

電力消費変調によるタップ接続機器の動的識別

池上 洋行[†] 中村 哲也[†] 落合 秀也^{††,†††}山本 成一^{†††,††††}

江崎 浩[†]

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科

^{††} 東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター

^{†††} 独立行政法人情報通信研究機構

^{††††} 東京大学 生産技術研究所

E-mail: †{ikegam,tetsu,yama,hiroshi}@hongo.wide.ad.jp, ††ochiai@vdec.u-tokyo.ac.jp

あらまし スマートタップと呼ばれる、接続された電気機器の消費電力測定が可能な電源タップが市場で流通している。これらのタップの機能は消費電力測定のみであるため、機器が入れ替わる場合や機器が多数の場合は測定対象の機器を識別する必要がある。本研究は、スマートタップに対し接続機器のIDを通知する手法を提案する。提案手法の検証を行い、2種類のスマートタップへ約0.01[bps]のデータ送信が可能なことを確認した。本稿では、消費電力パターン内に信号を埋め込む手法の原理、関連研究との差異、実験とその結果、結果からの考察について伸べる。

Dynamic Recognition of Plug-load Devices based on Power Consumption Pattern

Hiroyuki IKEGAMI[†], Tetsuya NAKAMURA[†], Hideya OCHIAI^{††,†††},

Seiichi YAMAMOTO^{†††,††††}, and Hiroshi ESAKI[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{††} VLSI Design and Education Center, The University of Tokyo

^{†††} National Institute of Information and Communications Technology

^{††††} Institute of Industrial science, The University of Tokyo

E-mail: †{ikegam,tetsu,yama,hiroshi}@hongo.wide.ad.jp, ††ochiai@vdec.u-tokyo.ac.jp

Abstract Smart taps, having a capability of measuring power consumption for a connected device, circulates throughout the market from many vendors. This study proposes a method and an implementation for to notify an ID of the load device to the taps. By this study, the taps can dynamically know what plug load device is. In addition, we had done a experimentation about this study and show about 0.01bps communication from a plug load device, PC display, to 2 kinds of smart tap. This paper presents principles and differences with related works and result of experiment and discussion.

1. はじめに

スマートタップと呼ばれる、接続された電気機器の消費電力測定が可能なコンセントや電源タップが市場で流通している。本研究は、これらの市場に流通しているスマートタップに対し接続されている電気機器を

通知する手法を提案するものである。

現在のスマートタップは自由に電源プラグを抜き差しできない問題がある。それは接続機器とその装置が消費している電力との対応付けが静的に行われているためである。そこで我々はスマートタップ本来の接続機器の消費電力を測定する機能に着目し、接続された電

気機器の消費電力パターンにデバイス識別子を能動的に埋め込む手法を提案する。提案手法により、スマートタップに接続された機器を同定し、測定された消費電力と接続機器の動的な対応付けが行えるため、自由な電源プラグ挿抜が可能となる。

スマートタップの用途として、エネルギー利用の最適化を行うことを目標とした Home Energy Management System(HEMS) や Building Energy Management System(BEMS) がある。HEMS・BEMS の研究開発は現在広く行われており、スマートタップは消費電力の見える化や電力のデマンドレスポンスといった機能を実現するために活用されている [1] [2]。HEMS・BEMS 内でのスマートタップの利用状況を図 1 に示す。コンピュータ・ディスプレイ・携帯充電器といった利用者が自由に電源プラグを抜き差しする接続機器はスマートタップの測定対象とすることができず、BEMS・HEMS との連携をとることができない。現在の HEMS・BEMS では、電源プラグの自由な挿抜を対象とせず、固定的に利用する接続機器にスマートタップを取り付けて連携している。例えば、冷蔵庫・電子レンジ・洗濯機・大型印刷機といったプラグを抜き差ししない機器とスマートタップの対応付けは設置時に静的に行うため、HEMS・BEMS との連携が可能である。

