

修士論文

2003年度(平成15年度)

ホームネットワークにおける
電力線搬送の実用性に関する研究

慶應義塾大学 政策・メディア研究科
徐 元

ホームネットワークにおける 電力線搬送の実用性に関する研究

論文要旨

本論文では、まず、ホームネットワークの特徴を説明し、ADSL、FTTH、IEEE802.11、Bluetooth、PLC などその中で用いられている多様な通信方式を比較する。ホームネットワークは、計算機技術、ネットワーク技術、マルチメディア技術によってサポートされており、家庭安全防犯システム(HSS, Home Security System)、家庭自動化システム(HAS, Home Automation System)、家庭通信システム(HCS, Home Communication System)などに利用されている。ホームネットワークにおけるトラフィックは多様であり、ストリーミングやコンテンツ制御などを含む。本研究では、ホームネットワークにおいて、異なる通信デバイスがIPを用いて通信を確立することを想定する。本研究で着目する電力線搬送システムは、近年多くの企業によって研究開発が行われており、OFDM、スペクトル方式、エラー訂正技術などが開発されている。本論文では、国別配電線分布方式について、特に、米国、日本における電力線の分布を説明し、各国の電力線搬送の利用及び制度を述べる。

本研究では、電力線搬送システムの実用性を検証するため、いくつかの実験を行った。まず、データ転送のRTTを分析し、エラー及び電波ノイズに対する測定を行った。測定には、UDPを用い、データ送信頻度が変更可能なプログラムを作成し、それを利用した。ファイル転送については、電力線モデムを経由し、シリアルモニタを利用して測定した。これにより、電力線搬送が大容量ファイルを転送可能であることを示した。また、S/N比と通信チャンネル容量を算出し、通信チャンネル特性を分析した。実験はWindows98、Windows2000上で行った。

キーワード：

1 電力線搬送 2 ホームネットワーク 3 UDP 通信 4 SNR 5 通信方式

慶應義塾大学 政策・メディア研究科
徐 元

Abstract of Master's Thesis

A Research on the Utility of the Power Line Communication in Home Network

Academic Year 2003

Summary

This thesis describes the properties of Home Network, and compares different communication methods used within, such as ADSL, FTTH, IEEE802.11, Bluetooth, and PLC. Home network is mainly composed of PC, network, communication and multi-media technologies, and supports systems such as Home Security System (HSS), Home Automation System (HAS), and Home Communication System (HCS). Home network holds diverse traffic, such as stream utilization and contents controlling. We assume that the communication is established among different communication devices based on IP. In the past several years, Power Line Communication system has been developed in companies of many countries. Studies like OFDM, spectrum spread approach and error correction have been launched. Since different countries have different electrical code, the thesis summarizes the residential electrical wiring standard in China, United State of America as well as Japan. The thesis also discusses PLC utilization and policies in above counties.

Results of several experiments under Windows98 and Windows2000 is shown. RTT has been analyzed according to the transmitted data. The measurements and correlated calculations about data transfer error as well as the noise of electronic waves have also been done. S/N ratio and communication channel capacity were calculated, and the characteristics of the communication channel is analyzed, which is beneficial for the study of practical and convenient home network power line transmission. The affirmative experiment of file transmission has been done through power line Modem with serial monitor. This experiment proved that high content files can be transmitted through power line.

Keywords:

1 Power Line Communication 2 Home Network 3 UDP Communication
4 SNR 5 Transmission Method

Keio University Graduate School of Media and Governance
Yuan Xu

目次

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 第1章 序論 | 2 |
| 1.1 はじめに | 2 |
| 1.2 本研究の背景と問題意識 | 3 |
| 1.3 本研究の目的 | 3 |
| 1.4 本論文の構成 | 3 |
| 第2章 ホームネットワーク | 4 |
| 2.1 ホームネットワーク | 5 |
| 2.1.1 現状 | 5 |
| 2.1.2 特徴 | 5 |
| 2.1.3 技術と応用 | 6 |
| 2.2 ホームネットワークアーキテクチャ | 6 |
| 2.2.1 Set Top Box | 7 |
| 2.2.2 ECHONET | 7 |
| 2.2.3 UPnP | 9 |
| 2.2.4 RG | 10 |
| 2.3 ホームネットワークにおけるトラフィックの解析 | 11 |
| 2.3.1 ストリーミングトラフィック | 11 |
| 2.3.2 インターネットトラフィック | 12 |
| 2.3.3 センサ・制御トラフィック | 12 |
| 2.4 本章のまとめ | 14 |
| 第3章 ホームネットワークにおける通信方式の比較 | 15 |
| 3.1 PowerLine Carrier | 16 |
| 3.1.1 エコーネット | 18 |
| 3.2 Home Plug | 18 |
| 3.3 FTTH | 18 |
| 3.4 ADSL | 19 |
| 3.5 ISDN | 20 |
| 3.6 HomePNA | 20 |
| 3.7 IEEE1394 | 20 |

| | | |
|------------|---------------------------|-----------|
| 3.8 | IEEE802.11a | 22 |
| 3.9 | Bluetooth | 22 |
| 3.10 | 本章のまとめ | 22 |
| 第4章 | 電力線搬送の利用ドメインと制度の比較 | 24 |
| 4.1 | 利用ドメイン | 25 |
| 4.1.1 | 電力線搬送の利用 | 25 |
| 4.1.2 | 電力線搬送トランシーバ開発 | 25 |
| 4.2 | 国別電力線搬送の制度 | 26 |
| 4.2.1 | 周波数利用 | 26 |
| 4.2.2 | 総合ケーブル配置 | 26 |
| 4.3 | 電力線搬送にいての研究 | 28 |
| 4.3.1 | スペクトラム拡散方式 | 28 |
| 4.3.2 | エラー訂正機能 | 29 |
| 4.3.3 | 二重キャリア周波数帯域 | 29 |
| 4.4 | 本章のまとめ | 29 |
| 第5章 | 電力線搬送の実用性に関する評価 | 30 |
| 5.1 | 予備実験(物理測定) | 31 |
| 5.1.1 | 広帯域データ伝送の物理測定 | 31 |
| 5.1.2 | 測定 | 31 |
| 5.1.3 | 高速PLC実用化の評価 | 34 |
| 5.2 | 実験設備のシステム構成 | 37 |
| 5.2.1 | 電子レンジのノイズの影響測定 | 38 |
| 5.2.2 | 蛍光灯と白熱灯のノイズ影響比較測定 | 40 |
| 5.2.3 | 通信確立 | 40 |
| 5.3 | 伝送RTT実験 | 41 |
| 5.3.1 | 送受信プロセス | 41 |
| 5.3.2 | 蛍光灯と白熱灯の比較測定 | 42 |
| 5.3.3 | 電子レンジの白熱灯の比較測定 | 42 |
| 5.4 | 評価 | 42 |
| 5.5 | データ伝送アプリケーション | 43 |
| 5.5.1 | 設定方法 | 43 |
| 5.5.2 | データ伝送 | 44 |
| 5.6 | 本章のまとめ | 45 |
| 第6章 | まとめ | 47 |
| 6.1 | 今後の課題 | 48 |
| | 参考文献 | 51 |

目 次

| | | |
|------|------------------------------|----|
| 2.1 | インターネットの利用率と月間利用時間 | 13 |
| 3.1 | 通信システムの比較 | 16 |
| 3.2 | 電力線搬送の標準機構 | 17 |
| 3.3 | 日本における PLC 使用周波数 | 17 |
| 5.1 | エンドツーエンド通信 | 32 |
| 5.2 | ノイズ | 32 |
| 5.3 | 信号強度 | 33 |
| 5.4 | 信号対ノイズの伝送率 | 34 |
| 5.5 | システム構成 | 37 |
| 5.6 | 実験設備構成 | 38 |
| 5.7 | BPLM100B インタフェース | 39 |
| 5.8 | neweval1.eps | 39 |
| 5.9 | neweval2.eps | 40 |
| 5.10 | neweval3.eps | 41 |
| 5.11 | neweval1.eps | 42 |
| 5.12 | neweval2.eps | 42 |
| 5.13 | neweval3.eps | 43 |

表 目 次

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 2.1 | ネットワーク規格の比較 | 10 |
| 2.2 | 日本でのブロードバンド利用人口調査 | 11 |
| 2.3 | 接続方式とストリーミングデータの実効伝送速度 | 13 |
| 3.1 | ISDN 普及度の調査 | 20 |
| 3.2 | HomePNA 事例調査 | 21 |
| 3.3 | IEEE1394 事例調査 | 21 |
| 3.4 | 多様な通信方式の比較 | 23 |
| 4.1 | 電力線配送の各国の研究状況 | 26 |
| 5.1 | 実験設備の構成 | 31 |
| 5.2 | ノイズサンプルデータ | 36 |

第 1 章

序論

本章では、本研究の意義および本論文の内容構成について述べる。

1.1 はじめに

近年、インターネットインフラが整備されてきてあらゆるコンピュータがネットワークに接続されて、相互に有機的に連携し、ネットワーク時代は現実のものとなった。こうしたネットワーク化の動きは、家庭にある機器同士の相互接続へと発展しつつある。家庭内にある機器を対象としたネットワークは、通常、「ホームネットワーク」と呼ばれている。ホームネットワーク実現の動きは、過去にも数回あったが物理的な接続を超えたソフトウェアの連携という視点まで含むことができなかつたために普及するには至らなかった。しかし、ここ 5-10 年間の間に、TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) によるネットワークプロトコルの統一化と TCP/IP を利用する共通のミドルウェア構築への動きが活発化してきており、過去の試みとは異なり、ホームネットワークが現実味を帯びたものとして、物理層からアプリケーションレベルに至るまで諸技術の研究開発が活発化している。

このような状況において、本論文は家庭内にある家電機器相互を物理的に接続する媒体について検討するものである。LAN (Local Area Network) を構築する際の物理媒体の候補となるものは数多くある。イーサネット、IEEE 1394、IEEE 802.11b 等の無線 LAN、電話線、Bluetooth、USB、電力線搬送 (PLC: Power Line Communications) モデムがその例である。ホームネットワークは、オフィス、工場の生産現場、大学研究室、計算機センター等の環境と異なり、新しくケーブルを敷設することが困難となっており、ケーブル敷設を必要としない手段が望まれる。電力線搬送は、家電機器の電源供給に使用される交流電源ライン上に周波数多重によりデータ通信を行うものであり、「ケーブル敷設を不要とする」という条件に合致し、ホームネットワークの媒体の有望な候補となる。

1.2 本研究の背景と問題意識

電力線搬送に関する研究は長年行われてきており、既に電力線搬送モデムの特性調査も進んでいる。電力線搬送の支障となる原因はノイズである。本来、家庭に供給されるべき理想的な電源は、電圧信号が 50 Hz (日本においては東日本。西日本では 60 Hz) の基本波だけからなるものである。しかし、最近、家電機器の電力供給口で交流から直流に変換する際にトランジスタやサイリスタ等の電力用半導体スイッチング素子が用いられていて、こうした素子が電源側に高調波 ($n \times 50$ Hz, $n = 3, 5, 7, \dots$) を流入させ、この高調波が電力線搬送の搬送周波数と重なり合いノイズとなる。そのため、実際のホームネットワークにおいては、実験室で理想的な電源が供給されるときほどにはデータ通信のスループットが達成されない。

したがって、実際の電力線搬送においてデータ通信のスループットを把握することが重要であることがわかる。これまでの特性調査は主として物理層レベルのものである。しかし、ソフトウェアアプリケーションレベルでは TCP もしくは UDP (User Datagram Protocol) 等のトランスポートプロトコル上で通信が行われるので、トランスポートプロトコル上でスループットを把握しなければならない。

電力線搬送の実用化に向けては、技術面以外にも、法規で規制されている場合があることも考慮しなければならない。そのため、各国の法規制の現状についても本論文では調査する。

1.3 本研究の目的

本論文では、従来の研究においては欠けていたトランスポートプロトコル上でスループットに焦点を当て、データ転送実験を行い、電力線搬送の実用性を検討するものである。特に、他の家電機器動作に伴うノイズ発生が電力線搬送スループットに及ぼす影響について、実験を行い、詳細に調査する。このような実験結果から、電力線搬送の実用化についての指針を与えることが本研究の目的である。

1.4 本論文の構成

本論文は全 6 章より構成される。次章ではホームネットワークの諸技術の現状について概説する。特に ECHONET、UPnP[13] 等既に提案されているホームネットワークアーキテクチャとトラフィックの種類について述べる。第 3 章では、ホームネットワークにおける通信方式の比較を行う。第 4 章では電力線搬送の利用ドメインについて述べ、各国の制度を比較する。第 5 章では、実際に実験を行い、電力線搬送の特性を測定する。第 6 章では応用分野のシナリオを述べ、電力線搬送の実用化に対する結論を述べ、本論文を締めくくる。

第 2 章

ホームネットワーク

本章では、ホームネットワークの諸技術の現状を明らかにし、特徴をまとめる。特に、各技術と電力線搬送との共存可能性を議論する。

2.1 ホームネットワーク

ホームネットワークは、家庭で利用されるネットワークの総称であり、物理媒体だけを指す場合もあるが、ソフトウェアアーキテクチャまで含めてシステム全体をホームネットワークと呼ぶこともある。ホームネットワークの物理媒体には、SOHO (small office, home office) 型 Ethernet, HomePNA, IEEE1394, 家電制御型電力線搬送モデム (PLM) 等がある。また、インターネットアクセスに付随するものとしてホームネットワークを見ることが出来る。

本章では、ホームネットワークの諸技術の現状を明らかにし、特徴をまとめる。特に、各技術と電力線搬送との共存可能性を議論する。ホームネットワークでは、多様な通信方式がサポートされ、高速で高いパフォーマンスの通信を提供されることが望ましい。ネットワーク機能を有する家電では、インターネットにアクセスしてコンテンツを読み取ることができ、省エネ、省スペースが要求される。

ホームネットワークの要素となりうる“ Set Top Box ”、アーキテクチャを定めた“ ECHONET[4] ”、“ レジデンシャルゲートウェイ RG ”を取り上げ、それぞれの構成及び機能を記述する。

2.1.1 現状

SOHO 型 Ethernet は、インターネットアクセスに付随するものとしてアクセスマルタの内側の LAN という形態で普及が進んでいる。コンピュータユーザの家庭においては、Ethernet はホームネットワークの有望な物理媒体となる。HomePNA は電話線を利用したものであるが、我が国ではほとんど普及していない。IEEE1394 は AV データ配送ケーブルとして使用されているに止まっている。

