

# 商用電源における電圧零交差点での電流制御による通信とパルス幅符号化

池上 洋行<sup>†a)</sup> 落合 秀也<sup>†</sup> 塚田 学<sup>†</sup> 新居 英明<sup>††</sup>  
江崎 浩<sup>†</sup>

Z3C: Zero-Cross Current Communication with Pulse Width Coding over Power Line

Hiroyuki IKEGAMI<sup>†a)</sup>, Hideya OCHIAI<sup>†</sup>, Manabu TSUKADA<sup>†</sup>, Hideaki NII<sup>††</sup>, and Hiroshi ESAKI<sup>†</sup>

あらまし スマートグリッドにおいて、電力線を用いた通信は利便性が高くさまざまな研究が行われているが、従来のいわゆる電力線通信は電圧に信号を印加する方式をとっている。本研究では、これまでほとんど研究が行われてこなかった電力線上で電流を使う通信方式に着目し、新しい電流ループを用いた電力線通信、Zero-Cross Current Communication (Z3C) を提案する。Z3C では電圧零交差点付近で信号電流をパルス形状で発生させる。するとその信号は電力線の上位方向に向かって伝搬し、下位から上位への通信が成立する。またパルス幅符号化により電流パルスを多値化する。本研究で開発した試験機による実験では、実際の商用電源の上で、さまざまな負荷装置のノイズに耐えて 300 bps の通信速度を達成した。

キーワード 電力線通信, スマートグリッド, 電流ループ, 低周波電力線搬送

## 1. ま え が き

ZigBee, Bluetooth, WiFi, Wi-SUN, 電力線通信 (PLC: Power Line Communication) などの通信技術は、近年の物のインターネット (IoT: Internet-of-Things) の流れの中で広く使われている。その中でも大きなアプリケーションとして注目されているエネルギー管理システム (EMS: Energy Management System) がある。EMS においても、スマートタップ・スマートメータや各家電製品が前述のような通信媒体を用いて消費電力情報の収集や機器制御を行っている。EMS ではあらゆる機器は電力線に繋がっていることから、PLC との相性が特によいと考えられる。PLC の技術は古くからあるが、近年特に EMS への応用を目指して活発に研究・開発がされている。しかしなが

ら、通信機器の場所特定や長距離伝送が可能な電流に着目した電力線通信の研究は近年ほとんど行われていない。

本研究では、低圧の商用電力線の上で電流を使って通信を行う新しい方式、Zero-Cross Current Communication (Z3C) を提案する。この方式では図 1 の矢

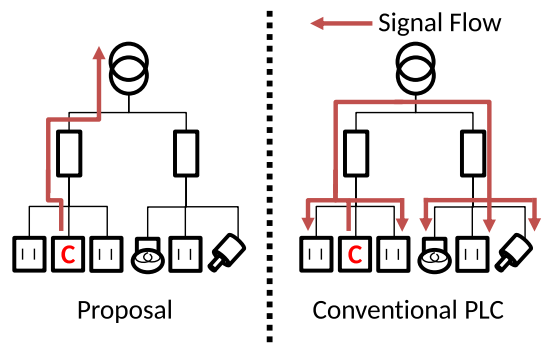


図 1 Z3C と従来型電力線通信の信号伝搬: Z3C では電力線をツリーとみた際に上位にのみ信号が流れる。

Fig. 1 Difference of signal propagation between conventional PLC and Z3C.

<sup>†</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科, 東京都 Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656 Japan  
<sup>††</sup> (株) IIJ イノベーションインスティテュート, 東京都 IIJ Innovation Institute Inc, Tokyo, 102-0071 Japan  
a) E-mail: ikegam@hongo.wide.ad.jp

印に示すように、電源を親とした木構造で電力線を見た際に、上位方向にのみ信号が伝わる。電流は電源と負荷間のループであり、電源に向かってどこまでも流れる。そのため Z3C における信号は、キルヒホッフの電流則に従い分岐回路の電流と足し合されて行くが、信号電流そのものは電源まで届く。この特性に着目した先行研究として TWACS [1], [2] がある。TWACS は電流ループを用いる PLC 技術であり、高圧配電網での長距離通信を実現するために開発された。TWACS では 60 から 70 A 程度の電流パルスを用いて 50 bps 程度の通信を実現している。

従来の電力線通信と電流ループを用いる電力線通信のもう一つの違いとして信号伝搬範囲がある。図 1 に示すように、電流ループを用いる方式では上位方向のみに流れる。そのため、枝葉に受信機をつけておくことで、どの枝葉から信号が発生したかを特定できる。一方、従来の電力線通信では信号は分岐を含めた電力線全体に広がるため、どの枝葉から発生した信号か特定することができない。提案の Z3C では、この特徴に着目し機器識別などの応用を想定している。機器識別では、識別子を送受信するため数百 bps 程度の通信速度が必要であり、またさまざまな機器に内蔵するためには小型な通信回路が必要である。このような要件を TWACS で満たすことは難しく、われわれは新しい方式を提案している。

本論では、Z3C におけるアップリンク通信（下位に設置した子機から上位に設置した親機への片方向通信）の基本理論・基礎実験について論じる。Z3C では、子機は交流電源電圧の零交差付近において、5 A 程度の電流パルスを発生させる。親機は零交差付近における電流パルスを検出することで通信を行う。またパルス幅への符号化を行い、最大 300 bps の通信速度を実現する。著者らの先行する研究として ECPLC [3] があり、ECPLC では負荷機器識別という応用に絞って研究した。本論文は低圧環境における電流ループを用いる電力線通信の基礎技術に内容を拡充したものであり、パルス幅を用いた多値表現やノイズに関する評価等を新たに行ったものである。

本論文は次のように構成される。2. では、まず Z3C に関連した研究について述べる。次に 3. で、提案する Z3C のアップリンクについて詳細を説明する。4. でプロトタイプシステムを用いた実験とその結果について述べ、5. で考察を述べる。最後に 6. で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

本研究に強く関係した研究分野として、電力線通信と負荷機器識別がある。本章では、それらの研究領域の方向性について俯瞰し、情報伝送に電流を用いる関連性の高い TWACS について述べる。