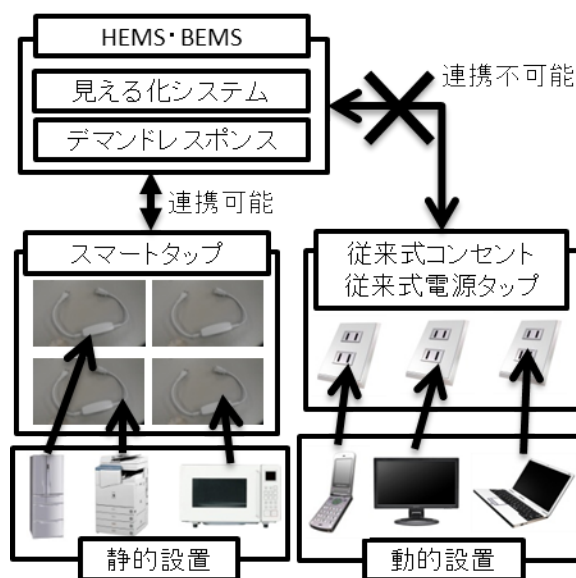


図 1 HEMS・BEMS とスマートタップの利用

前述のように液晶ディスプレイやラップトップ PC などスマートタップの測定対象とするためには、接続機器の動的な対応付けが必要である。

この問題を解決するために、スマートタップを使わずに電力測定の機能を接続機器に持たせる方法がある。しかし、この方法は電力測定を電力使用者側で行う手法であり、HEMS・BEMS の管理者と接続機器の利用者が同じで無い場合において測定した電力の情報収集

に問題が発生する。一方で、スマートタップに接続された機器を同定する手法は接続機器の物理的位置を示すことが出来ると言う利点があり、この情報も HEMS・BEMS において有効に活用できる。また、室内での物理的位置特定を行うための研究や室内での物理的位置を使った研究も行われており、多くの活用方法が提案されている [3] [4]。これらの理由から、本稿ではスマートタップの接続機器同定の手法を扱う。

接続機器の動的な対応付けを実現するためには電流・電圧をプロファイリングして推定する手法や、専用の差し込みプラグとタップを用意する手法が存在する。しかし、プロファイリングを用いる手法では誤判定が確率的に発生する課題があり、専用の機器を用いる手法にはデプロイに経済的および時間的コストが発生する課題が存在する。

本研究では、専用の電源プラグを必要とせず現在市場に流通している既存のスマートタップを利用して接続機器同定を実現する。具体的には、消費電力パターンの中に接続機器の識別子を埋め込み、スマートタップの消費電力測定機能を用いて測定された消費電力内の識別子を復調し、同定する。この手法は片方向の通信を実現するため信頼度が高く、かつ専用の機器を必要としない利点がある。

本稿では、提案手法の実装を行い、コンピュータ用のディスプレイを接続機器として、提案手法を市場で流通する 2 種類のスマートタップで実験し動作を確認した。実験の結果から提案手法の性能と、今後の課題をあきらかにした。2 章で関連研究との比較を行い、3 章で提案手法の原理を説明する。そして 4 章でディスプレイを用いた実験について記し、5 章で実験結果の評価を行う。最後に、6 章で考察と今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 Active 型の接続機器同定

接続機器の同定を行うために、能動的に情報を伝える手法を本稿では Active 型と呼ぶ。Active 型の関連研究・技術として、Power Line Communication(PLC) [5]、ソニーが開発した felica と PLC を用いたユーザ認証機能付きコンセントシステム [6]、鳥取大学計算機工学研究室による多機能インテリジェントコンセント [7] が挙げられる。

データ通信のための PLC は 1980 年代初頭より研究されている分野であり、電力線を用いて高速なデータ通信を行うためのチャンネルング手法やシミュレーション手法など非常に多くの研究が行われている [5]。これらのデータ通信のための PLC は変調波が系統毎に網全体に搬送される。データ通信のための PLC では数百 [kHz] から数十 [MHz] という高い周波数を使用することで数十から数百 [Mbps] の高速な通信を可能とする

