2. ブロードバンドネットワークの構成技術

2-1. xDSL技術

山野 誠一[†]

キーワード ● ADSL, VDSL, xDSL, メタリック線路

1. ま え が き

xDSLは、1対(2W)の電話線を伝送媒体とするデジタル加入者線伝送方式(Digital Subscriber Line)の総称であり、IDSL(ISDN), HDSL, ADSL, SDSL, VDSL等がある。インターネット常時接続においては、初期のIDSLに代わりADSLとVDSLが中心的に導入されてきており、ADSLは日本国内で1,200万回線を超え、VDSLはFTTB(Fiber to the Building)のラストワンマイル(見る側の違いでファーストマイルとも言われる)として、主に、既設集合住宅内で用いられている。本稿では、最近のADSLとVDSLの高速化技術と今後の課題について展望する。

2. 高速化技術

ADSL, VDSLともに高速化が進行している。図1および表1に高速化技術動向をまとめた。以降、これを参照しつつ論じる。伝送速度Cbpsは、使用帯域WHz(=1/s)とローディングビット数bbitに比例し、 $C=b*W$ で定まるため、送信PSD(Power Spectrum Density)使用帯域(W)の広帯域化が高速化技術の主である。また、最大ローディングビット数(b)向上の実装努力もされており、ADSLの場合15ビット/キャリアから18ビット程度/キャリアへ、VDSLの場合、10ビット/キャリアから12ビット超/キャリアへの向上が進んでいる。

2.1 ADSL

- (1) 下り帯域については、1.104MHzをシングルスペクトルと定義呼称し、1.104MHz*2をダブルスペクトル(ADSL+), 1.104MHz*4をクアッドスペクトル(ADSL++)と呼んでいる。ただしクアッドスペクトルについては、VDSL1の上り帯域US1が3.75MHzから開始するため、これとの近端漏話干渉を避けるため、上限周波数を、4.416MHzではなく3.75MHzと定めている。これらの下り帯域拡張(図1)に併せ、上記ローディングビット数の向上により、最大伝送速度は倍々化している(表1)。他に、上り帯域も下りに使用するオーバーラップ技術(エコーキャンセラ技術)

も、1~2Mbps程度の速度向上に寄与している。

- (2) 上り帯域についても同様に、138kHzをシングルスペクトルと定義呼称し、138kHz*2をダブルスペクトル(EU: Extended Upstream), 138kHz*4をクアッドスペクトル(EU+)と呼び、下り帯域とのオーバーラップ技術(エコーキャンセラ技術)により、最大伝送速度は、倍々化している。この上り帯域拡張については、隣接回線に収容される他のADSL回線に近端漏話干渉を及ぼし、下り速度低下の原因となることが懸念され、情報通信技術委員会(TTC)で、長期の技術論争を費やしたが、最近、決着し、適用距離制限の条件付で導入が開始されている。
- (3) ADSLのU点上伝送フレームにおけるATMヘッダ圧縮技術(ATM-HC: Header Compression)も導入されている。これにより、ラインレートは同一でもペイロードレートは、53/50=1.06倍と、6%の向上が可能となっている。
- (4) 上述の短距離高速化の技術とは別に、長距離化の技術も検討されている。下りスペクトラム上限周波数をハーフスペクトル以下の300kHz程度以下とし、送信レベルを20dBm制限以内でブーストすることにより、長距離時の受信信号減衰を軽減しようとする方式である。

2.2 VDSL

- (1) ITU-Tにおける変調形式に関わる長期の技術論争が、DMT/QAM両方標準化で決着し、2004年1月に、12MHz以下を使用帯域とするVDSL装置標準G.993.1が標準化された。これをVDSL1と呼称している。同時に、30MHz以下を使用するVDSL装置標準の検討開始が決定され、この変調形式は、DMTのみと定められた。これをVDSL2と呼称している。12MHz以下のVDSLバンドプランについては、上記G.993.1の一部としてすでに標準化済であったため、日本国内においては、G.993.1 Annex A(バンドプランAと呼称され、そのFTTB用のPSD規定を含む日本仕様がG.993.1 Annex F)を用いて、上記の変調形式の標準化を待たずに、集合住宅内での導入が進行していた。実装装置には、下り50Mbps超を提供可能なDMT/QAMの両方が存在しており、結果として両者ともにG.993.1標準準拠となった。なお、TTCにおいて、バンドプランAの採用が最近、合意されている。
- (2) 最近では、すでに、30MHz以下を使用するVDSL2標

[†] NTTアドバンステクノロジー株式会社

"Configuration Technologies of Broadband Networks: xDSL Technologies" by
Seiichi Yamano (NTT Advanced Technology Corporation, Tsukuba)

図 1 xDSL送信PSD使用帯域の推移

表 1 xDSL送信PSD使用帯域と装置実現最大速度

項 目	スペクトル俗称	下 り		上 り		変調形式
		使用帯域	装置実現最大速度	使用帯域	装置実現最大速度	
ライトADSL	ハーフスペクトル	138~552kHz	4 Mbit/s	—	—	DMT*1
ADSL	シングルススペクトル	25/138~1104kHz	12Mbit/s	25~138kHz	1.2Mbit/s	
ADSL+/EU	ダブルスペクトル	25/138~2208kHz	24Mbit/s	25~278kHz	3Mbit/s	
ADSL++/EU+	クアッドスペクトル	25/138~3750kHz	47~50Mbit/s	25~483kHz	5Mbit/s	
-/EU++	—	—	—	(25~138kHz) +(3.75~5.2MHz)	10Mbit/s	
VDSL1	バンドプランA*2	計6.41MHz	55Mbit/s	計4.95MHz	30Mbit/s	DMTおよびQAM*3
VDSL1+	バンドプランA拡張*4	計10.41MHz	70~80Mbit/s	同 上	30Mbit/s	DMT
VDSL1++	バンドプランA拡張*5	計11.11MHz	100Mbit/s	同 上	35Mbit/s	
VDSL2	バンドプランA (12MHz以下) 未 定 (12~30MHz)	未 定 (計11.11MHz以上)	100Mbit/s超*6	未 定 (計5.202MHz以上)	100Mbit/s*6	DMT

* 1 : Discrete Multi Toneの略。Toneとは、QAM信号のキャリアのこと。(4.3125*n) kHz (nは整数)の複数のキャリアを用いて送信する複数QAM方式。

* 2 : G.993.1 Annex Aのこと。G.993.1 Annex F(FTTB用日本仕様)は、これと同一。

* 3 : Quadrature Amplitude Modulationの略で、直交振幅変調。単一キャリアである。DMTのToneごとの変調形式もQAMである。

* 4 : G.993.1 Annex F(12MHz以下)に、DS帯域として12~16MHz(DS3)を追加。

* 5 : G.993.1 Annex F(12MHz以下)に、DS帯域として12~16.7MHz(DS3)を追加。

* 6 : 実現装置未。サービス仕様からみた期待値。

(注): 項目内の略号類は、筆者独自を含む。

準化を待たずに、16MHzまでを使用帯域とするVDSL1+、さらには、16.7MHzまでを使用帯域とするVDSL1++が、集合住宅内で導入されており、下り100Mbpsを提供可能なVDSL1++が現在の主流である。実装装置の変調形式は、現在DMTが主である。VDSL2のバンドプランの標準化検討がなされているが、日本仕様としては、12~XMHz (X未定だが16.7以上)をDS3とすることが、最近、ITU-Tにおいて合意されており、VDSL1+、VDSL1++の使用帯域は、VDSL2標準準拠となる予定である。16.7MHz以上の利用については、標準化動向への留意が望まれる。

