

次世代電力線通信と標準化

Next-Generation Power Line Communications and Standardization

古賀久雄
Hisao Koga

要 旨

2008年12月、IEEE P1901委員会において、次世代HD-PLC (High Definition Power Line Communication) 仕様が電力線通信 (PLC: Power Line Communication) 標準規格のベースライン技術方式の一方式として採択された。物理層 (PHY: PHYSical layer) の仕様としては、新たに高効率伝送を可能とする変調方式である32 PAM (Pulse Amplitude Modulation)、および強固な誤り訂正方式である低密度パリティ検査符号 (LDPC: Low Density Parity Check) を採用した。また、メディアアクセス制御層 (MAC: Media Access Control) の仕様として、高効率伝送を可能とするサブフレーム連結やセキュリティ強化のための動的鍵更新を追加した。さらに、PHY/MAC仕様とは別に、Wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) PLCとFFT (Fast Fourier Transform) OFDM PLCを共存させるために用いるISP (Inter-System Protocol) と呼ばれる制御方式も含まれる。本論文では、各仕様の概要を説明するとともに次世代HD-PLC仕様に基づいて試作されたモデムを用いて性能評価を行い、次世代HD-PLCの通信性能を検証する。

Abstract

The next-generation High Definition Power Line Communication (HD-PLC) specification was selected as one of the baseline technologies of the Power Line Communication (PLC) standard in IEEE P1901 committee in December 2008. 32 PAM (Pulse Amplitude Modulation) for high speed and Low Density Parity Check (LDPC) code for robust communication are adopted as new Physical Layer (PHY) specification. In addition, sub-frame concatenation function for high-efficiency transmission and dynamic key update function for security enhancement are added as new Media Access Control (MAC) specifications. In addition to new PHY/MAC specifications, the control method called Inter System Protocol (ISP) used for coexistence between Wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) PLC and FFT (Fast Fourier Transform) OFDM PLC is also added.

In this paper, the summary of each specification is described and the communication performance of the next-generation HD-PLC is evaluated with a test model based on it.

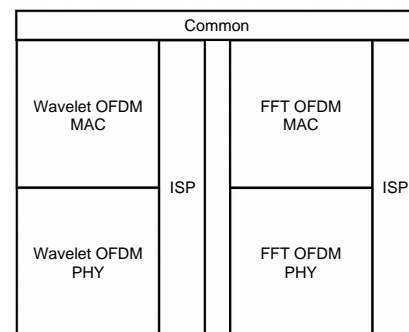
1. はじめに

IEEE P1901¹⁾⁻³⁾ 委員会では、高速化を目的とした次世代電力線通信技術のための標準化が行われている。2008年12月にIEEE P1901委員会において、電力線通信標準規格のベースライン技術方式が採択された。

ベースライン技術方式には、当社が提唱するHD-PLC^{®4)}をベースとした方式とHomePlug^{®(注1)5)}のHomePlug AVをベースとした方式が含まれる。また、上記に加えて、当社がCEPCA^{®6)}とともに提案した、ISPと呼ばれる異種PLC方式同士を共存させるための制御方式もベースライン技術方式の一部に含まれる。ISPは、2方式が相互接続できずに互いに干渉するのを防ぐために利用される。

本仕様を採用するLSIでは、2方式とISP、あるいは各方式とISPから構成することができる。これにより、2方式を同じ電力線上で同時に使用することが可能となる。

第1図に、ベースライン技術方式の概念図を示す。ペー



第1図 ベースライン技術方式の概念図

Fig. 1 Basic concept of baseline technology

スライン技術方式は、PHY/MAC仕様およびISP仕様から構成される。PHY/MAC仕様は、当社が提案した次世代HD-PLC仕様であるWavelet OFDM方式と、HomePlug AVをベースとするFFT OFDM方式からなる。各PHY/MACは、基本的に独立しており、上位層とのインターフェースの一部が共通化されている。また、ISPは各方式の一部の機能として使用される。

