

第4世代HD-PLC技術と国際標準化

4th Generation HD-PLC Technology and Its International Standardization

川 畑 直 弘
Naohiro Kawabata

古 賀 久 雄
Hisao Koga

要 旨

IEEE 1901-2010準拠の高速電力線通信技術HD-PLC^(注1) (High Definition Power Line Communication) をIoT用途へ拡張するために、1つのIPコアで通信の長距離化と高速化を切り替え可能な第4世代HD-PLC技術を開発した。並行して国際標準化活動を行い、本技術をベースラインとする仕様が2019年3月にIEEE 1901a標準規格として認定され、2021年1月にはIEEE 1901-2010と統合される形でIEEE 1901-2020の規格書が発行された。ビル・工場・社会インフラのIoT化が急速に進む中、現行の第3世代技術では通信距離や通信速度が問題となる場合がある。第4世代技術で新たにリサンプリング処理の追加と最小通信帯域の狭帯域化を行うことで、通信距離で2.4倍、通信速度で2倍の性能を達成した。また、多様化するアプリケーションへ対応するため、複数のモードとチャンネルを用意し、伝送路特性に応じて最適な組合せを選択可能とした。

Abstract

To extend HD-PLC to IoT applications, we have developed 4th generation technology that can switch between long-range and high-speed communication with a single IP core. We conducted international standardization activities concurrently, acquiring IEEE 1901a approval for specifications based on our technology in March 2019, and IEEE 1901-2020 was published in January 2021. With the rapid progress of IoT, transmission distance and speed may become issues in current 3rd generation technology. With the 4th generation, by adding a resampling process and narrowing the minimum communication band, we have achieved performance of 2.4 times the distance and 2 times the speed of the current generation. In addition, multiple modes and channels are available, enabling the optimal set to be selected according to transmission characteristics.

1. はじめに

高速電力線通信技術の1つであるHD-PLCは、電力線に限らず、同軸線・制御線・電話線などのさまざまな線を媒体としてデータ伝送を実現する技術である。既に敷設されている線をそのまま通信線として活用できるため、新規の配線工事が不要となり、低コストかつ短期間でネットワークの構築が可能である。さらに、省線化による軽量化やメンテナンス性向上のほか、地下空間やトンネル、エレベータなど、無線が届きにくい場所への活用も期待できる。

また、本技術は国際標準IEEE 1901[1]として規格化されており、国内においても、2021年6月に電波法施行規則等の一部が改正され[2]、電圧600 V以下の単相および三相交流や、鋼船内に限り直流の利用が可能となるなど、その適用範囲が拡大している。

IoT/DX/GX時代を迎え、建物全体のエネルギーマネジメントや遠隔監視によるセキュリティ、設備保全などの需要が高まっており、その実現のため多数の機器やデバイスをネットワークに接続することが求められている。その通信方式として無線やイーサネット、フィールドバスなどのさまざまな選択肢がある中、HD-PLCはこれらの方式と共

存しながら社会のネットワークインフラを構築する技術として重要な役割を担っている。

しかし、大規模ネットワークの構築や高精細な映像伝送などの多様なIoTアプリケーションへ対応するにあたり、現行の第3世代技術では通信距離と通信速度が問題となる場合がある。そこで、通信の長距離化と高速化を実現し、1つのIPコアでそれらを切り替え可能な第4世代技術を開発し、国際標準化を行った。

2. 第3世代技術の概要と課題

2.1 第3世代技術の概要

[1] Wavelet OFDMと基本技術

HD-PLCでは2 MHz~28 MHzの短波帯を使用し、変調方式にはWavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)を採用している。その特徴は以下の2つである。

1つ目は、各サブキャリアを帯域制限しているため、任意の2本のサブキャリアを不使用とすることで35dBの深いスペクトルノッチを形成可能なことである。同じ短波帯を使用するアマチュア無線への妨害の回避や、国または地域ごとに異なる周波数利用規制への対応が容易となる。

2つ目は、高い伝送効率である。Wavelet OFDMでは、各シンボルにおいて、遅延波を吸収するためのGI (Guard Interval) の挿入を行わない。遅延波への耐性は劣化するも

(注1) 当社の日本およびその他の国における登録商標または商標。

の、その影響を上回る伝送効率向上の効果が確認されている[3].