- (3) VDSL2は、大は小を兼ねるの理から、既存ADSLの包含とVDSL1の更なる短距離高速化の二面を有している。当面は、経済的実装の制約から、12~17.664MHz ($=4.3125\text{kHz} \times 2^{12}$) 以下を使用帯域とする装置と、30MHz以下を使用帯域とする装置に、二分される傾向が窺える。前者は、FTTcab (Fiber to the Cabinet) あるいはFTTR (Fiber to the Remote terminal) (1.5km超程度)を当面の主ターゲットとする欧米市場向けであり、後者は、FTTB (200~300m)ですでに競争状態にある日本市場向けと想定される。

2.3 HomePNA等

一般宅内のEthernet-LAN配線手段としては、無線LANが良く知られているが、既設2W宅内電話配線を使用するHomePNA V.2 (10Mbps)、HomePNA V.3 (100Mbps)も装置化されている。

3. 高速化限界

図2は、利用可能なPSD周波数範囲の目安を得るべく、線路距離をパラメータに、同下図に、25k~30MHzの周波数に対してローディング可能なビット数を試算したものである。同上図には、線路によって減衰を受けた受信PSDを併せて示している。同図から概ね、30MHzは350m、12MHzは600m、3.75MHzは1.5km、2.208MHzは2km、1.104MHzは3km、552kHzは5km程度となる。この時、装置の信号入力ダイナミックレンジは、72~78dBが必要とされる。図は略すが、漏話による制限はもっと厳しくなり、適用可能距離は概ね半減する。

4. 今後の課題

- (1) 局からのADSL (FTTEx: Fiber to the Exchange)、ユーザビル内のVDSL (FTTB)、さらには今後、RT (Remote Terminal) からのADSL/VDSL (FTTCab/FTTR)と、3種類の収容形態が、同一ケーブルユニット内に混在して収容され、相互に漏話干渉を及ぼしあうことが懸念されている。事業者の運用対処も必要であるが、相互干渉を軽減可能なスペクトラム利用技術の検討が必要である。

図2 受信PSDとローディングビット数

- (2) VDSL程度に使用周波数が高くなると、漏話による制限が大きくなり、メタリック線路の利用限界に近づいている。同一ケーブルユニット内各対 (10対程度)の使用帯域割当を可変制御し、また、同一ユニット内各対間の漏話をキャンセル (マトリックス方式)することによりメタリック線路の利用効率を極大化する方式としてDSM (Dynamic Spectrum Management) が提唱されている。

5. むすび

xDSLについて、最近の技術動向を概略した。ADSL登場時の変調形式、誤り訂正技術の目新しさは失せ、帯域有効利用技術として、エコーキャンセラ、さらには、漏話キャンセラ、動的周波数配置までが検討され始めている。ブロードバンドのキラーアプリケーションの一つとして新たな映像サービスが模索されており、また、ネットワークのQoS化も進展している。今後の映像ブロードバンド技術の発展に期待したい。

(2004年8月16日受付)

[文 献]

- 1) 山野, 堀, 三好, 松本: "xDSLアクセス技術", 信学誌, 84, 2, pp.84-91 (Feb. 2001)
- 2) 山野: "xDSL技術", 映像学誌, 57, 5, pp.532-534 (2003)

山野 誠一 1975年、早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1977年、同大学院修士課程修了。同年、NTT横須賀電気通信研究所入所。以来、メタリック系デジタル伝送方式の研究開発に従事。2004年、NTTアドバンステクノロジー(株)に移籍。現在、メタリックアクセス技術センタ所長。

2. ブロードバンドネットワークの構成技術

2-2. 光アクセス技術

枝川 登†

キーワード ● 光アクセス, FTTH (Fiber to the Home), PON (Passive Optical Network), マルチキャスト, IP放送, 光アナログ伝送

1. ま え が き

光ファイバ通信技術は基幹系通信網を支える伝送技術として近年急速に進展し、10Gbpsの光信号を波長多重することにより、光ファイバ1本で、Tbps級 (T=tera: 10^{12}) の超大容量通信が行える長距離光伝送システムがすでに商用化されている。その結果、最近、通信コストの低減が強く要求されるアクセス系においても、Gbps級の高速光通信技術が広く利用可能となりつつある。また、最近では、FTTH (Fiber to the Home) 網を用いたCATVサービスの検討も進んでいる。本稿では、このように進展著しい最近の光アクセス技術について概説する。

2. ネットワーク構成

図1に、ブロードバンドサービス用の典型的な有線系光アクセスネットワーク構成である、Single Star (SS), Passive Double Star (PDS), および、Active Double Star (ADS) の構成概念を示す。なお、PDSは一般的にPassive Optical Network (PON) と呼ばれることが多い。本章では、各構成の概略を示す。

2.1 SS

SSは、最寄りの設備センタから各ユーザに対して放射状 (スター状) に個別に光ファイバが提供される形態で、同種のネットワーク形態である従来の電話/ADSLシステムと同様に、運用保守が容易で、各ユーザへのサービス提供内容を個別に容易に変更できる (例えば、回線速度の増速) という利点がある。ユーザとの通信にはMedia Converter (MC) と呼ばれるPoint-to-Point通信用の光伝送装置が使用され、100Mbps (Fast Ethernet: FE) や1Gbps (Gigabit Ethernet: GbE) の全二重高速回線を実現している。一般に光ファイバ通信では光信号波長に1300nm帯や1500nm帯を用いることが多く、MCでもそれらの波長が使用される。表1に標準化されているPoint-to-Point通信用光信号波長を示す。SSでは、ユーザ毎に通信設備と光ファイバが必要となるため、ユーザ数が増加するとその経済性が課題となる。

†株式会社KDDI研究所 光アクセスネットワークグループ
"Optical Access System Technologies" by Noboru Edagawa (Optical Access Network Laboratory, KDDI R&D Laboratories, Inc., Kamifukuoka)

図1 光アクセスネットワーク構成例

表1 一心双方向型Point-to-Point用光アクセス通信機器の信号波長

規 格	上り回線	下り回線
TS-1000 (TTC)	1260~1360nm	1480~1580nm
100BASE-BX10 (IEEE 802.3ah)	1260~1360nm	1480~1580nm
1000BASE-BX10 (IEEE 802.3ah)	1260~1360nm	1480~1500nm

表2 B-PON, G-PON, GE-PONの特徴

項目	GE-PON	G-PON	B-PON
標準	IEEE 802.3ah	ITU-T (G.984)	ITU-T (G.983)
収容サービス	Ethernet	Ethernet, TDM, POTS	Ethernet, TDM, POTS
フレーム	Ethernetフレーム	Genericフレーム	ATM-53バイトセル
データ速度	上り:1 Gbps 下り:1 Gbps	上り:156M/622M/ 1.25G/2.5Gbps 下り:1.25/2.5Gbps	上り:156/622Mbps 下り:156M/622M/ 1.25Gbps
分岐数(物理/論理)	16分岐以上	64/128分岐	64/64分岐
伝送距離(物理/論理)	10, 20km以上	10, 20km/60km	10, 20km/20km
信号波長	上り:1260-1360nm 下り:1480-1500nm	上り:1260-1360nm 下り:1480-1500nm	上り:1260-1360nm 下り:1480-1580nm (G.983.1) 下り:1480-1500nm (G.983.3)
FEC機能	オプション	オプション	なし