本論文では、次世代HD-PLC仕様について述べる。また、

(注1) HomePlug Powerline Alliance Inc. の登録商標

次世代HD-PLC仕様に準拠した試作機を用いて通信性能検証を行うことにより、本技術が有効であることを示す。

なお、本文中で述べる次世代HD-PLCの仕様内容は、今後変更が行われる場合がある。

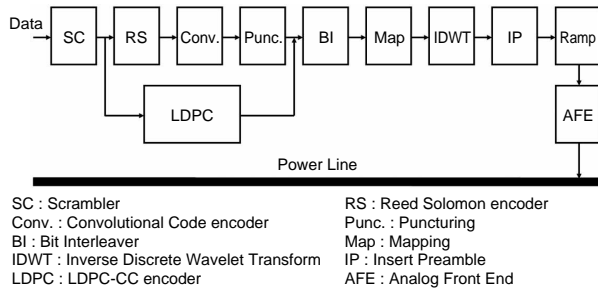
2. 次世代HD-PLCのPHY概要

次世代HD-PLCのPHY仕様は、現行HD-PLCの特長を継承しつつ、仕様拡張により通信性能の向上を図った方式である。

2.1 次世代HD-PLCの主なPHY仕様

HD-PLCの送信系の機能としては、スクランブラ、誤り訂正（FEC：Forward Error Correction）、ビットインターリーブ、マッピング、Wavelet逆変換やランプ処理などがある（第2図）。

第1表に、主な仕様諸元を示す。次世代HD-PLC仕様はベースライン技術方式を基に作成しており、新たな変調方式として32PAMが加えられ、またFECとしてLDPC-CC（Low Density Parity Check - Convolutional Code）が追加された。



第2図 送信系ブロックの概略図
 Fig. 2 General block diagram of transmitter side

第1表 HD-PLCの主な仕様諸元

Table 1 Main specifications of HD-PLC

	次世代HD-PLC	現行HD-PLC
Carrier space [kHz]	61.035 156 25	61.035 156 25
Symbol Length [μs]	8.192	8.192
PAM Modulation (per carrier)	2, 4, 8, 16, 32 (optional)	2, 4, 8, 16
Frequency Range [MHz]	2 ~ 28 2 ~ 50 (optional)	2 ~ 28
Maximum PHY Rate [Mbit/s]	260 480 (optional)	210
Forward Error Correction (Encoder only)	Reed-Solomon (RS), Convolutional Code (CC) RS +CC and LDPC-CC (optional)	Reed-Solomon (RS), Convolutional Code (CC) and RS +CC

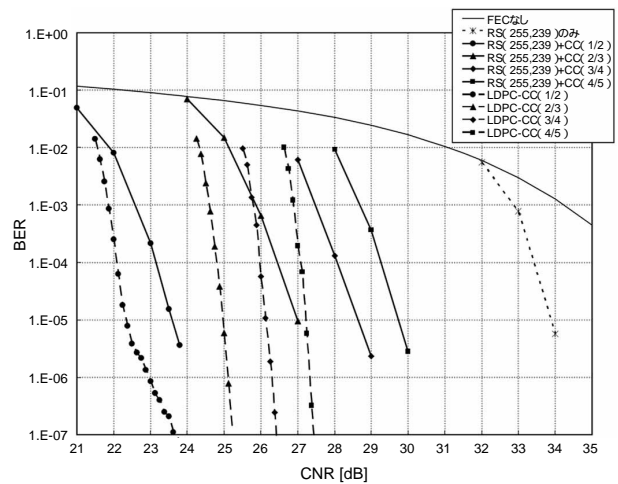
【1】変調方式

伝送効率を向上させる目的で、次世代HD-PLCでは変調方式の最大多値度を16PAMから32PAMへ変更した。伝送効率は、8 bit/Hzから10 bit/Hzへ向上する。これは、送受信機間のクロックのずれを補償する機能を強化することで実現した。これにより、最大PHY速度が1.25倍となり、高効率通信が可能となる。

