

無線 LAN 端末のためのマイクロ波給電の時間及び周波数分割の実験

井元 則克[†] 山下 翔大[†] 市原 卓哉^{††} 山本 高至[†]

西尾 理志[†] 守倉 正博[†] 篠原 真毅^{††}

[†] 京都大学大学院情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

^{††} 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄

E-mail: [†]info14@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 無線 LAN (Local Area Network) 端末にマイクロ波給電を行う際、無線 LAN 通信と同一周波数で同時に給電マイクロ波を送電すると干渉が起こる。一般に、マイクロ波給電の無線 LAN 通信に及ぼす影響を避けるため、無線 LAN 通信と異なる周波数を用いてマイクロ波給電を行うか、あるいはマイクロ波給電を間欠的に行う必要があると考えられる。本研究では、単純にこれら手法を用いたとしてもマイクロ波給電の無線 LAN 通信への影響を避けられないことを実験で明らかにする。この影響を避けるためには、給電源と無線 LAN 端末とが間欠マイクロ波給電及び無線 LAN 通信の時刻情報を共有する必要がある。

キーワード

Experimental Investigation of Time and Frequency Division of Microwave Power Transmission for Wireless LAN Communications

Norikatsu IMOTO[†], Shota YAMASHITA[†], Takuya ICHIHARA^{††}, Koji YAMAMOTO[†],
Takayuki NISHIO[†], Masahiro MORIKURA[†], and Naoki SHINOHARA^{††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

^{††} Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasyo, Uji, Kyoto, 611-0011
Japan

E-mail: [†]info14@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract Microwave power transmission (MPT) would interfere with frame receptions of wireless local area network (WLAN) devices when the frequency of continuous MPT is set to the same channel as that used for WLANs. In this paper, we discuss the division of radio resources in the time and frequency domains for WLAN devices powered with microwave energy. In general, there are two ways to avoid MPT from influencing WLAN data communications: adjacent channel operation of continuous MPT and WLAN data transmission and co-channel operation of intermittent MPT and WLAN data transmission. Experimental results reveal that even when we implement these methods, several problems arise because WLAN devices have been developed without supposing the existence of MPT. In addition, the experimental results imply that a microwave energy source and a WLAN device should share the information on the timings of intermittent MPT and data transmission.

Key words Microwave power transmission, IEEE 802.11, CSMA/CA, WLAN, adjacent channel interference

1. ま え が き

昨今、M2M (Machine-to-Machine) ネットワークの拡大により、無線 LAN (Local Area Network) 端末の数は増加し続けている。そのため、メンテナンスフリーの観点より、各端末をバッテリーレスとすることが望まれる。本研究では、無線給電

方式の一つであるマイクロ波給電に着目する。マイクロ波給電を無線 LAN 端末に用いる場合、給電マイクロ波に用いる周波数が無線 LAN 通信に用いる周波数にオーバーラップしていれば、給電マイクロ波は無線 LAN 通信に悪影響を及ぼすと考えられる。そのため、無線 LAN 通信と異なる周波数を用いてマイクロ波給電を行うか、または間欠的にマイクロ波給電を行う必要

がある。

無線端末に対するマイクロ波給電については既に多くの研究がなされている。[1]では給電マイクロ波の受電に用いるアンテナ及び整流回路の設計について報告されている。また、[2]では2.4 GHz帯を用いて携帯電話やセンサ端末への給電に成功している。ただし、これらの研究では、マイクロ波給電が無線LAN通信に及ぼす影響について、詳細には述べられていない。[3]ではIEEE 802.15.4に準拠した通信にマイクロ波給電が及ぼす影響について検討されている。

本研究では周波数利用効率の観点より、無線LAN通信と同じ周波数帯である2.4 GHz帯でマイクロ波給電を行う。このとき、前述したように給電マイクロ波と無線LAN通信との干渉を避ける方法は2種類ある。しかし、単純にこれらの方法をとったとしても解決できない問題が生じる場合がある。マイクロ波給電と無線LAN通信とに異なる周波数を用いたとしても、無線LAN端末がマイクロ波給電により大電力を受電した場合、受電した給電マイクロ波を十分に減衰できず、マイクロ波給電の影響を受ける可能性がある。一方、一般的に、給電マイクロ波が間欠的に送電される場合、CSMA/CA方式により送電中はデータ送信を待機するため、無線LANフレームの送受信は成功すると考えられる。しかし、給電マイクロ波とビーコンとの干渉などにより、マイクロ波給電が無線LAN通信に影響を及ぼす場合がある。

本論文の構成を述べる。まず2.でマイクロ波給電と無線LAN通信に異なる周波数を用いる際に起こる影響を実験を行って観測する。3.では間欠マイクロ波給電が無線LAN通信に与える影響について、実験で観測する。最後に、4.は本稿のまとめとする。

