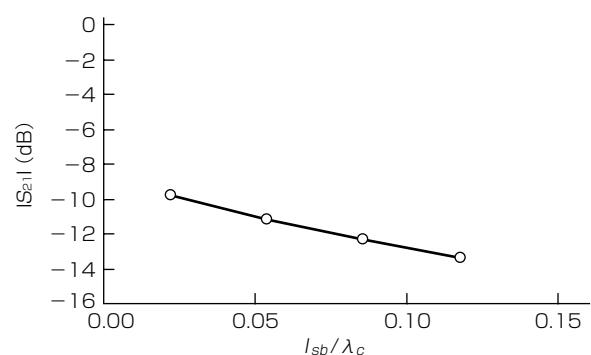


図3. スリットBの長さ l_{sb} とアンテナ間結合 $|S_{21}|$ の関係

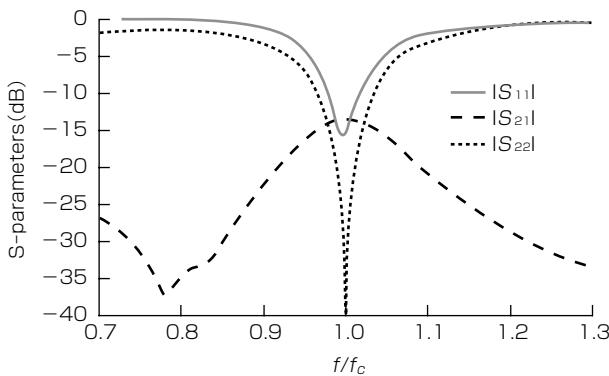


図4. 反射特性とアンテナ間結合特性

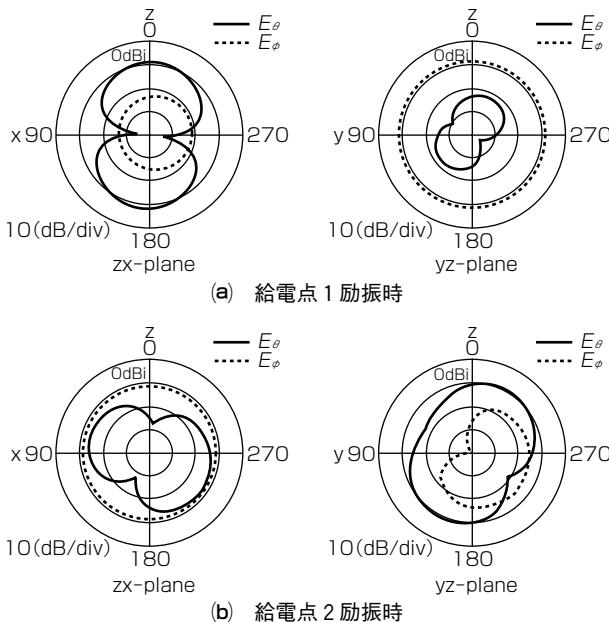


図5. 放射パターン

もに使用周波数 f_c 近傍で低減できていることが確認できる。反射振幅が -10 dB 以下となる比帯域は $|S_{11}|$ が 3.9% 、 $|S_{22}|$ が 6.8% である。図5に、 $f=f_c$ の時の放射パターンを示す。給電点1励振時には、半波長ダイポールとほぼ同じ放射パターンが得られている。一方、給電点2励振時には、給電線路グランド上の電流からの放射に加えて、グランド上を y 方向に流れる電流からの放射が大きいことが確認できる。zx面で、 E_ϕ 成分はグランドからの放射、 E_θ 成分は主として給電線路グランドからの放射である。2モードの放射パターンは、ほぼ直交していることが分かる。到來波が全方向に一様に分布していると仮定した場合の相関係数は 0.001 であり、非常に小さい。

3. 3つの集中定数素子による減結合回路を用いたマルチアンテナ

3.1 減結合回路の構成と設計式

図6に減結合回路の構成を示す。減結合回路は2つの直列サセプタンス素子 B_1 と1つの並列サセプタンス素子 B_2 の

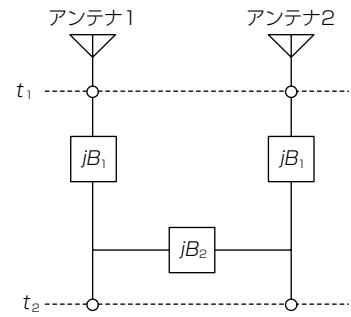


図6. 減結合回路の構成

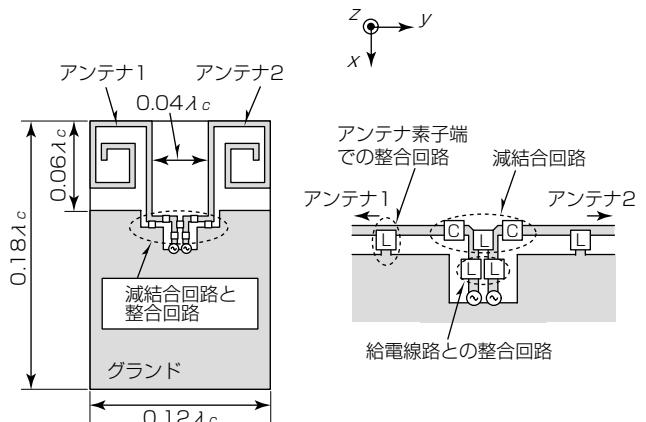


図7. アンテナと減結合回路及び整合回路

3個の集中定数素子によって構成されている。

ここで、図6の参照面 t_1 で、アンテナ間結合の振幅を α 、位相を θ とし、各アンテナによる反射を 0 とする。このとき、サセプタンス素子 B_1 、 B_2 の値は次式によって求められる。

$$B_1 = \frac{Y_0 (\sin \phi \pm 1)}{\cos \phi}, \quad B_2 = -\frac{Y_0 \alpha (\sin \phi \pm 1)}{1 + \alpha^2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Y_0 は規格化アドミタンスである。この回路には、2種類の B_1 、 B_2 の選び方があるが、減結合回路の挿入後の反射振幅が小さい方を選ぶことが望ましい。減結合回路挿入後の反射特性を改善するため、減結合回路の後段の各端子には整合回路を設置する。減結合回路によってアンテナ間の結合が 0 となるため、整合回路は互いに干渉せず、独立に調整できる。小形アンテナでは周囲環境によって特性が変化するが、この減結合回路は、集中定数素子だけで構成しているので調整が容易である。

3.2 設計例

アンテナと減結合回路及び整合回路の模式図を図7に示す。 $0.12\lambda_c \times 0.18\lambda_c$ の小さい基板上に2素子のスパイラル状モノポールアンテナを実装している。素子の最近接距離は $0.04\lambda_c$ である。図8に、反射特性とアンテナ間結合特性を示す。 f_c 付近でアンテナ間結合が -20 dB 以下まで低減されており、減結合回路の効果が確認できる。また、整合回路によって反射振幅 -20 dB 以下が得られている。図9に f_c

におけるzx面の放射パターンを示す。アンテナ1, 2で放射パターンの振幅はほぼ一致している。一方、位相については、 E_θ はほぼ一致しているが、 E_ϕ は約180度異なっている。このため、両者の相関係数は0.08と小さくなっている。

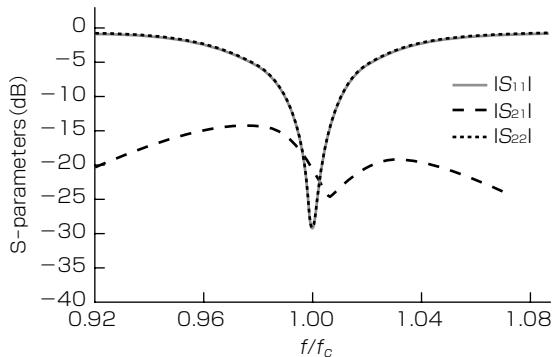


図8. 反射特性とアンテナ間結合特性

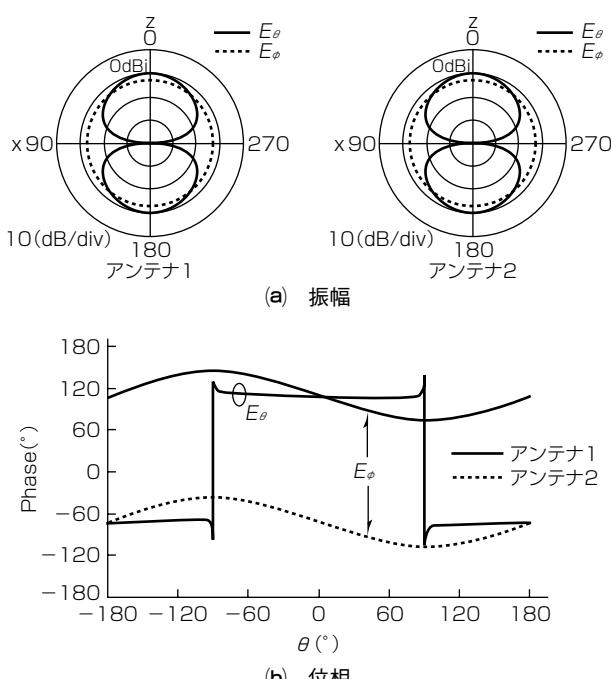


図9. zx面の放射パターン

4. む す び

小形マルチアンテナ技術として、直交する2つのモードを使用する方法と、減結合回路を用いる方法について、新たに開発した方法を述べた。直交する2つのモードを使用する方法に関しては、ダイポール／モノポールモードを利用した一体型マルチアンテナの動作原理と設計例を示した。アンテナの高さ、横幅がそれぞれ0.11波長、0.29波長で、反射振幅が-10dB以下となる比帯域3.9%，アンテナ間結合-13dBを実現できた。減結合回路を用いる方法に関しては、少数の集中定数素子だけで構成された簡易な減結合回路について、設計式を示した。また、間隔0.04波長の2本のモノポールアンテナ間にこの減結合回路を適用し、アンテナ間結合低減の有効性を確認した。

参 考 文 献

- (1) 町田幸一, ほか: 移動体通信基地局用偏波ダイバーシチアンテナ, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-49 (1995)
- (2) Chen, S.C., et al.: A decoupling technique for increasing the port isolation between two strongly coupled antennas, IEEE Trans. Antennas and Propagation, **56**, No.12, 3650~3658 (2008)
- (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ダイバーシチアンテナ, 電子情報通信学会大会講演論文集, B-1-131 (2011)
- (4) 西本研悟, ほか: 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, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2011-29, 13~18 (2011)
- (5) 西本研悟, ほか: ダイポール／モノポールモードを利用したダイバーシチアンテナの実験検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1-156 (2011)
- (6) Nishimoto, K., et al.: Compact diversity antenna using dipole and monopole modes, EuCAP, 2012, 2469~2473 (2012)
- (7) 柳 崇, ほか: 少数の集中定数素子による小型デカップリング整合回路, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1-184 (2012)

自己ベース電流制御形アナログプリディストーションリニアライザ

新庄真太郎*
森 一富*

Analog Pre-distortion Linearizer Using Self Base Bias Controlled Amplifier

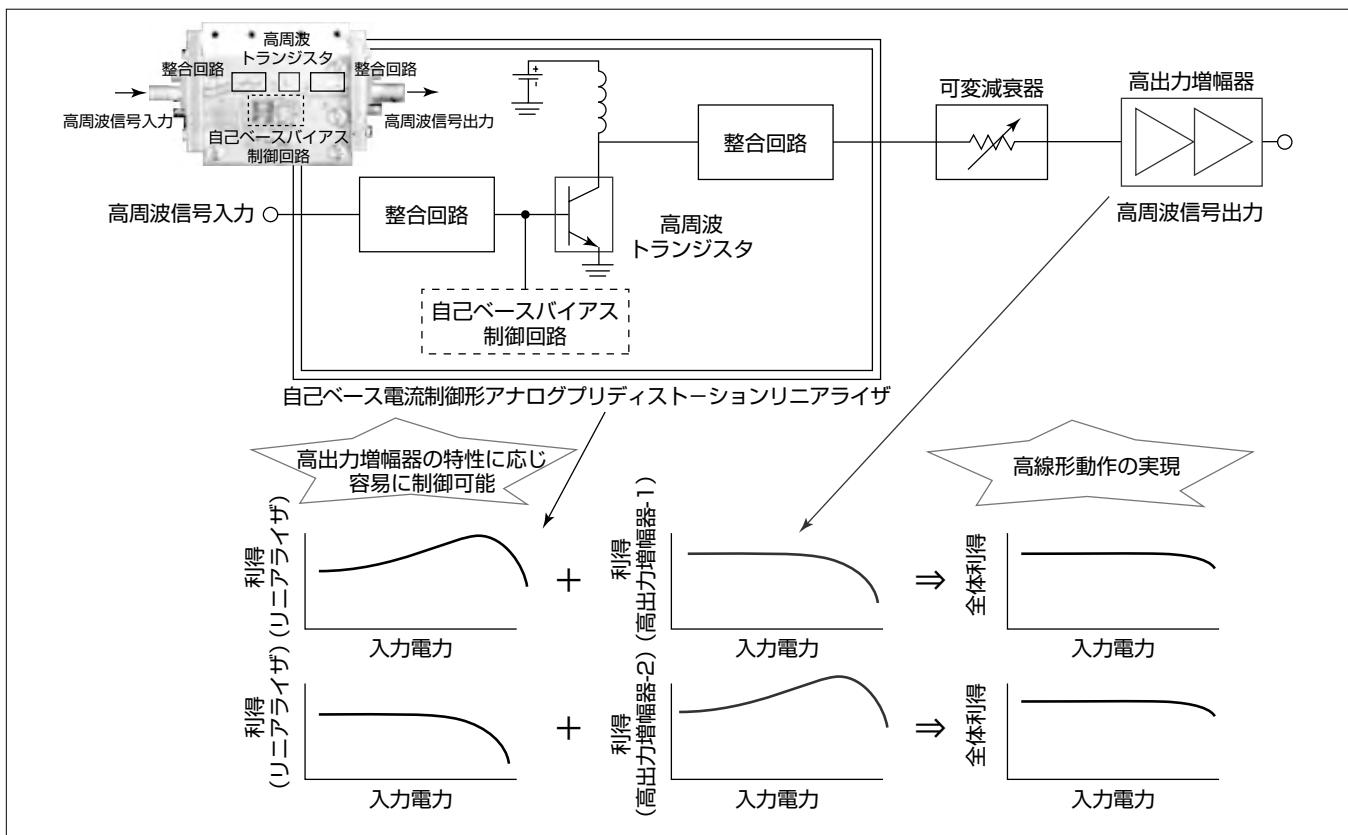
Shintaro Shinjo, Kazutomi Mori

要 旨

無線通信システムに用いられる送信高出力増幅器では、小型・低コストに加え、高効率に高線形動作することが求められる。増幅器の高効率動作のためには、飽和電力付近で動作させることが望ましいが、増幅素子の非線形性のためにひずみが発生し線形性を低下させる。一方、ひずみを小さくするためには飽和電力を高める必要があるが、その場合には効率の低下を招く。これらの相反する要求を同時に満足するために、ひずみ補償技術は重要である。

今回、各種ひずみ補償方式の中でも小型・低コストが可能なアナログプリディストーション方式に着目し、近年の高速無線通信システムに適用可能で、かつ汎用性に優れた自己ベース電流制御形アナログプリディストーションリニアライザを開発した。このリニアライザは、自己ベースバ

イアス制御回路を備えた増幅器を基本構成とする。自己ベースバイアス制御回路は、入力される変調信号からエンベロープ成分を抽出し、抽出したエンベロープ成分に応じて増幅器のベース電流を自動的に制御する。その結果、入力信号に対する利得特性を容易に制御することが可能となり、高出力増幅器のあらゆる振幅ひずみを打ち消すことが可能となりリニアライザを実現した。またSi BiCMOS (Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスを用いて構成することによって、変調信号の高速なエンベロープにも追従することを可能にした。このリニアライザを試作しW-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 基地局用送信高出力増幅器に適用した結果、高効率動作時のひずみ補償に有効な手法であることを確認した。



自己ベース電流制御形アナログプリディストーションリニアライザによるひずみ補償

入力される変調信号のエンベロープ成分に追従して動作する自己ベース電流制御形増幅器を用いたアナログプリディストーションリニアライザによって、高出力増幅器の任意の振幅ひずみを補償することを可能にした。またSi BiCMOSプロセスを用いて構成することによって、高速なエンベロープ信号に追従するリニアライザを実現した。

1. まえがき

近年の無線通信システムは音声とデータの両方を取り扱うマルチメディアシステムへと進化しており、占有帯域幅の広帯域化による高速かつ大容量化が進んでいる。したがって、無線通信システムに用いられる送信高出力増幅器では、小型・低コストに加え、高効率に高線形動作することが求められる。これらの要求を満足させるためにひずみ補償技術は重要であり、その中でも簡易なアナログリニアライザとデジタルプリディストーションリニアライザなどのデジタルひずみ補償回路とを組み合わせる構成が有効である。

簡易アナログリニアライザは、プリディストーション形であることが多く、ダイオードリニアライザなどに代表される小型なひずみ補償回路のことである。簡易アナログリニアライザには、高出力増幅器のあらゆる振幅ひずみに対応できるよう可変幅の大きな利得特性が求められるだけでなく、近年の無線通信システムで用いられる高速な変調信号のエンベロープの変動にも追従できるような広帯域特性も必要とされる。可変幅の大きな利得特性を得るために、電力レベルに応じて自動的に能動回路のバイアス条件を変化させる高機能バイアス回路技術を適用した増幅器を用いることが有効な手段である。また、この増幅器を高速動作可能な構成にすることによって、高速な変調信号のエンベロープにも追従させることができる。したがって、Si BiCMOSなどの高速プロセスを採用した高機能バイアス回路を用いた増幅器を、振幅や位相を補償するプリディストーションリニアライザとして動作させることができれば、高速な無線通信システムに対応できる汎用性の高いリニアライザを実現することができる。