が、スマートタップの接続機器を同定する用途で使用するためにはスマートタップ・接続機器間の電力線にのみに変調波が乗ることが必要である。そのためには、スマートタップ内部で PLC の変調波が機器の接続されたタップの口と接続機器間外に漏れないよう低域周波数通過フィルタを追加するなど、内部回路を変更した専用の機器が必要である。一方で、提案手法である消費電力に識別子を変調する手法では、消費電力を発生させる電流がスマートタップと接続機器の間で流れ他のタップの口に流れることが無いことから、従来の PLC と違いスマートタップ・接続機器間の電力線にのみ変調波を乗せられる。

ソニーは Felica の情報をコンセントとプラグ間で通信する、認証機能付きのコンセントシステムを開発した [6]。現代のコンセントは公共の機器として様々なユーザに使われる一方で、それらのユーザに利用代金を正しく請求する仕組みがないことなどを背景としている。認証機能付きのコンセントシステムにより、どのユーザがどの程度コンセントを利用したと言う情報を入手しその情報に基づいて課金を行うことが出来る。ソニーのシステムは我々の研究の目的とする部分を満足することができるが、専用のコンセントと差し込みプラグが必要である。

鳥取大学の和谷らは、接続機器同定を RFID を用いて行うことが可能な多機能インテリジェントコンセントを開発した [7]。これはプラグの先に RFID パッシブタグを貼り付けた状態でコンセントに差し込むことで、接続機器が同定できるコンセントである。Web インタフェースから接続機器の確認や電源の ON/OFF が可能であるが、専用のコンセントと差し込みプラグへの RFID タグの貼り付けが必要である。

2.2 Passive 型の接続機器同定

接続機器同定を行う手法として消費電力・電流の時間変化や電圧との位相差などをプロファイリングして、機器を推定・判別する技術がある。これを本稿では Passive 型と呼ぶ。Passive 型の関連研究として、京都大学松山研究室による消費電力パターンのモデル化による機器の状態推定 [8]、電圧と電流の波形とその位相をプロファイリングしての推定 [9]、Munster University of Applied Sciences によるテレビの消費電力パターンからの映像番組認識 [10] が挙げられる。

京都大学の松山研究室では、加藤らが電圧と電流の波形と位相を用いて接続機器を推定した [9]。また、土師らが消費電力パターンを用いて機器の状態を判定し、電力デマンド予想の精度を高めた [8]。

Munster University of Applied Sciences の Greveler らは、ドイツでスマートメータがデプロイされておりメータが測定した電力情報にはプライバシー上の問題

があることを問題としてあげ、テレビがどのチャンネルを表示しているかを、消費電力から認識する手法を提案した [10]。この手法では映像の RGB 情報から消費電力予想を作り、スマートメータが測定した消費電力と比較して、テレビで再生されている映像を予測する。

2.3 関連研究のまとめと本研究の立ち位置

現在のところ、Active 型で接続機器同定を行うためには、差し込みプラグと差し込み先のコンセント・スマートタップに専用の機器が必要である。一方で従来の Passive 型の接続機器同定は、本質的に推定であることから誤判定が発生する可能性がある。本研究では、Active 型かつ専用の機器を必要としない手法を提案する。関連研究と本研究を整理して表 1 に示す。

表 1 関連研究と本研究の比較

種別	誤認識の低さ	専用機器の必要性
Passive 型	△	なし
従来の Active 型	○	あり
提案の Active 型	○	なし

3. 提案手法

3.1 概要

提案手法の概要について図 2 に示す。スマートタップは、その本来の目的から接続された電気機器の消費電力を測定しコンピュータなどの情報機器に結果を送信することが可能である。この機能を利用することで次の手順でデジタル符号を接続機器からスマートタップへ送信できる。

