

マイクロ波電力伝送を用いるバッテリーレス無線 LAN の 残エネルギー適応スケジューリング

山下 翔大[†] 井元 則克^{††} 市原 卓哉^{†††} 山本 高至^{††} 守倉 正博^{††}
篠原 真毅^{†††}

[†] 京都大学工学部 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

^{††} 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 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: †yamashita@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし マイクロ波電力伝送によりバッテリーレス無線センサを駆動させる際、電力伝送と無線通信に同一周波数帯のマイクロ波を用いるならば、送電と通信を時間的にスケジューリングする必要がある。また、送電マイクロ波による給電電力をキャパシタに蓄えつつ無線センサを駆動させる際には、キャパシタの残エネルギーをできる限り大きくすることが望ましい。本稿では、マイクロ波送電と無線 LAN 通信を時分割により行うシステムの設計を行い、実験によりこのシステムが正しく機能したことを報告する。無線 LAN 端末はデータの送信に加え、AP (Access Point) から定期的送信されるビーコンの受信を行うため、これらが行われるよう送電マイクロ波の放射のタイミング制御を行う。また、無線 LAN 端末はキャパシタの残エネルギーに応じて自局のスリープ時間を制御する。

キーワード マイクロ波電力伝送, バッテリーレス, スケジューリング, 無線 LAN 通信, ビーコン, スリープ制御

Energy-aware Transmission Scheduling for Batteryless Wireless LAN Using Microwave Power Transmission

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

[†] Faculty of Engineering, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

^{††} Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

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

E-mail: †yamashita@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract When a wireless and batteryless sensor is powered by microwave power transmission technology, time scheduling is required if wireless communication and power transmission use the same radio frequency band. In addition, constant energy should be stored in the capacitors of the wireless sensor. This paper reports designing a method to allocate periods for microwave power transmission and WLAN communication. Microwave emission is stopped when the WLAN terminal transmits the data and receives beacons transmitted from an access point. The WLAN terminal controls sleep period depending on the remaining energy to store constant energy in the capacitor of the WLAN terminal.

Key words Microwave power transmission, batteryless, scheduling, WLAN communication, beacon, sleep control

1. ま え が き

将来我々が生活するであろう、環境に配慮した安全で安心な

社会を実現するために、スマートグリッドや自然災害予防システム、保健福祉医療システムなどの構築が求められている。このようなシステムに収容される無線端末数は莫大であり、それ

に加えメンテナンスフリーの観点からこれらの端末はバッテリーレスであることが望まれる。無線端末のバッテリーレス化を実現する一つの方法として、無線電力伝送が挙げられる [1]。

無線給電を実現する方法の一つであるマイクロ波電力伝送によって無線端末を駆動させる場合、送電に用いるマイクロ波と無線通信に用いるマイクロ波が同じ周波数帯を使用した場合は干渉や競合により同時使用ができない。また、異なる周波数帯を使用した場合においても、送電に用いるマイクロ波の電力が大きいため、無線通信に用いる周波数帯に影響を与える可能性がある [2]。従って、送電と通信とを時間的にスケジューリングする必要がある [3]。本研究では、送電と通信に同一周波数帯を用いることを前提として、送電に使用するマイクロ波と無線 LAN (Local Area Network) 通信に使用するマイクロ波との時間的なスケジューリングを行う。すなわち、無線通信による制御で、送電用マイクロ波の放射と無線 LAN 通信とが同時に行われないようにする。なお、給電と通信に同一周波数帯を用いる理由としては、有限のリソースである周波数の利用効率を高めることが挙げられる。

送電用のマイクロ波が放射されているとき、無線端末はスリープしており、低消費電力で動作する。本実験のスケジューリングの目的は、スリープ時間を効果的に制御して、無線端末の電源を担うキャパシタの残エネルギーを目標値に近づけることである。

我々はこれまで、ハロゲンライトと光電池を用いた発電によりマイクロ波電力伝送を模擬し、無線 LAN 端末を駆動した際のスケジューリングシステムの構築と実験を行っている [4]。本稿では、[4] で構築したスケジューリングシステムに基づき、実際にマイクロ波電力伝送を用いて無線 LAN 端末を駆動する実験を行う。

マイクロ波電力伝送において給電を受ける端末にはレクテナという素子を組み込む。レクテナはアンテナと整流回路で構成されており、電波を受電し、整流して直流電力として負荷に出力する素子である [1]。