当社は2000年代初頭から技術検討を行い、2006年には第1世代技術を搭載した国内初の200 Mbpsクラス宅内用PLCアダプタ（品番：BL-PA100）を商品化した。HD-PLCのネットワークは、1台のマスターに複数台のターミナルが接続する形態を基本構成としており、マスターがターミナルの認証や各種情報（MACアドレスや接続台数など）の管理を行っている。第1世代技術では、マスター1台当たり16台のターミナルの管理を行っていた。その後、2009年には第2世代技術として当社独自のメディアアクセス方式であるDVTP（Dynamic Virtual Token Passing）機能の搭載を行った。本機能では、マスターがターミナルへ動的に送信権を付与することで衝突の発生しないアクセスを実現している。そして、2013年には現行の第3世代技術として物理速度の理論最大値250 Mbpsを達成するとともに、マスター1台当たり128台のターミナルを管理することが可能となった。伝送路推定によるサブキャリアごとの情報量の最適化や誤り訂正によるノイズ耐性の向上、ダイバーシティ伝送など、ロバスト通信に必要な機能も搭載している。

[2] HD-PLCマルチホップ

第3世代技術では、主に産業用途で長距離かつ広範囲のネットワークを構築するため、複数のターミナル間でデータを順次中継するマルチホップ機能を実現している。マスター1台で管理可能なターミナルを1024台まで拡張し、最大10ホップまでの中継が可能である。ITU-T G.9905[4]準拠のプロアクティブ型ルーティングプロトコルであるCMSR（Centralized Metrics based Source Routing）をHD-PLCに適用することで、ルート探索トラフィックがネットワークに与える負荷を抑えながら伝送路環境の変動へ迅速に追従し、信頼性の高いルート構築を可能としている。

実際に2階建ての建物で実証を行っており、およそ130 m × 70 mのフロアにHD-PLCの通信端末を設置したときに、フロア間の経路も含め、各端末間で3 Mbps～10 Mbpsの実効速度を達成している[5].

2.2 通信距離と通信速度の問題

昨今のIoTアプリケーションの多様化に伴い、現行の第3世代技術では通信距離と通信速度が問題となる場合がある。

通信距離に関しては、ビル・工場・集合住宅などの大規模な建物に導入されるBEMS（Building Energy Management System）やFEMS（Factory Energy Management System）、スマートメーターへの適用を考えた場合、端末間の距離が長くなる傾向にあり、建物内で数10m～数100m、電力網では数kmに及ぶ場合もある。さらに、宅内のHEMS（Home Energy Management System）へ適用する場合においても、住宅設

備・家電・センサ類が常時インターネットに接続する必要があるため、さまざまな宅内環境において端末同士を通信可能とする高いロバスト性が求められる。2.1節に記載のマルチホップ技術が1つの解決手段であるものの、電力線の配線系統は通常ツリー構造であるため、各端末を通信品質の観点で最適な場所に設置できるとは限らず、通信が不安定または不通となる場合がある。

一方、通信速度に関しては、主にセキュリティやエンターテインメントの分野において同軸線を伝送路としたカメラ映像の高画質化（4K/8K）が進んでおり、第3世代技術をこのようなアプリケーションに適用するには速度不足の懸念がある。

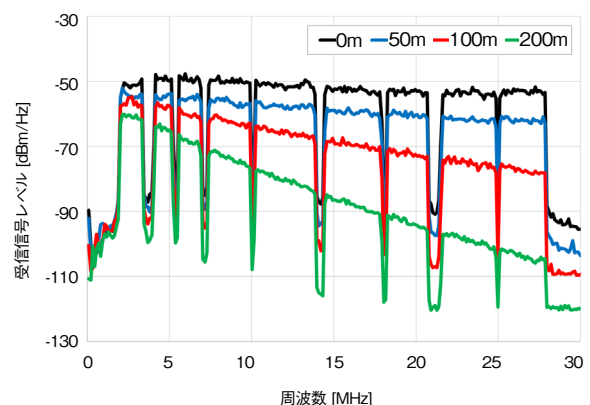
したがって、第3世代技術では通信の長距離化と高速化が課題であり、その解決が求められてきた。