- (1) 送信する符号にあわせて接続機器の電源を入切
- (2) 入切で消費した電力をスマートタップが測定
- (3) コンピュータで解析し符号を取得

上述の (1) 電源入切を送信する符号値にあわせて行う行為を変調と呼び、この変調を行う部分をソフトウェア変調器と呼ぶ。(3) の電力の情報から符号を取り出す処理を復調と呼ぶ。接続機器が消費電力を使って送信するデジタル符号を接続機器の識別子とすることで、コンピュータは送信元のスマートタップの先に接続されている接続機器を特定する。

しかし、接続機器の電源を入切することにより電圧降下が発生しその他のタップで誤判定が発生する可能性がある。そこで、パルス位置変調を用いて信号を消費電力パターンへ変調する。具体的な変調波について図 3 に示す。通信時には始めに開始信号が入力される。開始信号は入/切の長さが同じであり、このときの長さの半分を 1 クロックとする。次にその 1 クロックを用いて切区間の長さを変えて値を表す。入が 1 クロック続いたあと"1"は切が 2 クロックで、"0"は切が 3 クロックとなる。送信符号の最後のビットが"1"の場合には、停

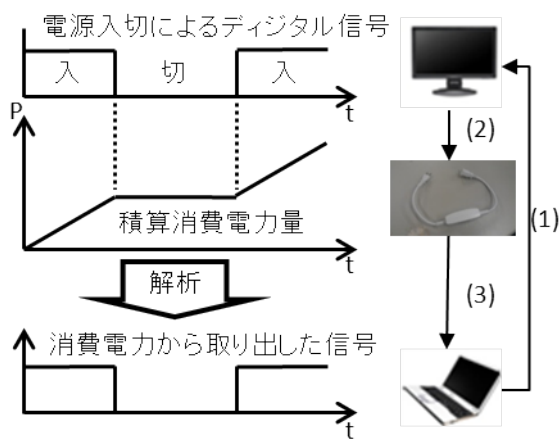


図2 提案手法の概要

止信号を入力することで切を2クロックで確定させ”0”との誤判定を避ける。

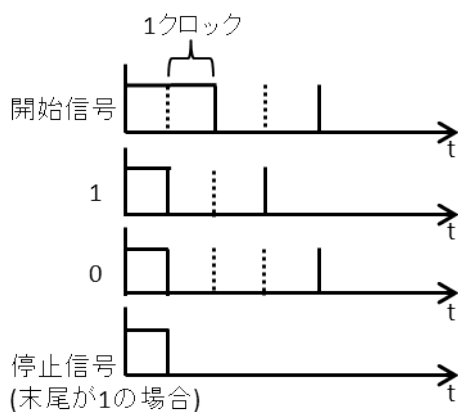


図3 変調方式

本稿では、提案手法が動作することを示しソフトウェア変調器の性能を評価した。ソフトウェア変調器は接続機器そのものの電源を入切し消費電力を増減させ、信号を送信するものである。スマートタップは消費電力を測定する機器であるが、具体的な測定分解能や送信・測定サンプリング周期や送信される消費電力の種類など機種によって異なる部分が存在する。これらによって提案手法が実現出来ない可能性がある。これらの課題についても実験を行うことで検証する。

4. PC用ディスプレイを用いた実験

本稿ではコンピュータ用のディスプレイを接続機器としソフトウェア変調器を用いた実験で提案手法を検証した。実験はA社とB社2種類のスマートタップとD社の17インチ液晶ディスプレイで行った。本実験では下記の2項目について実験し提案手法が動作することを示す。

(a) ディスプレイの電源の入切がスマートタップ

で測定した消費電力の情報から復元出来ること

(b) 3ビットの2進数をパルス位置変調しコンピュータで復調できること

前述の機材を図4のように配置し下記のように実験を行う。(3)で送信される情報はA社が瞬間消費電力、B社が積算消費電力量である。

- (1) 液晶ディスプレイの電源を入切する
- (2) スマートタップで消費電力が測定される
- (3) 測定された電力はPCに送信される
- (4) PCで消費電力を解析する
- (5) 液晶ディスプレイ入切の情報を得る