本稿では、Si BiCMOSプロセスを採用した自己ベースバイアス制御形増幅器を用いたアナログプリディストーションリニアライザを提案する。このリニアライザを構成する自己ベースバイアス制御回路は、入力される変調信号からエンベロープ成分を抽出し、抽出したエンベロープ成分に応じて増幅器のベース電流を自動的に制御する。その結果、高入力電力レベルでは、ベース電流の増加に応じて利得は増加し、負の振幅変動を持つ高出力増幅器の振幅ひずみを打ち消すことができる。また自己ベースバイアス制御回路に抵抗を装荷することによって、負の利得特性を実現し、正の振幅変動を持つ高出力増幅器の振幅ひずみを打ち消すことができる。提案のリニアライザを試作しW-CDMA基地局用増幅器に適用した結果、高効率動作時の線形性を改善する手法として有効であることを確認した。

2. 動作原理

図1に正の利得変動を実現する提案のアナログプリディストーションリニアライザの回路図を示す。図1で、Q₁は

RF(Radio Frequency)トランジスタ、Q₂はカレントミラー回路を構成するバイアス回路トランジスタ、Q₃はベース電流補償用トランジスタ、Q₄とQ₅はバイアス回路で帰還回路を構成するpMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)である。Q₁とQ₂のカレントミラー比はN:1、Q₄とQ₅のカレントミラー比は1:Mとする。提案のプリディストーションリニアライザは、RFトランジスタであるQ₁とベースバイアスフィード部及び自己ベースバイアス制御回路で構成している。

通常の増幅器では、ベースバイアスフィード部にある容量C_{RF}はエンベロープ周波数を遮断する容量値を選択する。しかし、エンベロープ信号に追従させるリニアライザとして動作させるために、エンベロープ周波数は遮断せず、高周波だけ対応する程度の小さな容量値を選択する。

正の利得変動を実現するためには、Q₁のベース電圧(V_{be1})はエンベロープに応じて増加する必要がある。大信号動作時にI_{be1}がI_{be1}+ΔI_{be1}に増加する場合、Q₄のドレイン電流(I_{ref4})、及びQ₅のドレイン電流(I_{ref5})は、それぞれI_{ref4}+ΔI_{ref4}、I_{ref5}+M×ΔI_{ref4}に増加する。その結果、Q₁のベース電流とベース電圧はそれぞれ式(1)、(2)のように表される。

$$I_{be1_final} = I_{be1} + \Delta I_{be1} + \sum_{m=1}^{\infty} \Delta I_{be1}(m)!$$

$$= I_{be1} + \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{M \cdot N}{\beta - M} \right)^m \cdot \Delta I_{be1} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{be1_final} = V_{be1} + \frac{q}{nkT} \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{I_s \cdot e^{qV_{be1}/nkT}} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{M \cdot N}{\beta - M} \right)^m \cdot \Delta I_{be1} \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

式(1)、(2)で、 β はQ₁及びQ₂の電流増幅率である。式(2)から、ベース電圧はエンベロープの振幅に応じて増加し増加量はQ₄とQ₅のカレントミラー比Mによって制御できることが分かる。したがって、提案のプリディストーションリニアライザの利得は、高入力電力レベルで増加する傾向

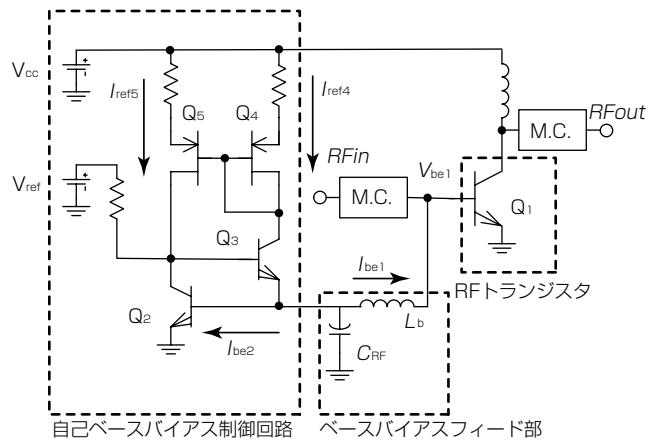


図1. 正の利得変動を実現する提案のアナログプリディストーションリニアライザの回路図

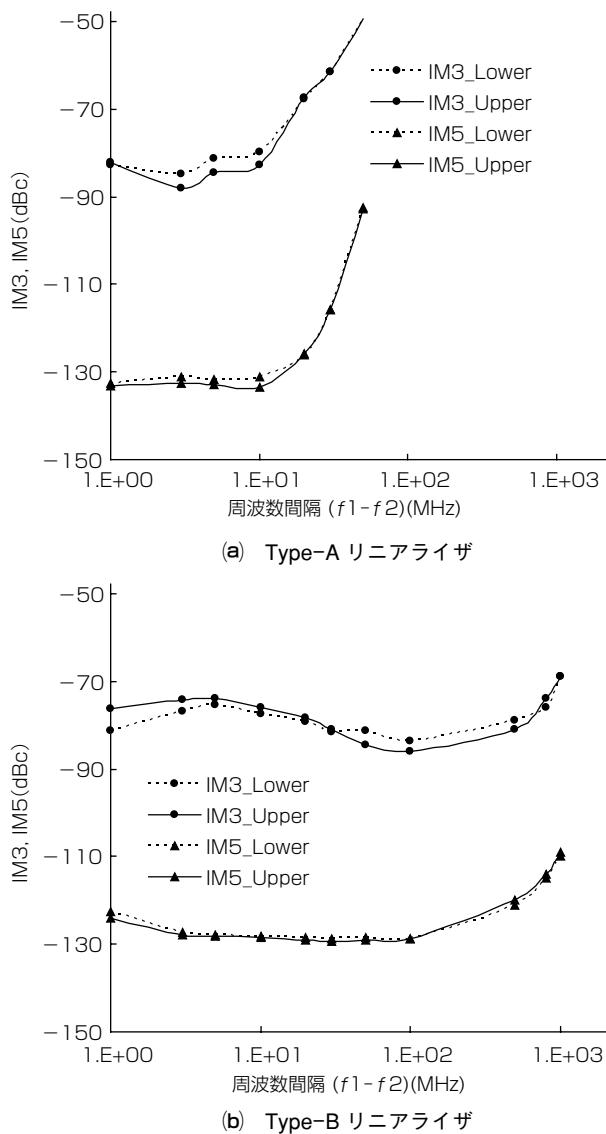


図2. 2波入力信号(f_1, f_2)の周波数間隔(f_1-f_2)に対するIM3, IM5シミュレーション結果

を示し、負の利得変動を持つ高出力増幅器の振幅ひずみを補償できることが期待される。

自己ベースバイアス制御回路で、周波数応答の上限を決める素子はpMOSFETである。そこで異なる遮断周波数を持つpMOSFETを用いた2種類のリニアライザに対して、2波の周波数間隔を変化させた時の相互変調ひずみ(IM)特性を計算し、その結果をもとに自己ベースバイアス制御回路の周波数応答に関して検討した。2種類のリニアライザは、20MHzの遮断周波数を持つpMOSFETを用いたType-Aリニアライザと3GHzの遮断周波数を持つpMOSFETを用いたType-Bリニアライザである。図2(a), (b)にType-AリニアライザとType-Bリニアライザの2波入力信号(f_1, f_2)の周波数間隔(f_1-f_2)に対するIM3(3次IM), IM5(5次IM)シミュレーション結果を示す。図2(a)に示すように、Type-AリニアライザのIM3, IM5は約10MHz付近から劣化する傾向を示す。一方、図2(b)に示すType-Bリニアライザでは約500MHzまでほぼ一定の特性を示す。

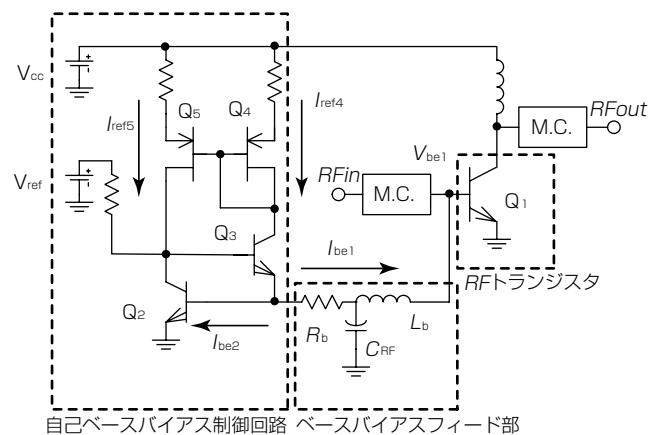


図3. 負の利得変動を実現する提案のアナログプリディストーションリニアライザの回路

つまり、 $(f_1-f_2)/2$ の成分がエンベロープ周波数に対応すると考えると、自己ベースバイアス制御回路の遮断周波数には、高調波を考慮しエンベロープ周波数の数倍の周波数が求められることになる。

次に、図3に負の利得変動を実現する提案のプリディストーションリニアライザの回路図を示す。負の利得変動を実現するために、抵抗 R_b が Q_1 と自己ベースバイアス制御回路の間に装荷される。同様に大信号動作時に I_{bel} が $I_{bel} + \Delta I_{bel}$ に増加する場合を考えると、ベース電圧は式(3)のように表される。

$$V_{bel_final} = V_{bel} + \frac{q}{nkT} \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{I_s \cdot e^{qV_{bel}/nkT}}\right) \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{N}{\beta}\right)^m \cdot \Delta I_{bel} \quad \dots(3)$$

式(3)で、カレント比 M は1とした。式(3)から、 V_{bel} はエンベロープの振幅に応じて低下し、低下量は R_b によって制御できることが分かる。したがって、提案のプリディストーションリニアライザの利得は、高入力電力レベルで低下する傾向を示し、正の利得変動を持つ高出力増幅器の振幅ひずみを補償できることが期待される。

3. 試作結果

ベースバイアス制御形増幅器を用いたアナログプリディストーションリニアライザをSi BJT (Bipolar Junction Transistor) 及びpMOSFETを用いて試作した。周波数応答性を確認するために、このリニアライザのAM/AM及びAM/PM特性実験結果を用いて算出したACPR (Adjacent Channel leak Power Ratio) とNACPR (Next Adjacent Channel leak Power Ratio) 計算結果と、3.84McpsのQPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 変調信号を用いたACPRとNACPR実験結果の比較を行った。図4にACPR, NACPRの計算結果と実験結果の比較を示す。周波数は2.14GHzとし、ACPRとNACPRはそれぞれ5MHzオフセットと10MHzオフセットで定義した。図から計算結果と実験

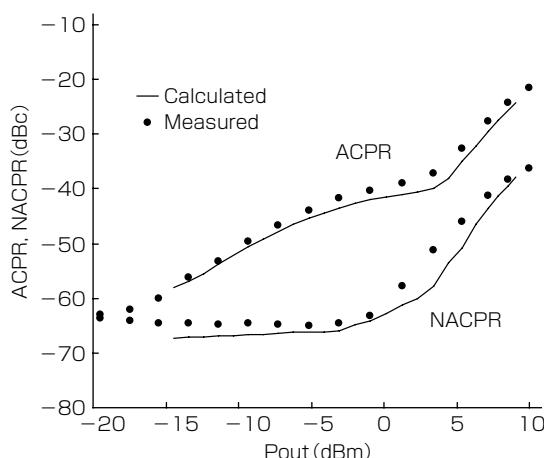
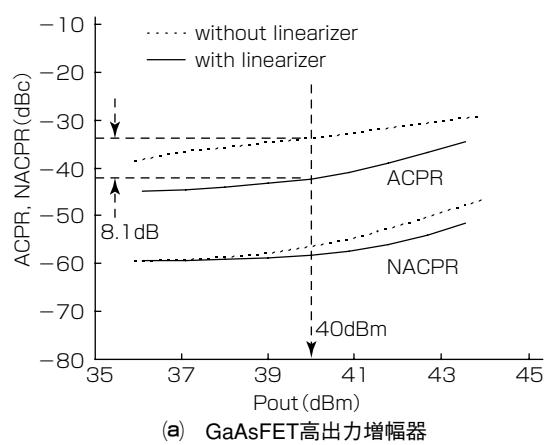
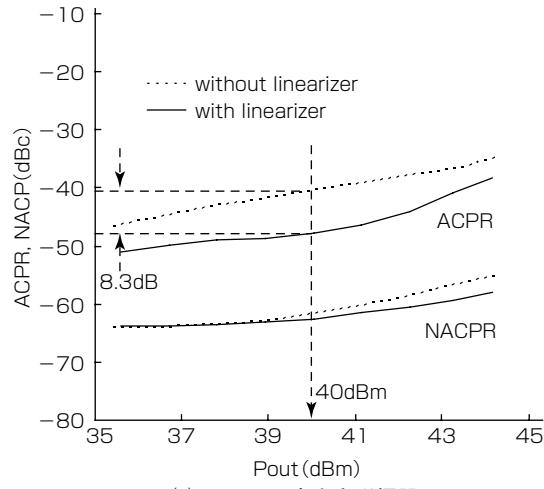


図4. リニアライザのACPRとNACPRの計算結果と実験結果の比較



(a) GaAsFET高出力増幅器



(b) LDMOS高出力増幅器

図5. プレディストーションリニアライザ適用時と未適用時のACPR, NACPR実験結果

結果はほぼ一致することが分かる。これは試作した自己ベースバイアス制御回路が3.84McpsのQPSK変調信号のエンベロープ成分に追従できていることを示すものである。

試作した自己ベースバイアス制御形増幅器を用いたアナログプリディストーションリニアライザは、2種類のW-CDMA基地局用高出力増幅器(利得の下ぞり特性を持つGaAs FET(Gallium Arsenic Field Effect Transistor)高出力増幅器と、利得の上ぞり特性を持つLDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor)高出力増幅器)に適用し、ひずみ補償効果を確認した。図5はGaAs FET高出力増幅器及びLDMOS高出力増幅器のプリディストーションリニアライザ適用時と未適用時のACPR, NACPR実験結果をそれぞれ示す。GaAs FET高出力増幅器は負の利得変動を持つため、この特性を打ち消すようにリニアライザを調整した結果、出力電力40dBm時のACPR改善量8.1dBを得た。またLDMOS高出力増幅器は正の利得変動を持つため、この特性を打ち消すようにリニアライザを調整し、出力電力40dBm時のACPRを8.3dB改善した。この結果は、提案の自己ベースバイアス制御形増幅器を用いたアナログプリディストーションリニアライザが広帯域に動作し、高効率動作時の高線形化をはかる手法として有効であることを示すものである。

4. む す び

近年の高速無線通信システムで用いられる送信高出力増幅器に適用可能な自己ベースバイアス制御形増幅器を用いたアナログプリディストーションリニアライザを提案した。このリニアライザは、入力される変調信号からエンベロープ成分を抽出し、抽出したエンベロープ成分に応じて増幅器のベース電流を自動的に制御することによって、送信高出力増幅器のあらゆる振幅ひずみを打ち消すことを可能にする。W-CDMA基地局用送信高出力増幅器に適用しひずみ補償実験を行った結果、高効率・高線形特性の実現に有効であることを確認した。

参 考 文 献

- (1) Shinjo, S., et al.: Analog Pre-Distortion Linearizer Using Self Base Bias Controlled Amplifier, IEICE Transaction on Electronics, E93-C, No.7, 966~974 (2010)

コグニティブ無線向け SiGe-BiCMOS直交変調器

堤 恒次*
新庄真太郎**
谷口英司**

SiGe-BiCMOS Quadrature Modulator for Cognitive Radio

Koji Tsutsumi, Shintaro Shinjo, Eiji Taniguchi

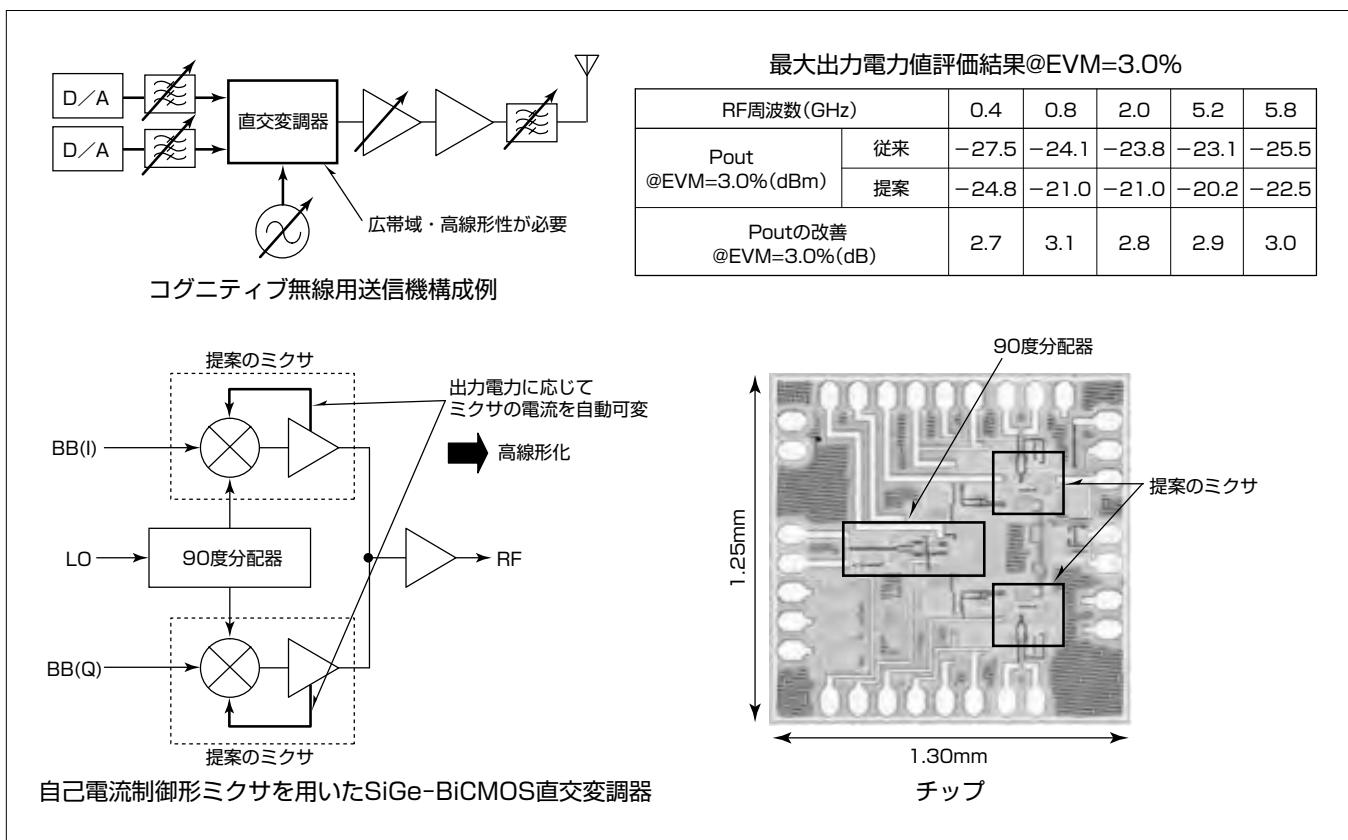
要 旨

コグニティブ無線は、端末や基地局が周囲の環境や電波状況を感じ、その状況に応じて自動的に周波数や方式を切換える無線通信システムである。このシステムに対応する無線通信機の高周波(RF)部では、想定される様々な周波数帯や変調方式に対応するため、広帯域かつ高線形なデバイスが必要となる。