【2】LDPC-CC

劣悪な電力線伝送路に対する耐性を向上させる目的で、新たなFECとしてLDPC-CCが追加された。この符号は、畳み込み符号（CC：Convolutional Code）をベースとしたLDPCである。第3図に、32PAMを使用した場合の各FECの誤り率特性を示す。図に示すように、同じ符号化率（1/2～4/5）のRS（Reed-Solomon）+CCとLDPC-CCを比べると、符号化率に応じてLDPC-CCの特性はRS+CCよりも約1.2 dB～2.6 dB向上している。これは、LDPC-CCでは長い拘束長を用いているため最小自由距離が長くなったことと、複数符号化率対応をパンクチャ処理によるものではなくて個別の符号で対応したからである。

LDPC-CCの採用により、劣悪な電力線伝送路で強固な通信が可能となるとともに、通信速度の向上も期待できる。



第3図 各FECの誤り率特性（32PAM使用）

Fig. 3 Bit error rate characteristic of each FEC (with 32PAM)

【3】最大PHY速度

通信に使用する周波数帯域を2 MHz～28 MHzと仮定すると、ノッチを形成しない場合の理論的な最大PHY速度は、現行HD-PLCでは210 Mbit/sであるのに対して、次世代HD-PLCでは260 Mbit/sである（第1表）。

なお、実際に得られる最大PHY速度は、ノッチの有無、伝送路環境や使用するFECに応じて値が異なる。

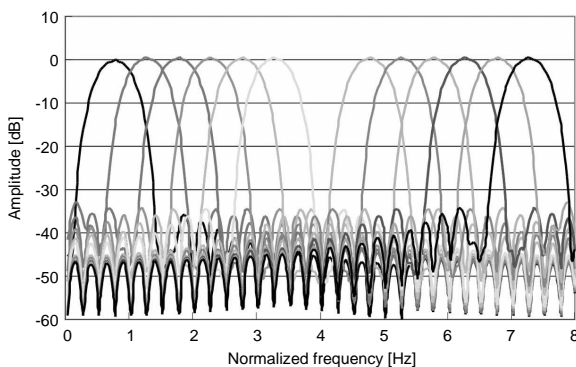
次世代HD-PLC仕様では、現行のHD-PLC仕様に対して上記以外にもオプションとして、ポストアンブル機能などが新たに追加されている。

2.2 Wavelet OFDMの特長

ここでは、FFT OFDMと比較してWavelet OFDMの2つの特長について述べる。

〔1〕Wavelet OFDMスペクトル⁷⁾

Wavelet OFDMでは、FFT OFDMと比較して各キャリアのサイドローレベルが低いという特長を有している(第4図)。オーバーラッピングファクタが4の完全再構成型コサイン変調フィルタバンクタイプのWaveletを使用した場合、各キャリアの第一サイドローを35 dB以上減衰させることができる。この場合、最小2本のキャリアを不使用とすることで、任意の使用周波数帯域内に深いノッチ(30 dB以上の減衰)を形成することが可能である。これにより、同じ周波数帯域を使用する既存の無線システムへの干渉の影響を軽減することが可能となる。



第4図 Wavelet OFDMスペクトル

Fig. 4 Wavelet OFDM spectrum

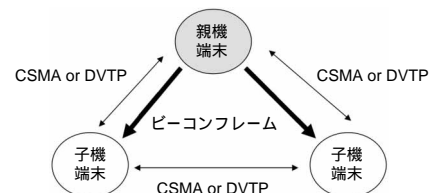
〔2〕ガードインターバルが不要な高効率方式⁸⁾

Wavelet OFDMでは、FFT OFDMとは異なりGI (Guard Interval) を用いない。そのため、電力線伝送路内での歪(ひずみ)などの影響を受けてしまうが、伝送路環境によるWavelet OFDMの直交性の崩れが緩やかなため、GI無しでも実用になる。

通常、GIは固定の冗長信号であり、シンボル長に対して1割から2割程度必要とされる。このことから、冗長信号成分を含まないWavelet OFDMは、歪が少ない伝送路環境において、特に高速な通信が可能となる。