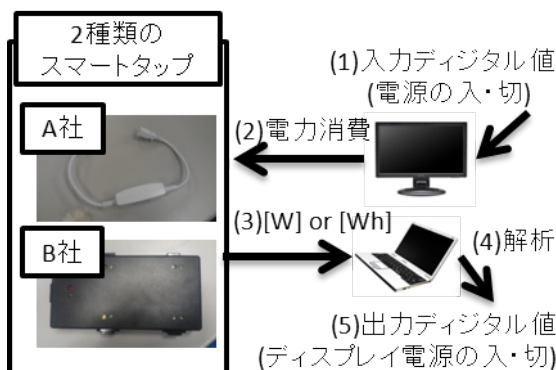


図4 実験環境

スマートタップとPCは無線で接続されており、この間は各社の通信プロトコルを用いる。接続機器であるディスプレイとPCはVGAケーブルによって接続され、ディスプレイの電源はVGAケーブル経由でPCより制御される。ディスプレイは、スマートタップに接続されておりスマートタップから電力の供給を受ける。

実験で用いたD社の17インチ液晶ディスプレイの電源入切時の瞬間消費電力の特性のグラフを図5に示す。このグラフでは経過時間2秒で電源を入れ、30秒で切断した。消費電力が40[W]で安定するためには電源を入れてから約5秒を必要とし、また電源切断時に安定するためには約5秒必要であることがわかる。よって本ディスプレイでは入/切で2値を示す時に最低で1クロックは10秒必要である。

スマートタップの性能について表2にまとめる。このように測定精度、測定周期、測定対象情報、各種違いがある。B社のタップは測定精度0.1[Wh]であり、D社のディスプレイの消費電力は40[W]である。消費電力40[W]の機器で0.1[Wh]を消費するためには約10秒稼働させる必要がある。これらの性能より、瞬間消費電力を測定可能なA社のタップでは1クロックを10秒とし、積算消費電力量を取得するB社のタップでは、1クロックを0.2Wh分の30秒とした。これらのクロック長の違いは図3の開始信号によって吸収される。

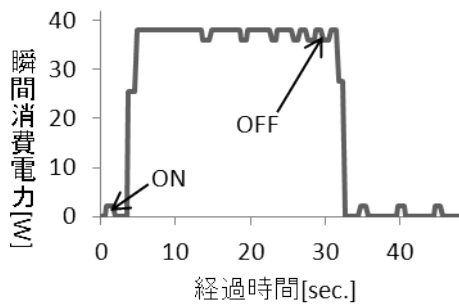


図5 液晶ディスプレイ電源入切時の瞬間消費電力

また、パルス位置変調されたデジタル信号を復調するためには、その元となるデジタル信号を、消費電力から取り出す必要がある。A社のような瞬間消費電力を送信するスマートタップでは単純な閾値を用いて入切を判定できる。積分値である積算消費電力量を送信するスマートタップでは、各サンプル値の微分を取り、差分がある場合は入、差分が無い場合は切と判断する。

表2 スマートタップの仕様比較

項目	A社製	B社製
測定周期	1.3秒	4秒
送信情報	瞬間消費電力	積算消費電力量
測定精度	0.01[W]	0.1[Wh]
周波数帯	2.4[GHz]	950[MHz]

またパルス位置変調の復調を図6に示す流れで行った。まず(1)の初期状態で、開始信号を検知するために、1の連続、0の連続の次に1を受信した際に1の連続と0の連続が同じ長さであった場合に、これを開始信号と認識する。次に開始信号の1の区間の数からクロックの長さを決定する。次に(2)、(3)の状態では、1を受信した後に、0がクロックの2倍か3倍かで、デジタル値を復調する。この時0の長さが極端に短い場合などではエラーとして初期状態に戻る。最後に(4)の状態では次の停止信号を受信した場合に、1を復調し、受信しなかった場合には0を復調して初期状態に戻る。