2.2 PDS/PON

PON (PDS) は、設備センタからスター状に出ている光ファイバの先に、光スプリッタと呼ばれる合分波用光部品を接続し、さらに、その先にスター状に光ファイバを展開するダブルスター線路形態をとることにより、1台の局設備で複数のユーザ（例えば、32）を収容することができる。光スプリッタは能動素子を含まないため給電が不要であり、このため本構成は「Passive」と呼ばれる。PONでは、上り回線と下り回線に異なる波長の光信号を用いて全二重通信回線を提供しているが、複数ユーザが同じ光ファイバを共有しながら効率的で安全な通信を行うための特殊な通信技術が必要で、その詳細は次章で説明する。PONはSSよりも所要光ファイバ量やセンタ設備容積が少ないので、今後の主流ネットワーク構成と考えられている。ただし、光信号パワーが光スプリッタでユーザ数に応じて等分されて減少するため、ユーザ数が増えると伝送距離に制約が生じる場合がある。

2.3 ADS

ADSでは、設備センタからスター状に出た各光ファイバの先に、給電が必要な能動（Active）機器（遠隔多重装置）を接続し、その先にさらにスター状に光ファイバやメタル線を接続し、各ユーザを収容する。例えば、設備センタと集合住宅を光ファイバとMC（FEやGbE）で接続し、集合住宅内の各ユーザは遠隔多重装置にVDSL（2-1章参照）を用いて収容する、という構成がある。

3. 映像配信技術

ブロードバンド光アクセス網における映像伝送の多くは、MPEG-TSなどのデジタル映像信号をIP網などのデジタルデータ通信路を使って伝送する場合と、ケーブルテレビ信号をそのまま光信号化する、光アナログ伝送技術を用いてユーザまで放送配信する場合とに大別される。本章では、各方法の概要を説明する。

3.1 光デジタル伝送

前記のようなデジタル映像伝送には、IPテレビ電話、

放送サービス、VODなどのさまざまな用途が考えられるが、映像信号が他のデータ信号と伝送路を共有しても良好な通信品質（例えば、低パケット損失、低ジッタ、低遅延など）を確保できる通信技術が重要となる。SSでは、ネットワーク構成が単純なので光アクセス部分（MC部分）で映像信号のための特別な処理は行われない。ADSでは、VDSLなどがそれらのトラフィック制御を行う（2-1章参照）。PONシステムでは、多数のユーザの高速トラフィックを1台のセンタ設備が制御する必要があるため、種々の高度な技術が用いられる。PONシステムには、すでに商用サービスに適用されているB-PON（Broadband PON）¹⁾と、その高機能化版であるG-PON（Gigabit-capable PON）²⁾、および、現在開発中のGE-PON（Gigabit Ethernet PON、海外では単に「E-PON」とも呼ばれることが多い）³⁾などがある。

表2にその概要を示す。

本節では、次期主力PONシステムと見込まれるGE-PONを例にとり、PONシステムのしくみについて概説する。

(1) PONシステムにおける信号伝送/MAC技術

図2に、PONシステムにおけるユーザトラフィック処理の概念を示す。センタ側の設備はOLT（Optical Line Terminal）、ユーザ側の設備はONU（Optical Network

図2 PONシステムのしくみ

Unit) と呼ばれる。GE-PONでは、電源投入済みのONUは、PONシステムに接続されるとDiscoveryプロセスを経て自動的にOLTに認知されるようになっている。

図3に、GE-PONで使用されるMACフレーム構成を示す。プリアンブル部に含まれるLLID (Logical Link ID) は、PON区間におけるOLT-ONU間の通信をONU毎に個別に管理するために導入された識別子であり、ブロードキャストLLIDなどの例外を除き、各LLIDは、原則的に固有のONUに対応付けされている（注：一つのONUが複数のLLIDに対応することは可）。その結果、下り回線の光信号は全ONUに到達するが、LLIDにしたがって受信した光パケットの中から当該ONU宛のフレームを選別し、ユーザ側に出力することができる。上り回線は、OLTからの指示に従い、各ONUが光信号をOLT側に出力することにより、PON区間内での光信号間の衝突を回避している（TDMA：Time-Division Multiple Access）。

ONU-OLT間の伝送損失は一般的にONU毎に異なるので、OLTには光強度の異なる光信号が次々に到達する。GE-PONシステムでは下り回線/上り回線の最大速度が約1Gbpsと高速なので、OLTの光受信機では、各ONUから到達する光信号に応じて光受信回路のパラメータを瞬時に調整し、速やかに同期が確立できるよう、非常に高度な光受信技術（バーストレシーバ技術）が適用されている。また、ONUの光送信機には、OLTからの指示に合わせて瞬時に光信号をON/OFFできるような高度な制御技術が適用されている。アクセス系の光ファイバには、標準的なシングルモード光ファイバ（SMF）が使用されるため、コスト低減要求が厳しいONUの光源波長（上り回線）には、安価な光源でもSMFによる群遅延歪みの少ない1310nm帯が用いられる。OLT用光源波長（下り回線）には、上り回線との分離が容易となるように1490nm帯が適用されている。正常な光リンクにおける符号誤り率は 1×10^{-12} 以下であり、高品質で安定したデータ伝送が保証されている。最近では、光送受信技術の進展により、設備センタから20km程度離れた32個のONUを収容できるGE-PONシステムの開発も進

んでいる。GE-PONでは、将来的に、Reed-Solomon符号を用いたFECを光リンクに導入し、光リンクのロスバジェットを増大することが計画されており、収容ONU数のさらなる拡大が期待される。

(2) PONシステムにおけるトラフィック制御技術

最近のPONシステムでは、各フレームに付与されたTOS (Type of Service) やCoS (Class of Service) による優先制御 (QoS：Quality of Service) が可能で、各種のVLAN機能にも対応している。また、ONUのユーザ側出力回線速度がFEでPON区間回線速度のGbEと大きな速度不整合があっても、バースト信号でパケット損失が発生しないように、OLTが強力なトラフィックシェイピング機能を有している場合もある。さらに、上り回線帯域を有効利用できるよう、ONUがOLTに送出するトラフィック量に応じてONUに割当てるタイムスロット量を調整する、動的帯域制御 (DBA：Dynamic Bandwidth Allocation) 機能が具備されている。例えば、GE-PONシステムでは、OLTが、各ONUから定期的に通信予定のトラフィック量の申告を受け付け、申告された全トラフィック量や申告されたトラフィックの優先度を考慮して、LLID毎に所定のタイムスロットを付与している（すなわち、長いタイムスロットを割当てられたONUは多くのトラフィックをOLTに送出できる）。また、ONUが複数のLLIDをサポートしている場合は、OLTがLLID毎に申告頻度を制御することにより、高度なDBAが可能となる。

PON区間におけるセキュリティは、GE-PONシステムではAES (Advanced Encryption Standard) 等を用いた暗号化によって確保されている。また、GE-PONシステムでは、802.1xなどの各種認証方式もサポートしている。映像配信に関しては、OLTおよびONUでIGMP Snooping機能をサポートしているPONシステムがあり、IPマルチキャスト方式による映像配信が行える。PONシステムでは、上記のような種々の機能を利用して高精度なトラフィック制御が行えるので、きめ細かなSLA (Service Level Agreement) 設定による帯域保証が可能で、バースト性の高いインタネッ