### 2.1 電力線通信と電流ループ

電力線は電気エネルギーを伝送するための線路であるが、この線路を用いて通信を行う技術が電力線通信である。有線上の無線信号 [4] として、線路のモデル化や変調手法等、広く研究開発が進められてきた [5]。それらの研究の成果として、広帯域電力線通信では IEEE 1901-2010 [6]、狭帯域電力線通信では ITU-T G.9903 [7] (G3-PLC) など標準規格も策定された。

これに対し、本研究で提案する方式は、交流商用電源を利用してそこからの電流を引き込む、電流ループを用いた通信であり、原理が全くことなる。従来の電力線通信方式では、通常数百 kHz から数十 MHz といった周波数領域を使用した電圧を通信機から注入する。そのため、電力線を通信で言うところのバスと見做すことができ、コンセントに通信機を接続するだけで他の通信機と通信ができる環境を構築してきた。

電流ループは電源との間に形成され、このループ上に流れる電流はどの点でも同じであるという特性がある。その特性から長距離通信に用いられることがおおく、4-20 mA 電流ループ [8] や RS485 [9] などがある。4-20 mA 電流ループは電流値に値を重畳し伝送する。RS485 では、低インピーダンスの終端抵抗を取り付けることで電流を終端抵抗まで引き込み、信号を遠くまで伝えることができる。しかしながら、この性質を用いた電力線通信の技術は十分に研究されていない。

### 2.2 負荷機器識別・場所特定

負荷機器の識別や機器の場所特定の技術は、EMS における自動的な電力分析を行うために必要である。この技術に対する要求は非常に高い。この要求は近年の IoT の流れに従いコンセント単位での電力計測など、非常に高い密度での計測を EMS で行うようになったことに起因する。おもに受動型と能動型の技術があり、特に受動型の研究は広く行われている。受動型とは、電力データの時系列解析結果から負荷装置が何であるかを予測する技術のことである。Reinhardt らは、負荷装置の消費電力データを 1 分ごとに取得し、その時系列データから機器の識別を行った [10]。また更に細かな、電圧・電流・力率のデータを用いた例として加藤

らの研究 [11] がある。これらの研究では、既設の電力計のデータから機器識別できるという利点はあるが、推定であることから精度に限界があり同じ機器が複数あるときに個々の機器を識別できない課題がある。

そういった問題が発生しない方式として、能動型の手法がある。例えば新しい通信線をコンセントとプラグに追加し、コンセント・プラグ間で通信を行って識別する方式などは能動型である。電気自動車の充電規格ではコンセントとプラグの形状を変更し、新たな物理線を追加している [12]。また SONY は RFID の通信機をコンセントとプラグに内蔵する認証コンセントを発表した [13]。電力網そのものを変更する方式としては、電力パケットがある [14], [15]。電力パケットでは発電元が電力の宛先を電力につけて電力網に入れることで電力がインターネットにおけるパケットのように伝送される。電力パケットでは負荷機器を発電元が指定するため、そもそも負荷機器を明らかにするというタスクを必要としない。

従来の能動的な手法は、電力システムのさまざまな部分を変更する必要があり、変更コストが高い。そこで既設の電力網をそのまま使用できる電力線通信による方法を考える。しかし、前述のように従来の電力線通信の信号は全てのコンセントに伝搬するため、利用することができない。一方で電流を用いる電力線通信であれば、信号は上位方向のみに伝搬する。このため、例えばコンセントなどの電力線の枝葉に受信機を付けることで、既設の電力網を用いて負荷機器識別を行うことができる。

### 2.3 TWACS

TWACS とは、Mak らによって開発された電力線通信技術 [1], [2] である。電力会社の顧客に設置された電力計の値を自動検針するために開発された技術であり、配電用変電所に設置された親機と各電力計に設置された子機の間で通信を行う。親機から子機の通信をアウトゴーイング (ダウンリンク) 通信と呼び、子機から親機の通信をインカミング (アップリンク) 通信と呼ぶ。日本においても導入を検討した美齊津らの研究 [16] がある。

TWACS のアップリンク通信では、電圧の零交差点直前から直後にかけて、サイリスタを用いて線路を短絡し 60 から 70 A 程度の電流を発生させ、この電流を親機で読み取ることで通信を実現している。ダウンリンク通信は、親機でも同様に短絡し電圧にひずみを作ることで実現している。ダウンリンク通信では非常に

低い周波数を用いること、アップリンクでは電流ループを用いることで長距離伝送に適した通信方式として提案され、運用されている。

TWACS はサイリスタを用いて線路を短絡することで交流電圧変動に受動的な電流パルスを作り通信を行う。短絡時の電流は線路のインピーダンスによって異なり、厳密に計算できないため、十分な大きさの信号電流を発生し、しきい値で信号電流の有無を判定する。そのため、TWACS では原理的に各零交差点でパルスの有無による 2 値 (1bit) しか表現できない。一方本研究で提案する Z3C ではトランジスタを用いることで能動的に制御された電流パルスを作り出す。その結果、パルス幅を調整することで多値の表現が可能になる。実際に本研究で行った実験では、各零交差点で 8 値 (3bit) の転送を実現した。また低圧環境に着目することで発生するパルス高も 5 A 程度と低くすることができ、通信回路の小型化も可能となった。

### 3. Z3C: 電圧零交差点での電流通信

本章では、Z3C のアップリンク通信原理とパルス幅符号化について述べ、その線路モデルとパラメータに関して解説する。その上で Z3C 装置の設計を行う。

#### 3.1 零交差点でのパルス幅符号化

Z3C では交流電圧の零交差点付近を通信に用いる。図 2 に示すように、電圧の零交差点付近において、任意幅  $T_w$  の電流パルスを発生させる。このパルス幅  $T_w$  を変えることによって複数の情報を半周期に一度送信する。このパルス幅に多値情報を符号化する手法をパルス幅符号化と呼ぶ。

理想的な波形の発生時の電圧  $V$  と電流  $I$  について式 (1) に示す。このように、零交差点から  $T_d$  まち、 $I_h$  の電流パルスを  $T_w$  の間発生させる。波の負区間に入る零交差点では  $-I_h$  のパルスを同様に発生させる。