2. 隣接チャネルマイクロ波給電が無線LAN通信に及ぼす影響

本章では、2.4 GHz帯でマイクロ波給電と無線LAN通信とを同時に行う際に無線LAN通信が受ける影響を明らかにするため、実験で無線LAN通信のスループットを観測する。給電マイクロ波の送電電力が大ききとき、給電マイクロ波の中心周波数が無線LAN通信に用いているチャンネルにオーバーラップしていなくとも、無線LAN通信は給電マイクロ波の影響を受けると予想される。

2.1 隣接チャネルマイクロ波給電の実験構成

図1に実験構成を示す。本実験は送電装置、データ送信端末、データ受信端末で構成される。データ送信端末及びデータ受信端末には、IEEE 802.11g準拠の通信を行うものを用いる。データ送信端末は中心周波数2.457 GHzでデータ受信端末にデータフレームを送信する。送電装置はデータ送信端末に向けて給電マイクロ波を送電する。給電マイクロ波の中心周波数を2.4 GHz以上、2.5 GHz以下とする。送電装置、データ送信端末、データ受信端末は一直線上に配置する。送電装置とデータ送信端末との距離を2.46 m、送電装置とデータ受信端末との距離を2.49 mとする。給電マイクロ波の影響を受けないよう、データ受信端末を送電装置の後方に配置する。本実験ではデー

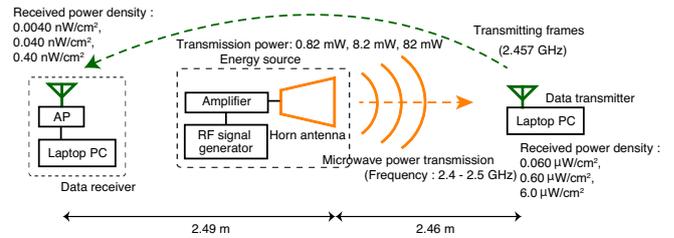


図1 隣接チャネルマイクロ波給電のための実験構成

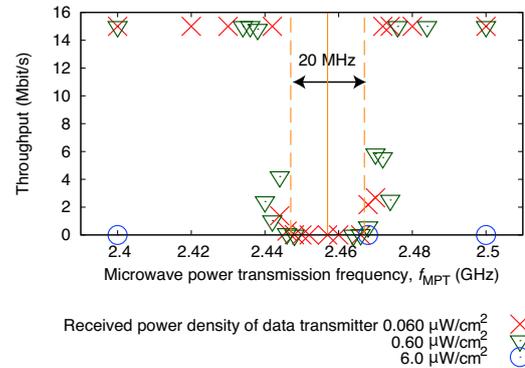


図2 給電マイクロ波の中心周波数と平均スループット

タ送信端末は一つであり、給電マイクロ波から得られる電力ではなくバッテリーから得られる電力を利用する。これは、本実験の目的が隣接チャネルマイクロ波給電の無線LAN通信に及ぼす影響の測定であり、給電電力についての考察ではないためである。

データ送信端末にはノートパソコン (MacBook Pro, 13-inch, Early 2011) を用いる。データ送信端末は1470 BのUDPフレームを非飽和トラヒックである15 Mbit/sを印加して送信する。データフレームの送信にはネットワークの帯域を測定するソフトウェアであるIperf 2.0.5を用いる。

データ受信端末はAP (Access Point) とノートパソコンで構成される。APにはアライドテレシス製のAT-TQ2403を用いる。データ受信端末上のノートパソコンはAPを介してデータ送信端末から送信されたフレームを受信し、Iperfを用いてスループットを測定する。

送電装置は主に信号発生器、増幅器、ホーンアンテナで構成される。信号発生器で特定の中心周波数と振幅を持つマイクロ波を発生させ、増幅器を介してホーンアンテナに入力する。本実験では絶対利得16.3 dBのホーンアンテナへ0.82 mW, 8.2 mW, 82 mWの電力を入力する。また、そのときのデータ送信端末地点での電力密度はそれぞれ0.060 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 0.60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 6.0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ となった。

2.2 隣接チャネルマイクロ波給電の実験結果

図2に実験結果を示す。無線LAN通信のスループットはデータ送信端末地点での電力密度に大きく依存している。電力密度が0.060 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 0.60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ のとき、給電マイクロ波の中心周波数 f_{MPT} が無線LAN通信に使用している帯域にオーバーラップしているとスループットは0 Mbit/sとなった。これは、データ送信端末は給電マイクロ波を検知し、CSMA/CA方式