ト系の大容量トラフィックとデジタル映像信号がOLTで混在しても、高品質な映像サービスを提供できる。

3.2 光アナログ伝送

ケーブルテレビ信号をそのまま伝送できる光アナログ伝送技術で映像配信する場合は、CATVで実績のあるSTBが使えるという利便性がある。ブロードバンド用光アクセス網でこのような映像光信号の配信を行う場合、映像伝送専用の光ファイバを用いる方法と通信用光ファイバを利用する方法がある。前者では映像光信号波長は自由に選択できるが、後者では、映像光信号と下り回線通信光信号とを波長多重して伝送するため(図4)、映像光信号波長の選択に制限が生じる。下り回線波長を1480nm～1500nmとする最近のPONシステムでは、映像光信号波長を1550nm～1560nmとする場合が多い。

PONシステムで映像光信号を波長多重伝送する場合は、V-ONUには通信光信号が、ONUには映像光信号が混入しないように、光フィルタなどで不要光信号を充分除去する必要がある。良好な受信画質を得るために必要な映像光信号の受信光パワーは一般的に、通信用光信号よりも約十～百倍程度大きい。このため、設備センタで光ファイバに入力される映像光信号パワーは一般的に数十mW～百mW以上と非常に強くなり、光コネクタなどの光損傷が発生しないよう運用上の注意を要する。また、システム条件によっては、光ファイバの非線形光学効果を介して通信光信号が映像光信号に悪影響を与える場合があるので、注意する必

要がある。

4. む す び

本稿では、紙面の制約上、自由空間で光通信を行う光無線技術について言及できなかったが、ビル間および宅内通信用光無線機器も近年Gbps級の高速通信機器が開発されている。光無線を屋外で使用する際は、鳥やこうもりなどの各種飛来物による瞬断や、霧や豪雨などによる伝送損失の大幅な増加など、通信品質が外乱の影響を受けやすいという課題はあるが、比較的小規模な工事で大容量通信回線を実現できる利便性は有用であり、今後の動向が注目される。

光アクセス技術は、非常に安定した高速・高品質な通信回線をユーザに提供できる通信技術であり、その拡充は、今後の多種多様な映像サービスの発展に大きく貢献するものと確信する。

(2004年9月24日受付)

〔文 献〕

- 1) ITU-T G.983シリーズ (Oct. 1998～)
- 2) ITU-T G.984シリーズ (Dec. 2003)
- 3) IEEE 802.3ah, (June 2004)

枝川 登 1984年、大阪大学大学院修士課程修了。1984年、国際電信電話(株)(現KDDI(株))に入社。1985年より、同社研究所に勤務し、光増幅中継技術を用いた大洋横断光海底ケーブルシステムの研究開発に従事。2003年より、光アクセス技術の研究開発に従事し、現在に至る。博士(工学)。

2. ブロードバンドネットワークの構成技術

2-3. 無線アクセス技術

渡 邊 和 二[†], 北 條 博 史^{††}, 久 保 田 周 治[†]

キーワード ● 移動通信, 無線LAN, FWA, 光無線

1. ま え が き

ラストワンホップの解決策として有力な無線アクセスは、迅速、経済的かつ柔軟にインフラ設備を構築可能である。また無線アクセスは、ポータブル端末をサポートできるというモビリティ機能を有しており、有線アクセスにはない無線システム特有の特徴を持っている。図1に、無線アクセスシステムの概要を示す。移動通信、オフィスおよびホームにおける無線LAN、その無線LANと公衆網が接続されたシステムで提供され、公衆スポットとホーム等との間でシームレスなアクセスが可能なノマデックワイヤレスアクセス、有線システムの代替として適用する固定ワイヤレスアクセス (Fixed Wireless Access : FWA) に大別される。本章では、移動通信、無線LANそしてFWAについて、

最初に伝送速度と周波数帯域幅、さらにMPEG等の映像符号化方式を示し、これらの関係から無線アクセスで適用可能な映像サービスについて述べる。そして最後に、さらなる無線アクセスのブロードバンド化を実現するために期待される技術について述べる。

2. 各種無線アクセスにおける伝送速度と周波数帯域幅

図2は、各種無線アクセスについて、横軸をシステムの伝送速度、縦軸を変調方式とした場合の関係を示す。大容量伝送のためには多値変調方式を利用する必要があるが、多値数が多くなることにより送信アンプの線形性が要求され、送信アンプの入力動作点を低くする必要があり、送信出力の低下そして伝送距離の低下に繋がる。FWAの実験

図1 無線アクセスの概要

[†] NTTアクセスサービスシステム研究所

^{††} NTT西日本研究開発センタ

"Wireless Access Technologies" by Kazuji Watanabe and Shuji Kubota (NTT Access Network Service Systems Laboratories, Yokosuka) and Hiroshi Hojo (NTT West Research and Development Center, Osaka)

システムとして、1024QAM変調の開発が行われている。しかし、送信出力の低下、さらには面的なサービスを考慮した場合に課題となる干渉に弱くなる。このため、商用システムとしては、64QAM以下の変調方式が主に多く用いられている。

商用システムで伝送速度を比較した場合、移動通信は2Mbps、無線LANは54Mbps、FWAは1.25GHzが最大である。一方、実験システムで比較した場合、周波数帯域が100MHz（無線LANは20MHz、FWAは60MHz）ではあるものの移動通信が300Mbpsを超える伝送速度を達成している。商用システムにみられる各種無線アクセスの伝送速度の差が縮まりつつある。

図3は、各種無線システムにおける周波数帯域幅を示している。一般に電波は周波数が高くなるにつれて直進性が強くなり、回折効果は少なくなる。このため、送信点から受信点までの通信路には見通しが要求される。これに対して、周波数が高くなると使用可能な帯域も広がるため、ブロードバンド通信に適している。移動通信は多少の見通しが遮られても通信可能な準マイクロ波を、有線アクセスの代替として利用されるFWAは、帯域幅が広い準ミリ波、

ミリ波帯さらに光無線を、無線LANはその中間の周波数帯域を利用している。一方、周波数が高くなるにつれ、パワーリミットな領域に移行するため、伝送品質を一定とした場合、伝送距離は短くなる傾向にある。

3. 映像サービスと無線アクセス

表1に、代表的な映像の圧縮方式を示す。映像信号の情報量は、HDTVで1Gbps以上、標準テレビでも100Mbps以上と膨大である。図2の各種無線アクセスにおける伝送速度とこの映像信号の情報量を比較した場合、商用システムでは、FWAシステム以外の適用は困難である。しかし、例えばMPEG-2の圧縮方式を用いることにより、HDTVでは20Mbps程度、標準テレビでは6Mbps程度と、無線LANでも利用できる情報量に削減でき、さらに、マンモスコデックと言われるH.264¹⁾を用いた場合、移動通信までの利用も視野に入る可能性すらある。まさに、映像サービスを無線アクセスに展開する上で高能率符号化は必須の技術である。

有線アクセスにおける変調方式としても、主に64QAMが用いられているため、映像サービスを行う上での有線アクセスと無線アクセスとの大きな違いは伝送帯域幅である。映像サービスの代表例であるCATVにおいて770MHz