このような要求を実現する上で、コンバータ回路はキーデバイスであり、様々な回路方式が提案されている。広帯域化のためには、ダイレクトコンバージョン方式によるSiGe-MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)直交変調器が提案されている。高線形化のためには、インダクタ負荷を用いた回路方式や高機能バイアス回路の適用が有効である。インダクタ負荷は基本的に狭帯域特性のため、コグニティブ無線への適用は難しい。一方、高機能バイアス回路に関しては、微細化が進んだCMOS(Complementary

Metal Oxide Semiconductor)やSiGe-BiCMOS(Bipolar CMOS)では、高速なP型トランジスタが使用可能であるため、広帯域な特性が求められるデバイスでも高線形化を実現する有効な手法である。

ここでは、直交変調器でベースバンド(BB)に対する広帯域動作時に高線形化を図る手法として、自己電流制御形ミクサ構成を述べる。この構成のミクサを用いることによって、ミクサの動作電流を出力電力に応じて自動的に変化させることを可能にし、高い線形性を得ることができる。また提案のミクサ構成に用いる帰還回路に高速なCMOSを適用することによって、信号における広帯域変調信号に対する動作も可能にする。自己電流制御形ミクサ構成をコグニティブ無線端末用SiGe-BiCMOS直交変調器に適用し、その有効性を確認した。



SiGe-MMIC直交変調器の構成と試作結果

開発したコグニティブ無線用SiGe-BiCMOS直交変調器の回路構成、チップ写真、EVM (Error Vector Magnitude) 3%時の最大出力電力値評価結果を示す。提案する自己電流制御形ミクサによって従来の構成と比較し約3dBの最大出力電力改善を実現した。

1. まえがき

周波数資源の有効利用を目的としたコグニティブ無線⁽¹⁾は、端末や基地局が周囲の環境や電波状況を感じ、その状況に応じて自動的に周波数や方式を切換える無線通信システムである。このシステムに対応する無線通信機の高周波(RF)部では、想定される様々な周波数帯や変調方式に対応するため⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、ベースバンド(BB)に対して広帯域かつ高線形なデバイスが必要となる。

このような要求を実現する上で、コンバータ回路はキーデバイスであり、様々な回路方式が提案されている。広帯域化のためには、ダイレクトコンバージョン方式によるSiGe-MMIC直交変調器が提案されてきた。一方、高線形化のためには、インダクタ負荷を用いた回路方式や高機能バイアス回路⁽⁵⁾の適用が有効である。インダクタ負荷は基本的に狭帯域特性のため、コグニティブ無線への適用は難しい。一方、高機能バイアス回路に関しては、微細化が進んだCMOSやSiGe-BiCMOSでは、高速なP型トランジスタが使用可能であるため、広帯域な特性が求められるデバイスでも高線形化を実現する有効な手法である。

本稿では、直交変調器でBBに対する広帯域動作時に高線形化を図る手法として、自己電流制御形ミクサ構成を述べる⁽⁶⁾。この構成を用いることによって、ミクサの動作電流を出力電力に応じて自動的に変化させ、高い線形性を得ることができる。また提案のミクサに用いる帰還回路に高速なCMOS回路を適用することで、BBに対する広帯域動作も可能である。

2. 自己電流制御形ミクサの動作原理

図1に提案する自己電流制御形ミクサの回路図を示す。提案のミクサは、従来のギルバートセルミクサと自己電流制御回路の組合せ構成であり、自己電流制御回路は電流帰還回路と出力バッファ増幅器からなる。インダクタ素子を用いないため小型でかつSiGeやCMOSプロセスでは容易に実現することができる回路構成である。

以下に、自己電流制御回路を用いた場合の動作原理を示す。出力電力が小さく、出力バッファ増幅器が小信号で動作する場合、ミクサの動作電流 I_{mix_small} と出力バッファ増幅器の動作電流 I_{buff} は、式(1)の関係にある。

$$I_{mix_small} = N \cdot (I_{bias_ref} + \frac{1}{M} \cdot I_{buff}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

一方、出力電力が大きく、出力バッファ増幅器が大信号で動作する場合、 I_{buff} は指数関数的に増加する。 I_{buff} の電流増加量を ΔI_{buff} とすると、大信号時のミクサの動作電流 I_{mix_large} は式(2)のようにならる。

$$I_{mix_large} = I_{mix_small} + \frac{N}{M} \cdot \Delta I_{buff} \quad \dots \dots \dots (2)$$

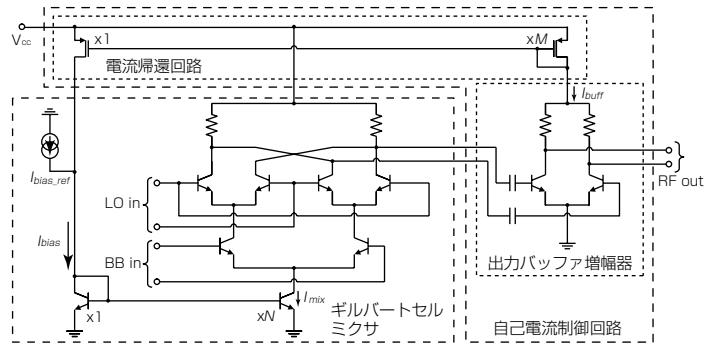


図1. 自己電流制御形ミクサの回路図

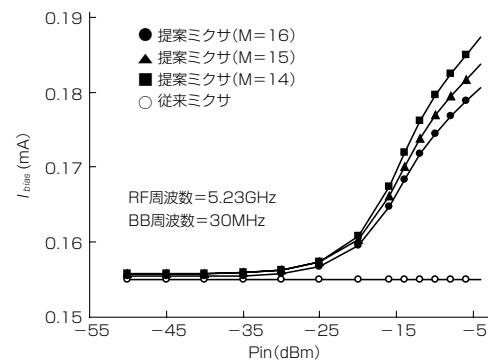


図2. ミクサの電流(I_{bias})特性シミュレーション結果

式(1)と式(2)から、高出力電力時にはミクサの動作電流が増加していることが分かる。さらにその増加量はミラー比 N 、 M 及び I_{buff} の電流増加量 ΔI_{buff} によって調整可能である。

図2に、回路シミュレーションによって求めた I_{bias} のミクサ入力電力依存性を示す。この結果から、従来のギルバートセルミクサの I_{bias} は入力電力レベルによらず一定であるのに対し、提案のミクサでは高入力電力時に I_{bias} が増加していることが分かる。また I_{bias} 増加量は、式(2)で表されるとおり、ミラー比 M を小さくするほど大きくなる。

3. 実回路設計

3.1 自己電流制御形ミクサの設計

自己電流制御形ミクサの設計は、高線形性に寄与する電流帰還回路のミラー比の設計と広帯域化に寄与する出力バッファ増幅器の電流密度の設計の2点に分けられる。

まず、電流帰還回路のミラー比の設計について述べる。図3に提案のミクサと従来のミクサの入出力特性シミュレーション結果を示す。この結果から、-20dBm以上の入力電力レベルで提案ミクサの変換利得(Gc)低下が抑圧されていることが分かる。ここで M を14に設定した場合には最も高い出力電力が得られるものの、15より小さくした場合には、逆に変換利得が上反る特性となる。その場合、振幅特性の非線形性によって変調特性を劣化させてしまうことが予想される。したがって、最適な M は15とした。その場合、P1dB(1dB利得抑圧時出力)は-21.5dBmであり、従来のミクサからのP1dB改善量は3.3dBとなる。

次に、出力バッファ増幅器のトランジスタにおける電流密度設計について述べる。図4は、回路シミュレーションで

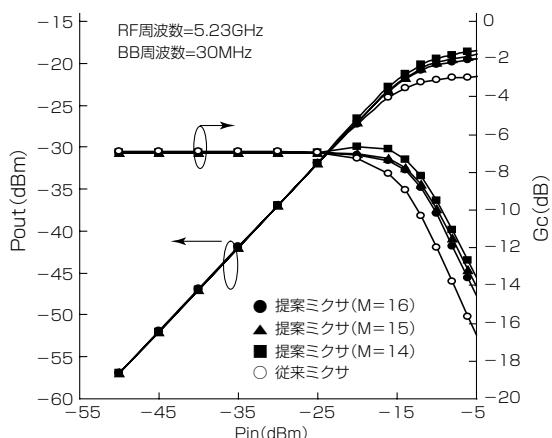


図3. ミクサの入出力特性シミュレーション結果

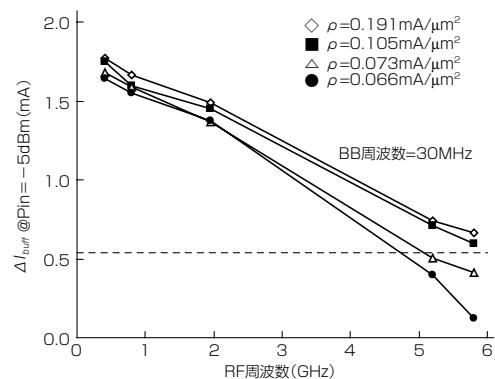


図4. ΔI_{buff} 特性のRF周波数依存性シミュレーション結果

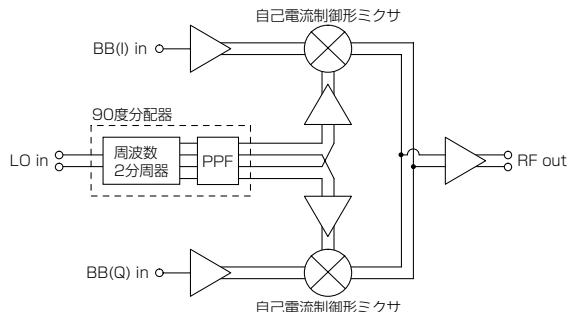


図5. 提案の直交変調器のブロック図

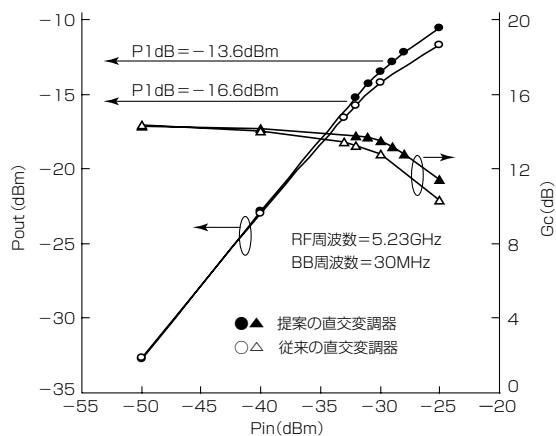


図6. 直交変調器の入出力特性シミュレーション結果

求めた、入力電力が-5 dBmの時の電流増加量 ΔI_{buff} のRF周波数依存性である。グラフから、電流密度が低いほど高周波での電流増加量 ΔI_{buff} は低下することが分かる。この結果から、提案のミクサの線形性を改善するためには、電流密度として $0.105 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$ が最適であることが分かった。

3.2 直交変調器

図5に提案のミクサを適用した直交変調器のブロック図を示す。直交変調器は局部発振信号(LO)を分配する90度分配器、自己電流制御形ミクサ、及びBB/LO/RF増幅器で構成している。LO信号を分配する90度分配器は、周波数2分周器と1段ポリフェーズフィルタ(PPF)の組合せである。PPFと組み合わせることによって高位相精度が得られ、またPPFのみを多段化した場合と比較すると広帯域化が実現できる⁽⁷⁾。

図6に提案の直交変調器とギルバートセルミクサを用いた従来の直交変調器の入出力特性シミュレーション結果を示す。提案のミクサの設計結果と同様、直交変調器でも自己電流制御形ミクサを用いることによって高入力電力レベル時の変換利得の低下を抑圧し、その結果P1dBが改善されることが確認できた。従来の直交変調器からのP1dB改善量は3.0dBである。

4. 評価結果

図7に試作したコグニティブ無線端末用SiGe-BiCMOS直交変調器のチップ写真を示す。使用したプロセスは、 $0.18\mu\text{m}$ SiGe-BiCMOSである。

図8に提案の直交変調器と従来の直交変調器の入出力特性評価結果を示す。シミュレーション結果と同様、提案の直交変調器は高入力電力レベルで利得低下を抑圧し線形性が改善している。その結果、P1dBもまた改善する。従来の直交変調器からのP1dB改善量は3.2dBであり、シミュレーション結果とほぼ一致する結果を得た。

試作した直交変調器の変調特性を、各種システムを想定した信号を用いて評価した。図9に各条件時のコンスタレーションと変調スペクトラムをそれぞれ示す。また、表1に変調特性のまとめ、表2に、EVM3.0%を満足する最大出力電力値の評価結果を示す。EVM = 3.0%時の出力電力

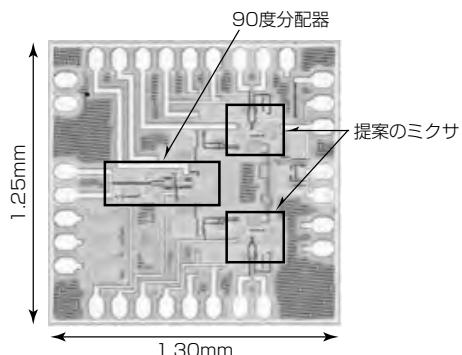


図7. 試作したコグニティブ無線端末用直交変調器のチップ

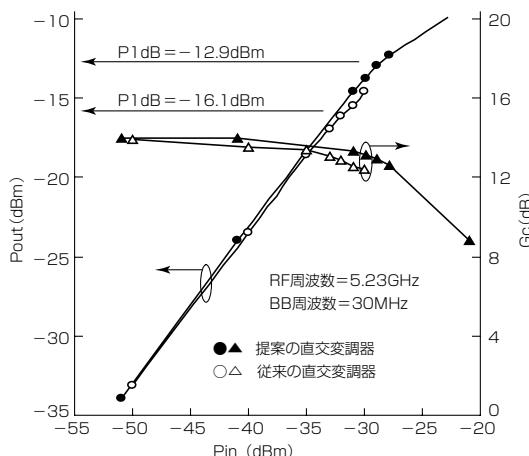


図8. 直交変調器の入出力特性評価結果

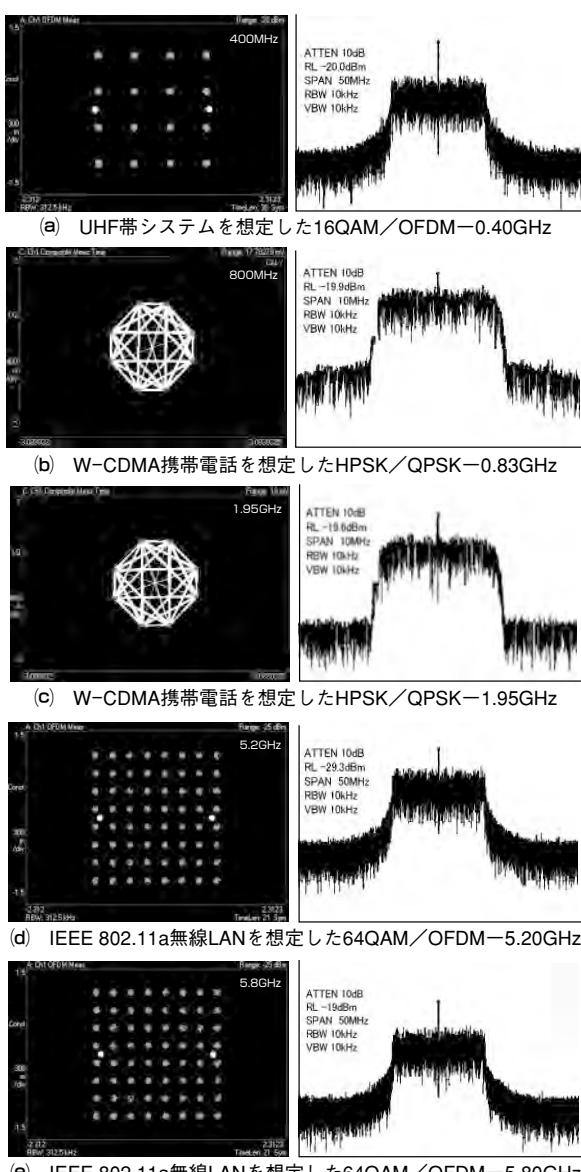


図9. コンスタレーションと変調スペクトラム評価結果

は提案構成では2.7dB以上改善しており、P1dB改善量とほぼ同等の値を得た。したがって、自己ミクサ電流制御回路は変調信号入力時でも、広帯域に線形特性改善効果を持つことが確認できた。