5. 実験結果

2進数 101 を、D社の17インチ液晶ディスプレイを使って電源入切でパルス位置変調した際にスマートタップで測定された消費電力パターンとそこから復調した結果について、A社のタップを図7、B社のタップを図8に示す。これらの図の入力デジタル値と、出力デジタル値は図4の(1)、(5)に対応している。また図7の積算消費電力量、図8の瞬間消費電力は同様に(3)に対応している。このようにどちらのタップであっても消費電力中にディスプレイの電源の入切情報が埋め込まれていることがわかる。またこれらの出力デジタル値はパルス位置変調されているが、これを

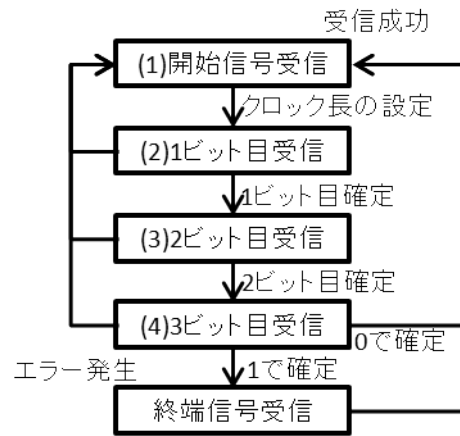


図6 パルス位置変調の復調手続き

前述のプログラムで復調することも可能であった。また提案手法とソフトウェア変調器により3ビットの2進数 101 をA社製では約3分、B社製では約7分で送信でき、このことから平均0.01[bps]で接続機器からタップへ情報が送信できることがわかった。

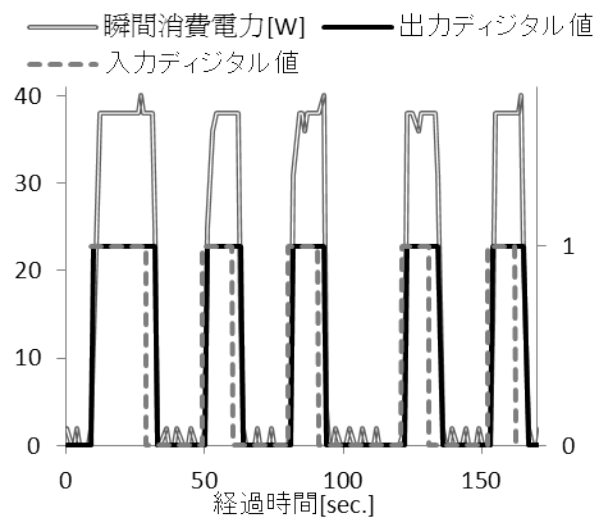


図7 A社製スマートタップでの実験結果

この結果より、B社のタップのような積算消費電力量からデジタル値を復元するためには、数十[W]の接続機器であっても、0.1[Wh]程度の測定精度では瞬間消費電力を測定するタップの倍の時間を必要とすることがわかった。つまり、ソフトウェア変調器を対象とする場合にはA社の瞬間消費電力の測定が可能なスマートタップがB社に比べて適していることが確認できた。