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

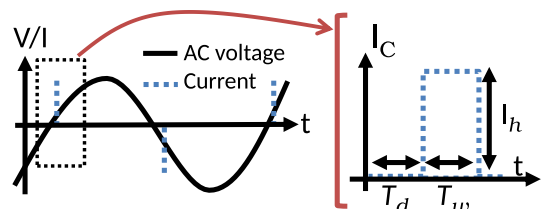


図 2 Z3C における電流パルスの波形：零交差点から  $T_d$  時間後に  $T_w$  時間・ $I_h$  の電流パルスを発生させる。

Fig. 2 Waveform of Z3C.

$$I = \begin{cases} 0 \\ I_h \quad (T_d < t < T_d + T_w) \end{cases} \quad (1)$$

ただし  $t$  は  $[0, \frac{\pi}{\omega}]$  の範囲とする。

次に多値伝送を行うための、パルス幅符号化について述べる。まず一度のパルスで  $N$  種類の値を送送することを考える。具体的には、いまここで  $N$  種類の状態を  $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$  で表すとす。そして、ある状態  $s_i$  に対し、 $T_w(s_i)$  幅のパルスを発生させるとする。ここで  $s_i$  に対して  $T_w(s_i)$  の値は一対一に対応していて、 $T_w$  は  $T_{unit}$  の整数倍である。つまり  $T_w$  は、

$$\forall i, j, i \neq j \rightarrow T_w(s_i) \neq T_w(s_j)$$

$$\forall i, \exists k \in \mathbb{N}, T_w(s_i) = kT_{unit}$$

を満すものとする。

例えば  $T_{unit} = 50$  の場合、 $s_1 = 0, 2 = 1$  の二値を送る場合、 $T_w(0) = 50, T_w(1) = 100$  のように  $T_w$  を対応づけるとする。同様に四値の場合、 $s_1 = 00, s_2 = 01, s_3 = 11, s_4 = 10$  を  $T_w(00) = 50, T_w(01) = 100, w(11) = 150, T_w(10) = 200$  などとする。

電圧の零交差点付近を用いる理由は二つある。一つは電力線本来の負荷電流も同様に少ない点、二つ目は消費電力を抑えられる点である。個別の理由について詳しく説明する。

商用電源に接続される負荷にはおおきく分けて、交流電力をそのまま適応できる交流負荷と、交流電力を直流に変換して使用する直流負荷がある。直流負荷では交流直流変換器 (ACDC アダプタ) を用いて電力を供給する。この交流直流変換器は、零交差点付近においては電流をほぼ発生しないという特徴がある。交流負荷においては、力率の低い機器が存在し、電流パルスと負荷電流が重なるが、交流負荷においては負荷電流波形がなめらかであるため電流パルスをはっきりと識別できる。このように、零交差点付近においては、負荷電流の絶対値が低い・みだれが少ない傾向があり、電力伝送の空白地帯となっていると言える。

二つ目の理由が消費電力である。電流パルスの高さを一定とした場合、電源電圧は低い方が消費電力は少ない。例えば  $1\text{ V}$  のとき  $10\text{ A}$  の電流パルスを  $100\text{ }\mu\text{s}$  発生した場合、消費電力量は  $1\text{ mWsec}$  であり、 $0.1\text{ V}$  のときには  $0.1\text{ mWsec}$  となる。

このように、零交差点付近は電力供給における空白

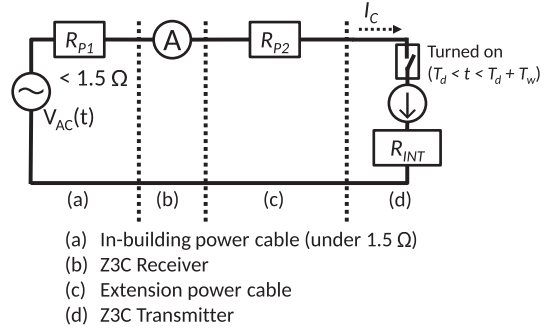


図 3 Z3C システムの電気回路モデル  
Fig. 3 Electrical circuit model for Z3C system.

地帯かつ電流パルスを用いたときに消費電力が少なくなるという利点がある。

### 3.2 実線路上の線路モデル

ここでは、Z3Cにおける電気回路の線路モデル (図 3) について詳細に解説する。本論文で提案する電流パルスを用いた Z3C においては、線路上における抵抗が最も重要となる。その理由として零交差点付近で電流を流すと言う点がある。商用電源をコンセントで短絡した場合に、取り出すことが可能な最大の電流は線路抵抗によって定まるためである。

例えば線路抵抗が  $1\text{ }\Omega$  の場合において、 $1\text{ A}$  の電流パルスを取り出すためには、交流電源側が  $1\text{ V}$  以上必要であり、 $0$  から  $1\text{ V}$  までの間はパルスの発生を待つ必要がある。そのため、線路抵抗  $R_{P1}$  と電流パルスの高さ  $I_h$  が遅延時間  $T_d$  を決定する。

線路抵抗は図 3 における、 $R_{P1}$ 、 $R_{P2}$  と  $R_{INT}$  の三種類からなる。 $R_{P1}$  はコンセントまでの線路抵抗である。日本のような交流  $100\text{ V}$  の場合、電圧は  $\pm 10\text{ V}$  に収まる必要があるため、コンセントでの最大電流  $15\text{ A}$  を流した場合でも  $10\text{ V}$  の電圧降下となるように線路抵抗は設定する必要があるため通常  $1.5\text{ }\Omega$  以下である。次に  $R_{P2}$  であるが、これはコンセントから送信機までの線路抵抗であり事前に予想することは難しいが、最大でも  $1\text{ }\Omega$  程度であると考えられる。また、 $R_{INT}$  は送信機の内部抵抗であり、送信機の実装による。

ここで、線路モデルを数式で表現する。まず送信機にかかる電源電圧  $V_{AC}$  を時間  $t$  に関する関数として、式 (2) のように定義する。ここで、 $V_{sys}$  と  $f_{sys}$  は電源電圧と周波数であり、日本の関東圏では  $100\text{ V}$  と  $50\text{ Hz}$  である。