3. 次世代HD-PLCのMAC概要

HD-PLCでは、親機がビーコンフレームと呼ばれる制御フレームをネットワーク内の全端末へ定期的にブロードキャストする方式を採用している(第5図)。これにより、ネットワーク内のメディアアクセス方式を統一し、QoS (Quality of Service) や各種制御のための管理を行う。基本メディアアクセス方式には、CSMA (Carrier Sense Multiple Access) とDVTP (Dynamic Virtual Token Passing) がある。DVTPは、当社独自のメディアアクセス方式の1つであり、親機が動的にネットワーク内の端末に送信権を付与し、衝突の発生しないアクセスを実現している。



第5図 HD-PLCシステム構成図

Fig. 5 HD-PLC system

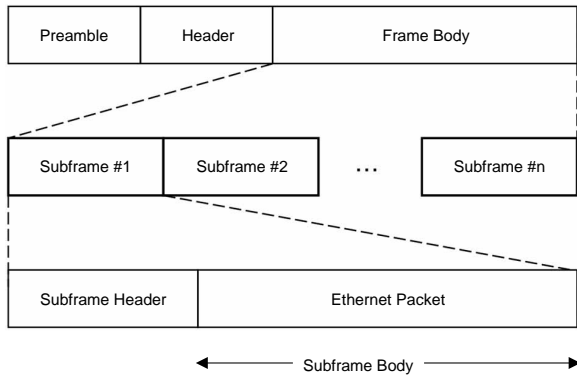
次世代HD-PLCでは、さらに伝送効率を高めるサブフレーム連結機能やセキュリティ機能を追加した。本章では、次世代HD-PLCで採用予定のWavelet OFDMのMAC仕様について述べる。

3.1 サブフレーム伝送による伝送効率向上

フレームは、主にフレームヘッダとフレームボディで構成される。フレームヘッダでは、ヘッダ長と変調方式(2PAM)は固定であり、送りたい情報を複製して同じ情報を異なるキャリアを用いて伝送するダイバーシチモードが用いられる。また、フレームボディでは長さは可変であり、各キャリアで伝送路状態に応じた適応変調が行われる。

〔1〕サブフレーム構成

通信時に送信する情報量が少ない場合は、フレームボディ長が短くなる。このような場合、フレームヘッダ長やフレーム間ギャップは固定であるため、フレーム長に対して割合が大きくなり、結果として大きなオーバーヘッドとなる。このようなオーバーヘッドを削減する目的で、複数のサブフレームから1つのフレームボディを構成可能とした(第6図)。



第6図 サブフレーム構成
Fig. 6 Subframe structure

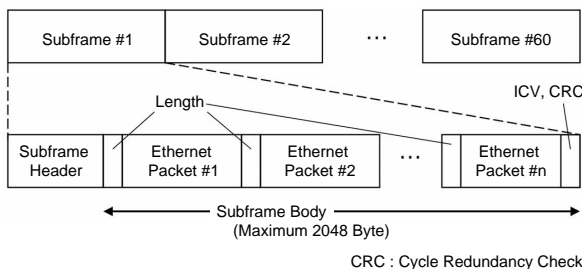
〔2〕サブフレーム構成の具体例

実環境においては、複数のイーサネット (Ethernet[®](注2)) パケットをまとめてフレームを構成することによりオーバーヘッドを削減している。

具体的には、従来は各サブフレームに原則1つのイーサネットパケットを格納していたのに対して、次世代HD-PLCではサブフレームボディが最大2048バイトになるまで複数のイーサネットパケットを1つのサブフレームに格納することを可能とした(第7図)。これにより、ショートパケットの伝送効率が飛躍的に向上した。たとえば、80バイトのイーサネットパケットならば、24パケットを1つのサブフレームに格納することが可能である。

なお、受信エラーが発生した場合、誤りのあったサブフレームだけを再送(選択再送)する。

ここで、ショートパケットの格納数が多い場合には、1つのサブフレーム長が長くなるという課題がある。この場合、伝送路環境によっては受信エラーの発生確率が増加し、再送によるオーバーヘッドが大きくなる。そのため、受信エラーの発生確率により、1つのサブフレームに