現在、いくつかの国では、例えば、米国、ドイツ、スイス、日本、中国、韓国などが電力線搬送を開発しており、家庭でネットワークに接続する技術として研究している。日本では、電力線を利用してインターネット接続を実現しようというもので、九州電力、関西電力など電力企業が中心になって開発を行っている [2]。新規なケーブル敷設が不要なため、実験で最大 45Mbps の速度を達成した。

2.1.2 特徴

ホームネットワークは、主に実時間性、操作性、汎用性、経済性が要求される。多様なアクセス方法により構内の通信システムを構成し、それらの構成要素が補完的に組み合わせられ、ホスト間アドレスが動的に割り当てられることが多い。

電力線が単一の伝送メディアであるため、電話や PC と共用できる。配線装置が壁のコンセントと一致し、異なる PC と電話システム間で利用が可能になる。既存の分散システムでは、電話や PC がそれぞれ電話線やケーブルを利用するため、両方のアーキテクチャ及びケーブルを一緒に使用することはできない。電力線コンセントはエンドホストと他のネットワークデバイス間で完全に共用できるため、PC や電話でも共通

に利用できる。電話線ケーブル、光ファイバ、無線のような通信方式に加え、多様なアクセス技術が融合に使いこなせ、比較的安価なコスト提供が求められる。

2.1.3 技術と応用

ホームネットワークの目標を実現させるために、インターネットやネットワーク接続機能を持つ家電機器の研究もなされている。

ネットワーク機能を持つ家電は、インターネットを經由してユーザが意識せずにアプリケーションを設定し、コンテンツを読み取れる機能を持つ。家庭、構内 PC 環境では、ネットワークを構築する諸要素が分散する資源を一元的に制御でき、多様な通信デバイス間で共通プロトコルを用いて通信が確立する。このような中で、IPv6 の実現は、家電機器ごとに IP を取り付けることが可能になり、新たなネットワーク資源を利用する可能性が出てきた。

東芝のフェミニティでは、電子レンジ、冷蔵庫、洗濯機などを短距離に通信できる Bluetooth に対応させ、アクセスポイントとワイヤレスで通信できるものを提案している。他の通信方法として、アクセス装置がイーサネット端子を用いてルータ経由でインターネットと接続する方法も提案されている。

家電機器の相互接続性について、インターネットで使用されている標準化技術が応用されている。その中でイーサネットや無線 LAN、Bluetooth、IEEE1394 のような技術が使用されている。家庭内では、通信の前提とするルータの使用について、FTTH の普及から理論上の 100Mbps に迫るインターネット接続が家庭でも利用可能になった。すなわち、大容量なデータ伝送が既に可能になり、インターネットからコンテンツを取り込む作業は現実の意味を持つようになった。

2.2 ホームネットワークアーキテクチャ

1998 年 5 月シンガーポールで「アジア家庭電器と電子消費品国際展示会」が開催された。“未来の家”と呼ばれる展示には、家庭知能化システムや、Echelon 社による Lonworks ネットワーク家庭展示システムが提案された。家庭知能化システムでは、自動的に音楽を流したり、洗顔機を利用する時に電気をつけたりすることがある。そして、これらを総合的な機能を持つリモコンから利用可能になる。また、DVD や、メール、インターネットニュースを購読したり、マルチメディアゲームを遊んだりする。

ユーザがいなくなると、家庭知能化システムが自動起動してホームセキュリティシステムが作動する。違法に進入したり、事故を起こしてしまったりするなど、システムが自動的にダイヤルして利用者に通知する。会社が終了すると、携帯電話を使って遠隔地から自宅内のエアコンを適当な温度に調整できる。ネットワーク家電は、PDA を通じて電子レンジを起動したり、空調機の温度を設定したり、或は終了を行う。テレビから自分の興味あるチャンネルを選択したり、庭の電灯を制御する。

以上の二種類の自動システムは、ネットワーク家庭の一部として知能化家庭の初期段階であるが、本当の意味の知能化家庭とは呼べない。前者では知能化家庭における

ユーザの要求がシステムで固定的に扱われ、ユーザの需要が変化するとそれらを柔軟に反映しにくくなる。後者では、家電機器をネットワークに繋げる以上の高度な処理が現れていない。両者とも電話やPDAを使って手動な制御を行い、制御するメディアが単一で、ユーザの需要に満たされない。つまり現在は、知能化というよりは、自動化程度に留まる。

しかし、現在の人工知能技術等による知能化程度には限界がある。PC、ネットワーク技術、通信技術及びマルチメディア技術によってサポートと共に、人工知能技術が発展するにつれて、知能化の概念が時代と技術の流れにより変化していくということである。これにより、総合な家庭安全防犯システム (HSS, Home Security System)、家庭自動化システム (HAS, Home Automation System)、家庭通信システム (HCS, Home Communication System) と家庭文化システム (HCS, Home Culture System) が実現され、安全、適切、便利と情報交流が盛んな生活環境を提供できる。

2.2.1 Set Top Box

2003年に日本で検討される放送サービスの一環として、家庭用据え置き型VTRとテレビの受信機と同じ機能を持つ大容量の記憶装置を接続する。セットトップボックスでは、大手企業が開発するepが、BSデジタル、CSデジタル両チューナ、大容量ハードディスク、56kbpsモデムを基本の枠組みとして組み合わせ、ユーザによる番組の録画、再生などが可能になる。モデムが内蔵されているため、ep対応の番組内のコンテンツに対する注文や資料請求をインターネット経由で行ったり、双方向機能も提供される。従って、ハードディスクに蓄積、更新される番組コンテンツ、さらにインターネットを組み合わせ、必要な情報を取り込む機能がEPにより提供される。インターネットへの接続が可能になるため、テレビをディスプレイとして電子メールなどのアプリケーションを利用できる。放送サービスと通信設備との融合的な利用を実現するepは、地上波デジタルチューナーの機能が付加されることにより、デジタルセットトップボックスの完成形になっていくことをも意味する。ハードディスクがチャンネルに適応したリンク情報を保有して、テレビにチャンネルのメニュー情報を提供できる。

2.2.2 ECHONET

エコネット (Energy Conservation and HOmecare NETwork) は、家庭、中小ビル、店舗において白物家電や設備機器からなるシステムを対象としたネットワークの規格である。家電製品は相互に接続され、違うデバイス及び機器のアクセスに対し、互換性を保証するためにミドルウェアが用いられる。また、住宅における家電ネットワーク化を前進させるECHONETは、違うOS間でもアプリケーションの動作を確保するミドルウェア技術として動作し、家電機器や情報機器など分散ネットワークコンポーネントを構築し、それらを統合的に利用可能になる。

同様なミドルウェアとしてHAVI(Home AV interoperability)、Jini(Java intelligent network infrastructure)がある。

レイヤー構成

ECHONET レイヤは、OSI 層のような 7 層を持つ。デバイスが互いに物理的に繋がり、よい接続性を持つようにインターネットの多様な標準技術が使われる。デバイス間の壁を無くすためにターミナル機能や共通な通信プロトコルを活用する。さらに、上層では共通プロトコルを使用するミドルウェアを通じて通信サービスが情報機器や情報家電間でのデータ交換を行う。より上の層では、ユーザがアプリケーションを利用して制御、エネルギー管理などの作業を行う。

ECHONET レイヤ [4] は、それぞれの機能を果たすために層という単位に分担させ、大きく三つの部分に分けられる。

下位通信: 第 1 層、第 2 層では、通信インタフェースと通信ソフトウェアを定義している。

通信ミドルウェア: 第 3 層から第 7 層では、様々な通信プロトコルの差異を制御し、異なるデバイスインタフェースの処理機能を揃えるプロトコル差異吸収処理部になっている。まだ通信プロトコル処理、ルーティング処理、オブジェクト管理、機器の状態情報を監視するための通信処理部も存在する。基本 API は、機器のアプリケーション負荷を軽減し、移植性を向上させることが目的である。

サービスミドルウェア: アプリケーションの共通処理を定義するサービス API と様々なサービスを提供するサービスミドルウェアのことである (機器メーカーによる開発、提供が多い)。

伝送媒体及び下位通信ソフトウェアにおける電灯線部は、電灯線を経由し、ECHONET で開発された信頼性がある変調方式とプロトコルに基づいて通信を行う。通信プロトコルとしては、ECHONET で開発したプロトコルと米国 Echelon 社が家庭、ビル、FA 向けに開発した LonTalk プロトコルを使用する。また、赤外線用の通信プロトコルは IrDA Control 規格を使用する。既存のホームパス規格 HBS(Home Bus System) との互換性を利用し、上位互換の拡張 HBS プロトコルを使用する。それらが日本電波の基本法に基づいて細かくまで規定されている。

通信ミドルウェアは、プロトコル差異吸収処理部と通信処理部、基本 API、機器オブジェクトがある。アプリケーションがシステムの機器を遠隔制御したり機器の状態をモニタリングしたりする際の処理を、簡単に行えるようにするための通信プロトコル処理を行う。プロトコル差異吸収処理部ではさまざまな通信インタフェースのアドレスやメッセージ・サイズなどの違いを吸収しアプリケーションに対してひとつのネットワーク機能に見せる。通信処理部では、通信プロトコル処理、ルーティング処理、機器オブジェクトの管理、機器の状態及び時ごとにもつ情報を監視する。オブジェクトは、単一機器が情報を持ち、遠隔制御するために情報メニュー項目から操作できる。また機器をモデル化したので、遠隔制御のための共通の通信インタフェース形式を提供する。その結果として、異種間機器の通信が成立する。基本 API、機器アプリケーション

ン開発の負荷が軽減し、またその移植性を向上させる。ECHONETの機能を使用するために、アプリケーションがインタフェースを規定することで、遠隔通信の制御、監視の実行、接続や機器制御などのライブラリインタフェースを規定する。

ECHONETの特徴として以下が挙げられる。

1. 物理的な複合ネットワーク構成を隠し、相互接続を図る。
2. 機器のアドレスとアプリケーションの所在やデータの所在を管理する方法としては集中型と分散型がある。常に、機器アドレスがローカル側に決定する。単一機器が各自で情報を保有し、当該情報のリンク先まで確認を送信し、他方（一般にはサーバ）がそれを応じて情報を応答する。
3. 機能としては、温度の変化、人体検出、エネルギー制御、湿度感知、光度投射、機器検出、環境状態確認など、システム内で発生するイベントの種別毎に標準イベントコードを規定し、それらの変化を周期的に検出し、同報送信する。そして、システム内の機器の連係及び新規機器の追加が可能である。
4. システムの機器接続状態の変化を検出する。動作中あるいは周期的に、機器のアドレスと機器種別識別子を同報送信し、システム内のほかの機器に通知した後、タイムアウトにより離脱状況を把握できる。

サービスミドルウェア及びサービスAPIでは、特定アプリケーションの共通処理を定義するのはサービスAPIである。それはアプリケーション開発の負担を軽減することを目的とする。また、通信ミドルウェアは、エネルギー制御、電力メータ、自動検針街電灯システム、店舗、設備制御、放送チャンネル選択(Ch)に使われる。

2.2.3 UPnP

UPnP(ユニバーサルプラグアンドプレイ)は、デバイスの挿入をより自動的に検出する機能がある。UPnP機能に対応している機器であれば、ネットワークの物理的な接続さえすれば、アプリケーションの設定が自動的に行われ、ユーザが手動的に変更する必要がなくなる。その特徴を活かし、個人向けのルータはUPnP機能への対応が欠かせないものとなる。

ステムズ社によるJiniが開発される以外、UPnPはマイクロソフト社を中心として推進される規格である。ウィンドウズXPがその標準規格に対応しており、ソフト開発の進展が更に進むことに違いない。UPnPでは、XMLをベースにネットワーク内の各デバイスが情報を交換する。現時点で既に具体化されているものとしては、ブロードバンドルータがアプリケーションからの要求に従い、ポートの開け閉めやアドレス変換のその動きを見ることが出来る。この機能の実装により、インスタントメッセージングアプリケーションは安全に外部との音声通話などができる。同等な機能が個々の家電に実装されるようになれば、携帯電話でリビングルームの家電製品をコントロールすることが可能になる。

2001年後半、マイクロソフトがMira[7]の中で、PCが中心に位置づけられ、RDP(リモートデスクトッププロトコル)を通じてPC内のデジタルコンテンツを家庭用のテレビやタッチパネルを持つ専用端末などで利用できるように発表した。MIRAを代表するソフトが家庭内でホームサーバが構築できる。そこで、ファイルサーバやwwwサーバなどのサーバ機能がハードデスク上に組み込まれて、アプリケーションがユーザ需要に適するように提供される。

UPnPが、デバイス間で良好な接続性を保持する上、家庭内ネットワークと知能なアクセス系が組み合わせられ、家庭内の家電機器がIPアドレスを持たされ、柔軟性の高いネットワークを構成できるようになる。[12]

ADSL

ADSLアーキテクチャは、電話ネットワーク、ADSL終端装置、POTSスプリッタからなる。そこで、イーサネット、電話線、電力線搬送を分類した比較を表2.1でまとめる。

表 2.1: ネットワーク規格の比較

| | 物理ネット | 速度 bps | 距離 m | 想定アプリケーション |
|----------|---------|----------|------|---------------|
| IEEE1394 | ツイストペア線 | 100-400M | 4.5 | AV制御,映像データ転送 |
| HomePNA | ツイストペア線 | 10M | 150 | 家電とAV制御,データ通信 |
| Home RF | 小電力無線 | 1-2M | 50 | AV制御,PCデータ通信 |
| X10 | 電力線 | 60 | 数百 | 白物家電,AV制御 |

2.2.4 RG

レジデンシャルゲートウェイ(RG)は、アクセスネットワークを経由した各種のサービスを家庭内で享受できるように家庭の内外を接続するための機器である。すなわち、RGは、家庭内の機器やホームネットワークと家庭外のアクセスネットワークとのインタフェースの役割を果たす。

米国の通信業界団体TIA(Telecommunication Industries Association)のTR41.5委員会により、RGのルーツが(IBM、HP、GTE、Bellcore、DavidSarnoff、Reliance Comm/Tec、B&C Consulting)がRGグループを結成し[15]、1997年から標準化の議論が始まっている。第一世代の単一ネットワークと単一家庭機器との接続から、複数のアクセスネットワークと複数の家庭内機器と接続する第二世代へ変化してきた。異なるアクセスネットワーク間でのインタオペラビリティや、異なるホームネットワーク間でのインタオペラビリティを実現する機器としてRGが使われている。RGグループでは家庭内のネットワークアーキテクチャの標準化を議論しており、その中で有名なHES(Home Electronic System)が家電コントロール系を中心とした家庭内アーキテクチャの標準