によってデータ送信を待機したためであると考えられる。

データ送信端末地点での電力密度が $6.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ のとき、 f_{MPT} に関わらずスループットは 0 Mbit/s となった。これは、給電マイクロ波が大電力で送電されたため、データ送信端末が給電マイクロ波を検知し、データフレーム送信を待機したと考えられる。

一般的に、無線 LAN 端末をマイクロ波給電で駆動する際、無線 LAN 端末地点での電力密度を $6.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ より大きくする必要がある。例えば [4] で用いられる無線 LAN 端末は、常時スリープモードで動作すると仮定しても $0.3 \text{ mW}/\text{cm}^2$ の電力密度が必要である。本実験結果より、無線 LAN 端末地点での電力密度が $6.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以上であるとき、 f_{MPT} の値に関わらず無線モジュールが給電マイクロ波を検知すると考えられる。よって、無線 LAN 端末を同一周波数帯でマイクロ波給電により駆動する際、中心周波数に関わらず給電マイクロ波の影響を受けるため、給電マイクロ波は間欠的に送電されなければならない。また、間欠マイクロ波給電を行う際、 2.4 GHz 帯を用いている他の無線機器に影響を与えないよう、給電マイクロ波と通信波は同一チャンネルで送信されることが望ましい。

3. 間欠マイクロ波給電が無線 LAN 通信に及ぼす影響

本章では、無線 LAN 通信と同一チャンネルで間欠マイクロ波給電を行う際に、無線 LAN 通信がマイクロ波給電から受ける影響を明らかにするため、無線 LAN データフレームの廃棄数及び伝送レートを実験で観測する。無線 LAN 端末は CSMA/CA 方式に基づいてデータ送信を行うため、給電マイクロ波が送電されている間無線 LAN 端末は送信を待機し、送電が休止されると無線 LAN 端末はデータフレームを送信する。そのため、給電マイクロ波が間欠的に送電されているならば無線 LAN 通信は成功すると考えられる。しかし、AP との接続や伝送レートの制御方式など、他の通信機構に与えられる影響が懸念される。

本実験では給電マイクロ波が時間的に変化するため、各時刻における無線 LAN 通信への影響を詳細に観測する必要がある。そのため、本実験ではスループットではなくフレーム廃棄数及び伝送レートを測定する。フレーム廃棄数を理論的に推定し、推定値と実験値との比較を行うことで、無線 LAN 端末にマイクロ波給電を適用した際に発生する特有の問題について考察する。

3.1 間欠マイクロ波給電の実験構成

図 3 に実験構成を示す。本実験は送電装置、データ送信端末、データ受信端末、フレームアナライザで構成される。送電装置、データ送信端末、データ受信端末は一直線上に配置する。データ受信端末とフレームアナライザは給電マイクロ波の影響を受けないよう送電装置の後方に配置する。

フレームアナライザはフレームキャプチャ端末とノートパソコンで構成される。フレームキャプチャ端末として Riverbed 社の AirPcap を用いる。フレームアナライザはデータ送信端末及びデータ受信端末からのフレームを受信する。このフレームには主にデータフレーム、ビーコン、ACK (Acknowledgement)

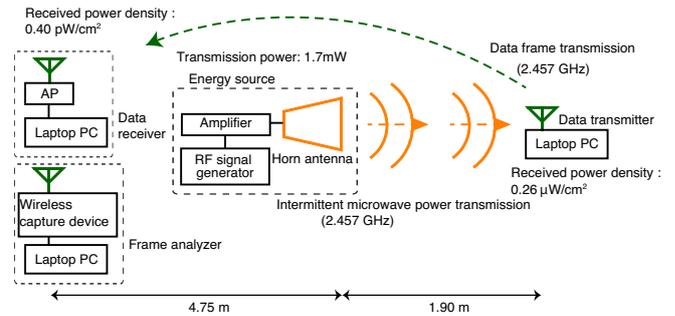


図 3 間欠マイクロ波給電のための実験構成

が含まれる。フレームアナライザを用いる理由は、無線 LAN データフレームの伝送レートとフレーム廃棄数をより詳しく測定するためである。

送電装置は給電マイクロ波を間欠的に送電する。つまり、一定時間の送電と一定時間の送電休止を繰り返す。ここで、連続した送電時間を T_{PT} 、連続した送電休止時間を T_{PS} とする。下付き文字 PT は Power Transmission を、下付き文字 PS は Power Suspension を表す。また、前述した通り、給電マイクロ波は無線 LAN 通信と同一チャンネルで送電する。給電マイクロ波がデータ受信端末及びフレームアナライザに影響を与えないよう、各端末間の距離と送電装置からの放射電力を 2. と異なり以下のように設定する。送電装置上のホーンアンテナには中心周波数 2.457 GHz で 1.7 mW のマイクロ波を入力する。送電装置、データ送信端末間の距離を 1.90 m 、送電装置、データ受信端末間の距離を 4.75 m とする。また、この電力密度の減少によりデータ送信端末の動作に変化が現れることはないと考えられる。