第7図 サブフレーム内のイーサネットパケット連結
Fig. 7 Ethernet packet concatenation in sub-frame

対するショートパケットの格納数を調整することで、この課題を解決した。

また、サブフレーム結合においては、次世代HD-PLCのフレームのサブフレーム格納数を現行HD-PLCの最大31から最大60まで向上させた。

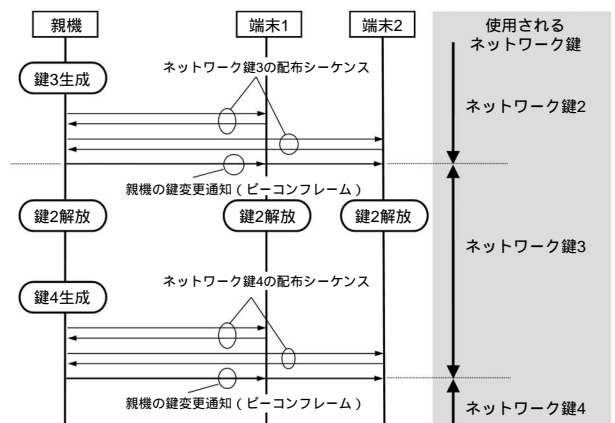
3.2 セキュリティ機能

従来のセキュリティ機能としては、親機がネットワーク鍵を管理してネットワークへの参加の認証を受けた端末に鍵を配布し、各端末はこの鍵を用いてフレームを暗号化して通信を行っていた。次世代HD-PLCでは、セキュリティ機能をさらに向上させるため、認証時のみならず、定期的に鍵を更新し配布する機能が追加された(第8図)。

下記に動的鍵更新の具体例を示す。

- (1) 所定時間が経過すると、親機はネットワーク鍵を新しく生成し、ネットワーク内の全端末に配布する。
- (2) 新鍵の配布が完了次第、親機は新鍵を使用することをビーコンフレームで通知する。
- (3) 全端末は、新鍵の使用が通知されるまでは旧鍵の使用を続けるが、通知後に全端末は新鍵の使用を開始する。
- (4) 旧鍵については、新鍵の使用開始所定時間経過後に破棄される。

また、各サブフレームに格納されているICV (Integrity Check Value) の値も新鍵の使用開始とともに初期化される(第7図)。ICVは改ざん防止を目的としており、各サブフレームに異なるシーケンス値が格納されている。各受信端末では、サブフレームごとに改ざんチェックを行う。鍵の変更のみならず、ICVのシーケンス値の初期化により、セキュリティが向上する。



第8図 動的鍵更新
Fig. 8 Dynamic key update

(注2) 米国Xerox社の登録商標

4. 異種PLC間共存のための制御方式 (ISP)

IEEE P1901委員会では、PHY/MAC仕様に加えて異種PLC間の共存を実現するための仕様を策定している (ISP)。ISPでは、Wavelet OFDM PLCとFFT OFDM PLCの共存を可能とする。具体的には、これらの技術を使ったIn-home PLC同士の共存やAccess PLCとの共存を行う場合に使用される。ここでは、In-home PLCは屋内で使用されるPLCを仮定し、Access PLCはビル構内や屋外で使用されるPLCを仮定する。本章では、ISPの基本概念について述べる。

〔1〕ISP信号

ISPでは、各PLC方式で共通に定義するISP信号を用いて共存のための制御を行う。この信号は、使用されるすべてのキャリアに同じ情報“1”を割り当てたFFT OFDM信号から構成される。これは、通常のデータ通信でフレームを構成する時に用いられる、プリアンブル信号と類似した信号形式である。通常のプリアンブル信号は、主にキャリア検出やシンボル同期などに用いられる。なお、Wavelet OFDM方式ではコサイン変調フィルタバンクを用いているため、FFT OFDM方式と同様に特別な処理を必要とせず容易にISP信号を送受信することができる。