化作業を進めている。VESA (Video Electronics Standardizations Association) のホームネットワーク WG では、RG を含めた家庭内のホームネットワーク全体についての標準化が議論されている。OSGi (Open System Gateway Initiative) では、RG の機能的な側面に関連する技術の標準化も議論されている。

2.3 ホームネットワークにおけるトラフィックの解析

本節では、ホームネットワークにおけるネットワークトラフィックを解析し、電力線搬送がどのようなトラフィックに利用可能かを検討する。

2.3.1 ストリーミングトラフィック

ストリーミングとは、映像や音声などのマルチメディアデータの受信と再生を同時に行うインターネット技術のことである。データの配信方式により、ダウンロード型、ライブ型、オンデマンド型の三種類に分けられる。ダウンロード型が HTTP、FTP などソフトウェアにより、ウェブ上で自由自在にコンテンツを利用する方法である。ライブ型は Real Time 放送のようにリアルタイムにコンテンツの配信を行うが、ユーザ側にコンテンツを複製することはできない。オンデマンド型はライブ型と異なり、ユーザ側の要求に基づいて配信されるコンテンツ送信サービスである。ライブ型とオンデマンド型はユーザ側とサーバ側がコンテンツ配信ソフトを要求される。一方、両方のコンテンツ製作に関しては、リアルタイム性があるかどうかのポイントになる。インターネット上の配信が多様化する途端、コンテンツの製作及び制御がオールインワン化、リアルタイム処理プロセスを行う。[17]

従って、電力線搬送で映像ストリーミングを実現するためには、高いスループットが要求される。高いスループット (ブロードバンド) のネットワークが映像データを伝送する傾向があり、データが圧縮され、音声、映像ストリーミングが素早く到達できる。表 2.2 に、日本でのブロードバンド利用者数をまとめる。

表 2.2: 日本でのブロードバンド利用人口調査

| (単位：回線数) | NTT西日本エリア | NTT東日本エリア | 合計 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| NTT が提供するもの | 1,071,396 | 1,334,585 | 2,405,981 |
| NTT 以外が提供するもの | 1,765,865 | 2,418,021 | 4,183,886 |
| 合計 | 2,837,261 | 3,752,606 | 6,589,867 |

最終更新日時 2003/3/11(総務省統計)

スカイパーフェクト・コミュニケーションズはオプティキャストを設立することにより、マンションでの SKY Perfec TV 視聴の対応策として、NTT と共同で光ファイバーを利用した映像配信実験を行ってきた。これは 1 芯の光ファイバーに複数の光波長を

多重し、SDTV 換算で最大 500 チャンネル分の映像を配信し、かつ上り下り 100Mbps のインターネット接続サービスを提供しようというものである。

全体にブロードバンド/ISDN 別に視聴している音声動画情報から、情報量の多いものほど利用者が ISDN 利用者に比べて視聴率が高いことが明らかになっている。

音声動画情報について、インターネット利用者全体では、45.4 %が視聴していると回答している。ブロードバンド/ISDN 別では当然ながら、圧倒的にブロードバンド利用者での視聴者が多く 6 割を超えている。しかしながら、視聴している人の一回あたりの視聴時間は全体平均で 19.3 分、ブロードバンド/ISDN 別にみてもそれぞれ 19.9 分、18.8 分とそれほど変わらない。

音声動画情報の視聴者に対してパソコン以外の機器からの視聴の有無を聞いたのが資料 [14] により、パソコン以外で視聴をしたいと思う回答者は 2 割程度に過ぎないが、パソコン以外 (無答えなど含む) でも音声動画情報を視聴したいと思っている回答者のうち 46.6 %は「携帯電話」で、41.2 %は「プレイステーション 2 で」音声動画情報を視聴したいと考えていることが分かる。

これらと比較して電力線搬送は低速であり、ストリーミングトラフィックには適さない。

2.3.2 インターネットトラフィック

ブロードバンド/ISDN 別の資料により、ブロードバンド利用者は「パソコン以外では音声動画情報を視聴したいと思わない」率が比較的高い。ISDN 利用者もその答えについて半割強 51.2 %の結果を示している。

家庭内で利用される音声動画情報の内容について、プロモーションビデオのクリップが視聴のトップ位置 44.8 %を占める。映画、TV 報告 (27.1 %)、生活情報 [20.7 %、「ゲーム」17.6 %、ニュース天気予報が 16.6 となっている。生活情報やニュース天気予報は利用コンテンツが上位になるが、テキスト情報はそれほどではない。図??に、日本でのインターネット利用率と月間利用時間をまとめる。

これらから、電力線搬送は ISDN と同等以上の通信帯域を持っているためクリップや映画、TV 報告などに使えるが、利用者の需要には合致していない可能性がある。

2.3.3 センサ・制御トラフィック

ハードウェアから通信チップセット製造が様々な技術をもつ。主に通信距離による通信速度の向上に向け、接続方式の開発で通信容量や転送情報を表 2.3 で示す。センサ情報や機器制御のトラフィックは転送する情報の量が少ないため、電力線搬送を十分に応用することができる。

[メディア開発総研作成]

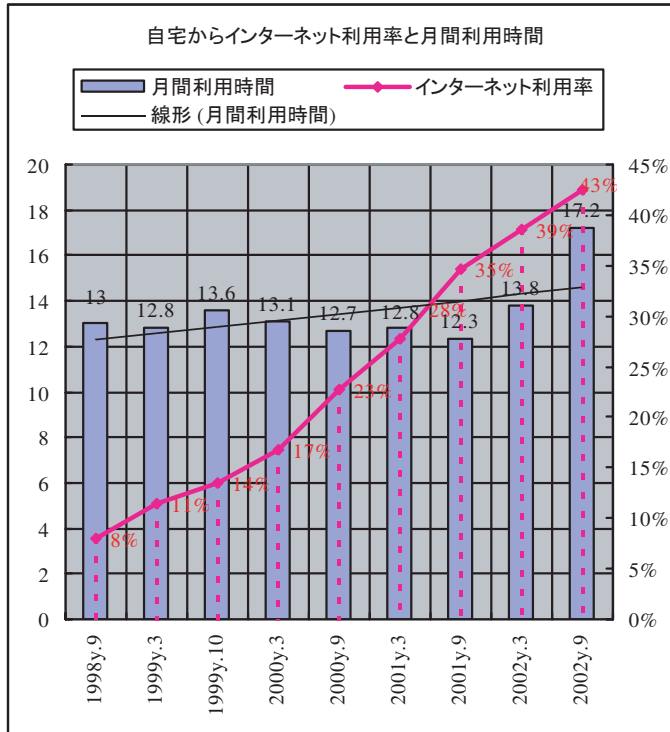


図 2.1: インターネットの利用率と月間利用時間

表 2.3: 接続方式とストリーミングデータの実効伝送速度

| 形態 | 転送レート | 実効転送速度 |
|---------------|----------------|-----------------|
| 56k モデム | 53kbps | 4.8KB/s |
| DUAL ISDN | 128kbps | 12KB/s |
| DSL | 8Mbps | 12KB/s |
| T1 | 1.54Mbps | 150KB/s |
| ケーブルモデム | 6Mbps | 300KB/s |
| イントラネット/LAN | 10Mbps | 350KB/s |
| 100BASE-T LAN | 100Mbps | 500KB/s |
| 電力線搬送 | 10Kbps ~ 3Mbps | 5Kbps ~ 1.5MB/s |

2.4 本章のまとめ

インターネットの発展と共に開発された多様な標準技術を活かし、ホームネットワークへコンテンツ配信を行うことはできる。通信速度とコンテンツ利用の向上により、ユーザの数が年々増える傾向がある。ホームネットワークでブロードバンドを利用し、データ送受信をリアルタイムに行う。ユーザは意識せずにシステム及びアプリケーション設定、変更ができる。一方で、ホームネットワーク内部には、電話線ケーブル、光ファイバ、無線等の通信方式に加え、電力線搬送があり、電力線搬送が比較的安価なコストで提供される。電力線コンセントがエンドホストと他のネットワークデバイスと完全に共用できるため、移動デバイス或は電話を利用することができる。

第 3 章

ホームネットワークにおける通信方式の比較

本章では、米国、欧州、日本において電力線搬送に関する研究の標準について記述する。PC、ネットワーク技術、通信技術及びマルチメディア技術を含むホームネットワークは、総合な家庭安全防犯システム (HSS, Home Security System)、家庭自動化システム (HAS, Home Automation System)、家庭通信システム (HCS, Home Communication System) 機能も持つ。ネットワークの役割により、通信方式がアクセス系とブリッジ系に分けられる。本章では、Home Plug、PLC、FTTH、ADSL、ISDN、HomePNA、IEEE1394、IEEE802.11、Bluetooth を代表する通信方式を比較し、それぞれの問題及び特徴を述べる。それらに基づき、家庭内のネットワークアーキテクチャの機能と品質について考察する。また、通信媒体によって敷設方法が違い、それらに対するユーザ嗜好とコスト要件などの要件について述べる。

3.1 PowerLine Carrier

電力線搬送の技術は既に 20 年間以上を経て、数多くの国に利用されている。電力線搬送の応用が増える一方、通信チャンネルとしてほかの通信メディアと融合して使用することが注目されている。電力線搬送は、通信チャンネルとして構内で利用する場合、いくつかのメリットがある。既存の電力線がそのまま使用可能なので、ケーブルの敷設が節約できる。また、同一の電力線ネットワークにすべてのネットワーク機器を接続すれば、リアルタイムな通信状況が把握できる。

一般には、商用の AC 電力供給に DC を与え、電力線搬送通信を 2 チャンネル備えたものが多い。これを多重利用する場合、DC 送電から AC(50/60Hz) 送電まで、ないし 100kHz ~ 450kHz 範囲における通信で利用できる。下の図 3.1 に無線通信システム、赤外線通信、電力線搬送システムにおける様々な規格、通信速度、利用目的及び開発の概略を示す。

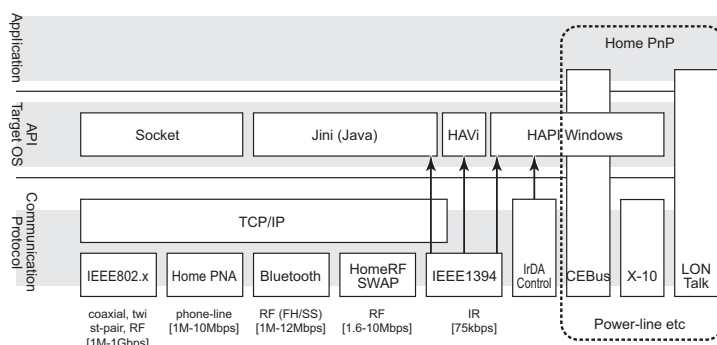


図 3.1: 通信システムの比較

米国では、高速の電力線 LAN の開発が進んでおり、X10、LonTalk、CEBus、SMART HOUSE などが存在する。また、EHS(European Home Systems)[5] と HES(Home Electric System) は、欧州における電力線搬送研究の基準部門及び世界スタンダード連合である。

日本には HBS の研究施設が設立され、エコーネット規格 [?] もその上に基づいて研究が進められている。そして、低周波と高周波それぞれの電力線通信規制は法律により明確に決められている。そこでは、2002 年 6 月の報告により、10kHz ~ 450kHz が低周波通信になっていて通信できるが、1.7MHz ~ 30MHz が高速電力線搬送は、現在には使用できない状態になっている [?]

その様子を [refig:freqencecarrer.eps](http://refig.freqencecarrer.eps) に示す。

電力線搬送は、データを電力線で伝送し、電源プラグ (Power Network Termination PNT) で情報交換を行い、PC とデバイス機器の間にはる過装置 (Coupling Unit) を通して広範囲、大容量、高速な通信が達成できる技術である。ユーザがあらかじめデバイスにネットワーク ID を決めておき、ターゲット機器を検出することで通信が確立する。また、他のネットワークへの接続が可能であり、専用のネットワーク接続端子を

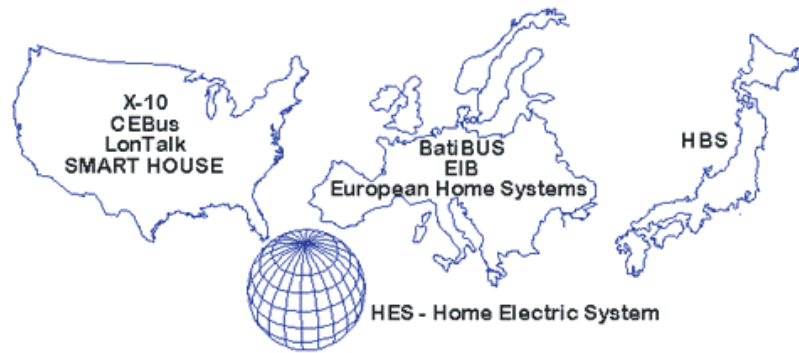


図 3.2: 電力線搬送の標準機構

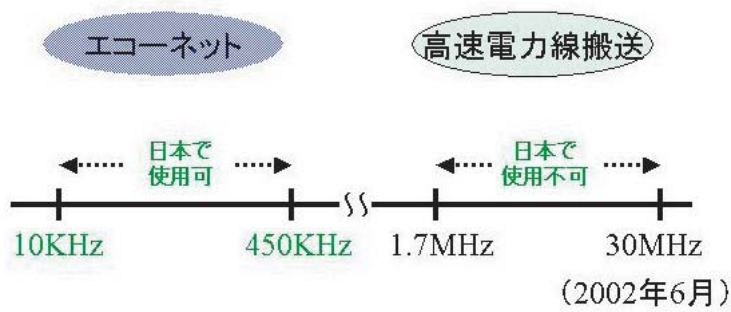


図 3.3: 日本における PLC 使用周波数

用いてインターネット、電話ネットワークへのアクセスも考えられる。

PLCによく利用される変調技術としては、直交波周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が存在する。この技術により、複数の搬送波を一部重なりあいながらも互いに干渉することなく密に並べることができ、狭い周波数の範囲を効率的に利用した広帯域伝送を実現する。この方式は、無線などで一般的に用いられるデジタル変調方式の1つであり、日本や欧州の地上波デジタル放送や、IEEE 802.11aなどの5GHz無線LAN、電力線モデムなどの伝送方式に採用されている。