2. と同様、データ送信端末は 1470 B の UDP フレームを 15 Mbit/s のトラヒックで送信する。送電時間 T_{PT} の間、データ送信端末は給電マイクロ波を検知し、データフレームを生成してもチャンネルがアイドル状態となるまで送信を待機させる。待機状態にあるデータフレームは有限なバッファに溜め込まれ、送電休止時間 T_{PS} 間に送信される。

データ受信端末は 2. と同様に有線接続された AP とノートパソコンとで構成される。データ受信端末上のノートパソコンはフレーム廃棄数を測定する。また、データ受信端末上の AP は 100 ms 毎にビーコンを送信する。

3.2 フレーム廃棄率の推定値

一般に、給電マイクロ波を間欠送電したとき、CSMA/CA 方式を行う無線 LAN モジュールはデータ送信に成功すると考えられる。しかし、もしデータ送信端末のバッファ内のフレーム数があるしきい値を超えていれば、データ送信端末はあらかじめ設定されているバッファ管理方式に基づいて溜め込まれているデータフレームの一部を廃棄する。よってバッファ管理方式がフレーム廃棄数に大きく影響する。本章では簡単のため、テイルドロップ方式でフレームが廃棄され、廃棄されていないフレームは全てデータ受信端末により受信されるとする。

3.1 で述べた実験構成において、フレーム廃棄率 P_{loss} を

$$P_{\text{loss}} := \frac{N_{\text{generated}} - N_{\text{received}}}{N_{\text{generated}}} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 N_{received} は $T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}}$ あたりのフレーム受信数、 $N_{\text{generated}}$ は $T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}}$ あたりのフレーム生成数である。 N_{received} 及び $N_{\text{generated}}$ はデータ送信端末がデータフレームの送信を開始してから十分長い時間経った後に観測されるものとする。本章では特に送電時間 T_{PT} 、送電休止時間 T_{PS} に対するフレーム廃棄率を推定する。

送電時間 T_{PT} が長いとき、もしくは送電休止時間 T_{PS} が短いときにデータ送信端末のバッファ溢れが起これる考えられる。なぜなら、送電時間 T_{PT} が長いほど T_{PT} 間にバッファに多くのフレームが溜め込まれ、送電休止時間 T_{PS} が短いほど T_{PS} 間に送信できるフレーム数が少なくなるためである。これらの仮説を実験で検証し、 T_{PT} 及び T_{PS} の関数としてフレーム廃棄率を推定する。

まず、送電休止時間 T_{PS} が十分に長いとき、バッファが溢れるかどうかは送電時間 T_{PT} の値に依存する。 T_{PT} の間に溜め込まれたデータフレームの合計サイズがデータ送信端末のバッファサイズ Z より大きいとき、バッファ溢れが起これる。よって、バッファ溢れが起これない条件は以下の式で表される。

$$GT_{\text{PT}} \leq Z \quad (2)$$

ここで、 G は印加トラヒックである。式 (2) の等号が成立するとき

$$T_{\text{PT}} = \frac{Z}{G} =: T_{\text{PT,longPS}} \quad (3)$$

となる。これより、送電休止時間 T_{PS} が十分に長くかつ $T_{\text{PT}} > T_{\text{PT,longPS}}$ であるとき、 $T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}}$ 間のフレーム廃棄数 $N_{\text{discarded}}$ は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} N_{\text{discarded}} &:= N_{\text{generated}} - N_{\text{received}} \\ &= \frac{GT_{\text{PT}} - Z}{L} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 L は UDP ペイロード長である。

次に、 $T_{\text{PT}} \leq T_{\text{PT,longPS}}$ であるとき、バッファ溢れが起これるか否かは T_{PS} と T_{PT} との比で決定される。一周期でのフレーム生成数が送電休止時間 T_{PS} の間に送信できるフレーム数より多いとき、バッファ溢れが起これる。よって、バッファ溢れが起これない条件は以下の式で表される。

$$\frac{G(T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}})}{L} \leq \frac{T_{\text{PS}}}{\tau} \quad (5)$$

ここで、 τ はあるデータフレームの送信開始から次のデータフレームの送信開始までの時間であり、実験によって得られる。式 (5) の等号が成立するとき

$$T_{\text{PS}} = \frac{GT_{\text{PT}}}{L/\tau - G} =: T_{\text{PS,shortPT}} \quad (6)$$