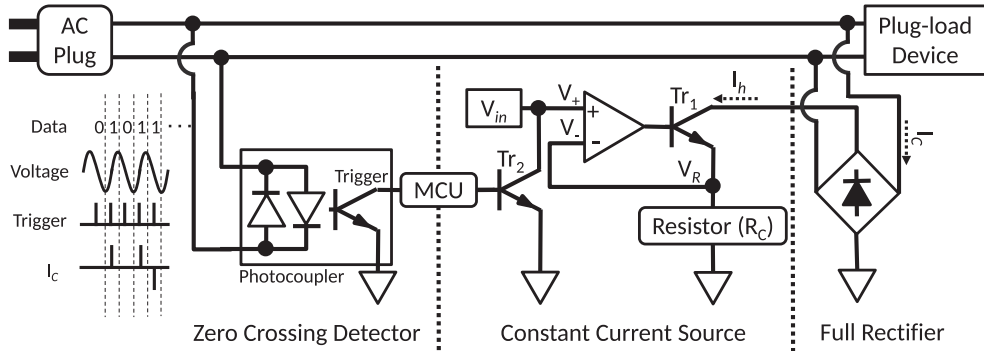


図4 Z3Cの送信機：零交差点検出回路からのトリガを受けて、定電流回路を駆動する。定電流回路はダイオードブリッジを介して電源線に電流  $I_C$  を発生する。  
Fig.4 Transmitter of Z3C.

$$V_{AC}(t) = \sqrt{2}V_{sys} \sin(2\pi f_{sys}t) \quad (2)$$

ただし  $t$  は  $[0, \frac{1}{2f_{sys}}]$  の範囲とする。

前述のように、線路抵抗によって送信機が電源から引き込む電流は制限されるためパルス発生時の  $I_C$  は式(3)のように  $I_h$  か、電圧と線路抵抗から求まる最大電流のどちらか小さい方となる。

$$I_C(t) = \begin{cases} 0 \\ \min \left\{ \frac{V_{AC}(t)}{R_{INT} + R_{P1} + R_{P2}}, I_h \right\} \end{cases} \quad (T_d < t < T_d + T_w) \quad (3)$$

つまり、定電流源による制御された  $I_h$  を得るためには、零交差点からの待ち時間  $T_d$  を適切に設定する必要がある。この最適な  $T_d$  を式(2), (3) から導出したものが式(4)となる。この式で得られる値を  $T_d$  に設定することで、送信機は  $I_h$  のパルス高をパルス発生時から得ることができる。

$$T_d \geq \frac{1}{2\pi f_{sys}} \arcsin\left(\frac{R_{INT} + R_{P1} + R_{P2}}{\sqrt{2}V_{sys}} I_h\right) \quad (4)$$

単位パルス幅  $T_{unit}$  は受信機のサンプリングレート  $f_{samp}$  によって定まる。本論文では許容するパルスのエラー幅を40%とするために、式(5)を満すパルス幅を、最小単位として用いた。この  $T_{unit}$  の整数倍を用いてパルス幅符号化を行う。

$$\begin{aligned} T_{unit} &\geq \frac{1}{f_{samp}} \times 2.5 \\ T_w &= NT_{unit} \end{aligned} \quad (5)$$

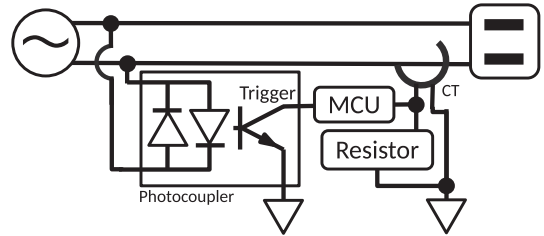


図5 Z3Cの受信機：電流トランス (CT) を用いて、電圧零交差点付近において電流パルスを検出する。  
Fig.5 Receiver of Z3C.

一方、電流パルスを送信するにあたって、電源電圧は時間とともに増加して行く。通信に用いてよい電力についても、 $T_w$  や  $I_h$  を定める重要なパラメータである。消費電力を算出するための計算式を式(6)に示す。

$$W_{com} = \int_{T_d}^{T_d + T_w} I_C(t) V_{AC}(t) \cdot dt \times 2f_{sys} \quad (6)$$

### 3.3 送受信機的设计

零交差点で電流パルスが発生させる定電流回路と電線に流れる電流を計測する回路を設計した。送信機の回路ブロックを図4に、受信機のを図5にあげる。受信機では検出した立ち上がり・立ち上がりエッジが規定パルス高の70%を超えているときにパルスと認識する。

送信機の主たる部分は、引き込み型の定電流源回路である。トランジスタを制御し、負荷を変動させることで電源電圧にかかわらず一定の電流を発生する。 $V_{in}$ ,  $V_+$ ,  $V_-$  と  $V_R$  はそれぞれ入力電圧、オペアンプのプラス電圧、マイナス電圧、そしてオペアンプの出力電圧である。オペアンプはプラス電圧とマイナ

ス電圧が等しくなるように出力電圧を制御する。つまり、 $V_{in} = V_R$  となるように制御される。その結果  $I_h = V_{in}/R_C$  となり、電源電圧にかかわらず定電流を流すことが可能となる。

マイクロコンピューティングユニット (MCU) は、この定電流回路を制御することで、任意幅のパルスを発生させる。MCU は  $Tr_2$  を制御することで  $V_+$  をゼロにすることができる。これによって、定電流回路の動作を制御可能であり、任意幅のパルスが発生可能である。商用電源に接続された、フォトカプラを用いた電圧零交差点検出回路からの入力をトリガとして電流パルスを発生する。

電圧零交差点検出回路は交流用フォトカプラを用いている。電圧が低くなった零交差点付近において、交流用フォトカプラ内の LED が消灯するため、出力トランジスタがオープンとなる。フォトカプラの出力をプルアップしておき、零交差点を検出する。

受信機は電流トランス (CT), MCU と送信機と同じ電圧零交差点検出回路からなる。零交差点のトリガを受けて、MCU が電流トランスから値を得てメモリに記録する。そのあと電流パルスが含まれるか確認する。電流パルスの検出にはエッジを用い、エラーが 3 割未満の立ち上がり・立ち下がりのペアを電流パルスとして認識する。