3.1.1 エコーネット

2001年半ばにECHONETは、電力線搬送を用いて、家庭内の様々な家電製品と住設機器を制御するための安価なネットワークを構築するために規格化された。日本の電波法などの国内法規に適合しているため、国内で製品化が可能である。イーサネットに近い通信速度を出すためには、国内法規に許可されていない帯域を使う必要があるが、目的を機器の制御とすることで、9k~100kbpsの通信速度を達成している。

3.2 Home Plug

Home Plug(Home Plug Powerline Alliance)は、2000年にアメリカの多数の企業により、高速電力線搬送通信に対して業界団体が設立した。主に家電製品、設備機器を制御、監視方式の標準化を目的とするHPAは、統一的な技術標準に基づくHome Plug1.0を発表し、万能電力プラグ装置あるいは電力線搬送モデムにより低コスト、高速電力線ネットワークが構築できる。Home Plugはユーザの好みでネットワーク位置を変更でき、初期費用が低く、配線工事が簡単で済む。

3.3 FTTH

家への光ファイバー接続であるFTTH(Fiber To The Home)は、両方向の光ファイバー経由で、電話技術、パケットデータ及びビデオを経済的に伝達するために最適化された光学のネットワークアーキテクチャを利用している新しいアクセステクノロジーである。現在、FTTHは、ビデオ、音声及びデータサービスの配達を容易にすることを可能にし、住宅用のアクセスネットワークの伝統的な手法の代替案となっている。

マルチメディアFTTHシステムの上で提供されたサービスはPOTS(平易な電話サービス)、高速なインターネットアクセス(データ)、および放送されたビデオである。パロアルト市では、これらの3つのサービスが結合され、中央制御室(UCC)から配布し、家庭の需要に応じて送信している。日本では、最寄りの電話局から一芯の光ファイバを電柱上などの局外スプリッターで複数の光ファイバに分岐させ、住宅とつなげる構成を採用する。電話同期伝送モードSTMが使われるため、一芯の光ファイバから多数ユーザで共有できる。まだ、一度に多くの芯数の光ケーブルを敷設したほうが芯数を節約することより経費が削減する。

90年代のIPトラフィックは光ファイバによるバックボーンの大容量化を推し進めてきた。その後半に入ると、トラフィックが集中する都心部では、メトロエリアネットワーク (MAN:Metropolitan Area Network) が発展し始まった。国、地域により多数な居住者をケーブル、電話およびブロードバンドのサービス (平均 1Mbps) が提供するよう、電話会社、公益事業会社はファイバーの上でポイントツーポイントギガビットのイーサネットを使います。

郊外におけるアクセスネットワークは、95%の (POTS) 普及によって1マイルあたり10個の家を仮定し、ブロードバンドFTTHの仕入原価は、ブロードバンドFTTC、DLC/ADSL (デジタルループ搬送/非同期デジタル加入者回線)、NBDLC(狭帯域デジタルループ搬送)などの他の提案されたソリューションより低いことを期待されている。

ただし、実際に使用する速度が数Mbpsしか出ない問題があり、それはボトルネックとなっている。また、OSごとにデフォルト値が異なるTCPの受信ウィンドウサイズの問題がある。例えばWindows98では、ウィンドウサイズのデフォルト値が8Kバイトしかないのでスループットがかなり低い。また、ケーブルを敷設するため、値段が高い、人員の労力が必要なため、急速に投入することが困難であるといった問題がある。

3.4 ADSL

ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)の構成は、通信プロトコルとラインコードの二つのレイヤに分けて考えることができる。それぞれを伝達手順TC(Transmission Convergence)と物理メディア依存PMD(Physical Media dependent)レイヤと呼ぶ。PMDは、電話回線の収容条件やラインコードに合わせて既存サービスとコンパチビリティがあり、最適な設定項目を選択できるものである。

ADSLの動作周波数帯はAMラジオが大きなノイズを発生しているため、場合によってこの帯域内で最大約-42dBm/Hzのスペクトラムが測定される。電話機が一般状態である時、500kHzに対して損失が約5dB程度、off hookすると900MHzの場合が約20dB損失が発生する [16]。ノイズに弱い距離による信号強度の減衰が大きい。DMTが位相回転角度と振幅に関する規格化であり、それを技術的な必然性よりも市場顧客のニーズに応じえるために進められてきたものと言える。

単方向ケーブルとマルチドロップは、家庭内における二つの電話ネットワーク敷設方法である。ADSLがマルチドロップ型であれば、室内の引込み線のところで、POTSスプリッタで分岐する代わりに、ローパスフィルタを置く。1.5MHz~20MHzの帯域を使用し、ADSLトラフィックを部屋ごと住設機器に分配できる。

Peter S.Chow, John M. Cioffi 1994 が約1.1MHzごとに15チャンネルを設定し、単純なQPSK変調方式を提案した。実験により、普通の室内配信が帯域内で2~10dBの損失を現れ、他の部屋での測定が15~20dBの信号ノイズ比(SNR)を得る。10E-7のエラーレートを実現するためのSNR14.5dBに3~6dBのノイズマージン上で実現した [16]。ラインコードs-TCM-AMIが日本だけ使われるため、米国のxDSLがそのまま導入できない状況である。日本仕様として、専門家の筒井、桜用氏の提言するS-TCM方式にxDSLを改造するか、dBm方式を採用するか、マイナモディフィケーションを行っ

た xDSL のいずれが日本向けに登場した。

3.5 ISDN

表 3.1: ISDN 普及度の調査

| 番号 | 国別 | 回線数(万) | 普及率(N/1000) | 割合 |
|----|-----|--------|-------------|-----|
| 1 | ドイツ | 360 | 44 | 33% |
| 2 | 日本 | 160 | 13 | 15% |
| 3 | 米国 | 130 | 5 | 12% |

上の表??は、ドイツ、日本、米国における ISDN の状況をまとめ、割合が世界中で占める比率である。xDSL が十分に提供できれば、数多い利用者がこの技術に使うようになるため、ISDN からの近端漏話の問題は、インターネットがほとんど存在しなかった 94 年の 40 万回線の水準まで減ることになり、ISDN の収容率は再び 1 % となり、無視してもよいこととなる。また、現在の ISDN の収容水準は、加入者回線の 3 % に過ぎないため、xDSL のサービスを現実的なコストで開始すれば、ISDN のラインコートの問題はその伸び率が止めることにより軽減していく。また、FTTH などインターネット急成長を背景に、ISDN が大きな役割を果たすと考えられる。

3.6 HomePNA

HomePNA(Home Phoneline Networking Alliance) は、電話線を経由し、家庭で端末装置からモデムに接続することにより高速な通信を実現するネットワークである。伝送距離は機器の種類により違うが、大体 1Mbps 程度の速度で 200 ~ 1000m まで、もしメタリックケーブル(銅線)で端末装置と繋がれば 1 キロメートルまで延伸できる。セキュリティ管理について、ローカルエリアネットワークに存在するホスト間通信は、ファイルの共有ができるためユーザのプライバシーを保護できないことがある。ただし、PNA ネットワークで集中管理装置(Concentrator)を設置し、上下に位置するホストの接続口(Port-Based)を検出することでセキュリティや伝送速度が同時に保証される。表??で PNA 技術と応用について示す。

3.7 IEEE1394

IEEE1394 は、高速シリアルバスを採用し、家庭内で機器通信の国際基準 PC、PC 周辺機器 MO、HDD など、AV 機器デジタルインターフェース、リピータに対応する。その技術と応用性を表??に示す。

表 3.2: HomePNA 事例調査

| | |
|----------|--|
| Home PNA | 説明 |
| 機能 | プラグ&プレーに未対応 |
| 配置 | 電話線利用、PC増設可。部屋毎に配線し、新たな配線不要 |
| 接続 | modem と connector 同一配置。トポロジーフリー使用 |
| 価額 | 比較に高価,HomePNA1.x:5,800 円. HomePNA2.0:9,200 円 |
| 製品 | Home PNA 製品少ない |
| 応用 | 電話線と共存、接続機器に制限。オフィスでは普及しない |

表 3.3: IEEE1394 事例調査

| | |
|----|--|
| 内容 | IEEE1394 |
| 機能 | プラグ&プレーに対応 |
| 敷設 | Cat5 ケーブルが太過ぎ、配置しにくい |
| 接続 | ハブ或はダイアルアップルータ。トリー状のトポロジー |
| 価額 | 100M 帯域が低コストで導入。種類 (USB/PCMCIA/PCI)。10/100Base-T:2,600 円 |
| 製品 | Ethernet をサポートする製品が多い |
| 応用 | オフィスでシームレスな運用 (PC) |

3.8 IEEE802.11a

5GHz 無線 LAN 802.11a は、2.4GHz・11Mbps 無線 LAN と同時に 802.11WG で標準化が行われた。OFDM 方式により、情報信号列を周波数の異なる複数の搬送波で変調するマルチキャリア方式を採用する。5GHz 無線 LAN は、ヨーロッパで標準化が進められている HiperLAN との共存を目的としている。5GHz 無線 LAN の伝送速度は、6,(9),12,(18),24,(36),(48),(54)Mbps があり、24Mbps が製品化のターゲットとなっている。

様々な通信機能として、BBS(Basic Service Set) は、通信相手とあらかじめ登録して通信する機能がある。ESS(Extended Service Set) は、アクセスポイントと端末を共通のグループに分け、各グループに識別するための論理アドレス (ID) を設定し、グループをまたがる通信を不可とする機能がある。ローミングは、端末が異なるアクセスポイント間を移動したとき、自動的に通信するアクセスポイントが切り替わる機能がある。

日本では、IEEE802.11b でワイヤレス接続のできるホームメディアステーション TransCube[5] を提案し、ワイヤレステレビや HDD ビデオレコーダー機能を相互補完して実現させた。

3.9 Bluetooth

Bluetooth は、携帯電話やモバイル端末間で、短距離な通信を実現するために使われる。1998 年 5 月に Bluetooth SIG(Special Interest Group) を中心として開発されてきた。現在、1200 社以上の企業が参加している。SIG は、機器レベルでの相互接続に関する認証作業とチップ間のインタフェースの規格化に取り組んでいる。

高速周波数ホッピング方式を使用し、1MHz ステップで 79 ホップ、低電力の 1mW で 10m 四方をカバーする。音声とデータの統合通信、リアルタイム性を提供する回線交換の ACL(Asynchronous Connection Less) を定義している。接続確認のための確認とデータの暗号化が行われる。

3.10 本章のまとめ

通信方式のいくつか挙げて、その使用周波数、速度、通信距離及び内容を述べた。その中で、PLC が電力線を通信メディアとして使用し、高速度通信 HPLC と低速度通信 LPLC の 2 つに大きく分けられることを述べた。本論文では、第 5 章で LPLC について送と RTT を解析する。ADSL、HomePNA、IEEE1394 が有線ネットワークの代表であり、比較的の高いスループットを示した。Bluetooth と HomeRF は、短距離において通信を行う技術であり、有線ネットワークより移動しやすい、再構築しやすい点に注目した。その具体的な比較を表??に示す。

表 3.4: 多様な通信方式の比較

| 通信 | 周波数 (Hz) | 速度 (kbps) | 変調 | 距離 (m) | 応用 |
|------------|----------|----------------|------|---------|--------------------|
| LPLC | 10k-450k | 9.6 | SS | -300 | リアルしない家電機器制御エネルギー |
| HPLC | 2-30M | 1-50M | OFDM | -300 | ラストマイルアクセス高速通信 |
| ADSL | 25k-1.1M | 160-640,1.5-9M | | 2-7k | 電話線利用 Ethernet に接続 |
| HomePNA | 5.5-9.5M | 1M,10M | | 200 | リアルタイム低速データ伝送 |
| IEEE1394 | 5.2G | 70M | OFDM | 4.5feet | リアルタイム IP データ伝送 |
| IEEE802.11 | 5.2G | 54M | OFDM | / | IP 伝送音声サポートしない |
| Bluetooth | 2.4G | 720-1M | FHSS | 2 | 短距離通信高速に向かない |
| HomeRF | 2.4G | 1.6M-10M | FHSS | 10- | AO 機器間音声サポート |

第 4 章

電力線搬送の利用ドメインと制度の比較

本章では、米国、中国、日本、イギリスなどの国における電力線搬送通信 (PLC: Power Line Communication) の利用方法や制度について述べる。各国の電力線機構は、周波数使用に明確な規制があり、配電線方式及び分線方法について規定されている。また、変調方式やエラー訂正などの既存研究についても説明する。

4.1 利用ドメイン

4.1.1 電力線搬送の利用

日本の PLC 利用に関しては、主に家電機器制御およびエネルギー管理が目的である。

家電機器制御に利用する場合、UPnP を用いることでユーザにネットワーク接続を意識させない通信システムが提供できる。その場合、まず、ユーザ側の認証、及びネットワーク家電の機器情報の識別と認証が必要になる。そこで、ID とアドレス、およびグローバル IP アドレスや空きポート請求を行う。ゲイトウェイデバイス (Internet Gateway Device) は、家庭内で利用できるサービスの情報を持つ。

PLC 技術を利用した電力登録システム [21] は、水、電気、ガスメータのデータが採集端末から収集され、電力線経由で転送されたデータが受信端末で復調される仕組みである。ユーザは、一意なアドレスを決め、電力線搬送モデムによって信号を読み取る。電力線の電磁干渉及び負荷による変化は電力登録システムの課題である。

4.1.2 電力線搬送トランシーバ開発

米国では、エネルギー最適化システムの一部として大型製造設備に対して全国的に電力線トランシーバ (PLT: Power Line Tranceiver) が利用されている。英国では、本土と北海オイルプラットフォームにおける遠隔測定装置の間で、PLT トランシーバを利用している。日本では、7300 以上の店舗で電灯、冷蔵庫およびエネルギー制御システムのために PLT を利用している。ドイツでは、4,000 台以上の電気メータを設置したヨーロッパ最大の商業展示ホールで PLT を利用し、展示会期間中での電気使用量を観察している。中国では、PLT を利用した 2Mbps と 14Mbps の高速電力線搬送システムが 200 の家庭やオフィスにおける実験ネットワークに導入され、高速電力線通信を実現している。アムステルダムでは、10,000 個所を超える街路光及び 1,000 台のパーキングメーターが PLT を用いて監視、制御されている。さらにオランダでは、国中のポンプステーションで、ポンプを監視、制御するために PLT を使っている。北アメリカでは、貨物列車や旅客列車の状態を監視し、障害個所を制御するために PLT を利用している。スウェーデンでは、PLT を使って家庭及びオフィスのメータと遠隔測定データを送っている。