となる。これより、 $T_{\text{PT}} \leq T_{\text{PT,longPS}}$ かつ $T_{\text{PS}} < T_{\text{PS,shortPT}}$ であるとき、 $N_{\text{discarded}}$ は以下の式で表される。

$$N_{\text{discarded}} = \frac{G(T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}}) - LT_{\text{PS}}/\tau}{L} \quad (7)$$

最後に、 $T_{\text{PT}} > T_{\text{PT,longPS}}$ であるとき、 $N_{\text{discarded}}$ が式 (4)、式 (7) のどちらで表されるかは T_{PS} に依存する。この場合、データ送信端末が T_{PS} の間に送信するべきデータフレームの数は $(Z + GT_{\text{PS}})/L$ である。よって、送信されるべきデータフレームの数が送信可能なデータフレームの数より小さいとき、つまり、

$$\frac{Z + GT_{\text{PS}}}{L} \leq \frac{T_{\text{PS}}}{\tau} \quad (8)$$

であるとき、フレーム廃棄数 $N_{\text{discarded}}$ は式 (7) によって表される。ここで、式 (8) の等号が成立するとき

$$T_{\text{PS}} = \frac{Z}{L/\tau - G} =: T_{\text{PS,longPT}} \quad (9)$$

となる。

式 (2) から式 (6)、さらに

$$N_{\text{generated}} = \frac{G(T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}})}{L} \quad (10)$$

より、フレーム廃棄率 P_{loss} は以下の式で表される。

$$P_{\text{loss}} = \begin{cases} \frac{G(T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}}) - LT_{\text{PS}}/\tau}{G(T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}})}, & (11a) \\ T_{\text{PS}} < T_{\text{PS,shortPT}} \text{ or } T_{\text{PS}} < T_{\text{PS,longPT}}; \\ \frac{GT_{\text{PT}} - Z}{G(T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}})}, & (11b) \\ T_{\text{PT}} > T_{\text{PT,longPS}} \text{ and } T_{\text{PS}} \geq T_{\text{PS,shortPT}}; \\ 0, & (11c) \\ T_{\text{PT}} \leq T_{\text{PT,longPS}} \text{ and } T_{\text{PS}} \geq T_{\text{PS,shortPT}} \end{cases}$$

P_{loss} は送電時間 T_{PT} に関する増加関数であり、送電休止時間 T_{PS} に関する減少関数である。

バッファオーバフローを避けるための条件は、式 (11c) より、 $T_{\text{PT}} \leq T_{\text{PT,longPS}}$ かつ $T_{\text{PS}} \geq T_{\text{PS,shortPT}}$ である。つまり、送電時間 T_{PT} に対する送電休止時間 T_{PS} の比は

$$\frac{T_{\text{PS}}}{T_{\text{PT}}} \geq \frac{T_{\text{PS,shortPT}}}{T_{\text{PT,longPS}}} = \frac{1}{L/G\tau - 1} \quad (12)$$

でなければならない。よって、 $T_{\text{PS}}/T_{\text{PT}}$ の最小値 $T_{\text{PS,shortPT}}/T_{\text{PT,longPS}}$ は印加トラヒック G に関する増加関数となる。ここで、 $T_{\text{PS}}/T_{\text{PT}}$ が大きいほどデータフレームの送信に使える時間が長くなり、マイクロ波給電を行う時間が短くなる。

3.2.1 印加トラヒックによる供給電力への制限

次に、送電装置からデータ送信端末への供給電力について述べる。 $T_{\text{PS}}/T_{\text{PT}}$ が小さいほどマイクロ波給電を行う時間が長くなる。すなわち、 $T_{\text{PS}}/T_{\text{PT}}$ が最小値であるときデータ送信端末への供給電力は最大値となる。 T_{PT} 間の供給電力を p_{PT} とすると、給電マイクロ波一周期での平均供給電力は

$$\begin{aligned} p_e &= \frac{p_{\text{PT}}T_{\text{PT}}}{T_{\text{PT}} + T_{\text{PS}}} = \frac{p_{\text{PT}}}{1 + T_{\text{PS}}/T_{\text{PT}}} \\ &\leq \frac{p_{\text{PT}}}{1 + T_{\text{PS,shortPT}}/T_{\text{PT,longPS}}} \\ &= \left(1 - \frac{G\tau}{L}\right) p_{\text{PT}} =: p_{e,\text{max}} \end{aligned} \quad (13)$$

