

数万端末競合環境を実現する M2M 無線アクセスネットワーク

M2M Wireless Access Network Consisting of Enormous Number of Terminals

山本高至 守倉正博



スマートグリッド実現のためのスマートメータなどを収容する無線アクセスネットワークは、アクセスポイントごとのサービスエリア半径が大きいことが望まれる。また、サービスエリア半径が大きい状況で競合型のアクセス制御を用いれば、送信権獲得に際して互いに競合する端末数が膨大となる。このような条件の無線アクセスネットワークを実現するための物理/MAC 層の技術として、IEEE 802.11ah にて検討が進められている技術について述べる。また、端末数が膨大となるにつれて求められる高いメンテナンスフリー性を実現するバッテリーレスのための給電技術として、マイクロ波電力伝送を中心に述べる。

キーワード：M2M ネットワーク，IEEE 802.11ah，スマートメータ，ワイヤレス電力伝送，マイクロ波電力伝送

1. ま え が き

スマートグリッドを実現するためのスマートメータなどの新たなデバイスは、これまで困難であったタイプのデータ収集を可能とし、仮想空間の情報通信技術を実空間に結び付けることで新たなサービスを生み出す。新たなデバイスにより新たなサービスを生み出す枠組みは、自然災害予防や保健医療福祉のためにも有望である。様々な目的を持った監視制御アプリケーションの普及のためには、統一的な社会プラットフォームが必要と考えられる。このプラットフォームのアクセスネットワークは、経済性、利便性、サービス展開の早さから、M2M (Machine-to-Machine) 無線ネットワークが中心になると考えられる。

M2M 無線ネットワークの要求条件の一つは、アクセスポイント（基地局）ごとのサービスエリア半径が大きいことである。また、サービスエリア半径が大きいいため、競合型のアクセス制御を用いる場合に送信権獲得に際して互いに競合（コンテンション）する端末数が膨大

となる。一方で、端末当りに要求される伝送速度は小さく、移動体通信システムや無線 LAN で要求される高速大容量と逆の特徴を持つ。

M2M 無線ネットワークのための新たな標準規格の策定に向け、IEEE 802.11ah⁽¹⁾や IEEE 802.15.4k⁽²⁾において議論が行われている。これと並行して、電子タグシステム及び将来的なスマートメータが利用可能なように、日米欧中韓を含む各国で 920 MHz 帯を中心とした帯域の割当が進んでいる⁽³⁾。

M2M 無線ネットワークにおけるもう一つの要求条件として、端末の高いメンテナンスフリー性が挙げられる。特に電源に関してはバッテリーレスを実現するために、一次電池や電力線以外の手段により充電しつつ用いるキャパシタなどの利用も長期的には視野に入れるべきと考えられる。キャパシタへの充電の方法としては、近年研究・実用化が進んでいるワイヤレス電力伝送やエネルギーハーベスティングなどが考えられる。

本稿の構成は以下のとおりである。2. では IEEE 802.11ah のユースケースについて、3. では IEEE 802.11ah の物理/MAC 層の技術についてそれぞれ述べる。4. ではワイヤレス電力伝送やエネルギーハーベスティングなどの給電手法について述べ、特にマイクロ波電力伝送と無線通信を同一周波数帯を用いて行う場合に必要となる時間的なスケジューリングについて述べる。

5. はむすびである。

山本高至 正員：シニア会員 京都大学大学院情報学研究所通信情報システム専攻
守倉正博 正員：フェロー 京都大学大学院情報学研究所通信情報システム専攻
Koji YAMAMOTO, Senior Member and Masahiro MORIKURA, Fellow
(Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-8501 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.96 No.5 pp.330-335 2013 年 5 月
©電子情報通信学会 2013

2. IEEE 802.11ah ユースケース

無線 LAN の標準化を進めてきた IEEE 802.11WG (Working Group) では、従来のブロードバンド路線とは別の新たな M2M 対応の無線アクセスシステムについて検討が始まった。これまで SIG (Sub 1 GHz) Study Group として議論してきた内容をベースに、2010 年 11 月からは Task Group ah (TGah) が正式に発足している。ターゲットの特性は、最大 1 km の伝送距離、最低 100 kbit/s の伝送速度が掲げられている⁽⁴⁾。

TGah において多数提起されたユースケースは、2011 年 3 月の段階で①センサやメータのためのアクセスネットワーク、②センサやメータのためのバックホールネットワーク、③無線 LAN のサービスエリア半径拡大の三つのカテゴリーにまとめられている⁽⁵⁾。

アクセスネットワークのカテゴリーについては、スマートメータのほか、環境モニタリング、ヘルスケアなどのユースケースが示されている。まず挙げられているスマートメータとは、図 1 のように、各家庭の電力計に通信機能を持たせ、電柱などに備え付けるアクセスポイントとの間で双方向通信を行うものである。スマートメータシステムの要求条件としては、スマートメータからの情報の収集とスマートメータの制御のために双方向通信、伝送速度 100 kbit/s 以上、許容パケット誤り率 10% 未満、アクセスポイント 1 台当りの端末数 6,000 とされている。なお、日本の都市部で半径 1 km のサービスエリアを仮定すると、その中の世帯数は多いところで 3 万を超え、ユースケース以上の数の端末が存在する可能性がある。

文献(5)に列挙されている個々のユースケースの要求条件を概観すると、伝送速度は 100 kbit/s から 20 Mbit/s、許容パケット誤り率は 1~10%、アクセスポイント (AP: Access Point) 1 台当りの最大端末数は 50~6,000 台、トラフィックパターンは連続、定期的、バース