PLT ドライバ [21] の研究、開発事業は数多く存在し、その多くが I/O 機能とネットワーク接続に優れる。そこで、PLT の開発と研究を行う企業、通信速度及び概要を図表に示す。

表 4.1: 電力線配送の各国の研究状況

| 企業別 | 国別 | 速度 (bps) | 概要 |
|-------------|-------|----------|---|
| Intellon | 米国 | 14M | 電力通信技術は 10 年の経験があり、Home Plug のベース技術として採用。 |
| Enkia | 米国 | 8 ~ 30M | システム LSI 指向、ドイツ OneLine 社とフィールドトライアル。 |
| DS2 | スペイン | 45M | 独自の OFDM 技術で 45Mbps を実現する超高速システム。より高速な技術を開発中。 |
| Busicom | 日本 | 1M | 高速度電力線搬送システムが中心。 |
| ArchNet | 中国 | 2 ~ 14M | SS 技術により開発された高速度電力線通信システム。 |
| Itran Comm. | イスラエル | 2 ~ 24M | 少ない SS 技術利用の高速電力線搬送技術。関西電力、松下電工との合弁会社を設立。 |

4.2 国別電力線搬送の制度

4.2.1 周波数利用

米国 FCC(Federal Communication Commission) では、100kHz ~ 450kHz 範囲が電力線通信の使用周波数帯域として規定される。1996 年、米国の AN 社では、100Kbps のマイクロチップを用いた電力線通信に成功した [6]。

CENELEC(European Committee for Electrical Standardization) はヨーロッパ標準であり、電力線搬送の使用周波数が 3kHz ~ 148.5kHz に決められている。イギリスの NOR-WEB では、2MHz 周波数を用いて 1Mbps の通信速度が出せる。

中国では、3kHz ~ 500kHz が電力線通信の使用周波数帯域である。中国の北京電力研究所とシンヨウ電力研究機構における電力線搬送実験では、45Mbps でインターネット、およびインターネット放送が選択する可能である。同研究所では、高速認知信号の低圧配電ネットワークにおける伝送特性、および高速データ通信モデム、圧縮、電磁兼容などの中心技術が研究されている。

4.2.2 総合ケーブル配置

システムごとに統合的な配線を行うことで、全体の機能が高められる。また、サブシステムが変更されたり、位置的に移動しても、配線システムが簡単な変更で対応できる。総合配線システム (Generic Cabling System) は、住宅内にケーブル、光ファイバ、電力線などのメディア、及びそれらに関連する装置によって構成される。通信メディアや接続デバイスを組み合わせて音声、画像、データを伝送することがその目的である。住宅における通信メディアは、配線方式の合理性を求められる。ここで、米

国、中国、日本の住宅ケーブル配置について述べる。

米国

米国は、住宅における総合配線システム (ANSI/EIA/TIA 568A) を標準化し、6種類のサブシステムを規定した。

1. バックボーンシステム (Campus Backbone Subsystem)
建物と建物に接する主要な配線である。
2. 垂直サブシステム (Riser Backbone Subsystem)
建物における配線システムが垂直に配置され、層の間で垂直な線路が敷設される。光ファイバ、あるいは太い銅線は電流ターミナルと専用の線路を利用して、建物で垂直な線路を配置する。低い住宅の場合は、主要な配電線から直接にワークエリアサブシステムに配線できる。
3. 水平サブシステム (Horizontal Subsystem)
水平サブシステムは、建物の層ごとに分布し、通信端口まで伸びる配置である。
4. 設備間サブシステム (Equipment Subsystem)
設備間サブシステムは、主要な配線架と共有設備からなる。共有設備と主要な配線架とを接続する。設備室に通じ、層ごとの配線サブシステム間で回線の配置、接続と測定が行える。
5. 管理サブシステム (Administration Subsystem)
管理サブシステムは、建物の層ごとの設備室における回線の敷設方式及びプラグ装置などの総合的な仕組みである。垂直サブシステムと配線サブシステムを連結させ、シンプルな接続方式によって簡単に配線システムを調整し、線路を変更できる。
6. ワークエリアサブシステム (Work Area Subsystem)
ワークエリアサブシステムは、最終端に配置され、情報コンセントから端末装置へ繋がるケーブルまで含む。一般に RJ45/RJ11 プラグ/コンセントを採用する情報コンセントが、壁、地面、テーブルに設置される。通信品質に影響を与えやすい部分でもある。一軒屋の場合は、垂直サブシステムが不要である。

中国

中国では、総合的な配線システムの種類が、設備配置状況とシステムの特徴によって分けられる。これらは音声、画像、データをサポートし、需要によりさらに高機能の配線システムに更新できる。その構成は4種類に分けられる。

1. バックボーンシステム
建物と建物との繋がりが太い銅線、あるいは多芯光ファイバにより構成される。

2. 垂直サブシステム

層ごとに敷設する主要な垂直幹線システムである。電力ケーブル、光ファイバ、層ごとにおける線路の終端機器、接続線などを含む。

3. 水平サブシステム

階の配線経路が同じ建物内に引き込まれたそれぞれの通信端末から分布する通信経路と接続する。

4. ワークエリアサブシステム

総合的な配線システムの最終端に置かれ、ユーザ端末設備と直接に繋がる。ユーザが終端装置を移動したり、変更したりするため、ケーブル配置は永久の敷設方法を採用しない。

日本

日本では、配電用変電所から三相 6.6kV で送電される高圧配電線を柱上トランスで受け、柱上トランスからは単相三線 100/200V で引込線により各家庭に接続される。宅内配線において分電盤内の漏電ブレーカの手前が電力会社との責任分解点となる。分電盤における分岐数は平均的な集合住宅で 4 前後、戸建住宅で 8 前後であり、分電盤の分岐ブレーカからコンセントまでの電灯線の分岐数は工業者に依存する。電灯線総延長は集合住宅で 200 m 程度、2 世帯住宅で 942 m 程度という実例がある。宅内の電灯線は、L1 と L2 の 2 層に分かれており、層間の負荷のバランスがとれるように配線設計がなされるが、設計どおりに配線されることは少ない。

宅内電話線配置については、注文住宅の場合、配線形態が指定できる場合もあり、線材そのものも LAN でも使用できる UTP カテゴリ 5 以上のものを使用したモジュラージャック RJ-45 を設置する形態も普及し始めている。ただし、既築の戸建住宅の場合、一本の電話回線に接続可能な容量は 3 μ F であり、接続できる電話、モデム等の台数は約 3 台程度という制約などもある。

4.3 電力線搬送にいての研究

4.3.1 スペクトラム拡散方式

電力線搬送はスペクトラム拡散技術を用いている。信号で伝えている音声および周波数ホッピングスペクトラム拡散のプロセスにより、このタイプのトランスミッタは一般に狭いバンド対応のものより複雑ではない。特別な変調ステップは、読み取り専用メモリの中にキャリアを蓄えることに先がけて実行される [10]。

Daniel W Durbak と James R Stewart [3] は、PLC 通信品質は信号対ノイズの比率で決定すると強調し、信号のパス減少の計算が伝送ラインで複雑化され、ネットワークの支線に存在するため、特定の解決法を提案した。ターミナルとインターフェース機器での損失は、通常計算しやすいが、送電線の上の損失より重要ではない。

4.3.2 エラー訂正機能

Morgan H.L.Chan、David Friedman、およびRobert W.D[1] は、FEC(Forward Error Correction) コードを、バースト/ランダムエラー訂正機能に対して定義した。これを用いた伝送率は1.2~19.2kbpsであり、VLSI マイクロチップを使用してFEC coding/decodingの実装を行った。また、自動リピート要求を含むデータリンクプロトコルは、届かなかったパケットあるいはエラーを含むパケットの再送を行う。この際FEC[?]は伝送中に発生したエラーを訂正する。パケットはデータフラグのためのオーバーヘッドビット、送信元、宛先アドレス、制御情報と循環冗長チェックシーケンス(CRC)を含む。CRCがパケット伝送エラーを観察する。セグメントエラー損失の中で、通常、受信側は送信側に明確な応答を返す。ただし、応答が受けられなければ送信側はパケット再送を行う。

彼らは[8]の論文の中で、電力線搬送のインパルスノイズにより起こるセグメント損失について述べている。振幅、帯域、インパルスノイズの到着時間の配布詳細、密度を解析し、結果として、120V電力線の電気負荷でインパルスノイズの効果的なエラー制御コードとデータリンクプロトコルを設計した。また、自動要求プロトコルに基づき、パケット長が減らされていない限り、不正確なパケット率は高く、スループットが低くなる。受信電力とデータビットのインパルス振幅や帯域によりビットエラーが決まる[?]

4.3.3 二重キャリア周波数帯域

Echelon社では、二重キャリア周波数帯域が使われている。周波数は132.5kHzと115kHzの2つ帯域をスイッチング方式[?]で使用する。前者が第一使用帯域として、後者が第二帯域として使われる。受信応答信号によって通信サービスが選択でき、具体的には、送信側が全ての確認応答を受け取ると、再送が起こらない。確認応答を受けないと、第二帯域で再送を行う。確認応答を感知しない場合があると、両方の帯域でデータが送受信される。

4.4 本章のまとめ

本章では、まず、電力線搬送通信の利用について述べた。電力線トランシーバは、多様な機器の状態取得や制御の用途に、各国で利用されている。次に、米国、中国、日本における電力線搬送に関する制度を挙げた。電力線搬送に各国で利用されている周波数帯は多くの場合3kHzから500kHzの間である。また、各国は複数のサブシステムから構成される統合的な配送システムについて規定している。最後に、電力線搬送に関する研究として、スペクトラム拡散方式、エラー訂正機能、二重キャリア周波数帯域について説明した。

第 5 章

電力線搬送の実用性に関する評価

本章では、電力線搬送技術の有益な分野を検討するため、蛍光灯や白色等のノイズを加えてラウンドトリップタイム (RTT) にどの程度影響があるかを測定した。結果として、電力線を経由するデータ伝送 RTT が、白色等の点灯や PC の再起動などに対して殆ど影響されないことが示せた。

5.1 予備実験 (物理測定)

5.1.1 広帯域データ伝送の物理測定

電力線を通信メディアとして使う時、構内における配電線の伝送媒体としての特性を解明する。ネットワーク伝送媒体としての状態は、ノイズ強度及び伝搬パラメータが直接的な影響を与える。高速通信ネットワークを利用するとき、通信チャンネル容量がネットワークアーキテクチャに極めて重要である。本実験により、電力線搬送ノイズ、信号強度、伝搬パラメータを測定し、33.6dB の SNR と 329Mbit/s の通信チャンネル容量を算出した。また、高周波数帯におけるノイズ特性が、周波数の増加によって波形があまり変化しない、或はその変化の曲線が平穏になることが明らかになった。

実験設備の概要

電力線搬送システムは多様な機器によって構成されるため、PLM は広帯域の高速 LAN や狭帯域の低速 LAN に分けられる。本実験は、ホスト間 USB コネクションで、220V 電源環境において電力線モデムと繋がることによりピアツーピア高速通信を行う。その設備の配置を表 5.1 に示す。ホームネットワーク環境における電力線システムを利用し、UPS などの電源フィルタを経由せずに直接構内に図 5.1 に示すエンドツーエンド型データ通信を行う設備を構築した。長さ 2m の電力線を経由し、広帯域におけるデータを送受信する実験をする。そこで、スペクトラム・アナライザが受信側で信号状況を監視する。またその帯域波形をインピーダンス・アナライザにより測定した。

表 5.1: 実験設備の構成

| 種類 | 型番 | 性能 | ほか |
|--------------------|--------------------|-----------|----------|
| PC | WIN2X | P500MHz | USB1.0 |
| PLM | Archet ATL60140 | 14Mbps | HomePlug |
| Spectrum Analyzer | Agilent ESA-L1500A | 9k 1.7GHz | / |
| Impedance Analyzer | Agilent 4395A | 90K 3GHz | / |

5.1.2 測定

搬送システムでは、設備を物理的に接続し、ノイズ、信号強度、インピーダンスを測定する。

信号強度は、データ送受信しない状況と送信状態で測定する。シミュレーション通信チャンネルは、入力信号と出力信号を連続的にデータを読み取れる通信チャンネルであり、情報を伝送するための物理メディアである。電力線通信チャンネルがシミュレーション通信チャンネルの典型的な例である。従って、電力線通信チャンネルが同時に関連のある各種類シミュレーションチャンネル規制に符合する。



図 5.1: エンドツーエンド通信

ノイズ測定とは、データ送受信しない状況の中でノイズ (dB) を測定する。一般には、周波数帯域におけるノイズを dB で示す。一般には横軸が周波数 (kHz) であり、縦軸がノイズ (dB) を示す。帯域内で電力線ノイズや周波数が現れている。

ノイズ

電力線搬送モデムが信号を伝搬しない時の、電力線でのノイズ密度を図??に示す。図では 500kHz から 30MHz の周波数帯域におけるノイズを示している。図により、電力線における周波数エネルギーが低い帯域 (< 10MHz) でノイズが集中していることが分かる。高い周波数帯におけるノイズは緩やかであり、周波数エネルギーが小さい。電力線におけるノイズは水平な直線状ではなく複雑なノイズである。これらからノイズが帯域内のデータ値を利用して計算できる。

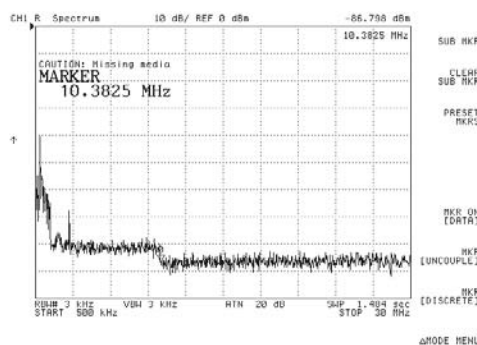


図 5.2: ノイズ

送信ボトル

??