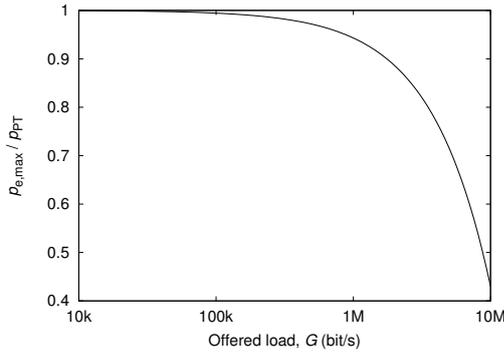


図4 $p_{e,max}/p_{PT}$ と印加トラフィック G ($\tau = 0.67$ ms, $L = 1470$ B)

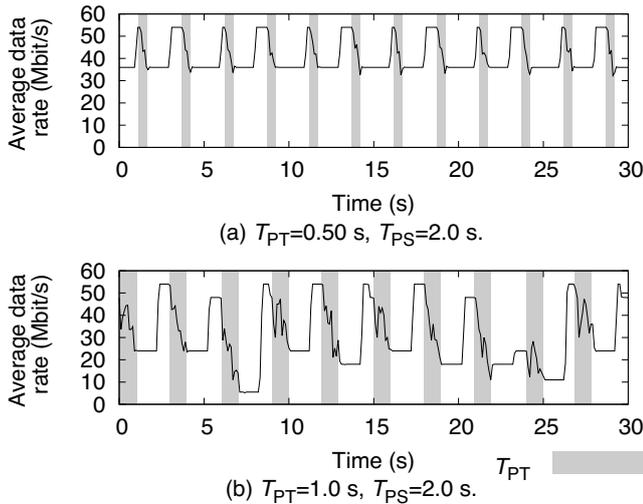


図5 0.1 s 毎の平均伝送レート ((a) $T_{PT} = 0.50$ s, $T_{PS} = 2.0$ s, (b) $T_{PT} = 1.0$ s, $T_{PS} = 2.0$ s)

と計算できる。よって、印加トラフィック G が大きいほど平均供給電力は小さくなる。

図4は $\tau = 0.67$ ms, $L = 1470$ B のときの $p_{e,max}/p_{PT}$ と G の関係を表す。図4より、無線 LAN 端末に十分な電力を供給するには印加トラフィック G を小さくしなければならないことが分かる。

3.3 間欠マイクロ波給電の実験結果

3.3.1 伝送レートの変化

図5(a)に $T_{PT} = 0.50$ s, $T_{PS} = 2.0$ s としたときの 0.1 s 毎の平均伝送レートを示す。図5(b)に $T_{PT} = 1.0$ s, $T_{PS} = 2.0$ s としたときの 0.1 s 毎の平均伝送レートを示す。これらの図より、 T_{PT} の間に伝送レートが段階的に低下していることが分かる。このため、図5(a)に比べ送電時間 T_{PT} が長い図5(b)では平均伝送レートが小さくなる。これは、データ送信端末は T_{PT} の間ほとんどデータ送信を待機しているが、しばしば送電中にも関わらずデータフレームを送信し、ACK の受信に失敗するためである。ACK の受信に連続して失敗することで、ARF (Auto Rate Fallback) [5] などの伝送レート制御アルゴリズムによりデータ送信端末が伝送レートを低下させたと考えられる。これは、CSMA/CA 方式によりデータフレーム送信が待機されていけば起こり得ない現象であり、3.2 でも考慮されていない。

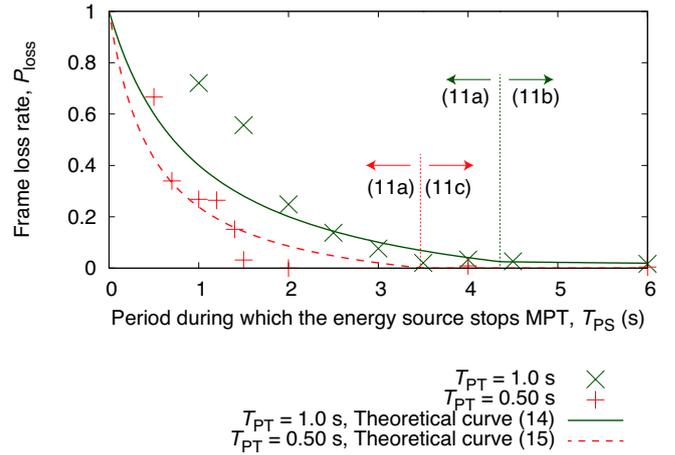


図6 送電休止時間とフレーム廃棄率 (実線は $T_{PT} = 1.0$ s に対する理論曲線であり、 $Z = 1.6$ MB, $\tau = 0.65$ ms としている。破線は $T_{PT} = 0.50$ s に対する理論曲線であり、 $Z = 1.6$ MB, $\tau = 0.68$ ms としている。)