送受信機と通信制御用のコンピュータ間のインタフェースには USB シリアルインタフェースを用いる。通信速度は 115200 bps とする。受信機は 10 ミリ秒間隔 (半周期に一度) で、検出したパルスの幅を送信する。

もしも検出できなかった場合や検出に失敗した場合にはエラーコードを送信する。送信機はコンピュータからパルス幅の指示を待ち、受信すると次の零交差点でパルスを発生する。その後、送信完了をコンピュータに伝える。そのため各零点で連続的にパルスを発生するためには、コンピュータは次のパルス発生までの待ち時間 (5 から 8 ミリ秒程度) に次のパルス幅を送信機に送信する必要がある。

送受信機とコンピュータ間のフレームフォーマットは開始記号 1 バイト、データ 1 バイト、チェックサム 1 バイトの計 3 バイトである。開始記号には 0xaa を用いている。データはパルス幅で、チェックサムにはデータと同じ内容をもう一度入れる。パルス幅は 4 マイクロ秒単位で設定し、単位パルス幅  $T_{unit}$  以下の値にエラーコードを割り当てている。

#### 4. 実験・結果

本章では、提案した Z3C についての実験結果について報告する。実験はプロトタイプを開発し、提案している通信原理やモデルについて検証した。また通信機的设计についても評価した。

##### 4.1 実験設定

実験は図 6 に示すような接続を用いて行った。送信機と受信機の上に延長ケーブル ( $R_{P2}$ ) を複数準備し、受信機を直接壁面のコンセントに接続した。実験を行った建物は東京大学本郷キャンパス工学部 2 号館で、実験室は 10 階である。また送信機を壁面コンセントに直接繋いだ際の送信機から見た配線抵抗 ( $R_{P1}$ )

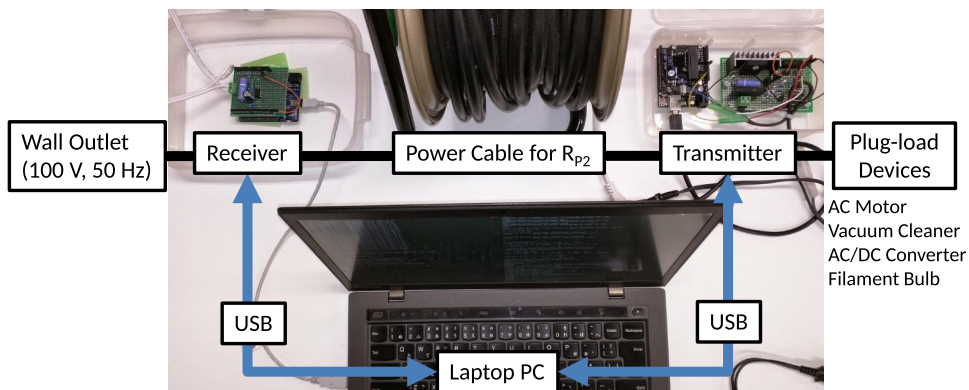


図 6 実験設定：壁コンセントに受信機を接続し、電源延長ケーブル経由で送信機を受信機に接続した。送受信機とコンピュータを USB により接続し送受信の制御を行った。送信機の後段には四種類の負荷装置を用意して適宜接続し実験した。

Fig.6 Experiment setting.

表 1 実験用の送受信機実装

Table 1 Implementation of transmitter and receiver.

Receiver	
MCU	ATMEL ATmega328P, 16MHz, 2KB SRAM
ADC	MCU internal, 60 kHz
Current sensing	CT, U_RD CTL-10-CLS
Burden resistor	1 k $\Omega$
Voltage sensing	Fairchild Semiconductor FOD814A300W
Transmitter	
MCU	ATMEL ATmega328P, 16MHz, 2KB SRAM
Voltage sensing	Fairchild Semiconductor FOD814A300W
Constant current source	HTC LM358N, TOSHIBA 2SC5200, 2SC3421
R <sub>C</sub>	0.39 $\Omega$

は 0.7  $\Omega$  であった。

送受信機の実装においては、表 1 に示すような部品を用いている。本実装においては、送受信機に用いた MCU の性能から  $T_{unit}$  を 40 マイクロ秒・8 値 (3bit) を 1 パルス (40 マイクロ秒から 320 マイクロ秒の幅) で送信するとして実験機を開発した。通信速度は 300 bps となる。

送受信機間は JIS C 8303 規格のコンセント・プラグを用いて接続しており、ケーブルは JIS C 3342 準拠の導体径 1.6 mm ケーブルである。各送信機受信機で、15 cm づつケーブルを使用している。これらの線抵抗と送信機の内部インピーダンスが  $R_{INT}$  を構成しており、1.3  $\Omega$  である。

送信までの待ち時間  $T_d$  とパルス高  $I_h$  は、送信機を直付け ( $R_{P2} = 0 \Omega$ ) した場合の抵抗値を使い、式 (4) により計算して 250 マイクロ秒と 5.5 A とした。

#### 4.2 送信機・受信機設計の評価

まず引き込み方の定電流源を用いた電流パルス発生回路のパルス発生特性の評価を行った。長さのことなる 3 種類の延長ケーブル、4 m (0.10  $\Omega$ )、60 m (0.64  $\Omega$ )、100 m (0.98  $\Omega$ ) を用いて、280 マイクロ秒のパルスを発生させ、配線抵抗による立ち上がりエッジの鈍化を図 7 のように確認した。

図が示すように配線抵抗をおおきくすることでパルスの立ち上がりがなだらかになって行くことが確認できる。配線インダクタンスから発生するであろうオーバershoot やアンダershoot は 100 m のケーブルを用いた際に確認できる。しかしながら、電流パルス全体の長さからすると無視することができるとわかる。

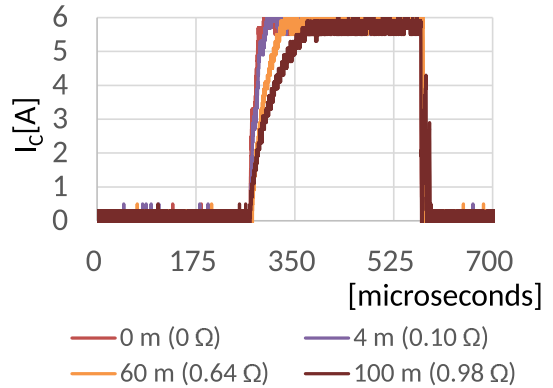


図 7 抵抗値別の電流パルス波形：抵抗値が増えて行くと、パルスの立ち上がりがなめらかになって行くことが確認できる。

Fig. 7 Pulse waveform with different resistor.