電力線搬送モデムが信号を送信する際の、信号強度分布を図 5.3 に示す。図からマルチキャリア変調 MCM (Multicarrier Modulation) 方式がモデムに使われていることが

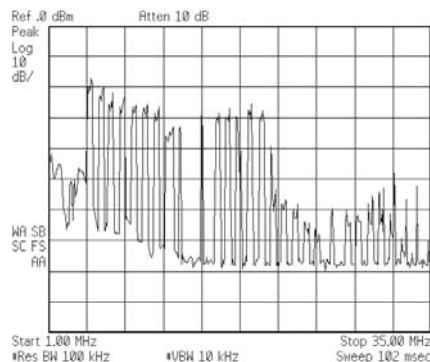


図 5.3: 信号強度

分かる。伝搬する信号が複数のサブチャンネルに分配され、並行計算法に通じてサブチャンネルごとに変調する。現在、国際的に流行する電力線高速通信変調方式トランザクションの中では、マルチキャリア変調方式の一つである OFDM 方式がよく採用され、その信号強度分布が上の図と似ている。

そこで、信号対ノイズの伝送特性は以下のようなになる。

$$SNR = P_s / P_{noise} \quad (5.1)$$

$$P_s$$

が送信信号強度であり

$$P_{noise}$$

がノイズ強度である。送信信号強度は図??から、ノイズ強度は図 5.2 から求められる。

信号伝搬

図 5.4 が電力線チャンネルの伝搬パラメータを示し、一つの通信チャンネルに対して定義できる伝搬パラメータは式 5.2 として定義できる。

$$H(f) = \frac{Sig_a}{Sig_t} \quad (5.2)$$

上の式において、

$$Sig_a$$

が受信した信号 (ノイズなし) を表し、

$$Sig_t$$

が送信の信号である。一般には、信号が振幅 (amplitude) や位相 (phase) を表すのは普通である。従って、伝搬パラメータが振幅や位相で表し、周波数の帯域によって変化

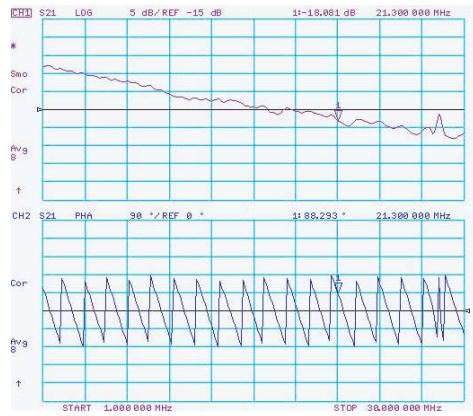


図 5.4: 信号対ノイズの伝送率

する。伝搬特性を測定する際には、信号の減衰を表すための振幅特性や信号の位相特性を考えなければならない。図 5.4 において上部の図が振幅特性を表し、下部が位相特性に関わるものである。そこで、信号の減衰が周波数の増加と伴って増大していくことから、電力線伝搬特性が線形な位相であると言える。振幅曲線は緩やかな傾向が表し、シンプルな電力線ネットワークアーキテクチャを意味する。

5.1.3 高速 PLC 実用化の評価

計算及び評価

サブチャンネルごとの周波数使用帯域が全体の帯域内に割合を示すため、その帯域値が求められる。図 5.3 の X 軸は 35MHz の帯域幅を示し、3.5MHz ごとに区切られている。第 2 列の数値から考えると、この幅には 4 個のサブチャンネルと 3 つのチャンネルの間隔がありそれぞれの幅が大体同じなので、一列の 7 つのサブチャンネルに分けて考えてよい。従って、サブチャンネルごとに $3.5/7=0.5\text{MHz}$ 帯域幅が算出できる。サブチャンネルごとの信号強度を観測すると、各サブチャンネルが個別にノイズをうけるため、データのがピーク値が違うが、大体のデータ値が測定できる。Y 軸が 0dBm から始め、10dBm ごとに下方向へ減少していく。第 2 列のデータから、4 つのサブチャンネルピーク値が、それぞれ -20dBm, -23dBm, -26dBm, -28dBm である。従って、サブチャンネルごとの信号強度が以下のように算出できる。

$$10^{-2.0} \times 5 \times 10^5 = 5000mW = 5W \quad 10^{-2.3} \times 5 \times 10^5 = 2.5W \quad 10^{-2.6} \times 5 \times 10^5 = 1.25W \quad 10^{-2.8} \times 5 \times 10^5 = 0.75W \quad (5.3)$$

従って、他の列の送信強度が同じ方法で算出できる。第 1 列では、サブチャンネルにおいて顕著な周波数帯が持たないため、送信設備がこの周波数帯域を利用していないことが分かり、計算が省略できる。

第3列では、3つのサブチャンネルと4つのチャンネル間隔があり、サブチャンネルごとの帯域が $3.5/7=0.5\text{MHz}$ である。送信強度が、それぞれ -28dBm , -28dBm , -30dBm であるため、サブチャンネルの送信ボルトが算出できる。

第4列では、信号を送信した途端にエラーが発生したため、測定に対して影響を与えた。ただし、以上の測定結果に基づき、4つのサブチャンネルがあると確定でき、その送信ボルトごと -30dBm と判断すれば、サブチャンネルの送信ボルトが4つとも 0.5W である。

第5列では、3つのサブチャンネルと4つのチャンネル間隔があり、サブチャンネルごとの帯域が $3.5/7=0.5\text{MHz}$ である。送信ボルトが、 -30dBm , -30dBm , -30dBm であるため、サブチャンネルの送信ボルトが、三つとも 0.5W に算出できる。

第6列では、 0.5MHz 範囲内で、それぞれ -25dBm , -28dBm , -39dBm に対し、 1.58W , 0.79W , 0.06W が算出した。

第7列で、四つの送信チャンネルが、それぞれ -57dBm , -58dBm , -63dBm , -67dBm であり、サブチャンネルの送信強度が 0.001W , 0.001W , 0.251mW , 0.100mW が算出した。

第8列では、3つの送信チャンネルと3つのチャンネル間隔により、 $3.5/6=0.58\text{MHz}$ が求められる。サブチャンネルの値が -68dBm , -60dBm , -60dBm であり、それぞれサブチャンネル送信強度が 0.092mw , 0.001W , 0.001W である。

第9列では、 0.5MHz 範囲で、サブチャンネルの値が -62dBm , -55dBm , -52dBm , -61dBm に対し、 0.316mw , 0.002W , 0.003W , 0.397mw の送信ボルトが求められる。

第10列では、サブチャンネルの値が -70dBm , -58dBm , -52dBm , -70dBm に対し、 0.004mw , 0.001W , 0.003W , 0.044mw の結果が求められる。

従って、2,3,4列の合計が 13.6W であり、5,6,7列の合計が 4.11W で、8,9,10列で 0.01W が求められる。

全部の送信ボルトが $13.6+4.11+0.01=17.72\text{W}$ 。

受信信号強度

図信号伝搬ボルトに対応するデータシートから、第1列が周波数であり、第2列が伝送パラメータのデシベル(dB)幅である。そこで、デシベル幅が受信信号と送信信号との比率である。デシベル値から信号チャンネルへの減衰を計算する公式が式??のように定義できる。

$$10^{\left(\frac{x}{10}\right)} \quad (5.4)$$

この式から、比率を計算できるため、受信側で周波数帯域ごとに信号強度が解析できる。(受信信号ボルトが比例と送信信号ボルトと乗る) 図信号伝搬ボルトによると、信号の減衰が大体計算できる。それぞれの減衰パラメータが、2,3,4列が -8dB 、5,6,7列が -10dB 、8,9,10列が -15dB である。従い、計算した送信信号ボルトと式1を利用し、2,3,4列では受信信号ボルトが

$$13.6 * 10^{(-8/10)} = 2.15\text{W}$$

である。

5,6,7列では、

$$4.11 * 10^6 - 10/10) = 0.41W$$

であり、

8,9,10列で

$$0.01 * 10^6 - 15/10) = 0.0003W$$

である。だから、受信側において信号ボルトが合計 $P_s=2.56W$ である。

ノイズ、SNR、信号チャンネル容量の計算

ノイズが方式により算出する。図5.2のサンプルデータから、周波数の差が $0.35E+05Hz$ 、周波数区間ごとに対するノイズが右側 (data trace) のデータを利用して表示する。従って、既定な周波数帯域におけるノイズを近似的に算出できる。表5.2にサンプルデータ中の数値を抜粋して示す。

$$P_{noise} = \sum_{k=1}^N P_k \Delta f \quad (5.5)$$

$$P_k$$

が data trace 側のデータであり、

$$\Delta f = 0.35E + 05Hz$$

である。

表 5.2: ノイズサンプルデータ

| Frequency | Data Trace | Memory Trace |
|-----------|------------|--------------|
| 5.00E+05 | -7.74E+01 | -2.85E+06 |
| 5.37E+05 | -5.94E+01 | -2.19E+06 |
| 5.74E+05 | -6.80E+01 | -2.51E+06 |
| 6.11E+05 | -5.58E+01 | -2.06E+06 |
| 6.48E+05 | -5.80E+01 | -2.14E+06 |
| 6.84E+05 | -7.07E+01 | -2.61E+06 |
| 7.21E+05 | -7.13E+01 | -2.63E+06 |
| 7.58E+05 | -5.35E+01 | -1.97E+06 |
| 7.95E+05 | -6.38E+01 | -2.35E+06 |
| ... | ... | ... |
| 3.00E+07 | -8.70E+01 | -2.49E+09 |

電力量 (dbm) から電力値 (mW) に変換するための計算式は：

$$10^{\frac{P}{10}} mW$$

だから、

$$P_n = 1.115mW$$

となる。

信号対ノイズの比率は式 5.1 より

$$SNR : 10 * \log_{10}(P_s/P_n) = 10 * \log(2.56/(1.115 * 10^{-3})) = 33.6dB \quad (5.6)$$

となり、信号チャンネル容量は式??より 329Mbit/s となる。

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (5.7)$$

5.2 実験設備のシステム構成

実験設備のシステム構成を示す。日本における伝送媒体とする電灯線は、100V 使えることが許可されている。このような周波数帯域において、エネルギー制御のために低速電力線搬送が使われる。ただし、様々な家電機器及び電気負荷のインパルスノイズの発生、インピーダンスなどの干渉がエンドホスト間のデータ通信に悪影響を与える。エンドホストを Windows98 を OS に持つ機器との影響で間データ通信が実現し、電力線搬送の特性を検討した。ソフトウェア設計及び実験ハードウェア環境を整備を、図 5.5 に示す。

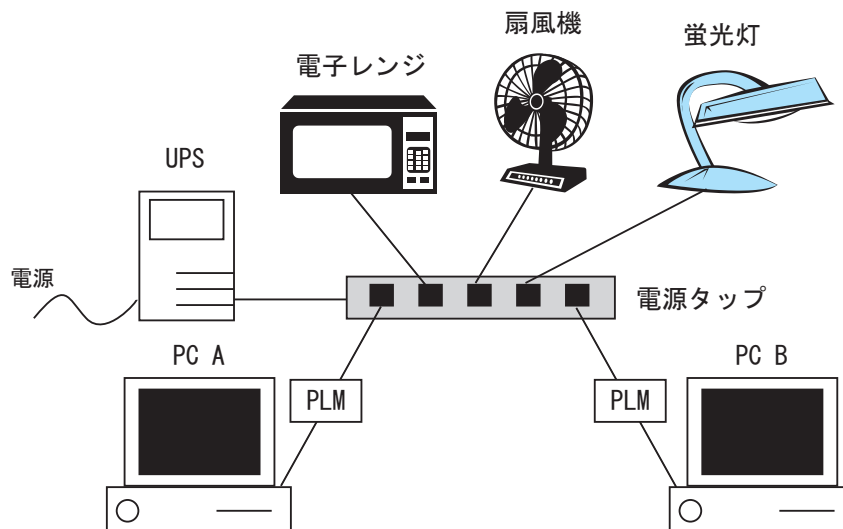


図 5.5: システム構成

実験設備は、パソコン 2 台と電力線搬送モデム 2 台を含む。パソコンと電力線搬送モデム間は互いに RS232c ケーブルで接続し、モデムから同一の電源タップに接続する。これにより、電力線搬送ネットワークが構成する。

140 ~ 450kHz 周波数を使用し、電灯線通信のイメージが図 5.6 に示す。

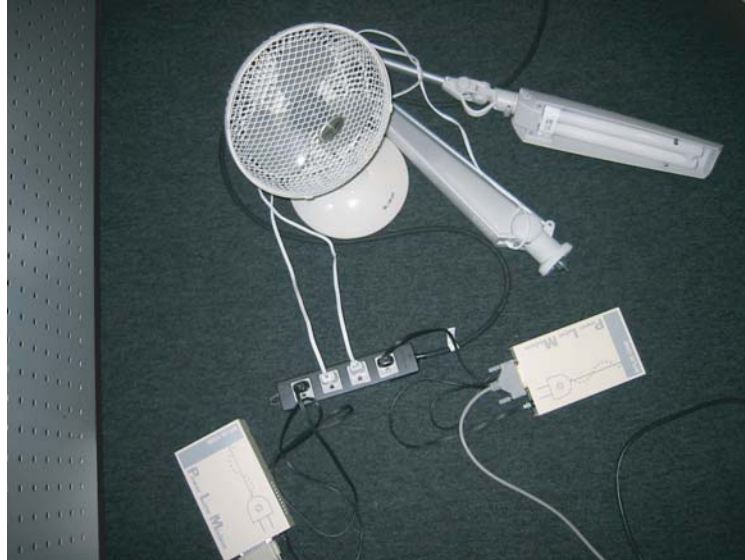


図 5.6: 実験設備構成

利用したパワーラインモデム：BPLM100B

電力線搬送システムには、多様な通信デバイスがあり、高いパフォーマンスに適した通信モデムが重要な役割を果たす。PLM は、広帯域の高速 LAN や狭帯域の低速 LAN で利用される。本研究では狭帯域の低速 LAN を対象とし、ビジコン社の BPLM100B が通信モデムを利用して実験を行った。BPLM100B はトークン情報とネットワーク上の情報検出機能を持ち、100kbps のデータ通信速度が達成できるものを利用した。本モデムは、電力線搬送システム内部でプリンタ、PC などと接続できる以外に、電話線モデムシステムとの使用も可能である。BPLM100B のインタフェースを図 5.7 に示す。

5.2.1 電子レンジのノイズの影響測定

電子レンジのノイズによってパワーラインモデム間での通信が影響を受けるかを測定した。

図 5.11 の実験により電子レンジの ON/OFF によってノイズが大きく発生し、電力線搬送特有のケットロス (Packet loss) が発生するため、伝送中のセグメント損失による再送が発生している。このため、送信側がセグメント列のデータバイトを転送し、シーケンス番号をつけるセグメントが順番に送り出し、受信側がそれを検出し、確認応答メッセージを返す。図のように大きな障害が検知出来たが、通常は安定した RTT でパケットを伝達可能であることがわかった。家庭内の電力線の配線を工夫することで、電力線搬送は安定した情報の伝達手段として利用できる。