本稿の章構成について述べる。2. では実験に使用する無線モジュールの動作を示す。3. では実験に用いる機器の構成や実験のシステムを示す。4. では給電・通信スケジューリングの方法と、スリープ制御の方法を示す。5. では給電・通信スケジューリングとスリープ制御を行い、マイクロ波電力伝送を用いて無線 LAN 端末を駆動した結果を述べる。最後に、6. で本稿を統括する。

2. 無線モジュールの動作

実験で用いる無線 LAN モジュール (以降は無線モジュールと呼称する) とその動作について説明する。

まず無線モジュールのドーズ状態とアウェイク状態について説明する。ドーズ状態とは無線による送受信ができない状態であり、このとき無線モジュールは必要最小限の電力で動作している。それに対しアウェイク状態とは無線による送受信ができる状態であり、このとき無線モジュールの RF 回路に完全に電力が供給されている [5]。

本実験では無線モジュールとして米国 Digi インターナショナル社の XBee Wi-Fi を用いている。ここでこの無線モジュールのスリープとアクティブについて説明する。スリープは無線モジュールの省電力モードであり、スリープ復帰操作以外の操作を一切受け付けない。一方、アクティブは無線モジュールの通常モードである。

無線モジュールの省電力設定に関しては AP Associated Sleep (APAS) を使用する。APAS 設定の無線モジュールは、スリープ時に AP が定期的に送信する DTIM (Delivery Traffic Indication Map) を含んだビーコン (以降では DTIM と呼称する) のみを受信することにより、AP との接続を保ちつつ省電力状態になる [6]。すなわち、スリープ時の無線モジュールは DTIM 受信の前後でアウェイク状態になり、それ以外はドーズ状態で動作する。

3. 実験の構成とシステム

本章では実験に使用する機器とそのシステムについて説明する。なお実際にマイクロ波電力伝送を用いる実験はすべて、電波暗室 A-METLAB 内で行っている。

3.1 実験機器の構成

本実験で使用する機器は図 1 に示す通り、レクテナを備える無線 LAN 端末、AP、送電装置、データ収集端末の 4 種類で構成される。以降ではこれらの機器を構成する要素と全体のシステムを説明する。まず始めに、マイコンボード (MB) には XBee シリーズを搭載して通信することができ、プログラムを書き込んで実行することのできる Arduino Fio を用いている。

無線 LAN 端末は、無線モジュール (WLAN module)、MB、電気二重層キャパシタ、DC-DC コンバータ、整流器とパッチアンテナを含むレクテナで構成される。このレクテナで放射された送電マイクロ波を受電・整流し、容量 10 F、耐電圧 2.7 V のキャパシタへ給電する。キャパシタに蓄えられるエネルギーにより MB 及び無線モジュールを駆動させるために、DC-DC コンバータにより MB の駆動電圧 3.3 V に昇圧する。

送電装置は主に、無線モジュール、マイコンボード MB、RF 信号発生器、マイクロ波電力増幅器、ホーンアンテナ (アンテナ利得 18.9 dBi) で構成される。RF 信号発生器から出力される送電マイクロ波の周波数は 2.46 GHz とする。

AP の設定について説明する。使用する無線通信規格を IEEE 802.11g とし、通信に使用する周波数帯の中心周波数を 2.457 GHz、チャンネル幅を 22 MHz とする。AP のビーコン間隔 (Beacon Interval) を 40.96 ms、DTIM 値 (DTIM Period: ビーコン何個おきに DTIM を含ませるかを決定するパラメータ) を 250 とする。すなわち、DTIM を含んだビーコンが送信される間隔 (以降は DTIM 間隔と呼称する) を 10.24 s としている。