また、OFDM信号特有の問題であるピーク電力対平均電力比を小さくする目的で、位相“0”と位相“ ”を用いて各キャリア位相のランダム化を行う。ただし、ISPでは各PLC方式において、異なるランダムパターン (位相ベクトル) を用いる。理由は、ISP信号に用いられた位相ベクトルを判別して、送信しているPLC方式を特定するためである。

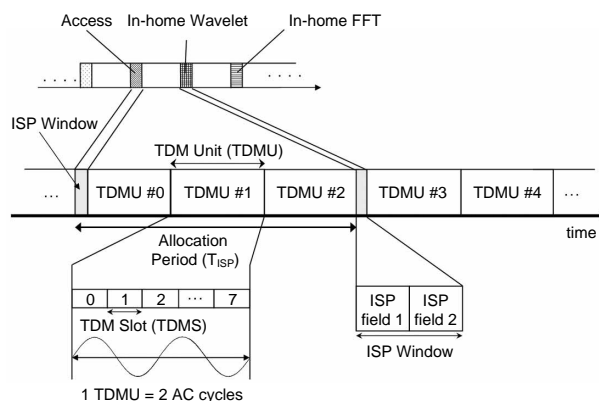
〔2〕ISP仕様の概要

ISPでは時分割処理を基本とし、交流電源周波数 (AC) に同期して制御される。ISPは、ISP WindowとTime Division Multiplexing Unit (TDMU) からなり、各TDMUは8個のTDM Slot (TDMS) から構成される。各TDMSはスロット割り当て表に基づいて使用され、各TDMUでは同じスロット割り当てが繰り返される (第9図)。また、ISP Windowは2つのISP fieldからなり、各PLC方式 (たとえばAccess, In-home Wavelet and In-home FFT) が送信するISP Windowは決められている。

なお、各スロット間隔は、AC (50 Hz or 60 Hz) に応じて決められている (第2表)。また、スロット割り当て表や各PLC方式がISP信号を送信するタイミングなども同様に決められている。

〔3〕ISPによる共存の具体例

まず、起動後にPLC端末はISP信号の探索を行うモードに移行し、他PLC端末から送信されたISP信号の位相ベクトルを判別して、現在ISPを使って共存しているPLC方式



第9図 ISPを使用した共存方法の一例

Fig. 9 Example of coexistence method with ISP

第2表 ISPに関する主な仕様諸元

Table 2 Main specifications of ISP

項目	50 Hz	60 Hz
AC cycle [ms]	20	16.67
T_{ISP} [ms]	120	100
TDMU [ms]	40	33.33
TDMS [ms]	5	4.17
ISP window [μ s]	491.52	491.52
ISP field [μ s]	245.76	245.76

を特定する。その後、自PLC方式にあらかじめ決められたISP WindowにISP信号を送信する。

TDMSの使用方法については、同じ電力線上に存在するPLC方式の種類に応じて、スロット割り当て表を使って決定する。このように、ISPでは時分割処理による干渉回避を基本としている。

なお図示していないが、Access PLCはISP field1&2にISP信号を送信することで、周波数分割処理による共存が可能である。ただし、周波数分割により共存しているIn-home PLCに対して、許容以上の干渉を与えない場合に限る。

5. 基本性能評価

ここでは、ベースライン技術方式に準拠した次世代HD-PLCの検証のため、FPGA (Field Programmable Gate Array) を使って試作機を開発し、通信性能評価を行った (第10図)。評価方法としては、試作機を国内仕様 (使用帯域: 2 MHz ~ 28 MHzでアマチュア無線と日経ラジオの使用帯域にノッチ形成ありの場合) に設定し、送受信機間に減衰器 (ATT) を挿入した理想的な伝送路環境でMAC速度を測定した。通信プロトコルはUDP (User Datagram Protocol) を使用した。() 内にパケット長を示す。また、

パケット長を変更した場合のMAC速度についても評価した（第3表）。

なお、UDPのMAC速度の上限は、評価に使用した100BASE-TX Ethernetの性能によるものである。ノッチを形成した場合の次世代HD-PLCのUDPのMAC速度は、理論的には最大で約160 Mbit/sである。