表1. 変調特性のまとめ

システム	UHF	W-CDMA		無線LAN(IEEE 802.11a)	
		OFDM/16QAM	HPSK/QPSK	OFDM/64QAM	OFDM/64QAM
RF	0.4GHz	0.8GHz	1.95GHz	5.2GHz	5.8GHz
EVM	2.7%rms	1.9%rms	1.8%rms	2.4%rms	2.3%rms
Pout	-23dBm	-17.8dBm	-19.4dBm	-24.8dBm	-26dBm
LOリード	21.2dBc	21.3dBc	22.7dBc	25.3dBc	26.8dBc

表2. EVM3.0%を満足する最大出力電力値評価結果

RF周波数(GHz)	0.4	0.8	2.0	5.2	5.8		
	Pout	従来	-27.5	-24.1	-23.8	-23.1	-25.5
@EVM=3.0%(dBm)	提案	-24.8	-21.0	-21.0	-20.2	-22.5	
Poutの改善		2.7	3.1	2.8	2.9	3.0	
@EVM=3.0%(dB)							

5. むすび

広帯域かつ高線形なコンバータを実現するために、自己電流制御形ミクサを開発した。自己電流制御形ミクサを直交変調器に応用して試作した結果、従来形ミクサを用いた直交変調器に比べ、0.4から5.8GHzの各種変調信号で2.7dB以上の高出力電力化を実現した。提案の回路構成は、コグニティブ無線のような無線通信システムで用いられる高線形ミクサ及び高線形直交変調器で有効な手法である。

参考文献

- 1) J. Mitola III : Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications, MoMuC'99, 3~10 (1999)
- 2) 原田博司 : コグニティブ無線機の実現に向けた要素技術の研究開発, 電子情報通信学会論文誌B, **J91-B**, No.11, 1320~1331 (2008)
- 3) 末松憲治, ほか : マルチバンド・マルチモード送受信機用Si-RFIC技術, 電子情報通信学会論文誌B, **J91-B**, No.11, 1339~1350 (2008)
- 4) Tsutsumi, K., et al. : A Low Spurious 400M-6GHz SiGe-MMIC Direct Conversion Transceiver using 2fLO LO Switching Configuration for Cognitive Radio, RFIC Symposium 2008, 585~588 (2008)
- 5) Taniguchi, E., et al. : Dual bias feed SiGe HBT low noise linear amplifier, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **51**, No.2, 414~421 (2003)
- 6) Shinjo, S., et al. : 0.4~5.8GHz SiGe-MMIC Quadrature Modulator Employing Self Current Controlled Mixer for Cognitive Radio, IEICE Transactions on Communications, **E92-B**, No.12, 3701~3710 (2009)
- 7) Suematsu, N., et al. : Multi-Band/Multi-Mode RFIC for SDR/Cognitive Radio Terminals, MWE2005, Microwave Workshop Digest, 249~254 (2005)

高周波ノイズ伝搬経路評価技術

渡邊陽介* 岡 尚人*
安藤雄二** 大橋英征**
内田 雄**

Technology for Evaluating Propagation Path of High Frequency Noise

Yosuke Watanabe, Yuji Ando, Takeshi Uchida, Naoto Oka, Hideyuki Ohashi

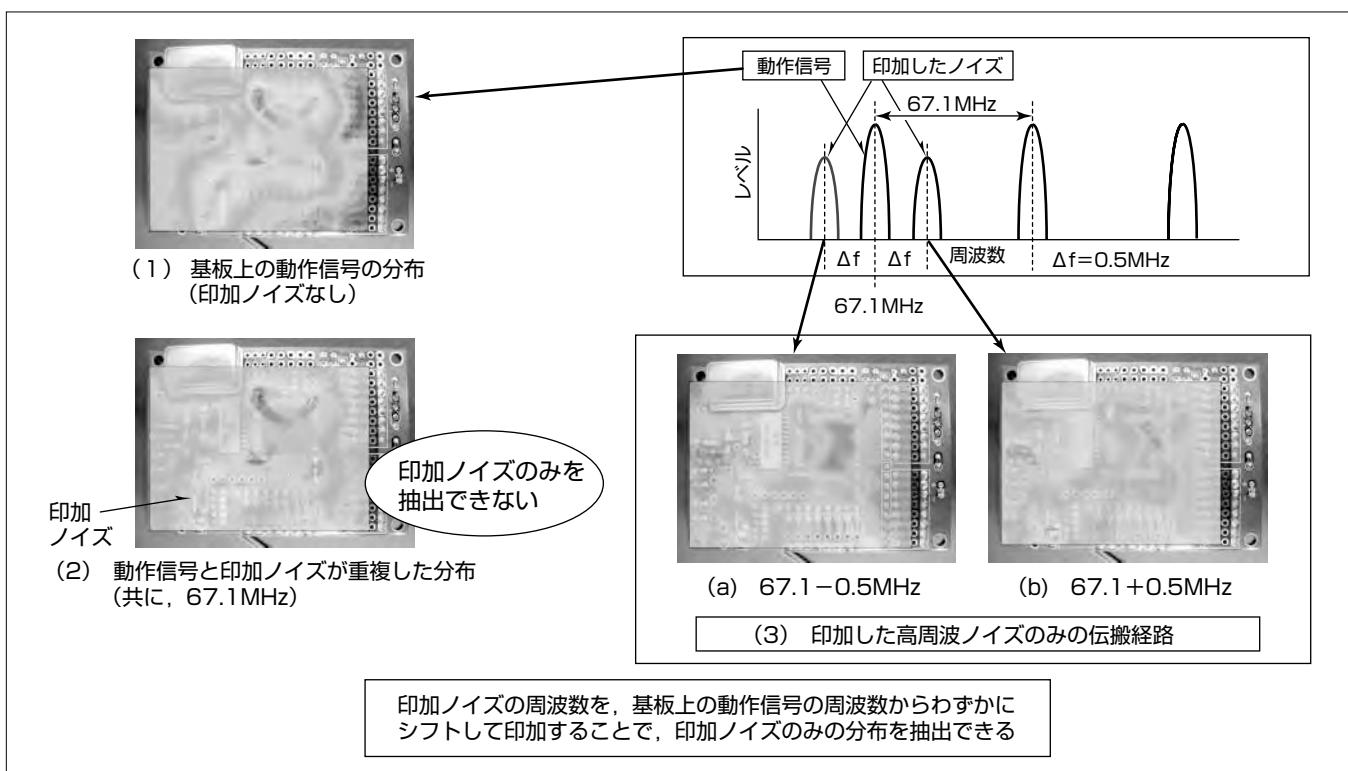
要 旨

近年の無線通信機器は、高速化だけでなく小型化と軽量化も求められており、高速・高周波で動作する回路部品が非常に高密度で実装される状況になっている。そのため、機器の内部モジュール間で起こる内部干渉や、外部の接続端子から混入するノイズ干渉等のEMC(Electro Magnetic Compatibility: 電磁両立性)問題に対し、あらかじめEMCを考慮した設計を行うことが求められる。この場合、要求仕様と軽量化・低コスト化を両立させ、必要最小限の部品を効果的に配置するためには、機器の内部におけるノイズの伝搬経路を評価する技術が必要である。

そこで三菱電機EMC技術センターでは回路基板の外部から混入する高周波ノイズの伝搬経路のみを可視化する技術を開発した。これは一般的な放射ノイズ可視化システムに加えて、評価する機器の外部端子にノイズを印加するカプラを装着することで、外来のノイズの分布を測定する構成となっている。さらに、印加ノイズの周波数が、内部回

路や通信回路の動作信号の周波数と重複し、それぞれの分布を識別できない場合には、重複する動作信号の周波数から上側と下側の両方にわずかにシフトした周波数の印加ノイズの分布を測定する。この手法によって、動作信号と重複する周波数の印加ノイズの分布を両側の周波数の分布から推定することが可能になる。

この技術をダイレクトデジタルシンセサイザの回路基板に適用した。基板上の水晶発振器から出力されるクロック信号と重複する周波数に対して、電源線から高周波ノイズを印加したところ、そのままの測定データでは印加ノイズの分布を抽出できなかったが、この技術を適用することで印加した高周波ノイズのみの分布を抽出することができ、その有効性が確認できた。今後はこの技術をEMC設計・対策における有用なツールとして、様々な電子機器に展開する予定である。



機器外部から印加される高周波ノイズの伝搬経路評価技術と適用例

電子機器の内部の回路を動作させた状態で、エラーが発生した特定の周波数におけるノイズ分布を観測しようとすると、外部から印加したノイズの周波数と、内部回路や通信回路の動作信号の周波数が重複してしまい、それぞれの分布を識別することができない。そこで、印加ノイズの周波数を、内部の動作信号と重複する周波数から、上側と下側にわずかにシフトさせることで、スペクトラムアナライザでノイズと動作信号の重複を避けて検波することができ、印加ノイズの分布を推定することができる。上図はこの技術と適用例を示す。

1. まえがき

近年の無線通信機器は、高速化だけでなく小型化と軽量化も求められており、高速・高周波で動作する回路部品が非常に高密度で実装される状況になっている。そのため、機器の内部モジュール間で起こる内部干渉や、外部の接続端子から混入するノイズ干渉等、EMCに関する問題は複雑化する傾向にある。

しかし、EMCに対応して、対策部品やシールドケースを過剰に配置すると、要求仕様に対してオーバースペックとなる。要求仕様と軽量化・低コスト化を両立させた上で、必要最小限の対策部品を最も効果がある箇所に配置することが望ましい。そのためには、機器の内部でノイズが伝搬する経路を評価する技術やツールを開発し、対策部品等の適切な配置場所を絞り込む必要がある。

以上を踏まえ、当社EMC技術センターでは、機器の内部における高周波ノイズ伝搬経路評価技術を開発した。本稿ではその技術と効果について述べる。

2. EMC設計の基本要素と開発の位置付け

2.1 EMC設計の基本要素

無線通信機器のEMC問題は、図1に示す3要素(①ノイズ発生源、②ノイズ発生源から被妨害回路までのノイズ伝搬経路、③ノイズの影響を受ける被妨害回路)を経由して発生する。

このため、EMC問題の回避には、最終的に被妨害回路が放射又は伝導で受けるノイズのレベルが、性能劣化を生じる誤動作レベル(ノイズ許容値やマージン)よりも低くなるように設計する必要がある。したがって、対象となる機器に応じて、ノイズ発生源の発生レベルの抑制、ノイズ伝搬の伝搬抑制、被妨害回路のノイズ耐性の向上と、それぞれの要素でのEMCを考慮することで、結果として被経路妨害回路で受信するレベルを抑制することができる。

2.2 開発の位置付け

当社EMC技術センターでは、上記のそれぞれの要素に対するEMC技術を開発しており、ノイズ発生源の解析や、高速差動線路・被妨害回路の耐ノイズ評価など、様々な検討を行ってきた。今回の開発はこのうちの伝搬経路に関する研究開発にあたる。以下に事例とともに、開発の位置付けを示す。

例えば、アンテナ端子から高周波のノイズが無線通信機器に混入した場合には、外来の高周波ノイズに起因した通信エラーや、無線機器の性能劣化が起こる可能性がある。



図1. EMC問題の基本要素

しかし、高密度で実装された無線通信機器では、通信のためのRF(Radio Frequency)回路以外にも様々な回路が混在しているため、どの回路でエラーや誤動作が発生したかを分析することは非常に困難である。このため、無線機器内で、高周波ノイズが伝搬する経路を特定する技術が求められる。ノイズ伝搬経路の特定ができれば、エラーの原因究明や、ノイズ伝搬抑制のための対策箇所の抽出が可能となり、設計時に非常に有用なデータ入手できる。

以上を踏まえ、無線通信機器の外部から混入する高周波ノイズの伝搬経路を可視化するための技術を開発した。

3. 高周波ノイズ伝搬経路可視化システム

3.1 一般的なノイズ可視化システム

一般的なノイズ可視化システムは、対象となる機器から発生するノイズに対する対策用ツールとして使われる。これは、対象となる機器内部に存在する不要なノイズの発生源を特定することによって、機器上で対策が必要となる箇所を絞り込むことを目的としている。

このノイズ可視化システムは、検出プローブと、検出プローブを走査する機構、スペクトラムアナライザなどの測定器、及び分布表示用のパソコン上のソフトウェアで構成している。対象機器の内部のプリント基板を流れるノイズ電流(電圧、電磁界)のレベルを、検出プローブとスペクトラムアナライザで観測し、基板上の一定のエリアを走査させることでノイズ分布を表示する。

3.2 開発した高周波ノイズ伝搬経路可視化システム

前節で示した一般的なノイズ可視化システムに対し、外部から印加した高周波ノイズの伝搬経路可視化システムを開発した。これは、先に述べたシステムで評価する機器の外部端子に対し、ノイズを印加するカプラを装着することで、外来ノイズの分布を測定するシステムを構成している。このシステムの構成を図2に示す。

先に述べた可視化システムとの構成要素に対して、機器の端子から外来のノイズを印加する機構を追加しただけ

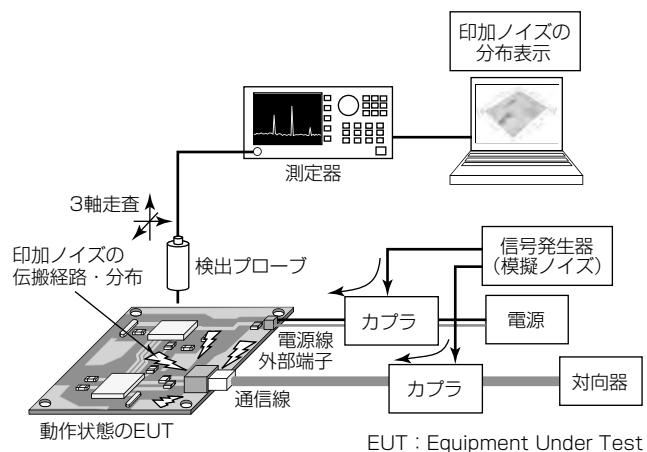


図2. 高周波ノイズ伝搬経路可視化システムの構成

あるが、ノイズの分布を抽出する手法は大きく異なる。

無線通信機器に対して外部からノイズを注入した際のエラーや誤動作の多くは、内部の回路で使用する信号の周波数と同一の周波数のノイズを重複した際に発生することが多い。また、内部の回路の動作状態によっては、回路のインピーダンスが異なることが多いため、動作状態では停止状態と別のノイズ伝搬経路が現れることもある。したがって、実際の機器の誤動作に対応した評価を行うためには、回路が動作した状態で、印加ノイズの伝搬経路を可視化しなければならない。

しかし、内部の回路を動作させた状態で、エラーが発生した特定の周波数におけるノイズ分布を観測しようとすると、内部の動作信号の通信回路の動作信号と、周波数が重複してしまい、それぞれを識別できないケースが多発する。この問題に対し、無線通信機器の内部の動作信号と印加ノイズを分離して検出する技術を検討した。その分離方法を図3に示す。

図3の上図は、対象となる機器の基板上の、ある一点の観測点における動作信号のスペクトラムを示している。今回の対象となる機器は、正弦波発生器のダイレクトデジタルシンセサイザ(Direct Digital Synthesizer: DDS)としたが、このグラフから機器内の各回路の動作信号を集積したスペクトラムは、非常に広い帯域の成分を持つことが分かる。図3の下図に、この動作信号のスペクトラムの一部を拡大して示す。この図はクロック発信器の基本周波数周辺の帯域のスペクトラムを拡大した。図中の f_s を対象基板から発生する信号の基本周波数とすると、この周波数に対して整数N倍の高調波が発生する。このとき、 f_s に対して同

じ周波数のノイズを外部から注入してしまうと、動作信号と外部印加ノイズが混ざってしまい、混合したレベル分布が観測されてしまう。これに対し、 f_s から Δf の周波数だけシフトした周波数のノイズを外部から印加する手法を考案した。この印加ノイズの周波数は、 f_s の上側と下側に対して Δf だけシフトした値となるため、測定器であるスペクトラムアナライザでは、動作信号と外部印加ノイズが混ざることなく検波でき、独立したノイズ分布を取得できる⁽¹⁾。

このとき、上側にシフトした周波数 $f_s + \Delta f$ を印加した際に観測されるノイズ分布と、下側にシフトした周波数 $f_s - \Delta f$ を印加した際に観測されるノイズ分布が一致する場合は、その間にある周波数 f_s の分布も同等になると判定する。以上のことによって、 f_s におけるノイズ分布を間接的に取得することができる。ただし、 Δf の決め方には条件があり、 f_s よりも小さく、かつスペクトラムアナライザの分解能帯域幅(Resolution BandWidth: RBW)よりも大きくする必要がある⁽²⁾⁽³⁾。

4. 高周波ノイズ伝搬経路可視化システムの効果

開発したシステムによって採用した高周波ノイズ伝搬経路可視化技術を用いて、ノイズの伝搬経路を可視化した事例を示す。図4に先に述べたDDS基板の外観を示す。図の基板の左下に直流電源端子があり、左上に67.1MHzのクロックを生成する水晶発振器が配置されている。また、基板中央にはDDSのICチップがあり、発振器とDDSチップの間にD/Aコンバータが置かれている。よって、この基板の回路動作する際には、発振器の基本周波数67.1MHzからの高調波成分とDDSチップの動作周波数が発生することが予想される。今回は67.1MHzの発振器の基本周波数に着目し、その周波数で動作信号と外来の高周波ノイズの切り分けが可能かを検証した。

まず、図5にDDS基板の動作信号のみの分布を測定した結果を示す。この図の基板の写真に重なる白黒の濃淡がノイズのレベルを示しており、白い箇所が高いノイズレベル、黒い箇所が低いノイズレベルを持つ部分となっている。この図から、発振器から出力された動作信号は、D/Aコ