3. 第4世代技術と国際標準化

3.1 通信の長距離化と高速化

一般に、電力線はインピーダンスが規定されておらず、分電盤による分岐も多数存在し、不特定多数の負荷（電気機器）も接続されるため、通信用途には劣悪な伝送路環境である。そのような環境下で通信の長距離化を実現するためには、通信帯域内のSNR（Signal to Noise Ratio）を向上させる、すなわち信号減衰もしくはノイズが少ない帯域を選択して通信を行う高いロバスト性が必要となる。

簡単のため単線ケーブルを例にとると、その伝送路特性は高周波ほど減衰が大きい。第1図は単線VVF（Vinyl insulated Vinyl sheathed Flat type）ケーブルを使用したときのPLC信号の受信スペクトルを示しており、ケーブル長が長くなるほど高域側の信号が減衰している。このとき、低域側に信号が残っていても、通信帯域内の信号の大部分が減衰し十分なSNRを確保できない場合には通信ができない。



第1図 単線VVFケーブル使用時の受信スペクトル[5]

Fig. 1 Received signal spectrum via single VVF cable[5]

第3世代技術の場合、サブキャリアベースで102本以上の可用帯域を確保できない場合には端末間のリンクが確立しない仕様となっている。したがって、通信の長距離化のためには低域側に十分な数のサブキャリアを確保することが求められる。

また、単線ではなく分電盤による分岐が存在する場合には、各線路からの反射の影響でマルチパス伝送路となり、その周波数特性は周波数ごとの減衰量が不規則に変化したものとなる。このような伝送路においても、各サブキャリアのSNRに応じた変調を行うことで通信は可能であるが、分電盤では分岐数の増加に伴い減衰が大きくなるため、特に産業用の大規模な分電盤では可用帯域の確保が困難となる。

その場合、十分なSNRを確保可能な帯域にサブキャリアを集約することで分岐による減衰の影響を抑え、通信の長距離化が可能となる。したがって、通信の長距離化を実現するには、伝送路特性に合わせてシンボル長を可変とし、サブキャリア間隔を変更できるような機能が必要となる。

一方、通信の高速化が求められる用途において、その伝送路は主に同軸線や制御線である。これらの線は通信の専用線であるため、伝送路で生じる減衰とノイズは電力線よりも十分に小さい。高速通信を実現する方法として、既存のWavelet PHY (Physical Layer) の機能を利用可能であり、前述の長距離化と合わせて1つのIPコアで実現可能な観点から、サブキャリア間隔を変更し広帯域化を図る方式を採用した。

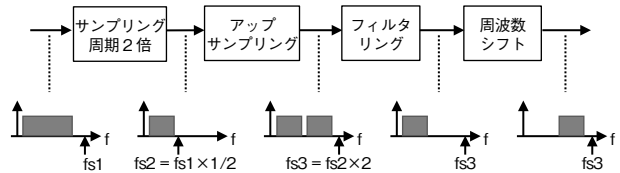
3.2 リサンプリング処理

第4世代技術では、シンボル長、言い換えるとサブキャリア間隔を可変とするために、Wavelet OFDM送信機内にリサンプリング処理を新たに追加している。これにより、第3世代技術との互換性を保ちながら、伝送路特性に応じて最適な周波数帯域を選択することが可能となる。

一例として、サブキャリア間隔を1/2倍にする場合の過程を第2図に示す。リサンプリングブロックへの入力は第3世代技術の信号と同じであり、そのサンプリング周波数(=2*fs1)は62.5 MHzである。サンプリング周期を2倍にすると、ナイキスト周波数がfs1の1/2倍のfs2となり、fs2未満の帯域に信号が再配置される。次に、2倍のアップサンプリングを行うことで、fs2の高周波側に折り返し信号が生成され、ナイキスト周波数はfs2の2倍のfs3になる。ここで、高域側の折り返し信号を除去するフィルタ処理により、入力信号の1/2倍の帯域幅を有する信号を生成できる。さらに、周波数シフトを行うことで任意の周波数帯域に信号を配置可能である。