図2 各種無線アクセスにおける伝送速度と変調方式

表1 圧縮方式と符号化レート

圧縮方式	符号化レート	主なアプリケーション
H.261	~1.92Mbps	テレビ電話、テレビ会議
MPEG-1	~1.5Mbps	CD-ROM等の蓄積メディア
MPEG-2	~20Mbps	DTV, HDTV
H.263	~1.5Mbps	低ビットレートのテレビ会議
MPEG-4	~2.0Mbps	FOMA, ezmovie用テレビ電話、映像配信
H.264	~10Mbps	DTV, HDTV

図3 各種無線アクセスにおける周波数帯域幅（括弧内が帯域幅）

方式を利用した場合、圧縮方式にMPEG-2を用いることにより6MHz帯域に標準的な番組を4チャンネル伝送でき、合計で440チャンネルもの伝送が可能である。一方、18,22,26,38GHz帯の各FWAシステムでは、合計の利用可能帯域幅は770MHz以上であるものの、無線アクセスにより面的にサービスを展開するためには周波数の再利用が必要となる。このため、少なくとも3波(770MHz×3)以上の帯域が利用できる60GHz帯のFWAシステムのみが適用可能である。ただし、CATVにおいてその帯域が地域によって250MHz、450MHz方式を用いている場合もあり、さらに、縦系配線が未整備な集合住宅等へのスポットエリアでの展開には、準ミリ波帯FWAシステムでも技術的には適用可能である。

一方移動通信、無線LANについてはCATVを代替できる伝送帯域を有していないことから、インターネット放送に代表される自動公衆送信としての利用が有力である。

上述した映像サービスは、有線アクセスと同じ内容、同じ情報量を無線アクセスで伝送する例である。しかし、地上デジタル放送の1セグメント受信のように、有線アクセスとは異なる情報量による映像サービスが近い将来期待されている。このため今後は、これまでの有線アクセスと同じ情報量を無線アクセスで伝送する映像サービスと無線アクセスの利用形態に応じて、柔軟に情報量を削減する映像サービスの両面の展開が期待される。

4. さらなる無線アクセスのブロードバンド化を実現するためのブレークスルー

これまでの無線システムのブロードバンド化は、変調方式の多値化へのチャレンジと言い換えることができる。図2で示したように、実験システムでは1024QAMまで、商用化システムでは64QAMまでが実現されている。無線アクセスシステムの場合、さまざまな伝搬環境に応じていろいろなユーザニーズに対応した面的サービス展開が主に要求されることを考えた場合、変調方式で決定される最大速度より実際のスループットをいかに向上させるかが重要である。無線アクセス方式として、これまでFDMA(周波数分割多元接続)、TDMA(時分割多元接続)、CDMA(符号分割多元接続)が用いられてきたが、今後は時間、周波数、符号に空間(SDMA:空間分割多元接続)を加えた4次元接続の最適な利用により、より効率的なスループットの向上が期待される。さらにユーザによっては、インターネットアクセスのようなベストエフォートの利用を望んでいる場合、あるいは1ビットも誤っては困る企業ユーザなど、さまざまなアプリケーションサービスへ対応する必要性が生じてくると考えられる。このような中で、限られた無線リソースを最大限に有効利用し、各サービスの要求品質を満足して伝送するQoS(Quality of Service)制御の向上も、期待するブレークスルー技術の一つである。そして、QoSの実現は圧

縮方式も含めたトータルで達成すべきであり、無線区間で発生したパケットエラーについて、MPEG-4以上の符号化レートを有する誤り耐性技術の高速化を期待したい。

また、高い周波数帯の開拓も、無線システムのブロードバンド化を実現するこれまでの歩である。伝送速度1Gbpsは、すでに60GHz帯の実験システムとして実現できている。しかし、10Gbps伝送を想定した場合、100GHz以上の周波数帯が有効であり、伝送距離は短いもののすでに120GHz帯を用いた実験システム²⁾も登場している。そしてこの新しい周波数帯の開拓は、新しいデバイス技術の開拓でもあり、高能率でかつ高出力可能なデバイスの出現が期待される。一方、一般的には高い周波数帯になればなるほど出力レベルは小さくなる傾向にある。このため、伝送距離が短くとも、各無線システムが有機的に接続可能なアドホックネットワークやメッシュネットワークなども、面的なサービス実現に向けて重要になってくる技術と考えられる。

5. むすび

これまでの無線アクセスの大容量化の発展は、先行する有線アクセスの大容量化を目指し、かつ、無線という特徴を生かしたサービス展開が図られてきた。映像サービスにおいても、これまでの有線アクセスの補完、さらには、新たな有線アクセスと無線アクセスの有機的な構成により、新たなサービスの創出を期待する。そして、ここで上げたそれを支える無線アクセスのブレークスルー技術が、新サービスの縁の下の力持ちとなって近い将来活躍することを夢見ている。

(2004年7月22日受付)

〔文 献〕

- 1) 例えば、NIKKEI ELECTRONICS 2004.1.19
- 2) 枚田明彦、原田 充、永妻忠夫：“フォトリソ技術を用いた120GHzミリ波無線通信”，NTT R&D, 51, 6, pp.486-492 (June 2002)

渡邊 和二 1982年、東京電機大学電子工学科卒業。同年、日本電信電話公社(現NTT)入社。デジタルマイクロ波方式、高速ワイヤレスアクセスシステムの研究開発に従事。現在、NTTアクセスサービスシステム研究所主幹研究員、工学博士。

北條 博史 1981年、京都大学工学部電気2卒業。1983年、同大学大学院修士課程修了。同年、日本電信電話公社(現NTT(株))入社。NTT研究所において、マルチビーム衛星通信装置および方式の研究開発、高速ワイヤレスアクセス方式の研究開発を経て、現在、NTT西日本研究開発センタにおいてネットワークSEに従事。

久保田周治 1980年、電気通信大学電気通信学部卒業。同年、日本電信電話公社(現NTT)入社。衛星通信方式、PHS、高速ワイヤレスアクセスシステムの研究開発に従事。現在、NTTアクセスサービスシステム研究所プロジェクトマネージャ、工学博士。

2. ブロードバンドネットワークの構成技術

2-4. 超高速インターネット衛星「WINDS」の概要

中村 安雄[†], 冨井 直弥[†]

キーワード ● WINDS, Ka帯, 衛星インターネット, MBA, MPA, APAA

1. ま え が き

1969年アメリカの大学・研究所の4台のコンピュータがネットワークによって結ばれたのがインターネットの最初といわれている。

我が国においては、1984年に東京大学、慶應義塾大学、東京工業大学がネットワークによって結ばれたのが日本初のインターネットである。それから約10年後の1995年にインターネットが流行語の一つに選ばれた。その後、インターネット社会はおろか生活の一部として定着するまでに至った。そして2000年のIT基本法（高度情報通信ネットワーク社会形成基本法（平成12年法律第144号））に基づき制定されたe-Japan重点計画（2001年3月）が日本国政府により公表され、世界最高水準の高度情報通信ネットワークを形成するための具体的施策の一環として超高速インターネット衛星計画が位置づけられた。我が国でインターネットという用語が普及し始めてから僅か6年後のことである。

本稿では、超高速インターネット衛星（WINDS）¹⁾を中心とした衛星通信ネットワークについて紹介する。

2. WINDSのミッション

超高速インターネット社会の実現に向けた宇宙インフラの開発研究として、無線による広範囲の超高速アクセスを可能とする通信技術の実用化、ならびに国際も含めた衛星通信ネットワークの構築に資する技術開発、実証がWINDSのミッションである。