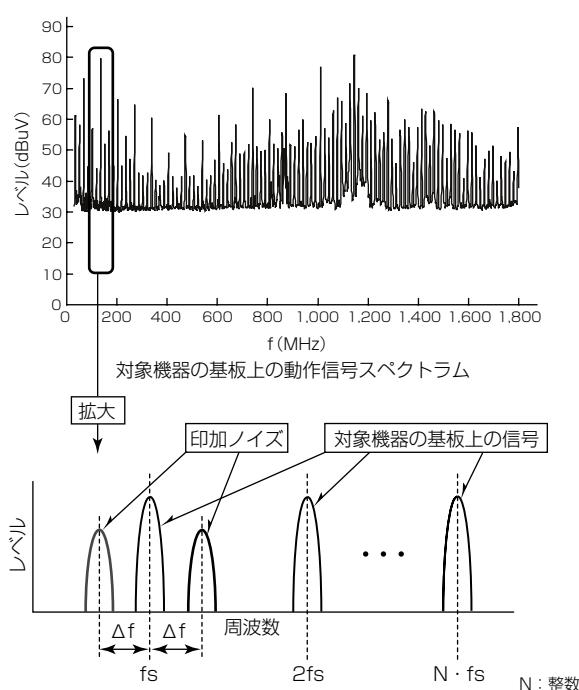


図3. 動作信号と重複した印加ノイズの分離方法

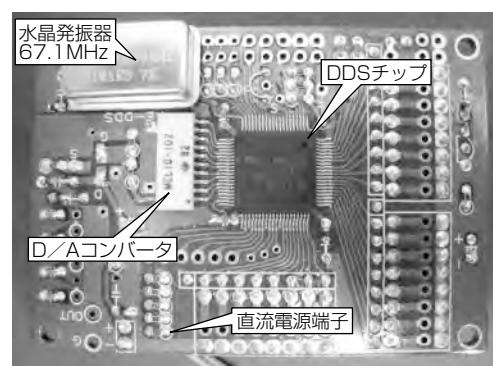


図4. 可視化の対象とするDDS基板の外観

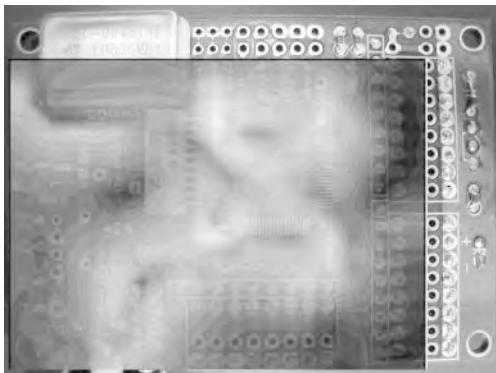


図5. DDS基板の動作信号(67.1MHz)のレベル分布

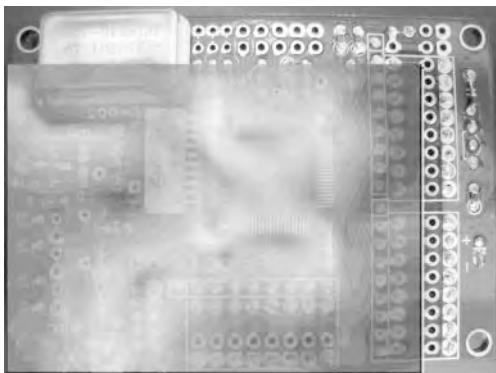
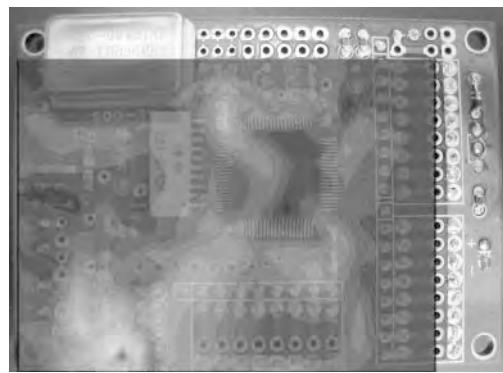
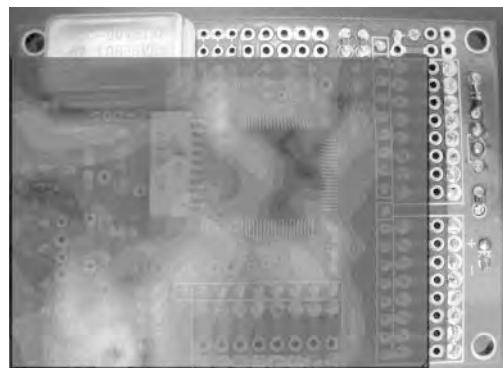


図6. 動作信号と同じ周波数(67.1MHz)のノイズを印加したときの分布



(a) 印加ノイズ周波数: 67.1+0.5MHz



(b) 印加ノイズ周波数: 67.1-0.5MHz

図7. 印加ノイズのみのノイズレベルの分布

ンバータを経由してDDSチップに入り、さらにDDSチップから直流電源端子に流れていることが分かる。

次に、DDS基板を動作させた状態で、動作信号と同じ周波数(67.1MHz)の高周波ノイズを直流電源端子から印加した。図6にそのノイズレベルの分布を示す。この図を見ると、左下の端子から印加した高周波ノイズと、発振器から流れる動作信号が混合されてしまうことが分かる。したがって、印加した高周波ノイズがDDSチップやD/Aコンバータにいたる経路を分析することは不可能である。

一方、先に述べた印加ノイズの周波数をシフトする手法を適用し、ノイズの周波数を67.1MHzから ± 0.5 MHzシフトさせて印加し、ノイズ分布を測定した。図7(a)に67.1+0.5MHzのノイズレベルの分布を、図7(b)に67.1-0.5MHzのノイズレベルの分布を示す。これらの図から、電源端子に印加したノイズはDDSチップまではパターンを経由して到達するものの、D/Aコンバータや発振器までは至っていないことが分かる。よって、基板が動作状態であっても、動作信号の影響を受けずに印加した高周波ノイズのみの伝搬経路が抽出できている。また、図7(a)と(b)の比較から、上下の周波数のシフトによって得られるノイズの分布は同等であるため、間の周波数の67.1MHzでも同様の伝搬経路を示すと推測できる。

以上によって、印加ノイズの周波数をシフトして、高周

波ノイズのみの伝搬経路を抽出する手法が有効であることが分かった。印加ノイズの周波数シフト量 Δf の最適な設定方法や、広帯域な動作信号への適用等が今後の課題である。

5. む す び

電子機器内部の動作信号と印加ノイズを分離して測定する技術を開発し、無線通信機器の外部から混入する高周波ノイズのみの伝搬経路を可視化する手法を構築した。開発成果であるこの技術をEMC設計・対策における有用なツールとして、様々な電子機器に展開する予定である。

参 考 文 献

- (1) 安藤雄二, ほか: プリント基板上の印加ノイズ伝搬経路測定評価法の一検討, エレクトロニクス実装学会第25回講演大会, 9A-20 (2011)
- (2) 安藤雄二, ほか: 基板上のノイズ伝搬経路可視化に用いる印加ノイズ周波数依存性の一検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-4-63 (2011)
- (3) 安藤雄二, ほか: 基板のノイズ伝搬経路可視化における印加ノイズの検討, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ2012-13 (2012)

人工衛星向け高速デジタル伝送技術

澁谷幸司* 明星慶洋*
小田木 功**
山岸圭太郎*

High-speed Digital Transmission Technologies for Artificial Satellites

Koji Shibuya, Isao Odagi, Keitaro Yamagishi, Yoshihiro Akeboshi

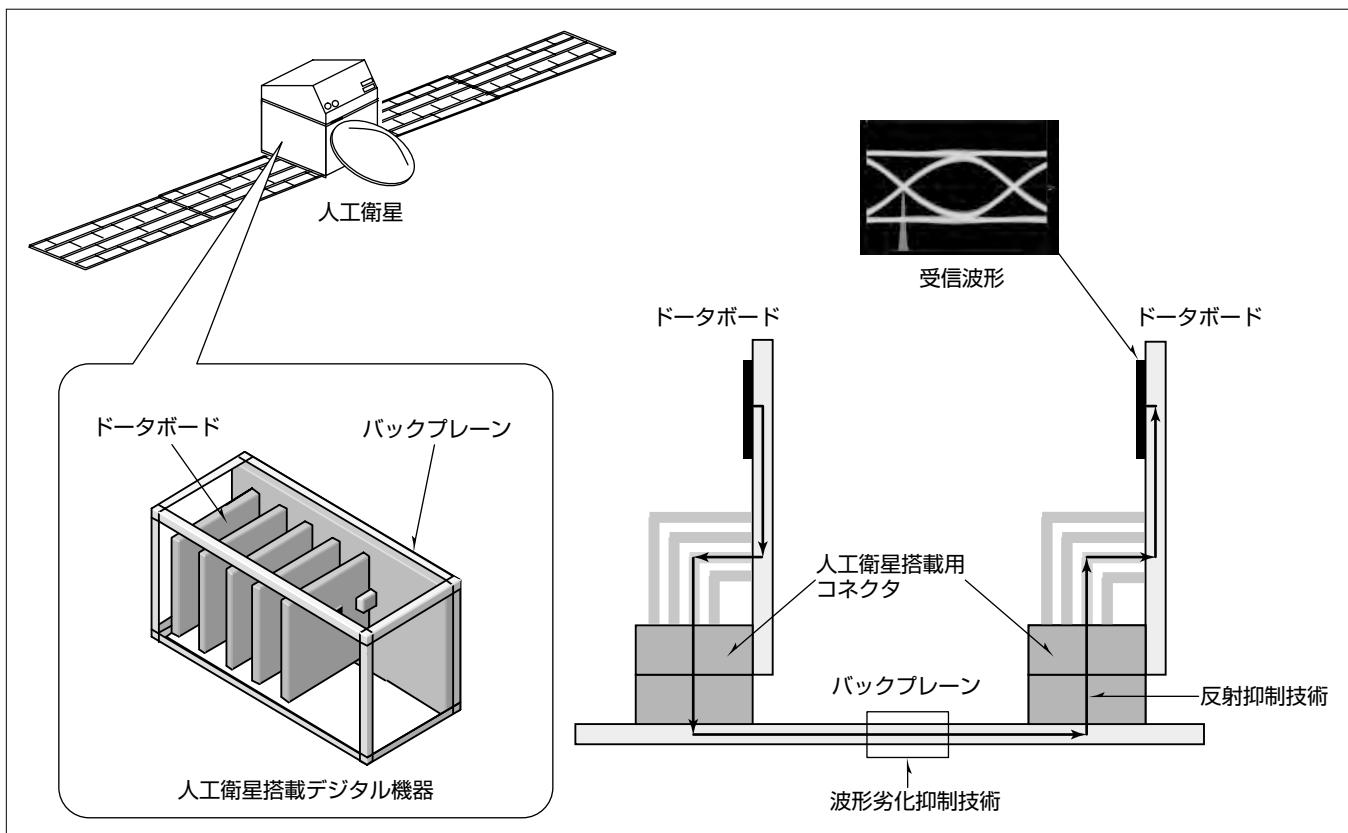
要 旨

人工衛星搭載機器における機器間通信として、データ伝送レート200Mbps程度のシリアル伝送通信が用いられている。ところが近年、高解像度センサなどの搭載機器で扱う情報量が増大しており、更なる伝送レートの向上が予想される。また、現在は機器間の接続としてケーブルを用いた伝送が主に検討されているが、機器の小型化、高集積化などの目的で、バックプレーンシステムへの移行が必要になると予想される。すなわち、高速かつ人工衛星で使用可能なバックプレーンシステムの開発が必要になる。

バックプレーンシステムを構成する上で、キーとなるのがバックプレーンとデータボードを接続する基板間コネクタである。人工衛星に搭載されるデジタル機器に用いる基

板間コネクタは、厳しい使用環境条件を満たす必要がある。地上用途では、10Gbps級の伝送が可能な高性能なコネクタが開発されているが、人工衛星搭載用としての認定はされておらず、そのまでの採用は難しい。一方、人工衛星搭載用コネクタは、高速信号伝送を考慮した設計とはなっていないため、人工衛星用機器の信号高速化の妨げとなる。

本稿では、このような人工衛星搭載用コネクタで、Gbps級高速信号伝送を実現するための解決策について述べる。人工衛星搭載用コネクタの伝送特性を評価し、ピンアサインの最適化による反射抑制技術と、パッシブ素子及び伝送路で構成した波形補償回路による波形劣化抑制技術を適用して、数Gbpsクラスの信号伝送が可能であることを示す。



人工衛星向け高速デジタル伝送技術を適用したバックプレーンシステム

人工衛星搭載機器における機器間通信は、近年の高解像度センサなどの搭載機器で扱う情報量の増大、及び機器の小型化・高集積化等の要請で、数Gbps級のシリアルデータ通信を用いたバックプレーンシステムの開発が必要になる。人工衛星搭載機器は地上機器と比べて、制限が厳しく、高速伝送の観点では不利な条件となっているが、この技術を適用することによって、人工衛星搭載機器でも高速伝送を実現することができる。

1. まえがき

人工衛星搭載機器における機器間通信として、データ伝送レート200Mbps程度のシリアル伝送通信が用いられている。ところが近年、高解像度センサなどの搭載機器で扱う情報量が増大しており、更なる伝送レートの向上が予想される。また、現在は機器間の接続としてケーブルを用いた伝送が主に検討されているが、機器の小型化、高集積化などの目的で、バックプレーンシステムへの移行が必要になると予想される。すなわち、高速かつ人工衛星で使用可能なバックプレーンシステムの開発が必要になる。

本稿では、従来200Mbps程度で運用されてきた人工衛星搭載機器で、6.25Gbps級高速信号の伝送を実現するための技術を示す⁽¹⁾⁽²⁾。まず2章で、人工衛星向け高速デジタル伝送技術の課題について述べる。そして、人工衛星搭載用コネクタの伝送特性を評価し、ピンアサインごとに伝送特性が大きく異なることを示すとともに、伝送上最適なピンアサインを決定する。3章では、最適なピンアサインを採用し、さらにパッシブ素子と伝送路で構成した波形補償回路を適用することで6.25Gbpsの高速信号伝送が可能であることをシミュレーションと実測によって示す。

2. 人工衛星向け高速デジタル伝送技術

2.1 人工衛星向け高速デジタル伝送の課題と対策

Gbps級のバックプレーンシステムを構成する上で特に課題となるのが、バックプレーンとデータボードを接続する人工衛星搭載用コネクタのインピーダンス不整合、及び配線の損失である⁽³⁾。特にコネクタの課題は人工衛星搭載機器特有であり、この章で詳しく述べる。配線損失の課題に対しては、波形補償回路によって影響を低減する。

2.2 コネクタの伝送特性

インピーダンス不整合が生じると、信号の反射によって伝送波形に歪(ひず)みが生じる。このため、高速信号伝送では、伝送路のインピーダンスを可能な限り整合させる必要がある。人工衛星に用いる基板間コネクタは、厳しい使用環境条件を満たさなければならない。地上用途では、10Gbps級の伝送が可能な高性能なコネクタが開発されているが、人工衛星搭載用としての認定はされておらず、そのまでの採用は難しい。一方、人工衛星搭載用コネクタは、高速信号伝送を考慮した設計とはなっていないため、人工衛星用機器の信号高速化の妨げになっている。高速信号伝送向けに設計されたコネクタでは、メーカーから指定されたピンの組合せを差動対としてアサインすることで、差動特性インピーダンスが保障される。

これに対し、人工衛星搭載向けのように高速信号伝送が考慮されていないコネクタは、インピーダンスコントロールがなされておらず、ピンごとに電気的な条件が異なるた

め、ピンアサインによってインピーダンスが異なることが予想される。さらに、コネクタは配線と異なり立体構造物であるため、伝送特性の見極めが容易ではない。そこでこの研究では、コネクタの伝送特性を評価する基板を作製し実測評価することによって、伝送上最適なピンアサインを決定した。

2.3 コネクタ評価基板

図1にコネクタ評価基板の構成とピンアサインを示す。評価基板は、バックプレーン及びデータボードを模擬した2枚の基板で構成している。それぞれに人工衛星搭載用コネクタ及び測定用のSMA(SubMiniature version A)コネクタを実装している。今回評価した人工衛星搭載用コネクタは、信号ピンを4列備えており、バックプレーン側はストレート型のレセプタクル、データボード側はライトアングル型のプラグである。

図中のAからCは伝送特性評価用ピンアサインの代表例である。灰色の丸が差動信号ペア、黒丸及び白丸がGND(GrouND)ピンである。ピンアサインA、Bは差動ペアの間にGNDピンをアサインしており、Cは差動ペアを隣接させている。ピンアサインA/Cはデータボード基板に近いためピン長が最も短くなる。反対にBはピン長が最も長くなる。

2.4 コネクタ評価

伝送レートがGbpsを超える高速伝送では、差動信号が用いられる。差動信号の伝送特性は、Mixed-Mode Sパラメータ⁽⁴⁾と呼ばれる指標によって評価される。Mixed-Mode Sパラメータは、通常のSパラメータを数値的に変換することによって得られる。この評価でもMixed-Mode Sパラメータを指標として採用した。図2にコネクタの周波数特性評価の構成を示す。4ポートネットワークアナライザに

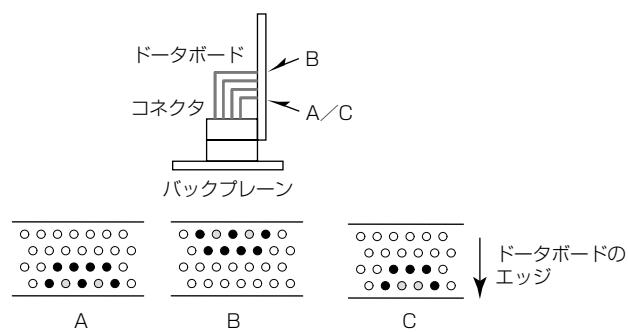


図1. コネクタ評価基板とピンアサイン

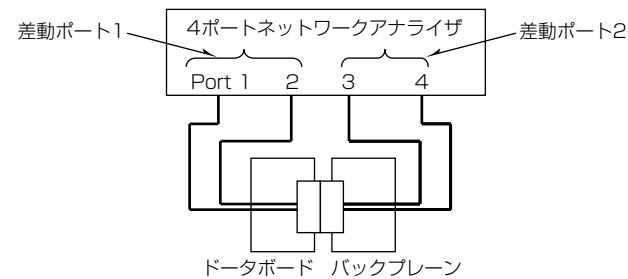


図2. 周波数特性評価の構成

Port1及びPort 2を差動ポート1, Port 3及びPort 4を差動ポート2となるように接続し, AからCのピンアサインに対してMixed-Mode Sパラメータを測定した。