また、上記の過程においてサンプリング周期を4倍にし、アップサンプリングとフィルタリングの処理を2回繰り返

すことで、入力信号の1/4倍の帯域幅を有する信号も生成可能である。



第2図 リサンプリング処理の例
Fig. 2 Example of resampling process

3.3 最小通信帯域の狭帯域化

ロバスト性を向上し通信の長距離化を実現するため、リサンプリング処理によるサブキャリア間隔の変更に加え、最小通信帯域の狭帯域化を行っている。ここで、HD-PLCのPPDU (Physical layer Protocol Data Unit) は主にフレームヘッダとフレームボディで構成される。フレームヘッダには送信先端末のMACアドレスや送信フレームの種別などの制御情報が含まれており、第4世代技術において、フレームヘッダで送信する情報量の最小化を行っている。なお、フレームヘッダから削減された制御情報はフレームボディ部分で送信されるため、狭帯域化のモードにおいても送信する制御情報の量は同じである。その結果、フレームヘッダの長さが34 Byteから8 Byteへ変更となり、フレームヘッダの情報の割り当てに必要なサブキャリア数も102本から50本へ減少したことで、最小通信帯域の狭帯域化が可能となっている。本稿では、第3世代技術による方式をFH34 (Frame Header 34 Byte) 方式、第4世代技術による狭帯域化後の方式をFH8 (Frame Header 8 Byte) 方式と呼ぶこととする。

3.4 通信のモードとチャネル

第4世代技術では通信モードとチャネルを新たに定義している。これらはIEEE 1901の標準仕様として規定されており、各モードにおけるシンボル長、周波数オフセット量、チャネルIDを第1表に示す。

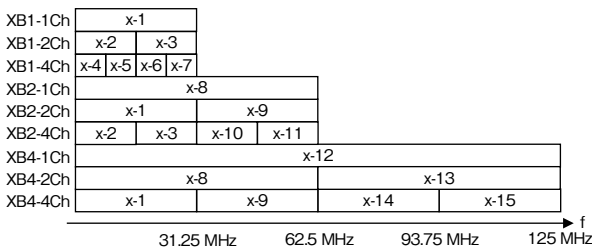
周波数帯域とその帯域内に存在するチャネル数の組合せに応じて9つのモードが存在する。周波数帯域には、第3世代技術と同じSingle Channel Wavelet band (XB1) と、その2倍の帯域であるExtended band 2 (XB2)、および4倍の帯域であるExtended band 4 (XB4) の3種があり、それぞれの帯域内に1, 2, 4つのチャネルが存在する。各モードに設定されているチャネルIDと周波数の関係を第3図に示す。XB1-1Chモード (チャネルID: x-1) は第3世代技術と同じ仕様であり、通信の互換性が保たれている。また、XB1-2Chモードでは、XB1-1Chモードに対してシンボル長が2倍、すなわち

サブキャリア間隔が1/2倍となっており、周波数シフトを行うことで2つのチャンネル（チャンネルID：x-2, x-3）を形成可能である。同様に、シンボル長と周波数オフセット量の組合せにより15のチャンネルを形成可能であり、使用者は伝送路特性に応じて最適なチャンネルを選択する。

第1表 各モードのシンボル長、周波数オフセット量、およびチャンネルID

Table 1 Symbol length, frequency offset, and channel ID in each mode

モード	シンボル長 [μs]	周波数オフセット量 [MHz]	チャンネルID
XB1-1Ch	8.192	0	x-1
XB1-2Ch	16.384	0	x-2
		15.625	x-3
XB1-4Ch	32.768	0	x-4
		7.8125	x-5
		15.625	x-6
		23.4375	x-7
XB2-1Ch	4.096	0	x-8
XB2-2Ch	8.192	0	x-1
		31.25	x-9
XB2-4Ch	16.384	0	x-2
		15.625	x-3
		31.25	x-10
		46.875	x-11
XB4-1Ch	2.048	0	x-12
XB4-2Ch	4.096	0	x-8
		62.5	x-13
XB4-4Ch	8.192	0	x-1
		31.25	x-9
		62.5	x-14
		93.75	x-15