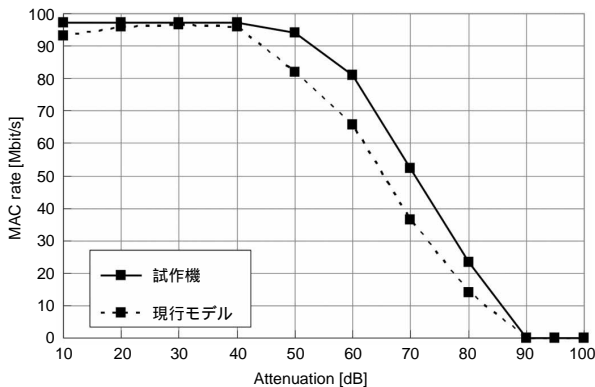
第10図および第3表の結果から、通信性能評価結果に関して下記のことが言える。

パケット長が長い場合の通信速度は、現行モデル同等以上の通信速度が得られる。

パケット長が短い場合の通信速度は、現行モデルよりも20 Mbit/sから30 Mbit/s向上する。

ATT 60 dB減衰時における通信速度は、現行モデルよりも10 Mbit/s以上向上する。

パケット長が長い場合の特性では、UDPのMAC速度の上限値と同じ値が得られている。また、パケット長が短い場合の特性では、サブフレーム構成の変更により伝送効率が向上している。さらに、ATT特性における試作機と現行モデルの特性差は、変調における多値度の増加およびLDPC-CCの効果によるものである。



第10図 試作機と現行モデルを使用した通信性能（パケット長：1514バイト）

Fig. 10 Communication performance with test model and existing model (packet length : 1514 Byte)

第3表 パケット長が異なる場合の通信性能

Table 3 Communication performance when using different packet lengths

	項目	試作機	現行モデル
通信性能	UDP (1514 Byte) [Mbit/s]	97.3	97.3
	UDP (512 Byte) [Mbit/s]	89.2	59.8
	UDP (64 Byte) [Mbit/s]	25.4	3.29

6. まとめ

今回、IEEE P1901委員会において承認されたベースライン技術方式には、家庭内だけでなく、ビル構内、工場や屋外への適用など、より大きなネットワークにも対応できる仕様も含まれている。そのため、スマートグリッドなど幅広い分野への応用も期待される。

今後は、この技術が世界的な標準技術となり、通信業界の発展に大きく貢献できるものと期待する。

当社では、IEEE 1901標準に準拠した次世代HD-PLC技術を使用して現行のHD-PLC採用商品との接続性の確保および異種PLC間での共存を図るとともに、HD-PLCアライアンスなどの団体を通じてIEEE 1901標準対応商品間の相互接続性の確保にも注力していく予定である。

参考文献

- 1) <http://grouper.ieee.org/groups/1901/> (参照2010.3.5).
- 2) Stefano Galli, et al. : Recent developments in the standardization of Power Line Communications within the IEEE. IEEE Communications Magazine 46, No. 7, pp.64-71 (2008).
- 3) Stefano Galli, et al. : The Inter-PHY Protocol (IPP):A simple co-existence protocol. IEEE ISPLC, pp.194-200 (2009).
- 4) <http://www.hd-plc.org/> (参照2010.3.5).
- 5) <http://www.homeplug.org/> (参照2010.3.5).
- 6) <http://www.cepca.org/> (参照2010.3.5).
- 7) 宮崎富弥 他：高速電灯線通信（HD-PLC）「どこでもリンク」 Matsushita Tech. Journal 51, No.5, pp.14-19 (2005).
- 8) Hisao Koga, et al. : A study on the performance of Wavelet OFDM in power line. IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, pp.1081-1086 (2008).

著者紹介



古賀久雄 Hisao Koga
 パナソニックシステムネットワークス（株）
 要素技術開発センター
 Core Technology Development Center,
 Panasonic System Networks Co., Ltd.
 博士（工学）