測定結果を図3から図5に示す。図の横軸は周波数, 縦軸はSパラメータの大きさをデシベル表記で表している。図3及び図5の縦軸Sdd11は差動ポート1での反射量で, 小さいほどインピーダンス不整合による反射が小さく, 特性が良いことを意味する。図4のSdd21は差動ポート1から2への透過量で, 大きいほど特性が良い。図3, 図4から, 特に1GHz以降の周波数において, 伝送特性の差が大きくなることが確認できる。コネクタの信号ピン長と伝送特性は相関があり, ピン長が最長となるピンアサインBが伝送特性が最も悪くなる。逆に最短となるピンアサインA

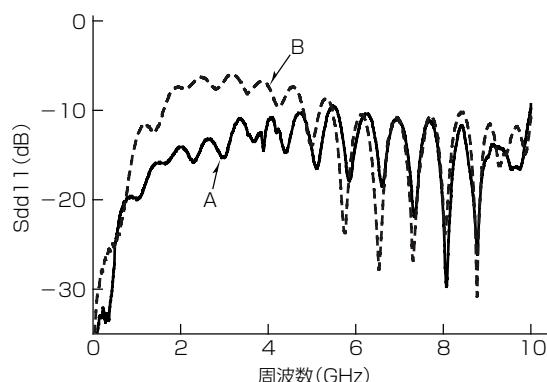


図3. コネクタの反射特性(A, B)

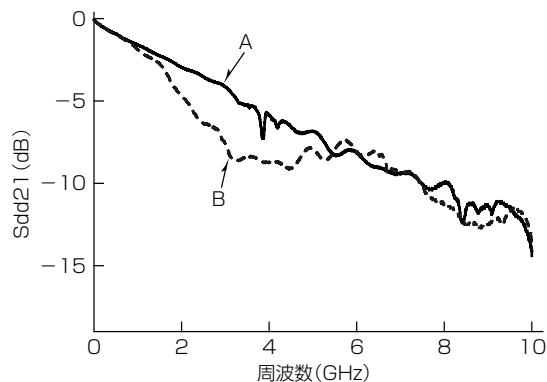


図4. コネクタの通過特性(A, B)

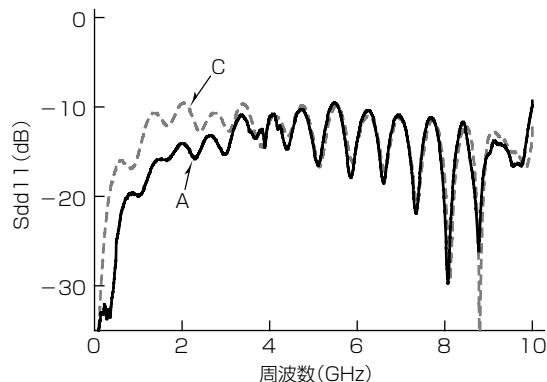


図5. コネクタの反射特性(A, C)

とすることによって, 3GHzにおける通過特性が3.5dB改善される。ピンアサインCのピン長はAと同じであり, グラフには示していないが, 通過特性もAに近く, ほぼ同等の結果であった。一方, 図5の反射特性に注目すると, 差が明確に現れており, CよりもAの方が反射が小さくなっている。これらの評価結果から, 今回評価した人工衛星搭載用コネクタを経由して数Gbpsの高速デジタル信号を伝送させる場合, ピンアサインAが最適である。

3. バックプレーン伝送評価

3.1 試作バックプレーンシステム

2章でGbps伝送を実現する上で最適なピンアサインを明らかにした。このピンアサインを用いることによって, 実際にバックプレーン伝送が可能であるかの検証のため, バックプレーンシステムを試作した。図6にその構成を示す。データ伝送レートは6.25Gbps, ピンアサインはAを採用し, 配線長は30cm, バックプレーン上に集中定数素子と伝送路からなるパッシブの波形補償回路を備えている。この波形補償回路は, 低い周波数ほど損失が大きくなるように設計されている。高い周波数ほど損失が大きくなる配線損失と合わせると, 全体の周波数特性が平坦化し, 波形劣化が抑制される。データボードの片側にオシロスコープを同軸ケーブルを介して接続している。別の片端には信号源としてパルスパターンジェネレータを接続している。この構成によって, 伝送波形を評価する。同時に, この構成を模擬したシミュレーションも実施し, 実測と比較を行う。伝送系のブロック図を図7に示す。

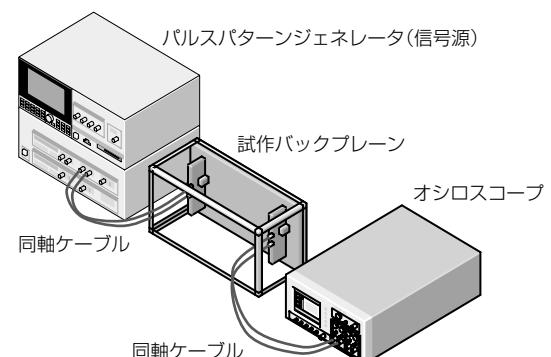


図6. バックプレーン伝送評価の構成

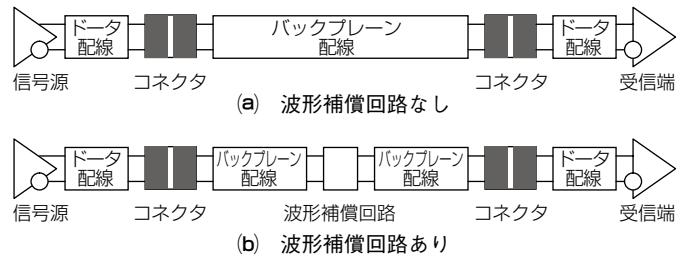


図7. 伝送系ブロック図

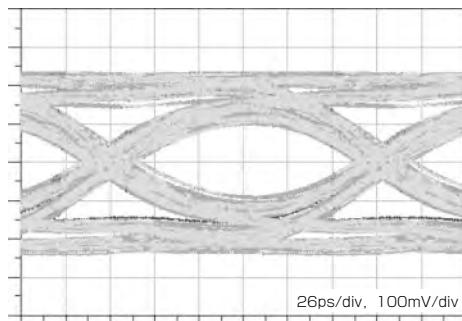


図8. 受信波形のシミュレーション(波形補償回路なし)

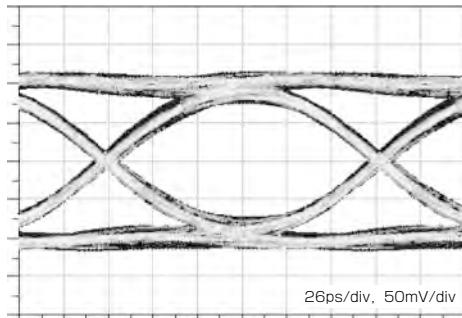


図9. 受信波形のシミュレーション(波形補償回路あり)

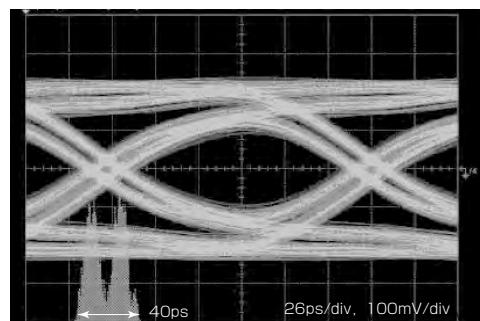


図10. 受信波形の実測(波形補償回路なし)

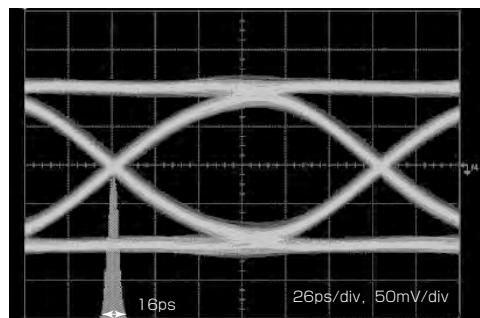


図11. 伝送波形の実測(波形補償回路あり)

伝送波形シミュレーションを実施するには、伝送路上の各要素を高精度にモデル化する必要がある。しかし、高速伝送向けではない部品は、メーカーから解析モデルが提供されなかったり、高周波まで対応していない場合が多い。その場合はユーザー側でモデル化を行わなければならない。この解析では、人工衛星搭載用コネクタについて、2章で示した測定結果からコネクタ部分の等価回路モデルを抽出することによってモデル化を行った。

3.2 伝送波形の評価

図8、図9がシミュレーション結果、図10、図11が実測波形である。図9及び図11は波形補償回路がある場合の波形である。各グラフの横軸は時間、縦軸は差動電圧である。これらの波形はアイパターンと呼ばれており、中央部の開口が大きいほど良好な伝送波形となる。

図10の波形から、波形補償回路を適用しない場合でも、十分に中央の開口が確保されており良好な波形となることが確認できる。波形補償回路を適用すると、更にジッタが約24ps削減される。シミュレーション波形については、実測の波形とほぼ一致しており、モデル化が十分高精度であることを確認できる。今後は、今回作成した解析モデルを用いることで、シミュレーションベースの検討、又は設計が可能となる。

4. む す び

人工衛星向け高速デジタル伝送技術について述べた。一般に人工衛星搭載用コネクタは高速伝送を考慮した設計と

はなっておらず、高速デジタル伝送を実現する上での課題となっている。ピンアサインごとの伝送特性を評価し、最適なピンアサインを採用するとともに、波形補償回路を用いることによって、6.25Gbpsのバックプレーン伝送で良好な信号伝送を達成可能であることを、シミュレーションと実測によって確認した。人工衛星搭載機器は地上機器と比べて、制限が厳しく、高速伝送の観点では不利な条件となっている。しかし、評価、解析、回路、実装といった各要素技術を駆使することによって、人工衛星搭載機器でも、数Gbpsクラスの高速伝送が実現可能である。

参 考 文 献

- (1) Shibuya, K., et al. : Evaluation and Analysis of Connector Performance for the SpaceWire Back Plane, International SpaceWire Conference 2008, 83~86 (2008)
- (2) Nakamura, M., et al. : SpaceWire Backplane with High Speed Spacefibre Link, International SpaceWire Conference 2010, 163~166 (2010)
- (3) Johnson, H. : High-Speed Signal Propagation, Prentice Hall (2003)
- (4) Bockelman, D. E., et al. : Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **43**, No.7, 1530~1539 (1995)

無線メッシュネットワーク対応セキュリティ技術

小林信博*
山口晃由**
村上ユミコ**

Security Technologies for Wireless Mesh Network

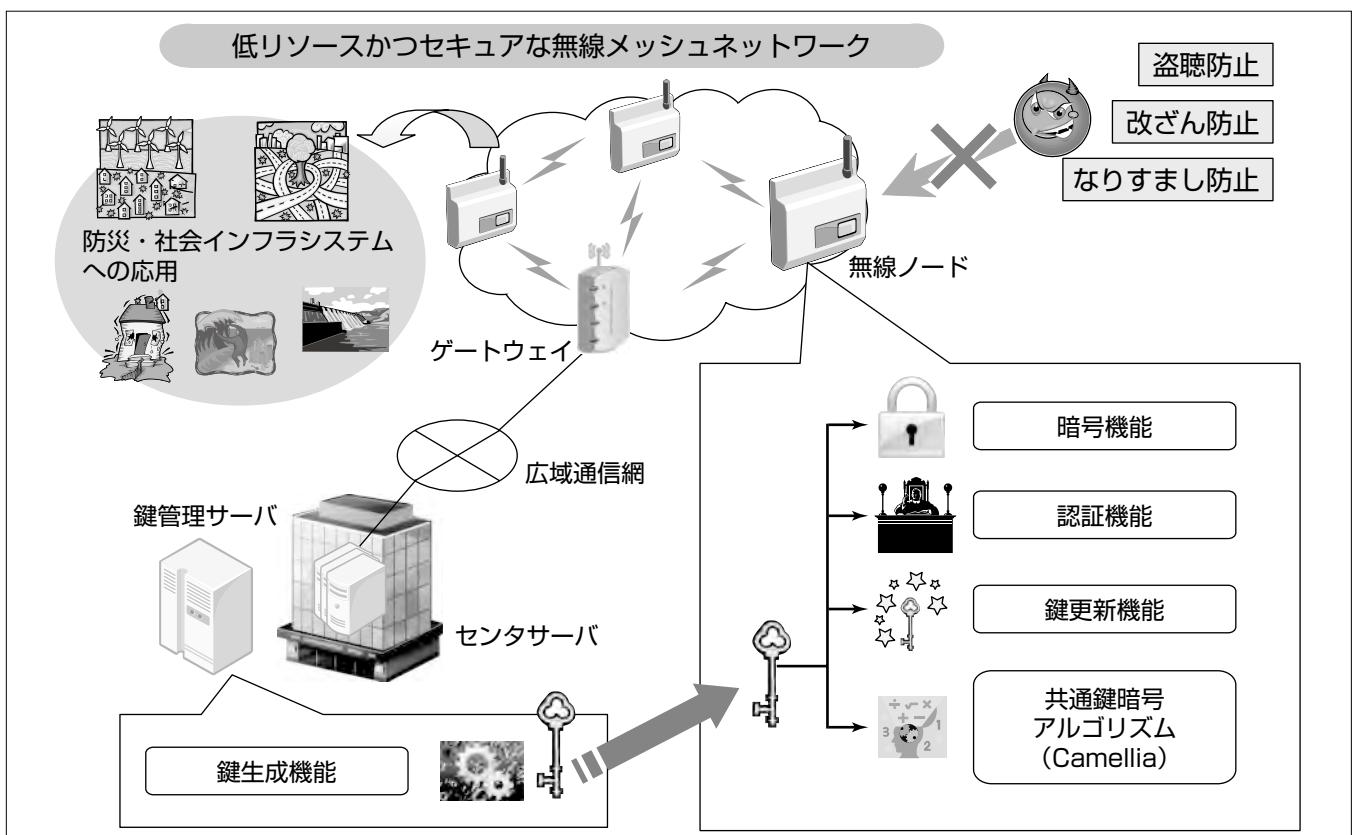
Nobuhiro Kobayashi, Teruyoshi Yamaguchi, Yumiko Murakami

要 旨

近年、災害対策及びスマートグリッド・スマートコミュニティ等の防災・社会インフラ分野において、ワイヤレスセンサネットワークの一つである無線メッシュネットワークを用いたITシステムに期待が高まっている。無線メッシュネットワークシステムでは、多数の小型かつ省電力な無線ノードと一つのゲートウェイが分散配置され、自律的に無線メッシュネットワークを構築するとともに、各無線メッシュネットワークを広域通信網に接続し、センタサーバと無線ノードの連係によって情報収集、分析、制御を行うことが検討されている。無線メッシュネットワークを構成する無線ノードは、演算能力や電力等の限られたリソースの範囲で動作することが望まれる一方、社会インフラ分野へ適用する際には、我々の生活に悪影響を及ぼすおそれ

のある不正アクセスやサイバー攻撃などの脅威に対して、十分なセキュリティが確保されている必要がある。特に考慮すべき脅威としては、無線で送受信するデータの盗聴・改ざん、不正機器のなりすまし、機器の盗難や内部解析による秘密情報の漏洩、暗号鍵の推定・流出等が挙げられる。

本稿では、無線メッシュネットワークの制約条件とセキュリティ要件について整理のうえ、三菱電機における安全性と低リソースの両立を指向したセキュリティ対策技術として、共通鍵暗号アルゴリズム“Camellia”を用いた鍵生成機能、暗号機能、認証機能、鍵更新機能について述べる。この技術によって、安全性を確保しつつ無線ノードの小型化、低コスト化が可能となり、防災・社会インフラ分野への無線メッシュネットワークの適用範囲拡大が期待できる。



無線メッシュネットワーク対応セキュリティ技術

無線メッシュネットワークでは、通信データの盗聴、改ざん、無線ノードへのなりすまし等の攻撃が想定され、セキュリティの確保が必須となる。計算機資源などのリソースが乏しい無線ノードに、当社保有の共通鍵暗号技術を応用した暗号機能、認証機能、鍵更新機能を備え、鍵管理サーバの鍵生成機能によって各無線ノードの鍵を生成することで、低リソースかつセキュアな無線メッシュネットワークを構築することができる。

1. まえがき

近年、災害対策及びスマートグリッド・スマートコミュニティ等の社会インフラ分野で、ワイヤレスセンサネットワークの一つである無線メッシュネットワークを用いたITシステムに期待が高まっている。無線メッシュネットワークシステムでは、多数の小型かつ省電力な無線ノードと一つのゲートウェイが分散配置され、自律的に無線メッシュネットワークを構築するとともに、各無線メッシュネットワークを広域通信網に接続し、センタサーバで情報収集、分析、制御を行う。この無線メッシュネットワークシステムの利用によって、地震や豪雨などの異常現象を的確に把握して避難指示や人命救助につなげる防災基盤の高度化や、地域、施設、住宅での電力需給を最適化することで低炭素化社会の実現につながるスマートグリッド・スマートコミュニティを実現することなどが期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、今後の防災・社会インフラ分野を支えるシステムとして適用する際には、不正アクセスやサイバー攻撃等の脅威に対するセキュリティの確保が必須となる。