第3図 チャンネルIDと周波数の関係
Fig. 3 Relationship between channel ID and frequency

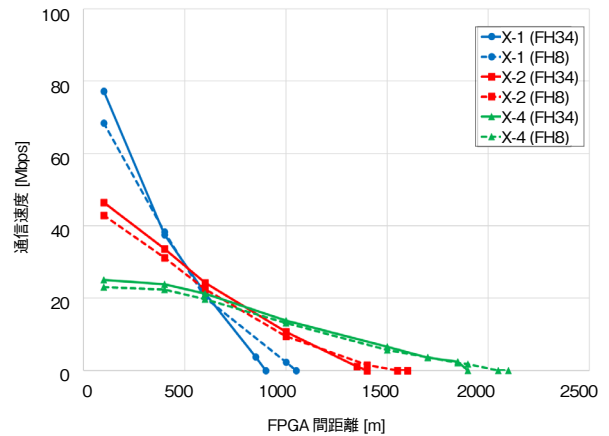
3.5 通信性能評価

本技術の有効性検証のため、FPGA (Field Programmable Gate Array) に機能を実装し、長距離化（通信距離向上、ロバスト性向上）と高速化の観点で通信性能の評価を行った。

〔1〕通信距離向上

通信距離の向上については、単線VCT (Vinyl Cabtyre) ケーブルを伝送路とし、FPGA間の距離を変えながらTCP (Transmission Control Protocol) によるベストエフォート型の通信を行い、受信側の速度を測定した。チャンネルIDにつ

いては、単線ケーブルの伝送路特性を踏まえ、XB1-1Ch, XB1-2Ch, XB1-4Chの各モードで最も低い周波数帯域のもの（チャンネルID：x-1, x-2, x-4）を選択している。距離に対する通信速度の測定結果を第4図に示す。また、各チャンネルIDにおける最大通信距離（通信不可となる直前の距離）とx-1 (FH34方式, FH8方式) に対する比率、およびFH8方式のFH34方式に対する比率をそれぞれ第2表に示す。



第4図 単線VCTケーブル使用時の距離に対する通信速度
Fig. 4 Transmission rate vs. distance via single VCT cable

第2表 各モードの最大通信距離

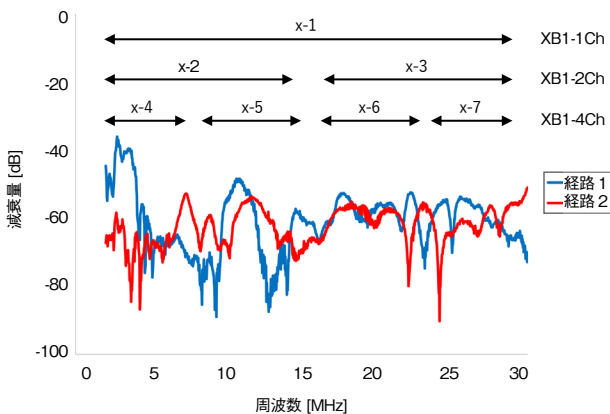
Table 2 Maximum transmission distance in each mode

	x-1		x-2		x-4	
	FH34	FH8	FH34	FH8	FH34	FH8
最大通信距離[m]	850	1000	1350	1550	1850	2050
vs. x-1(FH34)	1.00	1.18	1.59	1.82	2.18	2.41
vs. x-1(FH8)	-	1.00	-	1.55	-	2.05
FH34 vs. FH8	1.00	1.18	1.00	1.15	1.00	1.11

チャンネルIDの観点では、距離が短いときにはx-1が最も高速であるが、距離が長くなるにつれてx-2およびx-4の速度が上回り、x-1に対してx-2は約1.5倍、x-4は約2倍の長距離化が可能である。一方、FH34方式とFH8方式を比較すると、最小通信帯域の狭帯域化が10%~20%の長距離化に寄与している。距離が短いときにFH8方式の速度が下回っているのは、FPGAによる試作機のため受信側でヘッダ情報の解析に時間を要しており、伝送効率が低下しているためである。これは一時的な要因であり、今後の量産化においてFH34方式と同等の性能を達成可能な見込みである。チャンネルの形成による通信帯域の最適選択とヘッダ長の変更による最小通信帯域の狭帯域化の効果を組み合わせることで、第3世代技術（チャンネルID：x-1, FH34方式）と比較し、最大で2.4倍の長距離化を実現している。