6. 議論

6.1 ハードウェア変調器と高性能スマートタップを用いた評価

本論で提案した手法にはデプロイを段階的に行える特徴がある。変調器はコンピュータから電源制御が可

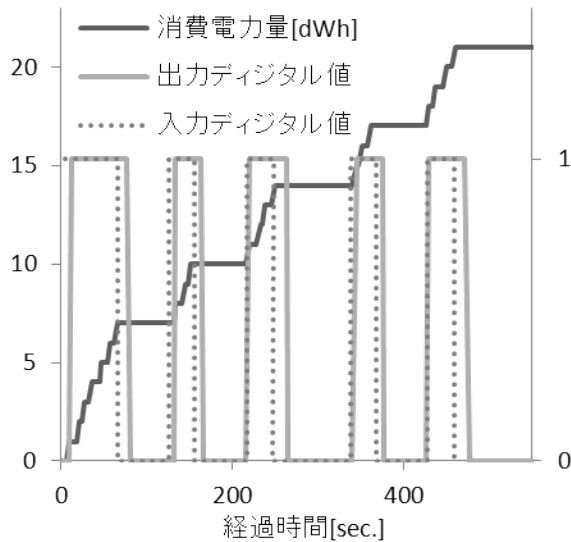


図 8 B 社製スマートタップでの実験結果

能な接続機器の場合、ソフトウェア実装が可能である。ソフトウェア実装の変調器+従来のスマートタップというデプロイは専用の機器を必要とせずに行うことができる。また本手法をハードウェアで実装したハードウェア変調器も開発できる。ソフトウェア変調器は、ソフトウェアでの電源制御が出来無い機器に適用できず、電源制御の最短時間と機器の消費電力に伝送速度が影響を受ける。ハードウェア変調器によってこれらのソフトウェア変調器の課題を、スマートタップ側の変更なく解決できる。

ハードウェア変調器については、図 9 に示すような回路図を持つ変調器を開発済みであり、現在実験を行っている。このハードウェア変調器では、接続機器の識別子の送信をまず 100 Ω 抵抗器を用いて行い、その後接続装置側のリレーを接続する。このハードウェア変調器では 100 Ω 抵抗であることから 100W の瞬間消費電力を発生させるため、0.1[Wh] の測定精度を持つ B 社のスマートタップでは理論上の最高値で 1 クロックを 3.6 秒に出来る。またこの回路図から明らかなようにあらゆる負荷装置に対して提案手法を適用可能である。

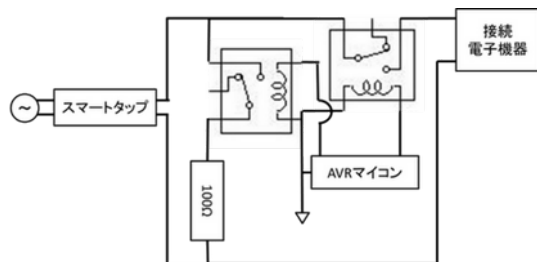


図 9 ハードウェア変調器の概要回路図

また本手法はスマートタップの測定周期・測定精度

を向上させると転送速度が向上する。我々は、図 10 に示すような、0.0001[Wh] 単位でクロックを発生させる電力計測器を開発済みであり、現在実験を行っている。この電力計測器とハードウェア変調器を組合せた場合、理論上の最高値で 1 クロックを 3.6 ミリ秒にできる。リレーの接点変更で発生するノイズ等、機械的、電気的なノイズによって、性能が低下することが予想されるが、従来のスマートタップを越える性能が出ると考えられる。

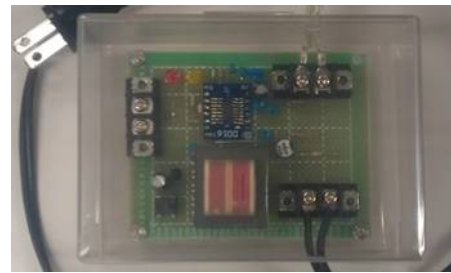


図 10 計測粒度 0.0001[Wh] で測定できる電力計測器

6.2 通信プロトコルの定義

本論では、デジタル信号をパルス位置変調するプロトコルを実装した。デジタル値の変調方式には他の方式も考えられるため、どれが最適なものであるか議論が必要である。また、現在は 3 ビットの信号を送信するとしてプロトコルを設計しているが、前述のハードウェア変調器・高性能なスマートタップによって伝送可能なビット長が拡大することを考慮して変調方式ならびに通信プロトコルを設計する必要がある。またデータグラム設計も議論の必要がある。

加えて、実際に HEMS・BEMS 内で活用するためには、より上位のアプリケーション層での通信プロトコルの定義が必要になる。この定義をするにあたっては提案手法を用いるアプリケーションにとって必要なセキュリティ上の問題等を議論する必要がある。

また、接続機器の識別子の割当についても議論が必要である。たとえば、Ethernet での MAC アドレスのように機体ごとに異なる割当や、機器の種別ごとに異なる割当など様々なポリシーがある。