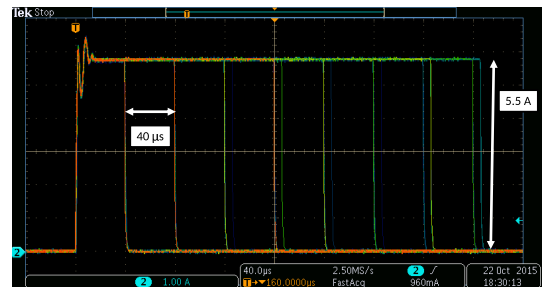


図 8 パルス発生を重ね描きによるアイパターン：Tektronix MDO3014 で取得。40 マイクロ秒のパルス幅の差が十分に広いことが確認できる。

Fig. 8 Eyepattern of current pulses.

次にパルス幅符号化を行った各値を送信しながら、100 回重ねがいたときのアイパターンを図 8 に示す。十分に広い目があいていることが確認できることから、非常に安定してパルスが発生できていることがわかる。電流パルスを発生させるにあたっては、パルスの立ち上がり・立ち下がりにどの程度の時間が必要かが重要になる。本実験の結果から、数マイクロ秒程度で数 A 程度の急しゅんな立ち上がりが可能なことがわかる。また筆者らが試した他の建物でも同じような特性がみられた。つまり、商用電源のインダクタンス・キャパシタンスによるパルスの立ち下がり・立ち上がり時間については、提案手法で用いるような数十マイクロ秒から数百マイクロ秒の電流パルスでは無視できる。

次に受信の特性評価を行った。送信機から図 8 と同じパルスを 500 回送信し、受信機で受けてパルス幅の誤差を測定した。その結果を図 9 に示す。縦軸がエ

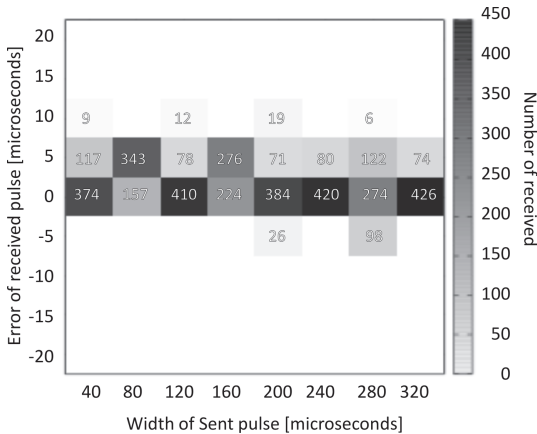


図9 送信パルス幅  $T_w$  に対する受信エラー量：送信したパルス幅  $T_w$  に対して受信したパルス幅の差分をカラーマップで表示（枠内の数字は回数を示す）した。受信のエラー幅が  $T_w$  にかかわらずおおよそ  $\pm 5$  マイクロ秒に収まっていることがわかる。

Fig. 9 Error of received pulse versus sent width.

ラーで、横軸が送信したパルス幅である。

この受信エラーについては、前述のようにサンプリングレートにより発生する。今回の 60 kHz で発生するエラー 16 マイクロ秒以下となっており設計と一致する。またパルス幅がかわってもエラーの幅がかわらないことから、サンプリングによる一定量のエラーと考えることができる。

#### 4.3 ノイズに関する評価

提案手法におけるノイズとは負荷機器そのものが流す、零交差点付近での電流である。そこで今回用意した四種類の負荷装置のノイズ（負荷電流）と送信機の信号を比較した。零交差点から 60 kHz で 100 回サンプリングを行い、各サンプル値の前後差分値をとりエッジ高とする。送信機の信号とノイズのエッジ高間に差が十分にあることを示す。ここでは、図 10 のように四種類の負荷装置と送信機での電流振幅差のヒストグラムを用いて比較を行った。また右端の ALL とはここにある全ての負荷装置を同時に動かして計測した負荷電流ノイズである。X 軸の値は検出回数であり、Y 軸の値はエッジ高である。また Y 軸の値は MCU の ADC の読み値で量子化されている。（幅はおおよそ 0.044 A/ $\Delta t$ ）

送信機の発生する電流パルス高である 5.5 A 付近にピークが確認できる。また他の負荷装置のピークが十分に低いことも確認できる。70%の高さで検出を行うため立ち上がり・立ち下がり検出範囲には送信機のバ

ルスしか入らず十分に弁別可能である。ACDC コンバータは電圧のピーク付近では鋭い電流パルスが発生するが、零交差点付近では電流を発生しない。そのため、理想的にはパルス高 0 A/ $\Delta t$  のみが検出される。実験結果には受信機の AD 変換結果の揺らぎが現れている。その他の機器については、零交差点付近の電流が穏やかに変化しているため、検出されるパルス高は低い。

また、各負荷の消費電流と送信機の信号を重ねあわせたグラフについて、付録 A・1 として掲載する。エッジ検出区間を矩形で囲んでいるが、そのグラフからも負荷電流に対して十分な高さの電流を発生できていることが確認できる。

## 5. 考察

本章では、実験結果の考察を行い、今後の課題について整理する。

### 5.1 電力線上での電流ループの可能性

実験結果により、5 A 程度の電流パルスを零交差点付近に発生させることによって、通信可能なことが実証できた。またパルス幅符号化を用いることで電流パルスによる多値伝送が可能であることも確認できた。図 10 の全機器を足し合わせた結果により、零交差点付近に高い電流パルスを発生させることで、検出が容易なパルスが発生できることも確認できた。また、力率 100%の機器を考えたときに、数 A の電流値が零交差点付近に生れるということはピークでは数十 A の電流が流れるということで、送信機のような機器は通常存在しえないと考えられる。