データ収集端末は、無線モジュールとラックトップコンピュータで構成され、PC のシリアルコンソールで受信データの確認を行う。

実験時の各構成要素の配置を図 1 に、各機器に組み込まれる無線モジュールの設定を表 1 に示す。無線 LAN 端末は送電装

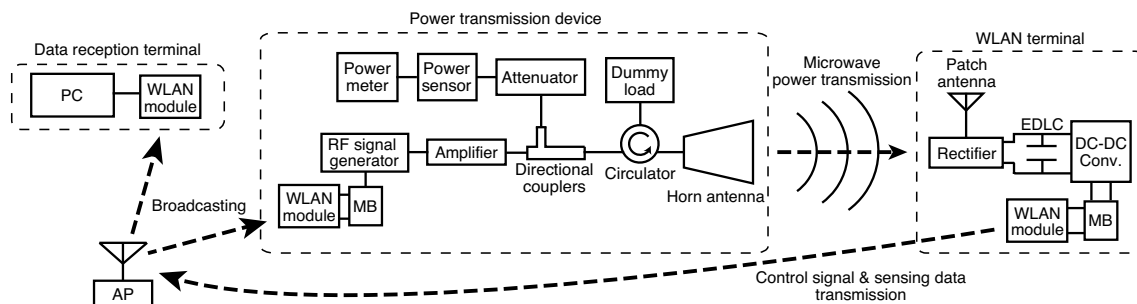


図 1 実験の構成

表 1 各無線モジュールの設定

| すべての無線モジュールに共通の設定 | | | |
|--------------------------------------|------------|---------|-------|
| 動作モード：インフラ・モード | | | |
| 通信プロトコル：UDP (User Datagram Protocol) | | | |
| 組み込まれている構成要素 | | | |
| 無線 LAN 端末 | 送電端末 | データ収集端末 | |
| スリープ | APAS | 使用しない | 使用しない |
| 通信 | ブロードキャスト送信 | 受信のみ | 受信のみ |

置内のホーンアンテナの正面に配置し、ホーンアンテナの後方に AP、送電装置、データ収集端末を配置する。このような配置にする理由は、送電マイクロ波放射による AP や送電装置内の無線モジュールへの影響を防ぐためである。

ホーンアンテナの開口面からパッチアンテナ、無線 LAN 端末内の無線モジュールのアンテナ、AP のアンテナまでの距離はそれぞれ 46 cm, 104 cm, 340 cm とする。無線 LAN 端末内の無線モジュールのアンテナから AP のアンテナまでの距離を 442 cm とし、AP のアンテナから送電装置内の無線モジュールのアンテナ、データ収集端末内の無線モジュールのアンテナまでの距離をそれぞれ 57 cm, 16 cm とする。

3.2 システム

次に各機器のシステムについて説明する。以降では「MB と無線モジュールの複合端末」を「無線端末」と呼ぶことにする。まず無線 LAN 端末は、自身のキャパシタの残エネルギーとレクテナから給電されている電力より、自局の無線端末のスリープ時間を決定する。この情報は AP を中継して送電装置の無線端末に伝えられる。無線 LAN 端末は将来実現するであろう無線センサを想定しているため、無線 LAN 端末のスリープ時間に関する情報の他、センシング情報も付加して送信する。送信するセンシング情報として、MB の計測により求めたキャパシタの残エネルギーの情報をを用いる。

送電装置の無線端末は受信した情報からスリープ時間に関する情報のみを抜き出し、その情報に応じて送電マイクロ波の放射の ON/OFF を制御する。このとき MB のデジタル出力の電圧 HIGH/LOW と、ホーンアンテナからの送電マイクロ波放射の ON/OFF とが一致している。

送電装置内のホーンアンテナから送電マイクロ波が放射されている間、そのマイクロ波を無線 LAN 端末のレクテナが受電することによりエネルギーをキャパシタへ蓄積する。このとき無線 LAN 端末の無線端末はスリープしており、結果キャパシタの残エネルギーが増加する。無線 LAN 端末内の無線端末は