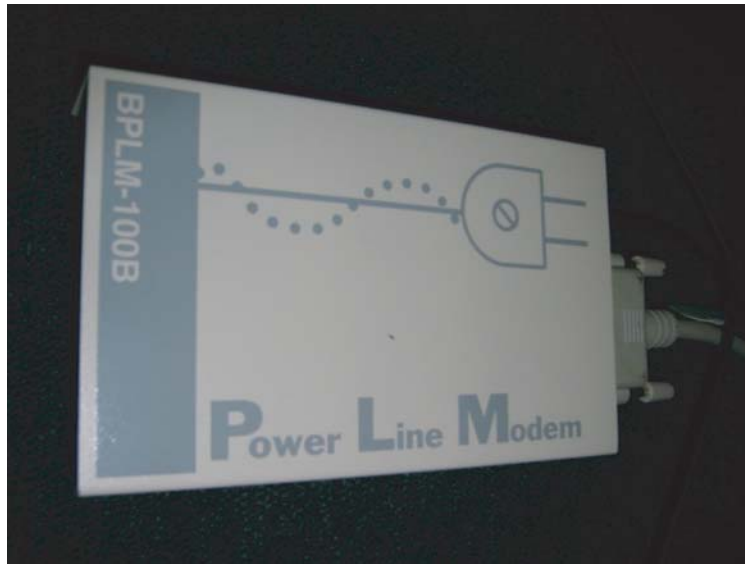


図 5.7: BPLM100B インタフェース

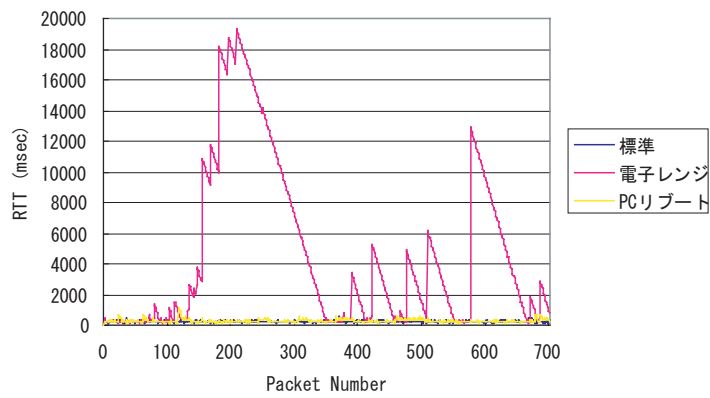


図 5.8: neweval1.eps

5.2.2 蛍光灯と白熱灯のノイズ影響比較測定

蛍光灯と白熱灯を常時 ON にした場合の比較測定を図 5.12 に示した。700 回パケット送信の RTT タイムを測定している。絶えず白熱灯を点灯した場合のノイズ影響範囲と絶えず蛍光灯を点灯した場合のノイズの影響を比較した。白熱灯の影響は、絶えず一定な状態を示したが蛍光灯を点滅させた場合は RTT に一部、白熱灯より遅延が発生する部分が現れた。蛍光灯 ON の場合は、平均で 317.3 白熱灯 ON の場合は 264.57 という RTT 違いは、蛍光灯のインバータのノイズの発生が原因である。

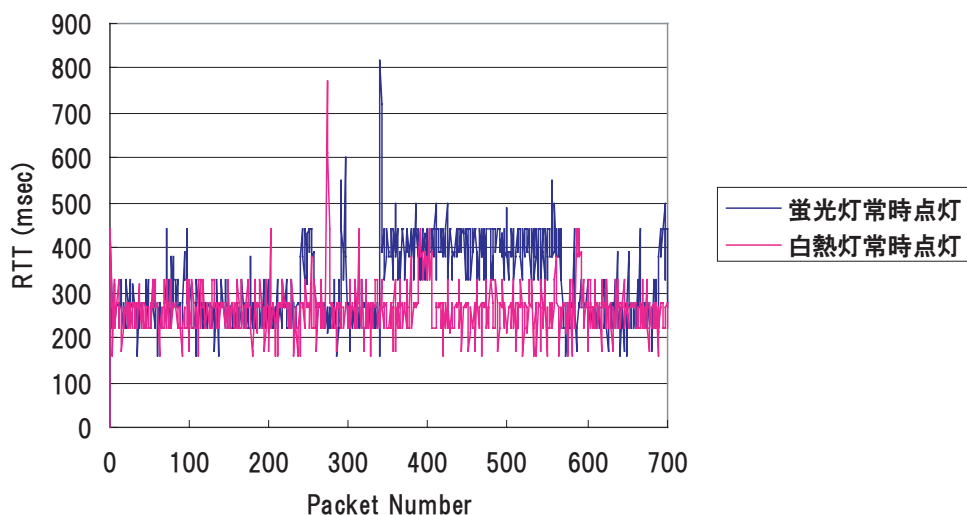


図 5.9: neweval2.eps

また、蛍光灯と白熱灯を一定間隔で点滅させて場合の比較測定を図 5.13 に示した。一定間隔の点滅によって RTT が安定していないことがわかる。

以上の測定評価によって蛍光灯の電力線と電力線搬送を用いる回線は別系統とすることが望ましいがある程度の遅延を許すならば、同一ネットワークでも利用可能である。

5.2.3 通信確立

実験では、エンド・ツウ・エンド [9] の UDP 送受信を行った。送信側が周期的にセグメントを送り出し、その結果を受信側で測定した。UDP セグメントの送受信は、まずサーバとクライアントの間で接続を確立してから行った。UDP セグメントがクライアントから `sendto` 機能により UDP セグメントを送信し、サーバが `recvfrom` 機能を使って受信を行う。

UDP プログラムを作成し、クライアントとサーバ側が確立してから、送信されるデータがサーバ側で検出し、その結果がログファイルに記録した。データとして、送信のデータサイズ、到達可能及びそのパケットロス率などの情報が出力される。

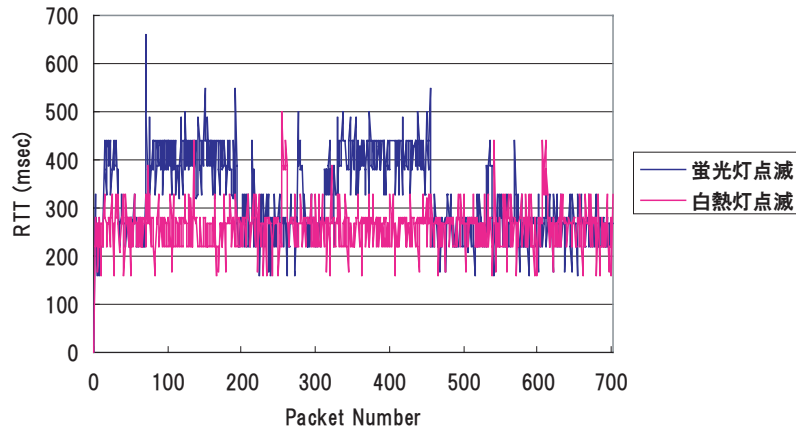


図 5.10: neweval3.eps

UDP

UDP(User Datagram Protocol) はコネクションレス型のプロトコルである [20, 19, 18]。トランスポート層より上層のアプリケーション層にデータを渡し、コネクションを確立しないでデータ送信を行う。アプリケーション層へのデータの受け渡しに最低限必要となるポート番号、パケット長、チェックサムを利用する。一つの UDP データグラムは一つの IP データグラムとして送信され、データグラムは IP 層を介して送られるが、到着できるかどうかは保証されない。送り側がチェックサムを計算し、受け側がチェックサムのエラーを検出すると、パケットが廃棄される。シンプルな通信性能を持ち、音声、画像など高速、大容量なデータ送信に向いているが、転送途中でのデータ損失に関しては一切感知しないことがある。送り側が大量のセグメントを送り出した場合、受け側では、その受信セグメントを受け取るが、確認応答が返さないため、セグメント損失は検出できない。

5.3 伝送 RTT 実験

5.3.1 送受信プロセス

セグメントが一秒単位で大量のデータを送り出し、その送信されたセグメントの結果を受信側で受け取り、セグメント損失を測った。また、データの量が時間単位に対して増やすようにプログラムを作成し、より高速なデータ転送が監視することから UDP セグメントの損失率を測定することができた。ローカルとリモートを指定して、ポート番号を取り付けて実験を行った。

5.3.2 蛍光灯と白熱灯の比較測定

5.3.3 電子レンジの白熱灯の比較測定

5.4 評価

電力線搬送システムには、多様な通信デバイスがあり、高いパフォーマンスに適した通信モデムが重要な役割を果たす。PLMが広帯域の高速LANや狭帯域の低速LANに分けられる。現在、多数のPLM技術が存在する。

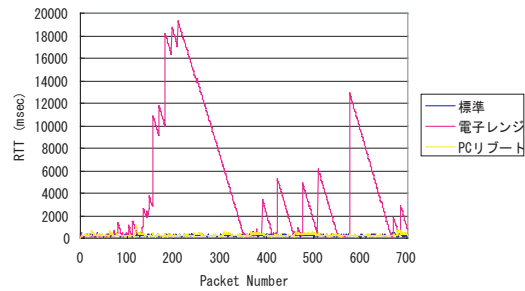


図 5.11: neweval1.eps

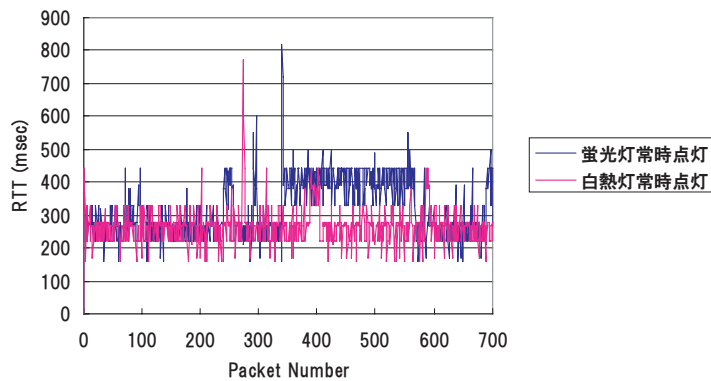


図 5.12: neweval2.eps

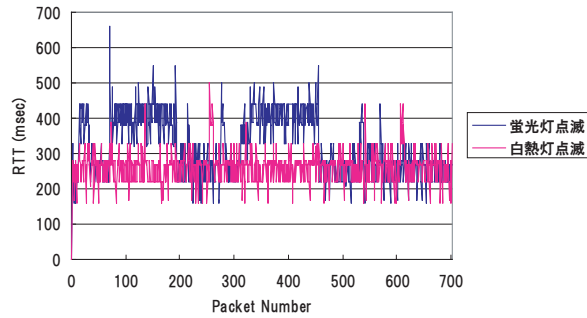


図 5.13: neweval3.eps

5.5 データ伝送アプリケーション

5.5.1 設定方法

エンド・ツウ・エンド通信には電力線搬送が用いられる。本節では、そのハードウェア、及びソフトウェアの設定を説明する。電力線モデム (PLM) は PC のシリアルポートにストレートケーブルを経由して接続する仕組みになっている。電力線モデムは I/O 機能とネットワーク機能を持っており、ストレートケーブルで接続した後に、モデム側が電力線上で接続しているホストを検索する。

電力線モデムが通信状態及びホストコネクション情報を通知するため、シンプルな通信インターフェイスを備え、接続機器の変更を自動的に反映できる。図 4.1 に示したように、電力線モデムに電源を入れると、PW ランプが自動的に点灯し、MS と NT ランプが点滅する。これにより、電力線モデムが電源網に繋がっていることが確認できるが、モデムの通信インターフェイスには PC が接続されていないことが分かる。MS が点灯している時、1 台の PC がモデムと接続できていることを示している。また、他方のモデムにおける通信インターフェイスの NT ランプが点灯すると、2 台目の PC が既に電力線ネットワークに接続されていることが確認できる。これにより、情報インターフェイス MS と NT の表示がランダムな点灯からモデムごとに点灯する状態へ移行する。これにより、モデムと PC との接続が順調に成立したことを確認できる。

次に、実験用モデムを起動するためのパラメータ設定およびオプション確認などの作業を行うため、設定ソフトウェアを使用する。通信速度、パフォーマンスを向上させるため、正確な設定をすることが重要である。本研究においては、モデム設定に関するパラメータの値を、baud rate:57600、data bits:8、stop bits:1、parity: None とした。2 台の PC と同じパラメータ値を設定されると、モデムに対する初期状態の設定になる。データを転送するため、通信トンネルを設定することが必要になり、そのためにモデム属性に対する設定がモデム名称に利用される。設定が正確ならば、他方のエンドとデータを送受信できるようになるので、諸設定値に定義される。

5.5.2 データ伝送

設定が終了した後、シリアルケーブルを経由してモデムに対するオプションを機能させる。データ転送がより高いパフォーマンス、信頼性を達成する機能を備えることが重要であるため、TCP コネクション機能を持つ TCPCom ソフトウェアを利用した。本ソフトウェアは、TCP を利用してデータ転送のセキュリティが保証できる。シリアルケーブルの上に TCP を乗せることにより、通信が行える。その特徴として、ネットワークへの接続がシリアルケーブル上で利用でき、シリアル通信プログラムを用いて通信チャンネル経由でデータを送受信する。

TCP

トランスポート層には TCP と UDP が存在し、TCP はパケット伝送の損失を制御する機能を持つ。セグメントの欠損を監視しながら、動的に TCP のアルゴリズムを状況にあった処理へと最適化する [22, 23, 11]。ウィンドウ制御は、TCP のウィンドウの値から、送信側が受信可能な最大の確認応答の数を計算し、TCP の再送処理である Fast Retransmit が作動するタイミングを動的に変更する。

通信制御を実現するために通信フロー状況の通知をすることにより効率的に行う。これにより損失率の高いデータをネットワーク上に流すことを抑えることが可能であり、ネットワーク帯域の効果的な利用が実現される。パケット損失による再送には、再送タイマによる再送と、受信側からの同一のセグメントを求める重複した ACK を一定の個数受け取った場合の再送 (Fast Retransmit) の 2 種類の再送方式がある。後者の再送方法は前者の再送方法と比べると 10 倍早い再送が実現できる。

TCP の通信量はウィンドウという概念で調整されている。ウィンドウ内のセグメントは ACK を持たずに送信することができる。この値はネットワークの混雑度、セグメントの欠損を基に動的に計算されている [22]。欠損率の低いネットワークでは、ウィンドウの値は十分に大きく保たれるため、欠損が起こったとしても、重複した ACK を導く欠損したセグメントより高いシーケンス番号を持ったセグメントが送信されている。