3. 衛星通信の特徴

常時、通信地点の上空に位置する静止衛星は、地理的な条件に制約されず1個の衛星で地球表面積の約1/3をカバーできるという広域性、カバーエリア内ではどこでも電波がほぼ同時に到達するという同報性、地球局を設置すれば通信回線が設定できるという可搬性、リアルタイム性、さら

に自然災害時においても通信ネットワークが破壊されず、回線の設定・解除が容易にできるという耐災害性など、いわゆるユビキタス性を実現できる可能性を秘めている。これらの特長を生かした衛星通信は、地上インフラとの相互補完によってさらに信頼度の高い通信ネットワークの構築が可能となる。

4. WINDSの特徴

WINDSはKa帯マルチビームアンテナ（MBA）とKa帯マルチポートアンプ（MPA）による衛星の受信能力、送信能力の大幅な向上、ビームホッピング可能なKa帯アクティブフェーズドアレイアンテナ（APAA）による通信カバレッジの広域化、ならびにATMベースバンド交換機（ABS）による1ホップ中継を主な特徴としている。

MPA¹⁾は図1に示すような構成で、増幅器8個分の電力を任意のポートに出力することも可能である。この機能によりKa帯の弱点である降雨減衰や地域的な通信需要のアンバランスに対応した複数ビーム間での送信電力の再配分が可能となる。アンテナビームと送信機を固定的に接続している従来衛星では、余剰送信電力を他ビームに回すことはできなかったが、WINDSではこれが可能になり、通信衛星では貴重な送信電力の有効利用が図れる。

APAAは衛星から見た可視範囲内のどこにでもスポットビームを瞬時に照射でき、固定ビームでは対応できない新

[†]宇宙航空研究開発機構 宇宙利用推進本部 WINDSプロジェクトチーム
"Outline of Wideband InterNetworking Engineering Test and Demonstration Satellite (WINDS)" by Yasuo Nakamura and Naoya Tomii (WINDS Project Team, Office of Space Application, Japan Aerospace Exploration Agency., Tsukuba)

図1 8ポートMPA機能システム

表1 WINDSの衛星主要諸元	
軌道	静止衛星軌道(東経143°(暫定))
質量	約2,700kg(静止衛星軌道上初期)
寸法	2m×3m×8m, 太陽電池パドル込みで全幅21.5m
設計寿命	打上げ後5年(目標)
発生電力	5,200W以上
姿勢安定方式	3軸姿勢制御方式
打上げ	H-II Aロケット, 2006年度(予定)

規の通信需要地域、あるいは島嶼地域など広範囲に散在するポイントに高速通信の機会を与える有効な手段として期待される。図2は、APAAの外観を示したもので、送受ビームの指向方向はビームフォーミングネットワーク(BFN)内の移相器で制御される。送受ビームの指向を独立に制御すれば、時分割で任意の2点間で通信回線を設定することができ、Satellite-Switched TDMA(SS-TDMA)が実現できる。

ABSは再生中継を基本としたデジタル交換機である。従来の衛星システムでは、STAR型ネットワーク構成が採用されているが、ABSによりMESH型ネットワークの構成が可能となり、ユーザ間を1ホップで接続可能となる。これにより、伝搬遅延時間、中継器を占有するリソース(帯域、送信電力)を半減させることができる。また、デジタル処理による誤り訂正、マルチキャスト(特定多数ユー

ザへの同報)やユニキャストが可能となり、信頼性の高い回線とともに応用範囲を多彩にすることが可能となる。

図3に従来型のベントパイプ型中継器とABSとの比較イメージを、図4に超高速インターネット衛星(WINDS)の外観と表1に主要諸元を示す。

5. WINDSの主な通信回線について

5.1 周波数と伝送速度

使用周波数を高くすれば利用可能な周波数帯域も広くなり、伝送速度も速くできる。伝送速度は、Lバンドのインテルサット(Cバンドのサービスもある)が144kbps、Cバンドのインテルサット(Kuバンドのサービスもある)がインテルサットビジネスサービス(通称IBS)で8.5Mbps、KuバンドのBSデジタルで52Mbpsである。WINDSでは伝送速度の高速化を図るため、またKu帯での周波数逼迫状況も考

慮し、連続した広帯域を確保できるKa帯を採用した。一般家庭にCSアンテナ並みの直径45cmアンテナの小型地球局(USAT)で155Mbpsの受信伝送速度であり、アンテナ径2.4m程度(VSAT)では送受622Mbps, 5m以上では送受1,200Mbpsのデータ伝送速度が可能である。

一般的な回線で、ISDNが128kbps, ADSLが48Mbps, 無線LANが54Mbps程度であり、光ファイバ以外の伝送メディアに比べてWINDSは相当のデータ伝送速度を持つことがわかる。

5.2 アンテナ方式とカバーエリア

(1) Ka帯マルチビームアンテナ(MBA)

一般に、同じ外形サイズで比較した場合、使用する周波数が高いほうが高利得、すなわち高い受信性能、送信性能が得られる。一方、利得に逆比例する形で、カバーエリアは小さくなる。静止衛星から同サイズのアンテナに異なる周波数帯で伝送した時のカバーエリアとデータ伝送量の概念を図5に示す。この図は、カバーエリアとデータ伝送量の相反関係を示したことになるが、WINDSではこのカバーエリアの狭さを克服するために、マルチビーム方式(MBA)を採用し、多数のビームを極力すき間がないように配置している。日本本土および沖縄を9ビームで、アジア主要都市を10ビームでカバーしている。

(2) Ka帯アクティブフェーズドアレイアンテナ(APAA)

アジア・太平洋の広い地域に対しては、電子的にビーム指向方向を自在に制御可能なAPAAにより、送受各2ビームを電子的にほぼ瞬時(10マイクロ秒程度)に通信需要のある任意の複数地域に向けることが可能である。

ムを電子的にほぼ瞬時(10マイクロ秒程度)に通信需要のある任意の複数地域に向けることが可能である。

5.3 降雨稼働率・地域的な通信需要への対応

周波数が高くなると降雨の影響で電波が減衰し、地上局の受信状況が悪くなる。

従来の通信衛星では降雨状況に関らず、常に降雨減衰量を想定し一定の大きな衛星送信電力(ダウンリンク)で送信しており、晴天時には無駄な電力を送信していた。WINDSではこの無駄を改善するためMPAを採用し、ビーム照射電力を照射地域や時間ごとに柔軟に配分することで、これまでの衛星では不可能であった送信電力の効率的な電力配分を可能としている。図6に電力配分制御のイメージを示す。

5.4 通信方式

衛星のデジタル通信ではPSK(Phase Shift Keying)方式が一般である。WINDSにおいては、伝送速度、必要な信号電力、占有帯域、ハードウェアの実現性などでトレードオフを行い、4相PSK(QPSK)を採用している。また、この変調方式に加え、必要な信号電力を下げるために、誤り訂正符号としてリードソロモン(RS)符号を採用している。誤り訂正符号の採用は、結果的に降雨による回線断の時間率低減にも効果的である。

5.5 中継方式と交換方式

WINDSの中継方式として、再生交換方式と非再生交換方式の両方を採用した。再生交換方式では、変調方式が限定されるが、多種多様な変調方式による通信実験の幅を広げるためにSS-TDMA方式による非再生交換も可能としている。