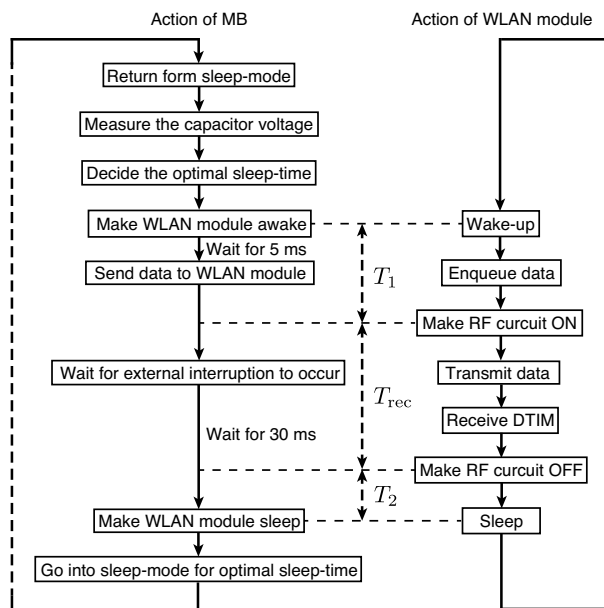


図 2 無線 LAN 端末の MB と無線モジュールの動作

送電装置からマイクロ波が放射されていないときに送信または受信を行う。

4. スケジューリング法

本章では、本実験で考案したスケジューリング法について、無線 LAN 端末内の MB にアップロードしたプログラムの流れと、スケジューリングを行う上で必要な最適なスリープ時間の決定方法について説明する。

4.1 無線 LAN 端末の動作の流れ

無線 LAN 端末内の MB と無線モジュールの動作のフローチャートを図 2 に、このフローチャートで動作させたときのデータ送信前後の消費電力の概形を図 3 に示す。なお、図中の T_1 , T_{rec} , T_2 はそれぞれ、無線モジュールがスリープから復帰して DTIM 受信のためにアウェイク状態になるまでの時間、無線モジュールがアウェイク状態になってから DTIM 受信を終えドーズ状態になるまでの時間、無線モジュールがドーズ状態になってからスリープするまでの時間である。以降では、このフローチャートの動作について説明する。

まず、MB は現在のキャパシタ両端電圧を計測し、キャパシタの残エネルギーを算出する。その後、4.2 で述べるアルゴリズムにより MB の最適なスリープ時間を決定する。次に無線

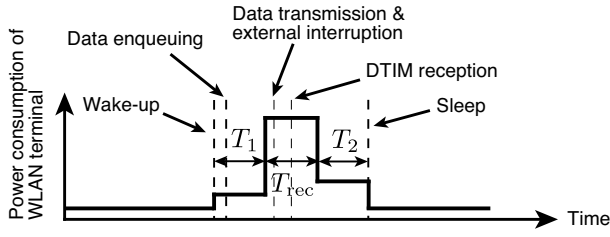


図3 無線 LAN 端末におけるデータ送信前後の消費電力の概形

モジュールをアクティブにし、無線モジュールを正常に動作させるために 5ms 待機する。その後、送信したいデータを MB から無線モジュールへ転送する。この段階ではまだ送信したいデータは無線モジュールの送信キューに蓄積されており、実際に無線モジュールが送信を行うのは DTIM を受信すべくアウェイク状態になったときである。

その後、MB のデジタル入力ピンを用いた外部割り込みが入るまで待機する。このピンは無線モジュールのピンと接続しており、外部割り込みが入るのは無線モジュールがデータを送信したときであるため、この割り込みにより MB が間接的に無線モジュールの DTIM 受信のタイミングを把握することができる。

その後、無線モジュールの DTIM 受信が終わるのを待つために 30ms 待機し、無線モジュールをスリープさせる。続けて送信前に決定した最適なスリープ時間だけ MB をスリープモードに移行させる。スリープモードから復帰した MB は、最初に戻ってキャパシタの両端電圧の測定から動作を繰り返す。

4.2 最適スリープ時間の決定方法

無線 LAN 端末における最適スリープ時間の決定方法を説明する。まず始めに、無線 LAN 端末に接続されるキャパシタを耐電圧まで充電した際に蓄えられているエネルギーを E_{\max} とする。スケジューリングの目的は、バッテリーレスな無線 LAN 端末の電源を担うキャパシタの残エネルギーをある目標値にすることである。本実験では、その目標値を E_{\max} に定め、キャパシタの残エネルギーが E_{\max} 以下かつ最も E_{\max} に近づくように、無線 LAN 端末及び送電装置を動作させる。なぜならば、本実験で使用する DC-DC コンバータに関して、入力電圧が高いほど変換効率が高くエネルギー損失を抑えることができるためである。

まず、スケジューリングをしたときの無線 LAN 端末の消費電力と送電装置のマイクロ波放射状態の概形を図 4 に示す。以降ではこの図のような動作を行うための演算について述べる。