しかしながら商用電源で用いられる 200 V-6600 V の昇圧トランスを通過する場合には、電流値が 1/33 となり、更に他の機器の電流も追加される。この場合についての実験・考察はできていないため、今後の課題となる。

### 5.2 引き込み型定電流源による電流パルスの発生

提案手法では、引き込み型の定電流源を用いて電流パルスを発生した。実験により、本設計で十分急しゅんな電流パルスが発生可能であることが確認できた。また受信機についても、発生したパルスを受信できることが確認できた。このことは提案手法の現実的な実装が可能であるということを表し設計の正しさを示すものである。

しかしながら定電流源の構成では、半導体スイッチと制御抵抗を電力線に直列接続するという構成を取る



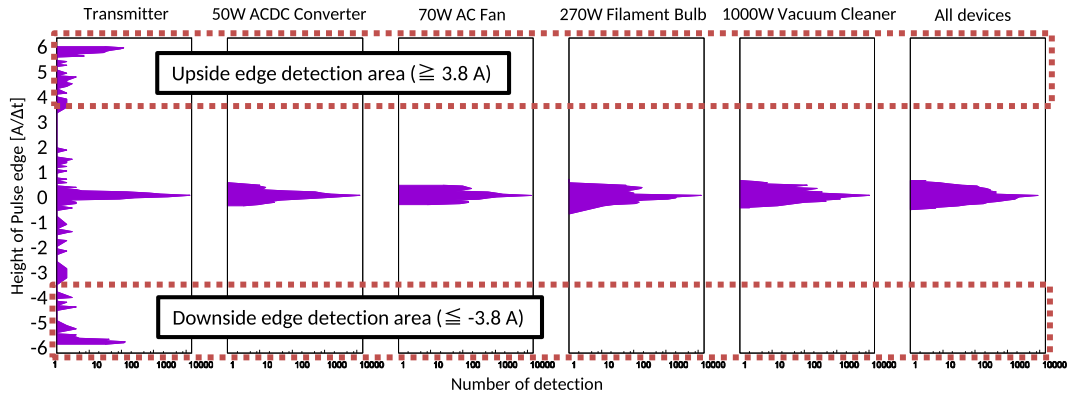


図 10 検出エッジ高のヒストグラム：X 軸は回数 (対数軸)，Y 軸は電流値である．右端は全負荷の合計電流によるプロットである．送信機が用いた 5.5 A というパルス高が十分に高く弁別可能なことを示している．

Fig. 10 Histogram of height of detected edges.

ため、電圧が低いときに電力線の配線抵抗によって取り出せるパルス高が制限される。そのため制御抵抗を取り払った半導体スイッチのみで定電流源を構成するような実装が今後重要になると考えられる。

### 5.3 今後の課題

今後の課題として特に重要なものは、大規模伝送モデルの研究があると考えられる。本論では、ビル内の電力線や、昇圧トランスなど電力網全体のことは考慮しなかった。しかしながら電流信号の性質上、コンセントと送信機の間でやりとりされたエネルギーの移動は、ビル内部の電力線や配電網全体でも発生していると考えられる。これらの信号は場合によっては変電所から需要家までといった非常に長い距離でも伝送されていると考えられ、自動検針などに用いることが可能な長距離通信技術になりえる可能性がある。

同時にこの特性は、同じ電力線内で複数の送信機・受信機ペアを配置するときには混信が発生する可能性があることも示しており、今後の課題として検討する必要がある。

## 6. むすび

本論文では、電流パルスを利用した商用電源から引き込むことで通信を実現する Z3C を提案した。提案は商用電源の下位におく送信機から上位の受信機までの片方向の通信であり、その通信について原理を述べ、送受信機的设计を行った。また実際に設計にあわせて実装を開発し、それを用いて動作の検証を行った。昇圧トランスを含んだ大規模伝送モデルの必要性などの課題が存在するが、提案する電流ループを用いた電力線通信

(Z3C) が実現できることは確認できた。提案する Z3C は商用電源で電流ループによる閉じた通信を実現でき、今後スマートグリッドでの応用が考えられる。

## 文 献

- [1] S.T. Mak and D.L. Reed, "Twacs, a new viable two-way automatic communication system for distribution networks. part i: Outbound communication," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol.PAS-101, no.8, pp.2941-2949, Aug. 1982.
- [2] S.T. Mak and T.G. Moore, "Twacs, a new viable two-way automatic communication system for distribution networks. part ii: Inbound communication," IEEE Power Engineering Review, vol.PER-4, no.8, pp.51-51, Aug. 1984.
- [3] H. Ikegami, M. Tsukada, H. Ochiai, H. Nii, and H. Esaki, "Electric current based power line communication for plug-load device auto identification," 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp.121-126, Nov. 2015.
- [4] 片山正昭, "電力線通信," 計測と制御, vol.44, no.6, pp.378-383, 2005.
- [5] N. Pavlidou, A.J.H. Vinck, J. Yazdani, and B. Honary, "Power line communications: state of the art and future trends," IEEE Commun. Mag., vol.41, no.4, pp.34-40, April 2003.
- [6] IEEE, "IEEE standard for broadband over power line networks: Medium access control and physical layer specifications," IEEE Std 1901-2010, pp.1-1586, Dec. 2010.
- [7] ITU, "Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for g3-plc networks," ITU-T G.9903, pp.1-226, Feb. 2014.
- [8] Acromag, "Introduction to the two-wire transmitter

and the 4-20ma current loop,” Whitepaper, pp.1-8, Aug. 2015.

[9] M. Soltero, J. Zhang, and C. Cockrill, “422 and 485 standards overview and system configurations,” Texas Instruments Application Report, pp.1-33, June 2002.

[10] A. Reinhardt, P. Baumann, D. Burgstahler, M. Hollick, H. Chonov, M. Werner, and R. Steinmetz, “On the accuracy of appliance identification based on distributed load metering data,” Proc. 2nd IFIP Conference on Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT), pp.1-9, 2012.

[11] T. Kato, H. Cho, D. Lee, T. Toyomura, and T. Yamazaki, “Appliance recognition from electric current signals for information-energy integrated network in home environments,” Ambient Assistive Health and Wellness Management in the Heart of the City, pp.150-157, 2009.