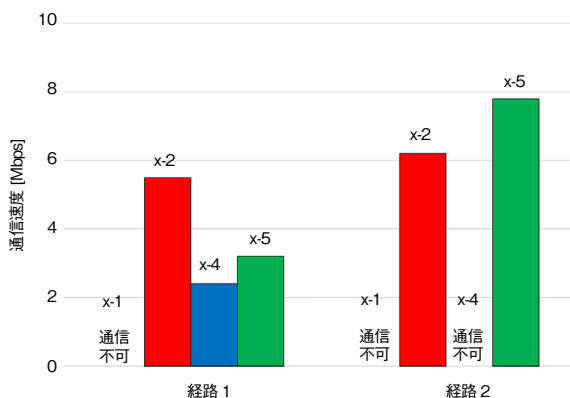
[2] ロバスト性向上

ロバスト性の向上については、2階建ての戸建住宅で評価を行った。分電盤から距離の離れたコンセントを1階から1個、2階から2個抽出し、フロアを跨（また）ぐ2組のコンセント間で伝送路を構築した。各伝送路をそれぞれ経路1、経路2としたときの伝送路特性を第5図に示す。劣悪な伝送路環境となる経路を抽出したこともあり、各経路において約60 dBの減衰があり（一般の家屋では30 dB～40 dB程度）、また本住宅内のコンセントにはさまざまな電気機器が接続されているため、それらの機器からのノイズの影響も考慮する必要がある。



第5図 戸建て住宅の伝送路特性[5]

Fig. 5 Transmission characteristics in a house[5]



第6図 戸建て住宅内での通信速度[5]

Fig. 6 Transmission rate in a house [5]

各経路でTCP通信を行ったときの通信速度の測定結果を第6図に示す。いずれの経路においてもチャンネルID：x-1ではリンクが確立せず、減衰の少ない他のチャンネルを使用することで通信可能な距離が向上している。特に、経路1ではチャンネルID：x-2、経路2ではチャンネルID：x-5を選択した場

合に最も高速な通信が可能であり、この結果は、複数のモードおよびチャンネルの中から最もSNRの高い組合せを選択することの有効性を示している。

[3] 高速化

高速化については、静的環境で評価を行った。伝送路としてHD-PLC評価環境装置 (DisLINE) [6]を使用し、チャンネルID：x-8を選択した場合の最大物理速度は450 Mbpsであった。これは、第3世代技術の最大物理速度の実測値230 Mbpsの2倍に相当する。また、チャンネルID：x-8の物理速度の理論最大値は500 Mbpsであり、アナログフィルタの影響や誤り訂正の冗長性を考慮すると、本結果は妥当と言える。高速化が適用される伝送路は主に同軸線や制御線であり伝送路のノイズは十分に小さいため、実環境においても本結果と同等の性能を得ることが可能と考えられる。

3.6 国際標準化活動

HD-PLC技術の国際標準化は、第3世代技術をベースライン技術の1つとしたIEEE 1901-2010[7]の規格書が発行されたことを受け、2010年12月にその活動をいったん終了している。しかし、第4世代技術の誕生に伴い、2018年3月に活動を再開した。IEEE 1901-2010をIoT向けアプリケーションに対応させるための機能拡張 (Amendment) としてIEEE P1901aのWG (Working Group) を立ち上げ、第4世代技術仕様の提案を行った結果、同年6月に本技術がベースライン技術として承認された。その後は、ドラフト仕様の策定および承認を経て、2019年3月にIEEE 1901a-2019[8]として認定、同年5月に規格書が発行された。

また、IEEEの規格文書は承認後10年以内に改訂されない場合、「Inactive」な状態へ移行される。IEEE 1901-2010もその対象となっており、2020年9月にIEEE 1901a-2019を統合する形で新たにIEEE 1901-2020[1]として認定され、2021年1月に規格書が発行された。

さらに、主にスマートグリッド用途でのセキュリティ強化に向けた機能が2021年12月にIEEE 1901b-2021[9]として認定され、2022年2月に規格書が発行されている。今後も、HD-PLCの新技術仕様の策定とともに国際標準化の活動を推進する。