再生交換方式として次の3種類で検討した。

- (1) 回線交換
- (2) IPパケット交換
- (3) ATMセル交換

(1) はアナログ電話と同様、伝送路の物理的な遅延以外には情報の伝送遅延はなくリアルタイム性に適している。一方、回線を固定的に割当てするため、大量の通信トラフィックには対応できない。また、転送情報がない時でも回線

表2 通信回線諸元

中継方式	再生交換中継方式 (ATMベースバンド交換方式)	非再生交換中継方式 (バントパイプ)
周波数	上り:27.5~28.6GHz, 下り:17.7~18.8GHz	
アンテナ方式とカバーエリア	固定ビーム(MBA):日本国内およびアジアの10都市 走査ビーム(APAA):アジア太平洋地域	
通信方式	変調方式:QPSK, 誤り訂正:RS(255,223)	
伝送速度(Mbps)	上り:1.5, 6, 24, 51, 155, 下り:155	上り/下り:622, 1,200(622×2)
EIRP	68dBW以上(MBA), 55dBW以上(APAA)	
G/T	17dB/K以上(MBA), 7dB/K以上(APAA)	
降雨時の回線稼働率	国内99.5%以上(一部98.5%以上), 国外97.5%以上	

が特定ユーザに占有され、他ユーザが使おうとしても使えず無駄が生じてしまう。

(2), (3)については、通信情報を一時蓄積してから転送するので、誤り訂正が可能となり信頼性の高い情報伝達が可能となる。情報の蓄積の際にさまざまなデジタル処理を加えることができるので、同報通信、速度変換など付加価値の高い通信サービスが実現できる。

以上を考慮し信頼性、同報通信や効率的に回線が使えることから(2), (3)が有効である。

(2)のIPパケット交換は、高い情報処理能力が求められ、WINDSの数百Mbps以上の超高速転送には困難(開発当時は転送制御をソフト的に実行可能な宇宙用CPUの能力に限界があった)であった。また、パケット長が長すぎると所要のメモリー容量が大きくなるだけでなく、パケット形成遅延時間が長くなるという欠点もある。以上より(3)を採用した。なお、WINDS搭載のATM交換機は独立行政法人情報通信研究機構が開発を担当している。

表2にWINDSの主な通信回線諸元を示す。

6. む す び

WINDSは衛星による高速インターネットアクセス、地上

インターネットバックボーンの補強・補完を可能にし、また、映像などのストリーム信号のマルチキャストによる効率的配信を可能とする通信プラットフォームとしての役割が期待される。

(2004年8月4日受付)

【文 献】

- 1) 有川, 倉益, 中村, 荒木, 島田: “超高速インターネット衛星(WINDS)の開発状況について”, 信学技報, 2003-10, pp19-24 (Oct. 2003)

なかむら やすお
中村 安雄 東京教育大学理学部卒業。1974年、宇宙開発事業団入社。人工衛星の試験、人工衛星熱制御系の設計解析業務に従事。1990年より、地球観測衛星の開発に従事。2003年より、超高速インターネット衛星プロジェクトマネージャ。

とみい なおゆき
富井 直弥 1992年、財団法人リモート・センシング技術センター入社。1999年、同センター退職。同年、宇宙開発事業団入社。陸域観測技術衛星のプログラム管理に従事。2002年より、超高速インターネット衛星プロジェクトにて、衛星および地上システム開発業務に従事。

2. ブロードバンドネットワークの構成技術

2-5. 高速電力線通信の実用化動向について

高 嶋 正 也[†]

キーワード ● 電力線通信, スペクトラム拡散方式, 直交周波数分割多重方式, 漏えい電界, コモンモード電流, 平衡度

1. ま え が き

近年のインターネットを中心とするネットワークの進歩は目覚しく、100Mbpsの高速インターネットが安価に利用でき、また、携帯電話からのインターネットアクセスが可能となるなど、ネットワークの利用シーンが急激に様変わりしつつある。こうした情勢の中で、高速電力線通信 (PLC: Power Line Communication) は、電気コンセントがあれば、家庭内のどの部屋からも簡単にインターネットを楽しむことができるようになるなど、ネットワークを構築する有力な手段の一つとして国内外で期待が高まっている。

このPLCという技術は、商用電源を供給する屋内外の電力線に高周波の信号を重畳して通信を行うものであり、現在でもkHz帯の周波数を用いたものが実際に使われているが、kHz帯は家電機器の影響が強い周波数帯であり、利用できる帯域が狭いことから高速通信が望めず、主に電気機器の制御やテレメトリングに利用されてきた。しかし近年、欧米を中心にMHz帯 (短波帯) を利用することで数十Mbps以上の高速通信を可能とするPLC機器が開発され、実際にインターネットサービスや、機器の販売などが行われている。

日本においても政府IT戦略本部が発表した「e-Japan重点計画-2004」¹⁾に「家庭内の電力線の高速通信への活用」が「高速・超高速インターネット利用環境の整備」のテーマの一つとして取り上げられている。

しかしながら、高速PLCの実用化に関しては課題がある。日本では、現行の電波法および無線設備規則にPLCが利用できる周波数は10kHzから450kHzと定められている上、MHz帯を用いた高速PLCの利用は、電力線から発生する漏えい電波がアマチュア無線や短波放送などの無線局に干渉する可能性があることから、現時点では認められていない。

2. 高速電力線通信 (PLC) の原理と利点

PLCとは前述の通り、送配電線や屋内配線といった電力線に微弱な高周波の信号を重畳して行う通信方式である (図1)。PLCは既設の配線を利用するため新規通信線工事

図1 PLCのイメージ図

が不要で経済的、プラグをコンセントに差し込むだけで通信が可能であり、宅内のどの部屋でもネットワークが利用可能と非常に利便性が高いのが特長である。そのため、産業用の機器制御やテレメトリングといった利用方法だけでなく、ホームAVネットワークを構築して家庭内のどのテレビでもビデオを楽しむことができたり、家電機器の稼動状態の集中監視や宅内外に設置したカメラによる集中モニタリングといった、ホームオートメーションやホームセキュリティなどを実現したりすることができる。

ところで、ここで述べる高速PLCは、2MHzから30MHzの周波数帯域の使用を前提としている。この理由は、2MHzよりも低い周波数については帯域が狭く、電気機器から出るノイズやインピーダンスの影響が大きいいため、高速通信には向かず、また、30MHzよりも高い帯域では、信号減衰が大きく伝送距離が短くなるためである。2MHzから30MHzの帯域は、信号減衰はあるものの、家電機器などの影響が小さく高速PLCに適しているといえる。

3. PLC実用化の課題

電話線などの一般的な通信線は2本の導線が近接しており、その線上を流れる信号は一方の導線から外部回路に流れ、もう一方の導線を伝って帰ってくる (このように、回路内を循環する電流をノーマル電流という)。しかし、例えば、一方の導線が他方の導線と比べて大地に充分近く、浮遊容量が大きいなど線路環境が異なる、つまり平衡度が異なると、2線の電流に差が生じる。この差の電流をコモンモード電流といい、漏えい電波発生の主な原因となる。

[†] 関西電力株式会社

"The Trend of Utilization of High Speed Power Line Communication" by Masaya Takashima (Kansai Electric Power Co., Inc., Osaka)