6.3 提案手法の理論的な議論

本論では、提案手法を実現したシステムの制御系としての特性が十分に評価できていない課題がある。安定性や可観測性があるかなどの理論的な評価も今後行う必要がある。

6.4 他機器でのソフトウェアによる実装

本論では、接続機器としてディスプレイを用いることによって、コンピュータからソフトウェアにより電源入切を行って、提案手法を実験した。ソフトウェアによる電源制御が可能な機器はディスプレイ以外にも、

UPS・バッテリーが取り付けられたコンピュータや、一部の電源断が可能な WakeUP on LAN 対応機器などがある。これらの機器に対する、ソフトウェアによる本手法の実装を今後も行う。

6.5 接続機器を動作させながらの接続機器同定

今回の実験で構築したシステムでは、ディスプレイを使用するために設置して3分から7分間はスマートタップに識別子を送信しスマートタップが接続機器を同定する。そのため、その期間は接続機器を操作できず、利便性を損う問題がある。ハードウェア変調器、高性能スマートタップを導入することでこの同定に要する時間は短くなることが予想できるが、同定を行う間は接続機器を動作させられない問題がある。接続機器を設置してすぐに使用可能にするため、接続機器を動作させながら意図的に消費電力を増加させるという同定の手法を現在検討している。接続機器によって消費電力やそのパターンは大きく異なるため、Passive 型の手法を取り入れながら行う必要があると考えている。

7. おわりに

本論では、消費電力パターンにデジタル符号を変調することでスマートタップが接続されたコンピュータと接続機器の間で約 0.01[bps] のデータ転送を行い、接続機器の識別子を送信することで、スマートタップに接続されている接続機器を同定した。また手法の原理と関連研究について述べた。実験では2種類のスマートタップを用いて本手法が動作することを示した。今後の課題として、ハードウェア変調器と高計測周期・高計測精度なスマートタップを用いた実験・評価、本通信を実現するためのプロトコル設計、より多くの種類の機器へのソフトウェア変調器の実装などが挙げられる。また Passive な方法と組合せた機器を稼働させながら同定する手法について研究開発を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Weng, B. Balaji, S. Dutta, R. Gupta, and Y. Agarwal, "Managing plug-loads for demand response within buildings," november 2011.
- [2] X. Jiang, S. Dawson-Haggerty, P. Dutta, and D. Culler, "Design and implementation of a high-fidelity ac metering network," Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp.253–264, IPSN '09, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2009.
- [3] V. Seshadri, G.V. Zaruba, and M. Huber, "A bayesian sampling approach to in-door localization of wireless devices using received signal strength indication," Pervasive Computing and Communications, 2005. PerCom 2005. Third IEEE International Conference on, pp.75–84, march 2005.
- [4] L. Ravindranath, C. Newport, H. Balakrishnan, and S. Madden, "Improving wireless network performance using sensor hints," NSDI '11: 8th

USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, pp.281–294, march 2011.

- [5] N. Pavlidou, A. Han Vinck, J. Yazdani, and B. Honary, "Power line communications: state of the art and future trends," Communications Magazine, IEEE, vol.41, no.4, pp.34–40, april 2003.
- [6] T. Washiro, "Applications of rfid over power line for smart grid," Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2012 16th IEEE International Symposium on, pp.83–87, march 2012.
- [7] 和谷優一, 川村尚生, 菅原一孔, 宇佐美悟, "多機能インテリジェントコンセントの開発について," Nov. 2007. 鳥取大学.
- [8] 土師浩平, 加藤丈和, 松山隆司, "Interval-based switching kalman filters による 家電の電力消費モデル推定," 信学技報, vol.112, no.31, pp.39–44, may 2012.
- [9] 加藤丈和, 松山隆司, "i-energy profile: スマートタップネットワークによるエネルギーの情報化プロファイル," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J94-B, no.10, pp.1232–1245, october 2011.
- [10] D.L. U. Greveler, B. Justus, "Multimedia content identification through smartmeter power usage profiles," Jan. 2012.