また、 T_{PS} の間、伝送レートが上昇を始めるまでに一定時間経過していることが分かる。これは、伝送レートを下げた時刻から一定時間経過した後、伝送レート制御アルゴリズムによりデータ送信端末が伝送レートを上昇させていると考えられる。このため、送電休止時間 T_{PS} が短いほど低伝送レートでデータフレームを送信する時間の割合が大きくなり、平均伝送レートが低下する。これは前述した伝送レートの低下と同様に 3.2 では考慮されていない現象である。

データ送信端末が送電中にデータフレームを送信しないよう制御できれば、伝送レートの減少は起こらないと考えられる。この制御のためには、送電装置とデータ送信端末はマイクロ波給電とデータ伝送の時刻に関する情報を共有する必要があると考えられる。

3.3.2 フレーム廃棄率

図6に、 T_{PT} を 0.50 s, 1.0 s としたときの T_{PS} とフレーム廃棄率 P_{loss} との関係を示す。式 (11a), (11b), (11c) で示されているように、フレーム廃棄率 P_{loss} は T_{PS} の増加に伴い減少する。 $T_{PT} = 1.0$ s としたとき、 $T_{PS} \geq 2.0$ s の範囲で式 (11a), (11b) は実験値によく合っている。この範囲で、 τ は T_{PS} に関わらず 0.65 ms と測定された。バッファサイズ Z はこの範囲で $T_{PS} = 1.0$ s の実験値に理論式 (11a), (11b), (11c) を最小二乗法を用いて推定されている。ここで、バッファサイズ Z には端末固有の値が存在するが、値が公表されていないため本項では推定により求める。以上の方法で τ , Z を与えることで、フレーム廃棄率の推定値は以下の式で表される。

$$P_{loss} = \begin{cases} \frac{1.2 \text{ s}}{T_{PS} + 1.0 \text{ s}} - 0.21, & T_{PS} < 4.4 \text{ s}; \\ \frac{0.15 \text{ s}}{T_{PS} + 1.0 \text{ s}}, & T_{PS} \geq 4.4 \text{ s} \end{cases} \quad (14)$$

上に述べた $T_{PS} \geq 2.0$ s 以外の範囲、つまり、 $T_{PS} = 1.0, 1.5$ s での測定点では、理論式は実験値に合わない。これは、3.3.1 で述べたように伝送レート制御アルゴリズムが原因と考えられる。

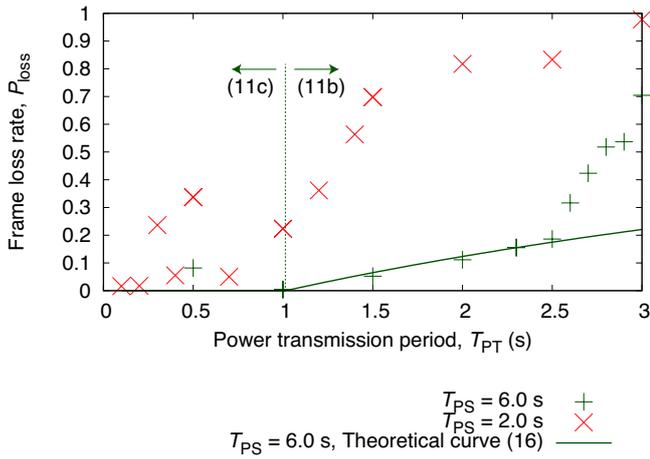


図7 送電時間とフレーム廃棄率 (実線は $T_{PS} = 6.0$ s に対する理論曲線であり, $Z = 1.9$ MB, $\tau = 0.67$ ms としている.)

$T_{PT} = 0.50$ s のとき, $T_{PS} \geq 0.70$ s の範囲で式 (11a), (11c) は実験値によく合っている. この範囲で, τ は T_{PS} に関わらず 0.69 ms と測定された. これより, フレーム廃棄率の推定値は以下の式で表される.

$$P_{\text{loss}} = \begin{cases} \frac{0.58 \text{ s}}{T_{PS} + 0.50 \text{ s}} - 0.15, & T_{PS} < 3.5 \text{ s}; \\ 0, & T_{PS} \geq 3.5 \text{ s} \end{cases} \quad (15)$$

上に述べた $T_{PS} \geq 0.70$ s 以外の範囲, つまり, $T_{PS} = 0.50$ s での測定点では理論式は実験値に合わない. これは $T_{PT} = 1.0$ s での実験結果と同様, 3.3.1 で述べたように伝送レート制御アルゴリズムが原因と考えられる.