[12] SAE, “Sae j1772: Electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler,” Jan. 2010.

[13] Sony develops “authentication outlet” where electricity use can be managed and consumed on a per-user and per-device basis, 2012. <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201202/12-023E/index.html>

[14] 斎藤浩海, 宮森 敏, 島田 亘, 豊田淳一, “開放型電力ネットワークにおける自律分散的電力流通を実現する機構の基礎検討,” 電学論 (B), vol.117, no.1, pp.10-18, Dec. 1996.

[15] 引原隆士, “電力のパケット化とルーティング技術,” 情報処理, vol.51, no.8, pp.943-950, Aug. 2010.

[16] 美齊津宏幸, 鈴木 大, 山崎雅生, 中城 陽, 齊藤安徳,

丹羽章裕, 中村達也, 竹内伸二, 井出崎功, 竹本 聡, 中野崇史, “低周波電力線搬送方式の配電系統における伝送特性,” 電気学会研究会資料, CMN, 通信研究会, vol.2011, no.1, pp.53-59, Jan. 2011.

## 付 録

### 負荷電流と電流パルスの重ね合わせ

図 A・1 は本実験で用いた四つの負荷装置の消費電流に、送信機が発生する電流パルスを重ねあわせたものである。十分に検出しやすく、高い電流が発生していることが確認できる。

図中のエッジ検出域でのエッジ高さをプロットしたものが、図 10 である。

(平成 27 年 10 月 27 日受付, 28 年 2 月 23 日再受付)

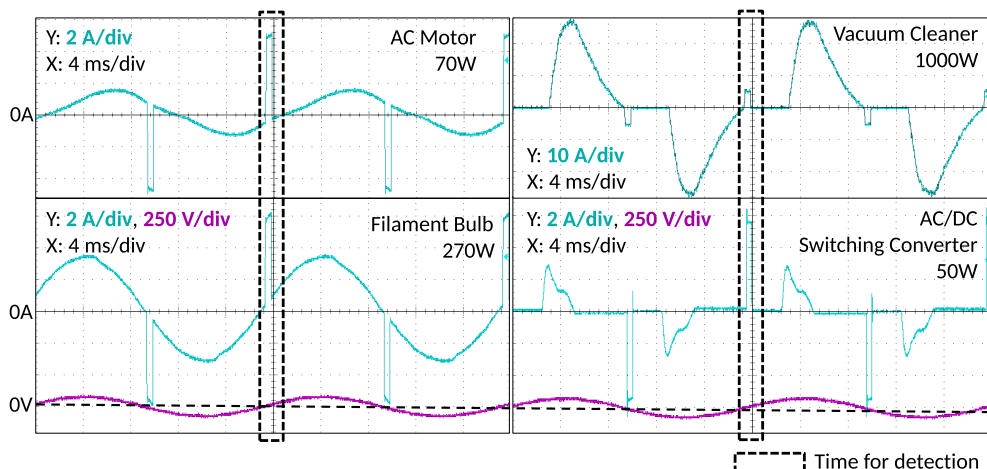


図 A・1 各負荷装置の消費電流と送信機の電流パルス：Tektronix MDO3014 により取得・パルスの立ち下がりでトリガ取得している。右上のもののみ Y 軸のスケールが異なる。エッジ検出域において、電流パルス高が負荷電流と比較して十分に高いとわかる。

Fig. A-1 Waveforms of each load devices with Z3C pulse.



### 池上 洋行

1986年生。2007年国立諺聞電波工業高等専門学校電子工学科卒業。同年(株)ネットワーク応用通信研究所入社。2010年退職。同年香川高等専門学校専攻科入学。2012年修了。同年東京大学大学院・情報理工学系研究科博士前期課程入学。2014年修了。同年東京大学大学院・博士後期課程進学。現在に至る。エネルギー管理システムでの負荷機器自動認識の研究に従事。



### 落合 秀也 (正員)

昭和58年生。平成18年東京大学・工・電子情報工学科卒。平成23年同大学大学院・情報理工学系研究科・博士課程了。同年同大学・大規模集積システム設計教育研究センター・助教。平成26年同大学大学院・情報理工学系研究科・講師。現在に至る。博士(情報理工学, 東京大学)。設備ネットワーク, 広域センサネットワーク, 遅延耐性ネットワーク研究の他, IEEE1888, ISO/IECの設備ネットワーク標準化活動に従事。



### 塚田 学

1982年, 京都生まれ。2005年慶應義塾大学環境情報学部卒業。2007年慶應義塾大学政策・メディア研究科修士取得。2007年よりフランス・パリ国立高等鉱業学校(Mines ParisTech) ロボット工学センター博士課程在籍及び, フランス国立情報学自動制御研究所(INRIA)のIMARAチームにて研究員として勤務。2011年博士号取得。現在は, 東京大学大学院情報理工学系研究科の特任助教。2014年よりWIDEプロジェクトのボードメンバー。自動車の情報化など, 次世代インターネットIPv6における移動体通信に取り組む。



### 新居 英明

1970年生。1995年東工大大学院理工学研究科制御博士前期課程了。同年(株)トキメック入社。2003年退職。同年電通大大学院・電気通信学研究科博士後期課程入学。2006年東大大学院・情報理工学系研究科助教。2009年慶大KMD特任講師。2010年シンガポール国立大学研究員。2012年より(株)IIJイノベーションインスティテュート, 現在に至る。博士(工学・電通大)。3Dディスプレイ及びプロジェクターカメラ系インタフェースの研究に従事。



### 江崎 浩 (正員)

昭和38年生。昭和62年九州大学・工・電子修士課程了。同年(株)東芝入社。平成2年米国ニュージャージー州ベルコア社。平成6年コロンビア大学・客員研究員。平成10年東京大学大型計算機センター・助教授。平成13年同大学大学院・情報理工学系研究科・助教授。平成17年同大学大学院・同研究科・教授。現在に至る。博士(工学, 東京大学)。MPLS-JAPAN代表, IPv6普及・高度化推進協議会専務理事, WIDEプロジェクト代表, JPNIC 副理事長。