ネットワーク上で大量なデータが流されると、許容量を超えることにより伝送速度が低下する。TCP では、データ送信を開始すると、スロースタートアルゴリズムが動作する。スロースタートでは、送信されるセグメントに対して確認応答があると、送信セグメント数を段階的に増やしていく。そのことにより、送り側が輻輳ウィンドウと報告されたウィンドウの最小値までデータを転送することが可能であり、輻輳ウィンドウが送り側からフロー制御を行う。ウィンドウサイズが受信バッファサイズにより制限され、受け側が受信データ容量のためにウィンドウサイズを提供する。セグメントを制御するため、輻輳ウィンドウが使われ、ウィンドウサイズがバイト単位で初期値 1 に設定され、確認応答があれば、ウィンドウのサイズを段階的に増やしていく。ネットワークの容量限界に達したら、送り側は輻輳ウィンドウが大きくなりすぎたことを検知し、パケットを廃棄する。TCP の送り側が他方エンドからの再伝送の確認応答を待っていない、送信されたセグメントの順番を間違えると、受け側で判断できる。この方法により、受け取られたセグメントの開始シーケンス番号が予想される番号と異

なると、正確に受け取った最後のシーケンス番号の ACK で応答を返す。その結果、重複する ACK が生成される。

セグメントを再送するまでの待ち時間はタイムアウトと呼ばれる。往復時間 RTT(Round Trip Time)[19, 18] がセグメント再送を行う度に 2 倍の値に設定される。TCP における再送処理は、セグメントが通信の途中で消失したり、破損した場合に行う。通常には SYN セグメントを送ると、ACK が返ることと SYN が途中で失うことがあり、ACK が損失することもある。チェックサムがセグメントのデータ部分をエラーがあるかどうかを確認する上で、確認応答を返す。また、ある時間が経過し、送信されたセグメントに対して ACK メッセージが返ってこない、同じセグメントの再送が行われる。さらに、再送されたセグメントが重複する可能性があるから、受け側で受信済みセグメントのシーケンス番号を確認した上、同じ番号ならば後に到着したセグメントが廃棄される。例えば、バークレー系の実装では、重複 ACK の数をカウントし、三つ目のものを受け取ると、セグメント損失と判断し、そのシーケンス番号のセグメントだけを再送する。

本実験では、電力線モデム専用のソフトウェアと、TCPCom を利用したが、実際のデータ転送には PLM の win-inter アプリケーションで行った。win-inter からはテキストファイル、ワード文章、表計算ファイル、ウェブファイルなど異なる形式のファイルを送信できる。この転送状態を監視できるようになった。実際に、データが送り側の PLM アプリケーションのファイル送信を利用し、受信側では、あらかじめシリアルモニタを起動させ、送信されるデータ情報が受け入れるような設計になっている。クライアントで送信されたファイルがサーバへ転送される途中では、シリアル通信ポートより検出できる。

実際に FreeBSD4.4 の上でセグメント送受信実験を行った。セグメントが一秒単位に複数のデータを送り出し、その送信されたセグメントの結果が受信側で受け取り、セグメント損失が発見されなかった。また、データの量が時間単位に対して増加するようにプログラムを作成し、より高速的なデータ転送を監視し、UDP セグメントの損失率を測定できた。クライアント側プログラムと送信の頻度についての内容を図 4.4 に示した。

5.6 本章のまとめ

本研究に使われる実験設備と電力線モデムの機能を説明し、主なパラメータ及びその技術的な背景を説明した。UDP データ伝送実験では、データ伝送中の RTT を計測することで伝送の効果を分析できる。さらに、TCP 技術に基づくファイル伝送を行い、狭帯域で PLM の実験を行った。UDP 送受信実験のために UDP プログラムを作成し、実際に、FreeBSD4.4 の上でセグメント送受信実験を行った。セグメントが秒単位で多数の数字データを送り出し、その送信されたセグメントの結果を受信側で受け取り、セグメント損失が発見されなかった。また、データの量が時間単位に対して増加するようにプログラムを作成し、より高速なデータ転送を監視し、UDP セグメントの損失率が測定できた。次に、電力線搬送に必要な、ハードウェア、及びソフトウェアの設定

について説明した。クライアントで送信されたファイルがサーバに転送される様子は、ストレートケーブル経由で、シリアル通信ポートより検出した。

第 6 章

まとめ

本論文では、家庭環境におけるネットワークの仕組みを説明し、多様な通信技術の比較、法制度の概観、また実証実験を行うことで、電力線搬送通信 (PLC: Power Line Communications) の実用性について検討した。

家庭内のアクセスメディアとして電力線は注目され、高周波で数 Mbps の通信速度が達成可能であった。しかし電力線搬送は、ADSL などの通信技術と競合し、マーケットと品質の問題に直面したため、オフィスや家庭内への普及が進んでいない。唯一、エコーネットの標準化により、家庭内で電力線接続やレイヤ構成が明確化され、電力線通信技術は著しく発展した。数多くの企業が、電力線搬送の中心技術である電力線トランシーバ (PLT: Power Line Transceiver) を開発しており、それが I/O 機能とネットワーク接続性に優れていることに注目した。電力線搬送には、新規敷設を必要としない、エネルギー管理及び白物家電制御に利用できるなど、いくつかのメリットがある。

現在、総務省の規定により、10kHz ~ 450kHz が低周波通信として日本国内で使用できるが、1.7MHz ~ 30MHz は使用できない状態になっている。今後、その周波数に対する使用規制を緩和する傾向が予想できる。また、家電機器制御とエネルギー管理を目的とする電力線搬送は、エコーネットなどの狭帯域通信、および HomePlug などの広帯域通信に分けられる。前者は、主に日本で採用されており、後者は、アメリカの標準仕様である。将来、日本では、電力線通信に適した万能プラグデバイスおよびノイズろ過などの技術開発に伴い、家電機器同士と協調しながら利用することが可能であろう。一方、通信企業では新たなビジネスチャンスが待たれており、プロバイダーによって多様な伝送サービスを活用することが期待できる。従って、電波法及び電力線搬送の具体的な制度を検討するのは不可欠である。

電力線搬送に関する研究は長く行われてきたが、物理層より上の OSI 層 [?, ?, ?] で行われた研究は少ない。本研究の主な目的は、トランスポート層に位置付けられる UDP と TCP に基づくデータ伝送を検証することである。

本研究では、実証実験として、まず UPS 電源装置を使用して 100V の環境作りを行い、エンド・ツウ・エンド通信時の UPS データ損失測定を行った。比較的に高速なデータ送受信テストをリモートホストとローカルの間で行った結果、パケット損失率がゼロに達成することを検証した。

データ伝送 RTT 実験では、エンド・ツウ・エンドの UDP 送受信を行った。送信側

が周期的にデータセグメントを送り出し、時間の変化と共にその出力結果を測定した。データの量が時間単位に対して増加するようにUDPプログラムを作成し、より高速なデータ転送を監視することでUDPセグメントの損失率が測定できた。また、比較的高い転送率での実験では、パケット損失が見つからなかった。

また、狭帯域における電力線通信を行い、PLM経由でファイルを伝送した。実証実験ではシリアルモニタを利用して観測を行った。このPLM実験に基づき、電力線搬送がファイルを転送可能であることを確認した。

物理層では、電力線搬送に特有の問題があり、スイッチング電源の動作周波数が同じであるため、パルス状のノイズが発生する。電力線の10kHz～1MHz帯におけるノイズが特に大きい。データ転送途中で、無線、電磁信号、パルス間の干渉が多いため、誤データ(ノイズ)やセグメント損失が発生する。特に家電機器のオン・オフに伴い、瞬間電圧、パルス信号が起き、ネットワーク物理環境に干渉を与える。

また、電力線搬送ノイズ、信号ボトル、伝搬パラメータを測定し、33.6dBのSNRと329Mbpsの通信チャンネル容量を算出した。

6.1 今後の課題

将来的には、バージョンの更新に伴い、WindowsやUNIX環境で電力線搬送の使用が考えられる。一方、パフォーマンスと通信品質を向上させるため、TCPコネクションを利用した通信の増加が予想できるが、データ転送におけるスループットの低下に対し、高いスループットを実現する通信プロトコルの作成が必要になる。本節では、そのようなプロトコル設計の指針と詳細を提案する。

プロトコル設計の前提

電力線搬送通信においては、その通信誤りを考慮する必要がある。無線LANに見られるようにランダムにノイズが強くなって、パケットが損失することに加えて、パースト的に非常に長い時間ノイズ状態が持続することがある。この長時間ノイズ状態が持続することをブラックアウトと呼ぶ。こうした通信路においてTCPを適用すると、TCPコネクションを管理する諸タイマの満了が頻繁に起こり、ほとんど通信できないことがある。また、TCPでは、明示的に送信レートを設定できないため、仮に電力線搬送の帯域が既知であっても、そのレート情報を送信の制御に用いることができず、結局スループットが低下するという問題がある。

プロトコル設計指針

上記の問題を解決する通信プロトコルの設計指針として、以下があげられる。1) 電力線搬送通信路が有する帯域情報を送信レートの基本とする。2) ランダムエラーあるいはブラックアウトエラーのどちらの状態にあるかを、送信および受信の協調により識別する。3) 識別した結果に応じた異なるレート制御を行う。4) シーケンス番号に基

づくエラー制御を行う。5) ランダムエラーが頻繁に起きるときには、冗長にパケットを送信する。

プロトコル設計の詳細

上記の指針に基づいたプロトコルの設計について述べる。データ送信側、受信側の動作を以下のように規定する。

送信側

[変数]

送信レート SendRate

基本レート BaseRate (例えば、57600bps)

プロービングレート ProbeRate (最低レート 300 bps)

送信側ステート SendState (Normal, Random-Error, Blackout-Error)

開始時に SendRate = BaseRate & SendState = Normal であるなら、
SendRate = BaseRate

SendState = Random-Error となっても、
SendRate = BaseRate のまま。ただし、同一パケットを2回送る。

SendState = Blackout-Error になったら、
SendRate = ProbeRate

SendState = Normal に戻ったら、
SendRate = BaseRate

受信側

送信側に対して、定期的に「受信成功パケット数」「受信ロスパケット数」の情報を含む、受信報告を返す。受信報告には、受信していないパケットの番号を含める。報告の送信間隔は、例えば5秒に1回である。Random-Error か Blackout-Error かの識別、および再送、冗長化制御を行う。

謝辞

本研究の機会を与えてくださり、絶えず懇切丁寧なご指導を賜りました、慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝致します。研究を進めるにあたって非常に多くの方からのご助言や研究に対する慎重かつ重要なアドバイスをもらい、その意見を熟慮と議論を繰り返す上で作成いたしました。慶應大学環境情報学部教授徳田英幸博士には、研究環境の提供及び研究指導とサポートをして下さいました。研究のためにご鞭撻しつづけた慶應義塾大学SFC研究所の高汐一紀氏にも深く感謝致します。また長い間、論文や研究に関する貴重なご指導及びご助言をいただいた、慶應義塾大学SFC研究所、東京電機大学 戸辺義人博士に感謝を表します。最後に、様々な研究に関する話題とご助言を頂いたPRJ研究グループ（岩本健嗣氏，中澤仁氏，岩井将行氏，由良淳一氏，松宮健太氏，間博人氏，高橋元氏）の皆様にも深い感謝の意をしめします。

2003年7月3日慶應大学 政策・メディア研究科
徐元

参考文献

- [1] Morgan H. L. Chan, David Friedman, and Robert W. Donaldson. Performance enhancement using forward error correction on power line communication channels. In *IEEE Transactions on Power Delibery*, Vol. 9, 1994.
- [2] Power Line Communication. University of essen, 2003. <http://www.exp-math.uni-essen.de/Events/Tagung.html>.
- [3] Daniel W. Durbak and James R. Stewart. Plc signal attenuation in branched networks. Vol. 5, No. 2, 1990.
- [4] ECHONET. エコネット規格, 2003. http://www.echonet.gr.jp/8_kikaku/index.htm.
- [5] EHS. European home systems, 2003. <http://www.ehsa.com/>.
- [6] Jingbo Guo Gan LI. Research on modelling of high-speed data transmission channel via low voltage power lines, 第1章. Oct 2002.
- [7] Microsoft. mira, 2003. <http://www.microsoft.com/japan/windows/mira/>.
- [8] Robert W. Donaldson Morgan H. L. Chan. Amplitude, width, and interarrival distributions for noise impulses on intrabuilding power line communication networks. In *IEEE Transactions on Power Delibery*, Vol. 31, 1989.
- [9] Alex C. Snoeren and Hari Balakrishnan. An end-to-end approach to host mobility. In *6th ACM/IEEE MobiCom*, 2000.
- [10] Phil Sutterlin and Walter Downey. A power line communication tutorialchallenges and technologies. 1994.
- [11] Y. Tamura and H. Tokuda. Ecs: A congestion control scheme for tcp in a 2.4ghz wireless link. In *In real-Time Mach Workshop'97*, 1997.
- [12] UPnP. ダイヤモンド社, 2003.
- [13] Universal Plug and Play Forum. Universal Plug and Play (UPnP), 1999. <http://www.upnp.org>.

- [14] 財団法人インターネット協会. インターネット白書 2002, 2002.
- [15] 財団法人情報処理相互運用技術協会. 平成 11 年度 rg(レジデンシャルゲートウェイ) 調査報告書, 2002.
- [16] 筒井多圭志. 第 3 章 ADSL 技術の総説. 丸山学芸図書, 1998.
- [17] 財団法人デジタルコンテンツ協会. デジタルコンテンツ白書 2002. 日本図書館協会, 2002.
- [18] 富永英儀, 石川宏. 標準 ATM 教科書. マルチメディア通信研究会, 1999.
- [19] 梅田峰子. TCP/IP スタンダード. ソフトバンク パブリッシング, 2000.
- [20] 橘康雄 W・リチャード・スティーヴンス. 詳解 TCP/IP, 第 1 巻. 2000.
- [21] 後藤健. 高速電灯線通信の現状と動向. pp. 139–142, 2002.
- [22] 田村陽介. (修士論文) インターネット網における通信トラフィック制御機構に関する研究. 1999.
- [23] 田村陽介, 戸辺義人, 徳田英幸. 移動方通信環境において効率的な通信を実現する tcp の設計と実装. 情報処理学会コンピュータシステムシンポジウム, 1997.