現在 k 回目の最適スリープ時間の演算を行っている時刻とする。 $k+1$ 回目の演算を DTIM 間隔 T_{DTIM} の整数倍だけ後、すなわち非負の整数値 n_t に対して $(n_t + 1)T_{\text{DTIM}}$ 後に行うとする。ここで n_t は、次の演算までに送電装置からマイクロ波の放射を行う回数 (図 4 の下図における矩形波の数) とする。無線 LAN 端末は n_t の最適値 $n_t^*[k]$ を送電装置へ送信し、それを受け取った送電装置はマイクロ波の送電を開始する。しかし、スリープ時の無線 LAN 端末内の無線モジュールは DTIM を受信することで AP との接続を保つため、送電装置から放射される

マイクロ波が無線モジュールの DTIM 受信を妨げないようにする必要がある。そこで送電装置内の MB は AP の DTIM 送信がいつになるのかを推定して、その前後で送電マイクロ波の放射を行わないようにする。この送電マイクロ波の放射を行わない期間を通信許可期間と呼ぶことにし、 T_p と表記する。さらに、次のデータ送信の T_{DTIM} 前では送電マイクロ波の放射を行わないとする。このようにした目的は、送電が終わった直後におけるデータ送信の失敗を防ぐことである。

以降より、 k 回目の演算で求めるべき最適な次の演算までの時間 $(n_t^*[k] + 1)T_{\text{DTIM}}$ における、 $n_t^*[k]$ を求める。 k 回目の演算直前に計測したキャパシタの残エネルギーを $e[k]$ 、1 つ前の演算時から現時点までにおける送電マイクロ波放射時にレクテナからキャパシタに供給される電力を $p_t[k-1]$ とする。

まず、 k 回目の演算から $k+1$ 回目の演算までにレクテナからキャパシタに供給されるエネルギーの推定値 $\hat{e}_t(p_t[k-1], n_t)$ と、同じ時間に無線 LAN 端末が消費するエネルギーの推定値 $\hat{e}_c(n_t)$ を以下の式により求める。

$$\hat{e}_t(p_t[k-1], n_t) = n_t p_t[k-1](T_{\text{DTIM}} - T_p) \quad (1)$$

$$\hat{e}_c(n_t) = E_{c0} + n_t \times [E_{c,\text{DTIM}} + P_{\text{sleep}}(T_{\text{DTIM}} - T_{\text{rec}})] \quad (2)$$

但し、 $E_{c,\text{DTIM}}$ は無線 LAN 端末が DTIM を一回受信する際に消費するエネルギー、 P_{sleep} は無線 LAN 端末がスリープ時の消費電力とする。さらに、 E_{c0} は $\hat{e}_c(0)$ と等しいとする。

次に、 $n_t^*[k]$ は、 E_{\max} と $k+1$ 回目の測定時のキャパシタの残エネルギーの推定値との差である $\Delta(p_t[k-1], n_t)$ を用いて以下の式で算出する。なお N は自然数とし、 $n_t^*[k]$ の取りうる最大値とする。

$$\Delta(p_t[k-1], n_t) = E_{\max} - [e[k] + \hat{e}_t(p_t[k-1], n_t) - \hat{e}_c(n_t)] \quad (3)$$

$$n_t^*[k] = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta(p_t[k-1], n_t) \leq 0, \forall n_t \\ \arg \min_{n_t \in \{1, \dots, N\}, \Delta(p_t[k-1], n_t) > 0} \Delta(p_t[k-1], n_t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$(n_t^*[k] + 1)T_{\text{DTIM}}$ は k 回目の演算から $k+1$ 回目の演算までの時間であるため図 3 における無線モジュールのアクティブ時間を考慮すると、 k 回目の演算で求めた最適なスリープ時間 $T_{\text{sleep}}^*[k]$ は以下の式により求められる。

$$T_{\text{sleep}}^*[k] = (n_t^*[k] + 1)T_{\text{DTIM}} - (T_1 + T_2 + T_{\text{rec}}) \quad (5)$$

その後 MB は $T_{\text{sleep}}^*[k]$ だけスリープし、復帰後に $k+1$ 回目の演算に使用するキャパシタの残エネルギー $e[k+1]$ を測定する。そして k 回目の演算時から現時点までにおける、送電マイクロ波放射時のレクテナからキャパシタに供給される電力 $p_t[k]$ を以下の式により算出する。

$$p_t[k] = \begin{cases} p_t[k-1] & \text{if } n_t^*[k] = 0 \\ \frac{e[k+1] - e[k] + \hat{e}_c(n_t^*[k])}{n_t^*[k](T_{\text{DTIM}} - T_p)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