図2 コモンモード電流

図2は屋外配線に多い不平衡例であり、平衡な線路であれば $I_1 = I_2$ であるが、不平衡な線路では $I_1 \neq I_2$ となり I_1 と I_2 の差の電流が大地との間に構成されたループアンテナ形状の回路に流れ、漏えい電波を発生しやすくなる。このように、電力線は本来通信線ではないため平衡度などについて考慮されておらず、一般的な通信線と比べて漏えい電波を放射しやすい。アマチュア無線など、この帯域を利用している既存の無線局にとっては、この漏えい電波がノイズとなるため、既存無線局への干渉を防止する意味でも漏えい電波への対応が必要となる。

この漏えい電波を抑制するには信号送信電力を抑えることが効果的であるが、PLCで利用するMHz帯は元来減衰しやすい帯域である上に、家庭内配線は分岐も多く、減衰がさらに大きくなりやすい環境である。したがって、PLC機器は、送信点から比較的離れた地点に到達した微弱な信号をも受信できることが重要となる。つまり、広いダイナミックレンジを確保しつつ、できるだけ微弱な信号を検出、復号できる必要がある。また、既存の無線局の信号や飛来ノイズの電力線への重畳や、家電機器からのノイズが影響を与えるため、これに打ち勝つ性能が求められる。

4. PLCを実現する通信技術

現在、PLCに利用されている変調方式には、スペクトラム拡散(SS: Spread Spectrum)方式、直交周波数分割多重(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式などがある。

SS方式は、送信側は送信したい信号を十分に広い周波数帯域に拡散して信号を送信し、受信側は拡散された信号を元の狭帯域信号に復元(逆拡散)し、復号することで通信を行う方式である(図3)。

信号を広帯域に拡散して伝送するため、信号電力スペクトル密度が小さく、漏洩電界の低減効果が期待できる。既存無線局との干渉が多い周波数については、特定の周波数帯域の出力だけを低減するデジタルフィルタ(ノッチフィルタ)を用いることにより、干渉を避けることができる。

OFDM方式は、数多くのキャリアを周波数軸上に極めて

図3 SS方式の概要

図4 OFDM方式の概要

図5 コモンモードフィルタの構造

密に並べ、それぞれのキャリアに個別に送信したいビットを割当てて送受信する方式である(図4)。

信号密度が高い上、キャリア毎の信号対雑音比(SNR: Signal-to-Noise Ratio)に応じて割当てるビット数を変えたり、既存の無線局が使用している周波数帯域のキャリアの出力そのものを停止したりできるなど、使用環境に応じ柔軟な変更を加えることができる。

また、PLCから生じる漏えい電波を抑制する技術としては、配線系統の最適化などによるPLC機器の平衡度改善、コモンモードフィルタ、フェライトコアの利用などが挙げられる。コモンモードフィルタとはコモンモード電流を抑制するフィルタであり、漏えい電波の発生原因となるコモンモード電流を抑えることで漏えい電波を抑制する。コモンモードフィルタはコアに導線を巻きつけた構造をしている(図5)。

コモンモード電流により発生した磁束が互いに強め合う向きに導線が巻きつけられているため、コモンモード電流

に対してインピーダンスとして作用し、コモンモード電流を抑制する。通常の信号の場合（ノーマル電流）は磁束が打ち消しあう方向に電流が流れるため、インピーダンスとして働かず、コモンモード電流のみ抑制することができる。

5. PLCの実用化動向

日本でのPLCの実用化については、これまで民間および総務省にて検討がなされてきた。平成13年5月には電波産業会（ARIB）に検討部会が、平成14年4月には総務省に研究会が設立され、平成14年7月、その結論²⁾として使用周波数帯の開放は見送られたが、一方でPLCの技術開発継続の必要性から、研究開発目的の実フィールドでの実証実験に対する許可制度の整備が必要であると提言された。これを受けて、平成16年1月26日、漏えい電界強度低減技術の検証を目的とするPLC実証実験の許可制度が施行された。

一方、国内の通信機器メーカーや電力会社を中心に、PLCの高速化技術、既存無線システムとの共存技術の検証を行い、日本国内での高速電力線通信の早期実用化を目的として高速電力線通信推進協議会（PLC-J: High Speed Power Line Communication Promoters' Alliance of Japan）³⁾が平成15年3月に設立された。PLC-Jの主な活動内容は、①電力線通信を利用するための技術基準（漏えい電磁界強度等）に関する検討、②高速電力線通信を実現するための技術および実用化手段の検討、③電力線通信の普及啓発活動、である。平成16年7月末日現在で法人会員28社、特別会員（有識者）1名にて構成されている。

国内実証実験については、平成16年6月末段階で、11社の企業が20の実験サイトにて取組んでおり、そのうちPLC-J加盟企業は10社、計17の実験サイトにて実証実験を行っている。

海外においては、アメリカではすでにPLCが利用されており、業界標準であるHomePlug 1.0⁴⁾（2001年6月策定）に基づいたPLC機器が市販されている。さらに、現在はHomePlug AVと呼ばれる動画伝送が可能な標準の策定が行われている。また、ブッシュ大統領が高速インターネット接続を実現する具体的取組みの一つとしてPLCの仕様検討を行うとの声明を出すなど、国家として積極的に取組む姿勢を明確にしている。

ヨーロッパでは、スペイン、ドイツなどで電力会社を中心となり、商用のインターネットアクセスサービスが開始されている。その他、イギリス、フランスなど各国で実証実験が進められている。

アジアでは、シンガポールにてサービスが開始されているほか、中国でも北京を中心に数千軒規模での実証実験が進められており、当社グループも技術協力を行っている。

韓国では日本と同様に現在は法令によりPLCの使用は禁止されているが、2003年7月から実フィールド実験が許可され、さらに政府が今年中の規制緩和を表明している。

図6 漏えい電界強度の低減結果の一例

6. 当社のPLC事業への取組み

当社を含む電力会社では、古くからPLC技術の開発に取り組んでおり、特に当社では2001年8月に高速PLCに関する研究開発を目的として、ラインコム（株）を設立した。イスラエル/イトラン社の技術を導入し、PLC機器、システムの開発など、日本でのPLC実用化に向けた取組みを中心に活動している。実証実験の許可制度の施行に合わせ、平成16年3月より当社とラインコム（株）との共同で、当社所有施設にて実証実験に取り組んでいるところである。参考に、その実験結果の一例を図6に示す。これは、施設の室内でPLC機器を利用した場合の同室内での漏えい電界強度を測定したものである。2002年の総務省研究会時²⁾と比べて最大で30dB以上の漏えい電界強度の低減を果たしている。

7. むすび

本稿では高速電力線通信（PLC）について、その技術概要と課題、および日本と海外の実用化動向を紹介した。

PLCは、その利便性と経済性から、ホームネットワークの構築や電気機器の制御など、今後多くの分野で利用が期待できる技術である。高速で安定した通信を実現できるよう技術開発に取り組む一方で、既存無線局との共存が可能であることについて実証実験を通じて証明し、早期実用化に結び付けていく所存である。

（2004年8月13日受付）

〔文 献〕

- 1) <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/index.html>
- 2) 電力線搬送通信設備に関する研究会報告書, <http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020809/honbun.pdf>
- 3) <http://www.plc-j.org/>
- 4) <http://www.homeplug.org/>

高嶋 正也 1988年、慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1990年、同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、関西電力（株）入社。以来、配電線自動運用システム、配電線搬送システムの開発に従事。2000年より、ホームゲートウェイ、高速電力線通信の開発に従事。