本稿では、無線メッシュネットワークの制約条件とセキュリティ要件、そして当社における安全性と低リソースの両立を指向したセキュリティ対策技術について述べる。

2. 無線メッシュネットワークにおける制約条件とセキュリティ要件

2.1 無線メッシュネットワーク

無線メッシュネットワークとは、一つのゲートウェイと複数の無線ノードが、自律的に無線通信を行うことで構築される無線ネットワークのことである。ゲートウェイは無線メッシュネットワークと広域通信網をつなぐ装置であり、広域通信網に接続されているセンタサーバと無線メッシュネットワーク内の無線ノードとの通信を中継したり、無線メッシュネットワークの管理を行ったりする。無線ノードは分散配置され、自身のデータを送受信したり、近隣の無線ノードからのデータを中継したりする(図1)。

2.2 無線メッシュネットワークのセキュリティ要件

社会インフラを支えるシステムに無線メッシュネットワークを適用する場合、次のような脅威にさらされることが想定される。

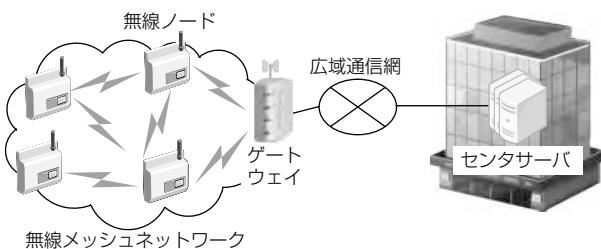


図1. 無線メッシュネットワーク

- ①偽の無線ノードによる、なりすまし
 - ②無線通信データの盗聴による情報漏洩(ろうえい)
 - ③攻撃者による不正データの送信
 - ④暗号化された無線通信データの解読(鍵の推定)
 - ⑤攻撃者による妨害電波の発信
 - ⑥無線ノードを分解、内部の秘密情報(鍵)を不正入手
- このような脅威に対して、次のような対策を行う必要がある。

(1) 認証

攻撃者によるなりすましを防ぐため、ネットワークに参加している無線ノードの正当性を確認するための認証が必要となる。

(2) 暗号化

無線通信によって送受信されるデータには、プライバシー情報などの機密情報が含まれる可能性があることから、情報漏洩を防ぐために暗号化によるデータの秘匿が必要となる。

(3) 改ざん検知

制御情報や収集するデータの完全性を確保するため、通信データの認証によって改ざんを検知する必要がある。

(4) 鍵共有・更新

認証、暗号化、改ざん検知で用いられる鍵の共有と、同じ鍵を使い続けることによって低下する安全性を回復するために鍵の更新が必要となる。

(5) 通信妨害対策

無線通信を利用するため、攻撃者からの不正電波の発信による局所的な通信妨害を根本的に排除することは難しいが、通信チャネルの変更などの対策が考えられる。また、不正データの検出によってネットワーク内の伝播(でんぱ)を遮断するフィルタの導入も必要となる。

(6) 耐盗難性

攻撃者による機器の盗難や内部解析が行われる前提のもと、システム全体の危殆(きたい)化を回避し、可用性を維持可能なセキュリティ方式を採用する必要がある。

2.3 セキュリティ機能実装における制約条件

無線メッシュネットワークシステムを構成する無線ノードは、設置場所に対する制約が少ない反面、物理的に保護されない状況下で攻撃者による盗難や内部解析の脅威にさらされるおそれがある。また、内蔵電池や太陽電池などから供給される限られた電力で動作することが求められる。さらに、コスト上の理由から限られた演算能力とメモリ容量しか与えられない。これら無線ノードにおける制約条件を次に示す。

- ①演算能力が乏しく複雑な処理に時間がかかる。
- ②メモリ容量が乏しく大量のデータが扱えない。
- ③電力が乏しく演算や通信が制限される。
- ④攻撃者からの隔離が難しい。

社会インフラ分野で無線メッシュネットワークシステムを利用する場合には、これらの制約を踏まえてセキュリティを考慮する必要がある。

3. 当社の取組み

当社では、考えうる最高の安全性を追求するのと同様に、限られたリソースの中で必要な安全性を確実に担保することを重視している。無線メッシュネットワークの適用先として想定している防災・社会インフラ分野では、その特質からシステム構築の費用が、最終的な受益者の人々への負担につながることが避けられない。そこで今回は、必要な安全性の確実な担保というポイントにフォーカスし、無線メッシュネットワークにおける制約条件とセキュリティ要件を、リソースに乏しい無線ノードでも実現可能なセキュリティ技術を開発した。

無線ノードに求められるセキュリティ機能のうち、3.1節で認証、暗号化、改ざん検知について、3.2節で耐盗難性について、3.3節で鍵共有・更新について述べる。

3.1 省リソース志向の機器認証と通信データ保護技術

計算機資源などの各種リソースが乏しい無線ノードで、メッシュネットワークへ参加する際の正当性を証明する認証、無線経由の通信データを攻撃者の盗聴や改ざんから保護する暗号化及び改ざん検知の各セキュリティ機能を実現するには、計算量の少ない軽量な暗号技術を利用することが求められる。具体的な暗号技術としては、共通鍵暗号技術やハッシュ関数が該当する。一方で、最新のセキュリティ技術動向に対応した安全性の確保も重要である。システムに用いる暗号アルゴリズム、プロトコルの選定にあたっては、国際標準化団体であるISO/IEC (International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission)、電子政府推奨暗号の安全性評価・監視プロジェクトであるCRYPTREC (Cryptography Research and Evaluation Committees)、米国国立標準技術研究所NIST (National Institute of Standards and Technology)によって公表されている指針・推奨に則することが、防災・社会インフラ分野で重要視される公正な判断に基づく安全性の確保についての証明にもつながる。当社では、共通鍵暗号アルゴリズムの選定にあたり、NIST SP800-57⁽⁴⁾⁽⁵⁾に基づいてセキュリティ強度として128ビット安全性が長期の運用にも余裕を持って耐えうると判断した。そこで、通信データの暗号化及び改ざん検知のために、当社とNTTが共同開発し、既に国際標準規格ISO/IEC 18033-3⁽⁶⁾及び電子政府推奨暗号リスト⁽⁷⁾に採用されている128ビットブロック暗号アルゴリズム“Camellia⁽⁸⁾”を選択し、暗号の利用モードとして、NIST SP800-38C⁽⁹⁾で規定されている守秘・認証用の暗号利用モードであるCCM(Counter with Cipher block chaining-Message authentication code)モードを採用し

た。また、認証のプロトコルとしてISO/IEC 9798-4-4に採用されているThree pass authenticationを用いることで、共通鍵暗号を利用した相互認証を実現した。

3.2 耐盗難性を考慮した無線ノードの鍵生成技術

無線ノードは設置場所に対する制約が少ない反面、盜難などの物理的脅威にさらされており、内部解析による情報漏洩を防ぐためにデータ暗号化などの対策が施される。データ暗号化は入力としてデータそのものほかに鍵を必要とし、多くの場合、この鍵は銀行口座の暗証番号のように第三者には秘密にしておかなければならぬ。すなわち、鍵の情報が漏洩すると、強固に設計された暗号でも安全性が著しく低下してしまうため、暗証番号と同様、第三者が容易に予測できる生成法は避けるべきである。

図2にあるように、鍵の生成には共通鍵暗号アルゴリズムを採用した。この共通鍵暗号アルゴリズムは、先に述べたデータ暗号化処理と本質的に同じである。つまりデータと鍵の入力を必要とする。データ暗号化処理の出力を一般に暗号文と呼ぶが、鍵生成の場合はこの暗号文が、目的の“鍵”となる。この出力された“鍵”と区別するため、図2では入力の鍵はマスタ鍵と表記している。マスタ鍵は、鍵生成者(無線ノードメーカーなど)だけが知る値を用いる。もう一つの入力となるデータには、無線ノードや無線メッシュネットワークの識別子などを用いる。無線ノード識別子を用いた場合は無線ノードごとに異なる鍵が生成され、無線メッシュネットワーク識別子を用いた場合は、同一の無線メッシュネットワーク内の無線ノードは同一の鍵を持つことになる。万が一この鍵が漏洩した場合、同一の鍵を持つ他の全無線ノードに影響が及ぶため、無線ノードごとに異なる鍵を持つことがセキュリティ上望ましいが、これはセキュリティ強度が上がる反面、鍵の管理が煩雑になるため、運用に応じた使い分けが必要になる。なお、図2にあるように、この識別子は、共通鍵暗号アルゴリズムに入力する前に一度ハッシュ関数に通しておき、その出力(ハッシュ値)を共通鍵暗号アルゴリズムの入力データとする。これによって、偏りがちな識別子の分布を散らすことができる。

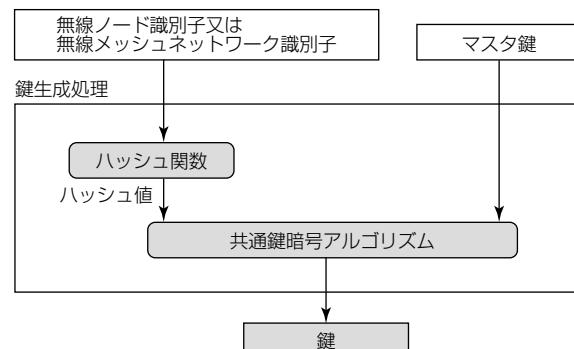


図2. 鍵生成処理の概略

3.3 時刻の非同期を許容可能な暗号鍵の更新技術

無線メッシュネットワークでは、リソースの制約から、事前に共有した共通鍵だけを用いて暗号通信を行う必要がある。同一の共通鍵を長期に使用することは、鍵の推定による危険化を招く。そのため、共有した共通鍵と、無線ノード間で同期したパラメータから一時暗号鍵を生成して通信に用いる必要がある。

ノード間で同期に使用できるパラメータとして、時刻が考えられるが、リソースの乏しいノードでは、高精度な時刻同期を期待できない。NTP(Network Time Protocol)などの時刻同期プロトコルを用いた場合も、時刻同期のパケットを改ざんされるおそれがあるため、同パケットをメッセージ検証する仕組みを別に用意する必要がある。

そこで、各ノードで単調増加のカウンタを保持し、カウンタ値と共通鍵から一時暗号鍵を生成する方式を採用した。カウンタ値の最大値は更新頻度と製品寿命から決定する。タイマによってカウンタをインクリメントすることで、過去に使用した一時暗号鍵を無効化する。また、カウンタ値は、送信パケットに付与される。受信側ノードはパケットの真正性を確認したのち、自身が持つカウンタ値と比較し、パケットの受理判定とカウンタ値の更新を行う。各々のメッセージとカウンタ値は一時暗号鍵でメッセージ検証されるので、カウンタ値だけの改ざんを行うことはできない。また、正規の無線ノードは共通鍵を持っているので、メッセージを否認されても、新しいカウンタ値で再送できる(図3)。

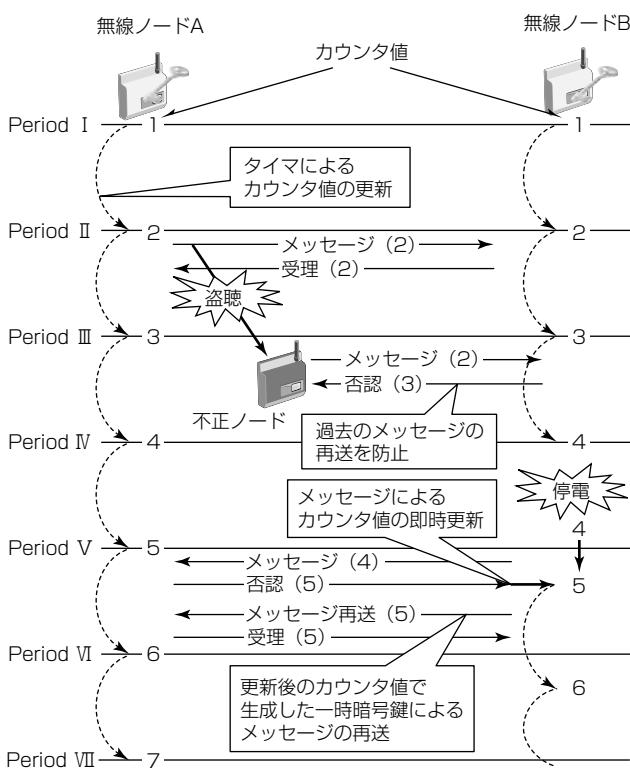


図3. 一時暗号鍵の同期と更新

4. むすび

無線メッシュネットワークシステムの制約条件とセキュリティ要件、そして当社における安全性と低リソースの両立を指向したセキュリティ対策技術について述べた。この技術によって、安全性を確保しつつ無線ノードの小型化、低コスト化が可能となり、防災・社会インフラ分野への無線メッシュネットワークの適用範囲拡大を通じて、地球環境及び社会へのより一層の貢献が実現できるものと考える。

今後も、当社が保有する情報セキュリティ技術と無線通信技術の融合によって、防災・社会インフラ分野を支える次世代システムの実現にむけた技術開発を継続する。

参考文献

- (1) 嶋田 博, ほか:スマートグリッドを支えるネットワーク技術, 三菱電機技報, 86, No.2, 134~138 (2012)
- (2) 三菱電機 ニュースリリース2011年2月16日:スマートグリッド実証実験「自動検針用無線メッシュネットワーク技術」
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2011/0216-a.html>
- (3) 独立行政法人 情報処理推進機構:重要インフラの制御システムセキュリティとITサービス継続に関する調査報告書 (2009)
- (4) NIST: Recommendation for Key Management Part 1: General (Revised), NIST Special Publication 800-57 (2007)
http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-57/sp800-57-Part1-revised2_Mar08-2007.pdf
- (5) NIST: Recommendation for Key Management Part 1: General (Revised 3), NIST Special Publication 800-57 (2012)
http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-57/sp800-57_part1_rev3_general.pdf
- (6) ISO/IEC: ISO/IEC 18033-3 Information technology - Security techniques - Encryption algorithms - Part 3: Block ciphers (2010)
- (7) CRYPTREC:電子政府推奨暗号リスト
<http://www.cryptrec.go.jp/list.html> (2003)
- (8) 三菱電機 ニュースリリース2005年5月26日:128ビットブロック暗号アルゴリズム「Camellia」がISO国際標準規格に採用
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2005/0526-c.html>
- (9) NIST: Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: The CCM Mode for Authentication and Confidentiality, NIST Special Publication 800-38 C (2004)

通信システム向け高品質映像伝送ボード

中田浩志* 松田幸成**
山本好彦* 川畠幸保**
猪股英樹*

High-quality Video Transmission Board for Video Communication System

Hiroshi Nakata, Yoshihiko Yamamoto, Hideki Inomata, Yukinari Matsuda, Yukiyasu Kawahata

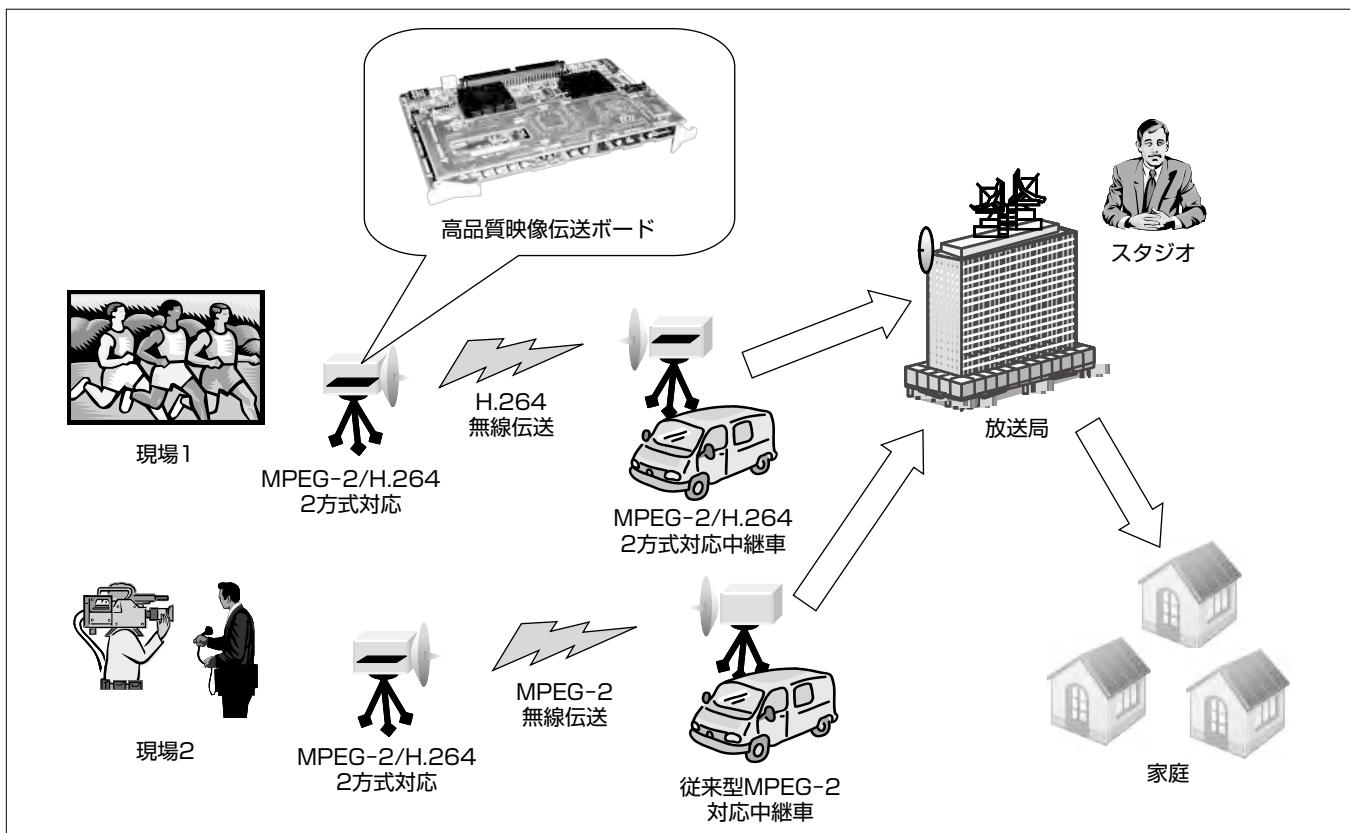
要 旨

テレビ放送や映像通信の分野で、デジタル化、HDTV (High Definition TeleVision)化と大きな変革を迎えており、映像符号化方式はMPEG(Moving Picture Experts Group)-2方式からMPEG-4 AVC(Advanced Video Coding)/H.264方式へ発展し、従来のMPEG-2方式に対してMPEG-4 AVC/H.264方式は2倍の符号化効率を達成している。更なる映像伝送品質の向上が要求される一方で、現場からのライブ中継などでは、撮影機材の取り回しの良さや新旧機器が混在した環境での運用が求められている。