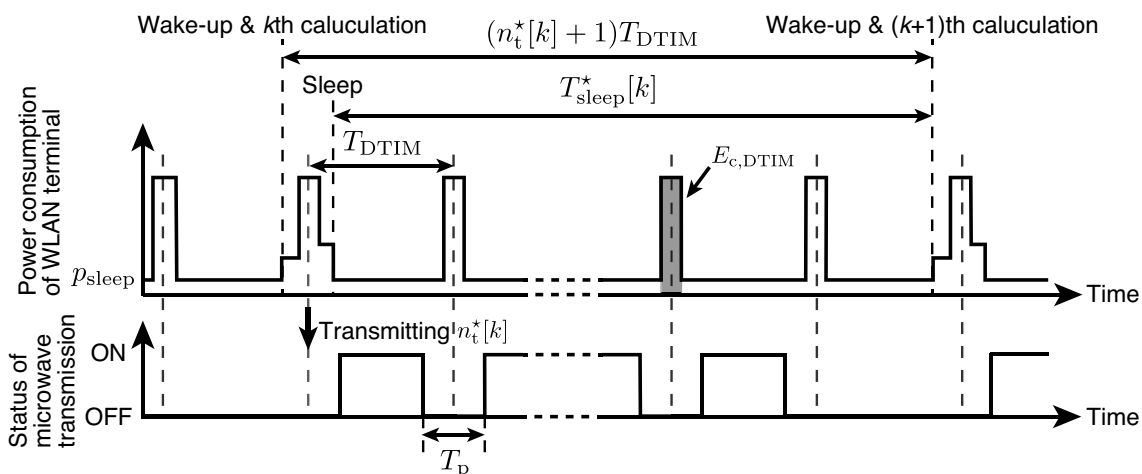


図4 スケジューリングの概形

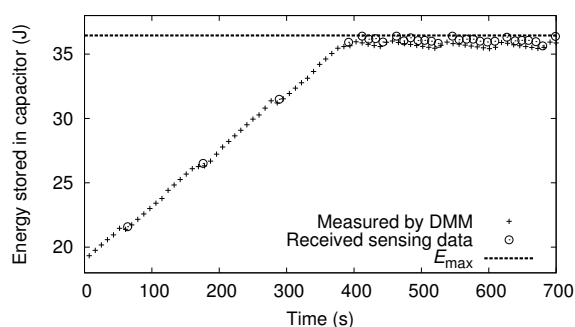
以上が演算 k 回目における $n_t^*[k]$ の決定方法と $k+1$ 回目の演算に使用する $p_t[k]$ の決定方法である。しかし、 $p_t[k-1]$ つまりレクテナからキャパシタへ供給される電力について、 $n_t^*[k] = N$ を選んだ場合においても送電マイクロ波の放射によりキャパシタのエネルギーが増加しなければならない。その条件は以下の式で表される。この式は実験を行う上で最低限満たすべき条件のため、以後 $p_t[k-1]$ がこの式を満たさない場合は $n_t^*[k] = N$ として電力消費を最小限にする。

$$p_t[k-1] > \frac{E_{c0} + N[E_{c,DTIM} + P_{sleep}(T_{DTIM} - T_{rec})]}{N(T_{DTIM} - T_p)} \quad (7)$$