4. 想定される応用と普及拡大への取り組み

第4世代技術により通信の長距離化と高速化を実現したHD-PLCは、住宅からビルや工場、社会インフラに至るまで、幅広い分野への適用が期待できる。長距離化は、スマートメーターのデータ収集やスマート街路灯の状態監視および制御、さらには、太陽光パネルや蓄電池などの創エネ・蓄エネ機器と空調・照明機器の連携によるエネルギー制御

などへの適用に有効である。一方、高速化は、高画質化が進む監視カメラの映像伝送や高容量が求められるWi-Fi^(注2)機器の幹線ネットワークなどへの適用に有効である。

また、このような分野への普及拡大に向けて、HD-PLCアライアンスとともに他規格団体と連携した活動を行っている。その一環として、HD-PLCを採用したLONMARK規格が、2020年2月にANSI/CTA 709.8 LON HD-PLC[10]として米国国家規格協会により承認された。スマートビルディングの実現に向けたエネルギー機器のIP化や高速制御の需要は大きく、今後、BACnet (Building Automation and Control Networking Protocol) やKNXなど、関連する規格への採用に向けた取り組みも行っていく。

5. まとめ

伝送路特性に応じて最適なモードとチャネルを選択可能な第4世代HD-PLC技術を考案し、通信の長距離化と高速化を実現したことで、IoT向けネットワーク基盤技術としての有効性を示した。当社は既に第4世代技術のIPライセンスの供与を開始しており、LSIベンダと協業しながら2022年度の量産化を目指している。また、新たな取り組みとして、本技術で採用しているWavelet OFDMを適用した近距離無線通信技術 (PaWalet Link^(注3)) の開発を行っている[11]。同じ通信方式を用いることで、有線通信と無線通信のハイブリッド環境を簡単に構築でき、電波の到達範囲を狭いエリアに限定することで、無線で接続する端末の場所を特定する位置検出への応用が可能、さらには磁界共鳴を利用したワイヤレス給電技術との併用も可能である。EV (Electric Vehicle) やドローンなどのモビリティ分野へ展開することで、本技術の適用範囲をより一層拡大し、グローバルでのDX/GX推進に貢献する。

参考文献

- [1] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, IEEE 1901-2020, 2021.
- [2] 電波法施行規則等の一部を改正する省令, 総務省令第六十五号, 令和三年.
- [3] 古賀久雄 他, “電力線伝送路におけるWavelet OFDM特性についての一検討,” IEEJ Trans. EIS, vol. 128, no. 7, pp. 1081-1086, 2008.
- [4] Centralized metric-based source routing, ITU-T G.9905, 2013.
- [5] 川畑直弘 他, “第3世代HD-PLCの現在と第4世代が目指す世界,” RFワールド, no. 53, pp. 101-113, 2021.
- [6] 九州計測器株式会社, “HD-PLC評価環境装置_DisLINE,” <https://premium.ipros.jp/qk/product/detail/2000202235/>, 参照 Apr. 20, 2022.
- [7] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, IEEE 1901-2010, 2010.
- [8] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications - Amendment 1: Enhancement for Internet of Things Applications, IEEE 1901a-2019, 2019.
- [9] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications - Amendment 2: Enhancements for Authentication and Authorization, IEEE 1901b-2021, 2022.
- [10] Open Data Communication in Building Automation, Controls and Building Management – Control Network Protocol Specification – Part 8: Control Network Protocol/High Definition Power Line Channel Specification (CNP/HD-PLC), ANSI/CTA-709.8, 2020.
- [11] パナソニック株式会社, “世界初、Wavelet OFDMを適用した近距離無線通信技術を開発,” <https://news.panasonic.com/jp/press/data/2021/11/jn211110-1/jn211110-1.html>, 参照 Apr. 20, 2022.

執筆者紹介



川畑 直弘 Naohiro Kawabata
技術部門 事業開発室
Technology Sector, Business Development Office



古賀 久雄 Hisao Koga
技術部門 事業開発室
Technology Sector, Business Development Office
博士 (工学)

(注2) Wi-Fi Allianceの登録商標。

(注3) 当社の商標。