三菱電機ではこのような要求を満たし、機器の小型化、相互接続性を両立させるために、映像符号化方式に従来のMPEG-2方式に加え新たにMPEG-4 AVC/H.264方式へ対

応した高品質映像伝送ボードを開発した。ライブ中継などの通信システムを始め、様々な映像伝送に適用できるように、即時性を高める映像符号化・復号処理遅延10msの超低遅延処理、伝送レートが極めて低い状況でも映像品質を確保する超低レート符号化処理、伝送誤りによる映像の乱れを修復して映像の途切れを抑制する映像復元機能、運用中の障害への対処を迅速にするストリーム蓄積・再生機能等を実現した。

今回開発した映像伝送ボードによって、様々な運用環境であっても伝送品質に応じて最適な映像伝送が実現できるようになる。



ライブ中継の運用イメージ

マラソン中継や取材現場からの中継では、屋内スタジオからの放送のような常設設備ではなく、可搬機材を運搬設置してライブ中継環境を構築して放送することとなる。複数のカメラを用いて中継する際には、サポートする方式が異なる機器が混在して運用される場合もあり、現場での効率的な運用には機動性や相互接続性が高く、伝送エラーに強いシステムが望まれる。

1. まえがき

通信技術と映像符号化技術の向上によって、情報量が膨大な映像をリアルタイムかつ高品質に伝送できるようになり、更なる進歩が続いている。ニュースやスポーツ、災害現場等の臨場感のある映像が現場からライブ中継されることも多くなっている。

当社では映像符号化技術に長きにわたって取り組んでおり、映像符号化の黎明(れいめい)期から映像符号化方式の標準化活動に参画し、その成果を応用した製品を継続して開発している。

映像符号化方式も従来のMPEG-2方式の2倍の符号化効率を達成するMPEG-4 AVC/H.264方式(以下“AVC/H.264”という。)へと発展し、限られた伝送帯域を有効に活用し高画質な映像を伝送可能な映像符号化・伝送装置の開発を行っている⁽¹⁾。

本稿では、現場からのライブ中継などの中継機器に適用可能な映像伝送ボードと適用しているコーデック技術について述べる。

2. 映像伝送ボードの開発

ライブ中継を主なターゲットとしたボード型コーデック(エンコーダ、デコーダ)を開発した。長年培ってきた映像符号化技術を基に専用LSIを開発することで小型化と高性能化を両立させ、伝送帯域の有効活用やサービス向上、システムの機動性向上を実現している。

2.1 ボード型コーデック

このボードは、従来機種の特長であった高画質を踏襲し、さらに、現場での運用効率の向上やライブ中継以外への用途に展開を可能とする次の機能の拡充を図っている。

- (1) MPEG-2, AVC/H.264の映像符号化方式への対応
- (2) 超低遅延符号化・復号伝送
- (3) 超低レート符号化伝送
- (4) 伝送誤りに対するエラーコンシールメント機能
- (5) 伝送ストリームの蓄積・再生機能

映像伝送ボードを図1、主な諸元を表1に示す。

このボードでは既存MPEG-2方式の機器との接続を考慮し、AVC/H.264方式のみならずMPEG-2方式も実装している。これによって、新旧の方式が混在した運用では既存機器が受信可能な方式を選択することで相互接続性を確保でき、現場での運用の幅が増えることになる。また、現場からの中継では伝送状態が不安定であったり、十分な伝送帯域が確保できない状況もある。そのような状況であっても可能な限り滑らかな映像伝送を確保する工夫を行っている。

2.2 H.264エンコーダLSI

AVC/H.264方式は、MPEG-2方式の10倍とも言われる演算量を必要とするため、その実現は容易ではなかった。

そこで、AVC/H.264方式が必要とする演算量を達成するため、H.264エンコーダLSI(図2)を開発した⁽²⁾。主な諸元を表2に示す。

装置の小型化を図るため1チップで実現することを目標

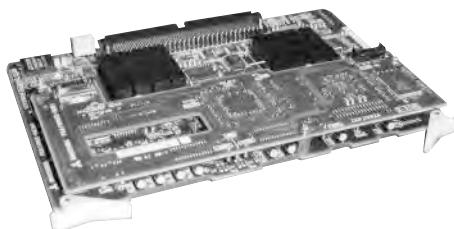


図1. ボード型エンコーダ

表1. 映像伝送ボードの主な諸元

項目	内容
映像符号化方式	MPEG-4 AVC/H.264 High422P@L4.1 MPEG-2 422P@HL, MP@HL, MP@ML 1920×1440×1080i 29.27/25Hz
映像フォーマット	1280×720p 59.94/50Hz 720×480i 29.97Hz 720×576i 25Hz
クロマフォーマット	MPEG-4 AVC/H.264 4:2:0/4:2:2 MPEG-2 4:2:0/4:2:2 ^(注1)
音声符号化方式	MPEG-2 AAC MPEG-1 Audio Layer II PCM (SMPTE 302M)
補助データ	SMPTE 272M, ARIB TR-B22/B23 LTC/VITC
メディア多重	MPEG-2 TS, 最大 160Mbps
遅延時間 ^(注2)	通常遅延: 600ms~ 低遅延(P-only): 100ms~ 超低遅延(P-only): 10ms~
伝送形式	DVB-ASI, 188/204バイト切替
ボードサイズ	180×120(mm)

(注1) エンコーダは4:2:0

(注2) 当社製エンコーダ/デコーダ直結時の処理時間

AAC	: Advanced Audio Coding
PCM	: Pulse Code Modulation
SMPTE	: Society of Motion Picture and Television Engineers
ARIB	: (社)電波産業会
TS	: Transport Stream
LTC	: Longitudinal Time Code
P-only	: Predictive Coded Picture only
DVB-ASI	: Digital Video Broadcasting via Asynchronous Serial Interface
VITC	: Vertical Interval Time Code



図2. H.264エンコーダLSI

表2. H.264エンコーダLSIの主な諸元

項目	内容
最大クロックレート	324MHz
プロセス	90nm 7層メタル
チップサイズ	9×9 (mm)
パッケージ	35×35 (mm), 769ピンPBGA
外部メモリ	DDR2 256M×32ビット

PBGA: Plastic Ball Grid Array

DDR2: Double Data Rate 2

に映像符号化処理の最適化による演算量の削減だけでなく、実装レベルでのゲート数を削減するアーキテクチャなどの高度なASIC(Application Specific Integrated Circuit)設計技術を駆使している。直交変換や量子化、動き探索といった各種符号化ツールごとにプロセッサ処理やハードウェア処理から最適な手法を組み合わせたアーキテクチャ構成によって処理効率を高める工夫を行っている。

3. コーデック技術

映像伝送における実際の運用では様々な状況があり、理想的な映像伝送品質が確保できるとは限らない。どのような状況であっても可能な限り映像品質を保つことでサービスの向上が期待できる。この章では映像伝送を多様な用途へ展開するために新たに開発したコーデック技術を述べる⁽³⁾。

3.1 超低遅延符号化技術

現場のレポーターの映像が伝送されてスタジオに届くまでの時間が長いと、それだけライブ中継における掛け合いで違和感が生じることになる。そのためコーデック遅延を短縮するため、映像符号化・復号処理をピクチャー単位よりも細分化し、装置内部でのデータ転送処理を効率化して、映像の符号化・復号にかかる処理遅延を短縮する技術を開発した(図3)。

映像符号化では映像の特徴に応じて情報量を配分し、映像の類似箇所を探索して差分を伝送するなどの手法で少ない情報量に圧縮している。しかし、ピクチャーを細分化して符号化・復号処理を短時間にする場合、映像の一部だけで映像符号化制御を判定し、細分化した個々の領域の符号化レートが変動しないように一定の範囲内の符号化レートで出力することが課題となる。このボードでは安定した画質を確保するため、高度な符号化レート制御や緻密な処理のスケジューリングを実施することで約10msの超低遅延コーデックを実現した。

3.2 超低レート符号化技術

AVC/H.264方式になって映像圧縮効率が向上したが、HDTV映像を5Mbps以下で伝送することは難しく、防災向け衛星通信などで用いられる1～2Mbpsのような極めて低いレートになると映像の内容によっては映像の動きが

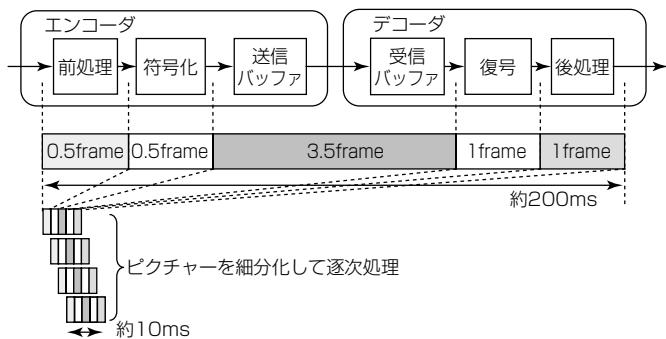


図3. 超低遅延の概念

止まる、ブロック状のノイズが現れる等、符号化処理が破綻する問題が生じてしまう。そこで映像内の動き情報や符号化難易度によって伝送帯域に応じた最適な映像解像度や映像フレームレートを動的に決定し、これらの問題に対処する技術を開発した(図4)。

映像にはその内容によって図5に示すような情報の偏りがあるため、エンコーダ側ではその特徴を利用して映像符号化を制御する。例えば、カメラのパン・チルト等の操作のため動き量が特定の大きさに偏っている場合(図5(a))には、映像解像度を落として符号量を節約し、その代わりに映像フレームレートを維持して滑らかな動きを保持する。また、静止画や高ノイズ映像等で動き量がゼロに集中している場合や偏りが見られない場合(図5(b))には、映像フレームレートを落として符号量を節約することで符号化効率を高めている。また、デコーダ側では超解像技術によって映像の精細感を高めて低レートでの映像劣化を改善している。

3.3 エラーコンシール技術

映像符号化の弊害として、伝送路上のエラーによるビット誤りが復号結果に多大な影響を与え、視覚的にも悪い印象となることが挙げられる。従来は復号エラーによる映像の乱れを回避するためピクチャー単位にフリーズして正常に復号された映像だけを繰り返し出力するようにして対処しており、映像の動きが途切れることになっていた。このボードでは復号エラーがあっても映像の特徴に応じて適切に補正するエラーコンシールと呼ばれる元の映像を再現する技術を実装している。これによって映像の動きを維持して伝送エラーの影響を軽減する効果を実現している(図6)。

映像符号化では映像間の相関を利用して符号化すること

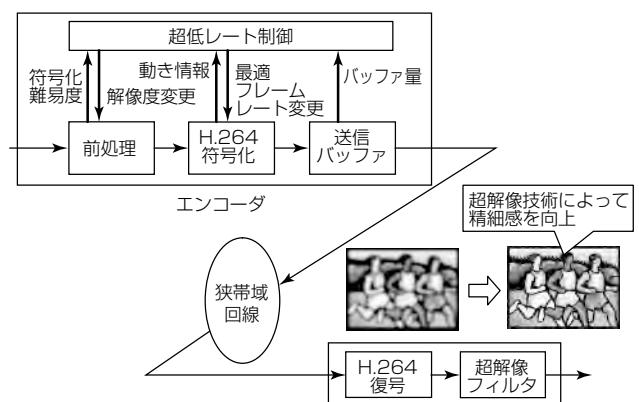
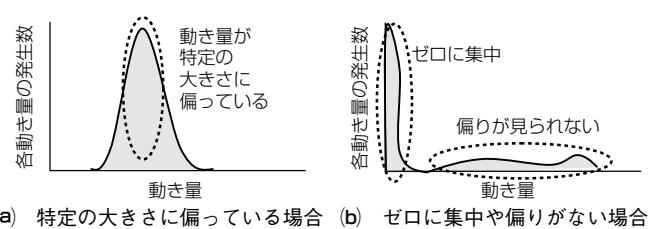


図4. 超低レート符号化の概念



(a) 特定の大きさに偏っている場合 (b) ゼロに集中や偏りがない場合

図5. 映像内の動き量の偏り

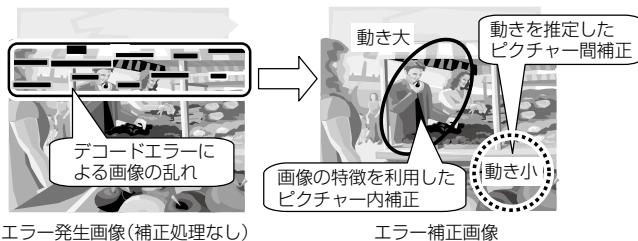


図 6. エラーコンシールの概念

で情報量を圧縮しており、単独で符号化したピクチャーをIピクチャー、過去のピクチャーを参照して差分を符号化したピクチャーをPピクチャー、過去と未来の両方のピクチャーを参照して差分を符号化したピクチャーをBピクチャーと呼ぶ。複数ピクチャーからの差分を利用するため、図7のように差分の元になるピクチャーに復号エラーが発生して正しい映像が得られなかった場合、そのピクチャーを参照するピクチャーもまた正しい映像とならず、復号エラーが伝播(でんぱ)してしまう。例えば、映像の符号化構造によってIピクチャーが0.5秒周期であった場合、最大0.5秒間にわたってエラーが伝播することになるため、従来はそのエラー伝播期間中には映像をフリーズ表示していた。

このボードでは映像の動きを維持するため、復号エラーによる映像乱れを修復し、復号エラーの伝播を抑制するように復号処理を制御する機能を実装している。

例えば、映像の動き量が小さい領域に対しては隣接するピクチャーとの違いが少ないと利用して隣接ピクチャーの類似部分を用いて修復し、映像の動き量が多い領域に対しては同一ピクチャー内の近接部分の映像を用いて修復する。このような制御を複数のマクロブロック単位で適応的に実施し映像補正の精度を高めている。

また、復号エラーの伝播抑制についても、動き量に応じて隣接ピクチャーを用いるか自ピクチャーを用いるかを適応的に切り替えている。隣接ピクチャーを用いた修復は、対象がPピクチャーの場合には自ピクチャーの動き情報を基に直前のI/Pピクチャーから修復を行う。修復対象がBピクチャーの場合には直後のPピクチャーの動き情報を基に前後のPピクチャーから修復を行ってエラーの伝播を抑制している。

3.4 ストリーム蓄積・再生技術

テレビ放送中に映像途絶などの障害が発生した場合には放送事故として重大な問題として取り扱われる。そのため、障害を発生させないことが前提となるが、障害発生の際には原因究明や対策に向けたすみやかな対応が必要となる。障害原因を特定する手段の一つとして受信ストリームの解析が有効であり、デコーダ側では受信ストリームの蓄積・再生機能を実装している。重大な障害が発生した箇所に限定して受信ストリームを取り込むことで、解析作業を容易にするとともに、実装面(コスト、サイズ)でも有効である。デコーダ側では映像伝送を妨げずに記録するため、図8

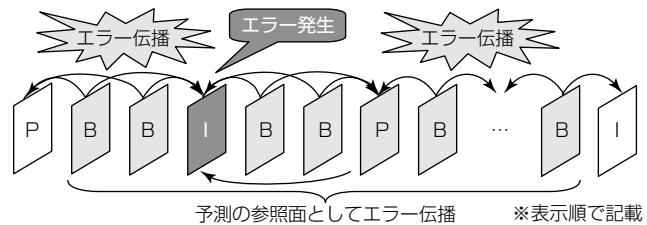


図 7. 復号エラーの伝播

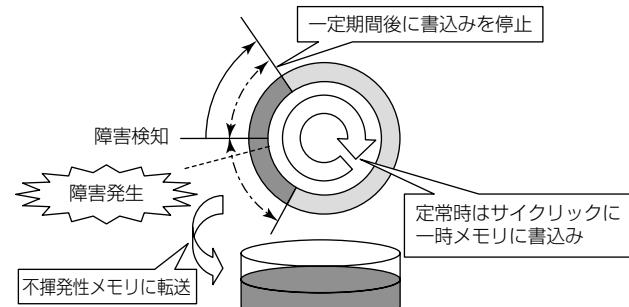


図 8. エラー時のストリーム記録

のような処理フローによって自動的に障害を含む受信ストリームを蓄積できるように制御している。

- (1) ストリーム受信とともに一時メモリにサイクリックに保存を継続
- (2) 障害検知時には障害箇所前後のストリームを保存するように保存タイミングを制御
- (3) 電源再投入や再起動後でもストリームの解析ができるようにストリームを不揮発性メモリへ書き込み処理
- (4) デコーダ内部で簡易な解析ができる自律的な復号・表示制御
- (5) 詳細な解析時には保存ストリームを取り出し
これらによって発生頻度の少ない障害の分析が容易になり、原因究明に要する時間の大幅な短縮が可能となる。

4. む す び

現場からのライブ中継を担う通信システムで、運用効率や機動力の向上を可能とする高品質映像伝送ボードを開発した。引き続き、これまでに培った映像符号化・伝送技術を更に発展させて、放送業務や映像監視等の映像伝送サービスへ貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 猪股英樹, ほか: H.264HDTVコーデック技術, 三菱電機技報, 82, No.12, 747~750 (2008)
- (2) 本山信明, ほか: H.264/AVC High422P@L4.1対応1チップHDTVエンコーダLSIの開発, 映像情報メディア, 63, No.12, 1860~1867 (2009)
- (3) 本山信明, ほか: H.264/MPEG-2ビデオデコーダの開発(1)~(4), 電子情報通信学会総合大会, D-11-55~D-11-58 (2012)