図7に, T_{PS} を 2.0 s, 6.0 s としたときの T_{PT} とフレーム廃棄率 P_{loss} との関係を示す. 式 (11a), (11b), (11c) で示されているように, フレーム廃棄率 P_{loss} は T_{PT} の増加に伴い増加する. $T_{PS} = 2.0$ s のとき, 式 (11a), (11b), (11c) は実験値に合わない. これは, 3.3.1 で述べたように, 伝送レートの上昇に時間がかかることが原因と考えられる.

$T_{PS} = 6.0$ s としたとき, $T_{PT} \leq 2.5$ s の範囲で式 (11b), (11c) は実験値によく合っている. この範囲で, τ は T_{PT} に関わらず 0.67 ms と測定された. バッファサイズ Z は $1.0 \text{ s} \leq T_{PT} \leq 2.5$ s で理論式 (11b) を最小二乗法を用いて推定している. 以上の方法で τ , Z を与えることで, フレーム廃棄率の推定値は以下の式で表される.

$$P_{\text{loss}} = \begin{cases} 1.0 - \frac{5.0 \text{ s}}{T_{PT} + 6.0 \text{ s}}, & T_{PT} > 1.0 \text{ s}; \\ 0, & T_{PT} \leq 1.0 \text{ s} \end{cases} \quad (16)$$

上に述べた $T_{PT} \leq 2.5$ s 以外の範囲, つまり, $T_{PT} \geq 2.6$ s での測定点では理論式は実験値に合わない. これは, 3.2, 3.3.1 で述べられていない現象が原因となっている. $T_{PT} \geq 2.6$ s のとき, 無線 LAN 端末は頻りにスリープモードとなる. これは, T_{PT} の間, データ送信端末がデータ受信端末からのビーコン受信に失敗するためであると考えられる. スリープモードに入っている一定時間, データ送信端末はデータフレームを送信しない. よって, $T_{PT} \geq 2.6$ s のとき, より多くのデータフレーム

がバッファに溜め込まれ, フレーム廃棄率は理論値より大きくなる. これらの予期していないスリープを避けるため, 給電マイクロ波はビーコン送信の間送電されるべきではない. ただし, スリープモードは標準化されておらず, 端末依存である.

これらの結果より, 3.2 で示された理論式は実験値によく合っている. ただし, 3.3.1 と本項で述べた伝送レート制御及びビーコンの受信失敗の影響が大きいつき, 3.2 で示された理論式より多くのフレーム廃棄が起きる. これらの現象は電波の放射時間が長く, さらにチャンネルがアイドル状態である時間が短いというマイクロ波給電の特色に由来する問題であり, データフレーム同士の干渉では起こりにくいと考えられる.

4. むすび

マイクロ波給電と IEEE 802.11g 準拠の通信を 2.4 GHz 帯で行う場合, 給電マイクロ波が通信に与える影響を実験で明らかにした. 無線 LAN 端末をマイクロ波によって給電する場合, 送電電力の大きさ, 送電時間及び送電休止時間により無線 LAN 端末に影響が現れる. 実験結果より, 給電源と無線 LAN 端末とが間欠マイクロ波給電及び無線 LAN 通信の時刻に関する情報を共有する必要があるとわかる.

無線 LAN 通信へのマイクロ波給電の影響の大きさは使用する無線 LAN 端末によるところが大きいが, 本研究の目的は一般的に起こりうる問題の提示である. 今後の課題として複数電源からの給電及び複数端末への給電が挙げられる.

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 24360149) によるものである. 本研究におけるマイクロ波送電実験は, 京大生生存圏研究所全国共同利用施設「マイクロ波エネルギー伝送実験装置 (METLAB)」の電波暗室において行った.

文 献

- [1] T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, Y. Fujita, T. Suzuki, and S. Otaka, "A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance," J. IEEE Solid-State Circuits, vol.41, no.1, pp.35–41, Jan. 2006.
- [2] N. Shinohara, M. Tomohiko, and H. Matsumoto, "Study on ubiquitous power source with microwave power transmission," Proc. Union Radio Science (URSI) General Assembly 2005, pp.1–4, 2005.
- [3] T. Ichihara, T. Mitani, and N. Shinohara, "Study on intermittent microwave power transmission to a ZigBee device," Proc. IEEE Microwave Workshop Series (IMWS) on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications 2012, pp.209–212, Kyoto, Japan, May 2012.
- [4] S. Yamashita, N. Imoto, T. Ichihara, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and N. Shinohara, "Implementation and feasibility study of co-channel operation system of microwave power transmissions to IEEE 802.11-based battery-less sensors," submitted to IEICE Trans. Commun., Special Section on Ambient Intelligence and Sensor Networks, Jan. 2014.
- [5] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band," J. Bell Labs Technical, vol.2, no.3, pp.118–133, Aug. 1997.