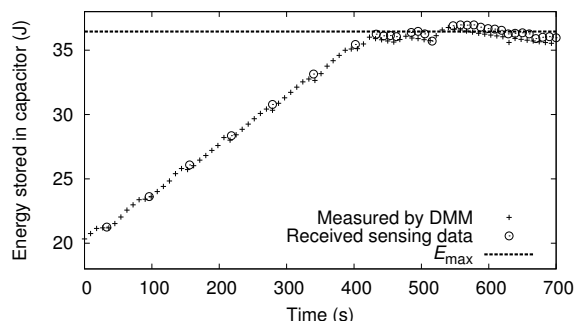
5. 実験結果

実際にマイクロ波給電を使ってスケジューリングし、DMMでの計測により求めたキャパシタの残エネルギーと無線LAN端末が送信したキャパシタ残エネルギーのセンシング情報の時間変化を図5に示す。なお、図5(a)と図5(b)はそれぞれ $N = 10$ 、 $N = 5$ とした場合の実験結果である。4.2の各式で使用したパラメータは表2に示す値とし、この値は実験をする前にプログラムを動作させたときの情報より求めている。初期状態のキャパシタ両端電圧は2V程度であり、パワーメータにより測定したホーンアンテナからの送電出力は4.93Wであった。図5より、通信と給電のスケジューリングにより最終的にキャパシタの残エネルギーを E_{max} 以下かつ E_{max} に漸近するような安定動作が得られている。キャパシタの残エネルギーが E_{max} 以上になっている部分があるが、その原因はMBの電圧測定時に生じる量子化誤差とMBそのものの演算誤差によるものである。図5の直線増加時の傾きより求めた、レクテナからキャパシタへ供給される電力の平均値は71.2mWであった。

実験終了後、ホーンアンテナからマイクロ波を放射しているときのパッチアンテナの受電電力を測定したところ206mWであった。従って、レクテナからキャパシタへの出力が71.2mWであったことを考慮すると、レクテナの変換効率率は34.6%である。それに加えて、ホーンアンテナから送電マイクロ波が放射されているときの各機器のアンテナの場所における電力密度



(a) $N = 10$ の場合



(b) $N = 5$ の場合

図5 キャパシタ残エネルギーの変化

表2 実験時に設定した各パラメータの値

| パラメータ | 値 |
|--------------|---------|
| E_{max} | 36.45 J |
| T_{DTIM} | 10.24 s |
| T_p | 2000 ms |
| $E_{c,DTIM}$ | 17.4 mJ |
| P_{sleep} | 6.6 mW |
| T_1 | 30 ms |
| T_2 | 20 ms |
| T_{rec} | 40 ms |
| E_{c0} | 87.5 mJ |

を、半端長ダイポールアンテナにより計測した。但しこのとき、測定場所のアンテナのみを撤去した状態で測定を行っている。その結果、無線LAN端末内のパッチアンテナにおける電力密

度は 3.73 mW/cm^2 、無線 LAN 端末内の無線モジュールのアンテナにおける電力密度は 0.85 mW/cm^2 、AP のアンテナにおける電力密度は $0.47\text{ }\mu\text{W/cm}^2$ 、送電装置内の無線モジュールアンテナにおける電力密度は 80 nW/cm^2 であった。

6. む す び

本稿では、無線端末の電源供給をマイクロ波電力伝送で行う際の電波の干渉や競合の問題に対して、無線通信を行う時間と給電を行う時間とを分割し、同時に行わないようなシステムを構築した。無線 LAN で通信を行っているため、無線モジュールがスリープ中に AP からの DTIM を受信することを考慮してシステムを構築している。そして実験ではこのシステムに基づいて、マイクロ波電力伝送技術を用いてキャパシタへの電力供給を行った。その結果、キャパシタの残エネルギーを目標値以下かつ目標値に近づけるスケジューリングシステムが実現できた。また、実験中は電波の干渉や競合をすることなく、無線通信と給電とを時間的にスケジューリングすることができている。

今後の課題としては、一つの送電装置に対して複数の無線端末を配置した場合におけるスケジューリング法の検討が挙げられる。

謝 辞

本実験は京大生生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置を利用して行った。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。

文 献

- [1] 篠原真毅, ワイヤレス給電技術の最前線, 株式会社シーエムシー出版, 2011.
- [2] 鈴木望, 三谷友彦, “ZigBee センサーネットワークに対するマイクロ波無線電力供給システムの研究開発,” 信学技報 SPS2009-12, pp.11-15, March 2010.
- [3] 山本高至, 守倉正博, “数万端末競合環境を実現する ENTERPRICE M2M ネットワークの提案,” 信学技報, RCS2011-294, pp. 153-158, Jan. 2012.
- [4] 井元則克, 山下翔大, 山本高至, 守倉正博, “単一无線 LAN 端末への給電・通信スケジューリングの実験,” 信学技報, USN2012-57, Jan. 2012.
- [5] 守倉正博, 久保田周治, 改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書, 株式会社インプレス R&D, 2008.
- [6] Digi International, Inc., “Product Manual: XBee Wi-Fi 802.11BGN Module,” http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002124_F.pdf.