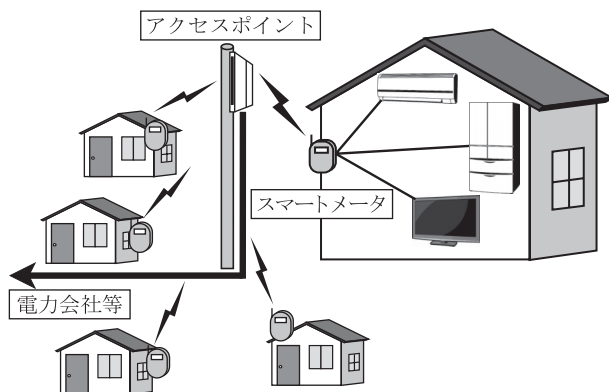


図 1 スマートメータのための無線ネットワーク 各家庭の電力計と、電柱などに備え付けるアクセスポイント間で双方向通信を行う。

ト的、イベント駆動など多様な条件が挙げられている。

また、ユースケース⁽⁵⁾を反映して、要求条件とシミュレーション評価手法が文献(6)にまとめられている。この中でも、スマートメータがシミュレーションシナリオの一つとして挙げられており、一つの AP を中心として半径 1 km のカバーエリア内に 6,000 台の端末が一様ランダムに分布するものとされている。

3. IEEE 802.11ah の物理/MAC 層

IEEE 802.11ah では物理層として 1 GHz 帯以下の免許不要無線周波数バンドで運用する OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式を適用する。MAC 層については IEEE 802.15.4 及び IEEE 802.15.4g システムと共存し、新たな要求に適合できるように通信プロトコル機能の強化を行う。伝送速度に関しては使用できる無線周波数チャネル幅と伝送距離を勘案の上決定する。具体的には 1 km の伝送距離で 100 kbit/s 以上の伝送速度を達成可能とする方式を実現する。本章では、文献(7)に基づき、IEEE 802.11ah にて現在検討が進められている物理/MAC 層の技術について述べる。

3.1 チャネル配置

1 GHz 以下の免許不要無線周波数バンドの代表的なものとして米国の 902~928 MHz ISM (Industrial, Science, and Medical) があり、日本においても 920 MHz 帯が 2012 年 7 月から利用可能となっている。図 2 に日米欧の当該無線周波数バンドにおける TGah で議論されているチャネル配置を示す。

注意が必要なことは、2 MHz モード以上の無線チャネルは中心周波数を自由に選べないことである。このた

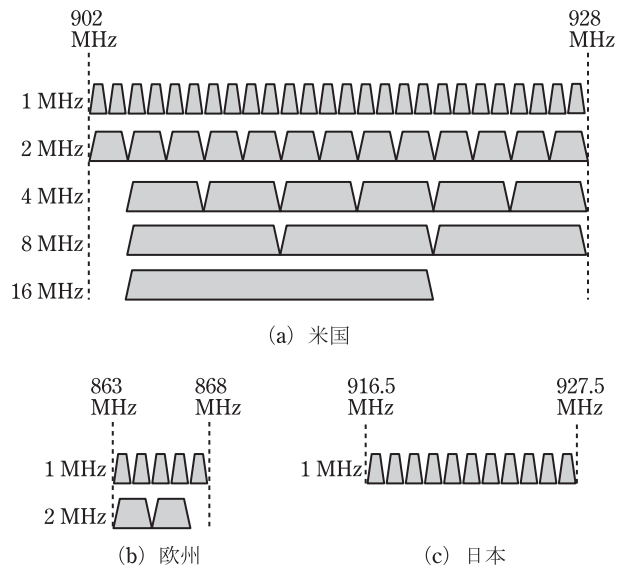


図 2 IEEE 802.11ah 用無線チャネル配置

め、1 MHz モードの無線チャンネルが無秩序に選択されれば、2 MHz モード以上の無線チャンネルについて、利用されていない無線チャンネルを選択できない可能性が高い。例えば図 3 中の “x” 印を付した二つの 1 MHz モードの無線チャンネルが使われている場合、その無線チャンネルにおける通信との競合なく使える無線チャンネルは、黒色で示したものの以外となる。将来のアプリケーションでの利用のため、より高速なモードのための無線チャンネルができる限り多く残るようにチャンネル選択を行う方針が提案されている⁽⁸⁾。

3.2 ダウンクロック方式

無線 LAN チップ開発を効率的に進めるために、既存の無線 LAN 規格を利用して他の新しい無線 LAN 規格の作成が行われることがある。例として 2010 年 7 月に移動体無線アクセス向けに規格が作成された IEEE 802.11p がある⁽⁹⁾。この規格では北米・欧州にて 5.850~5.925 GHz 帯を用いて最大移動速度 200 km/h、最大伝送距離 1 km を狙いとし、チャンネル幅を 5, 10, 20 MHz としている。本節では IEEE 802.11p など

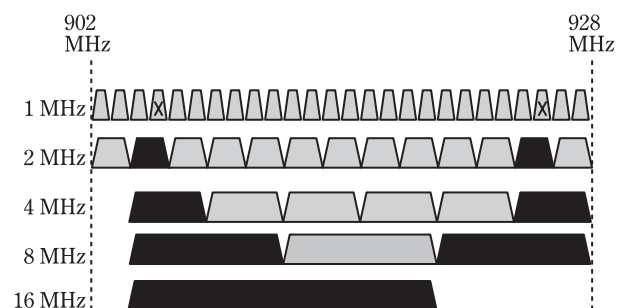


図 3 競合なく利用できるチャンネル “x” 印のチャンネルを用いると、競合なく利用できる広帯域チャンネルは黒色のもの以外となる。

11p などと省略して表現する。11p のチャンネル幅は 11a で用いられている 20 MHz チャンネル幅を基に、無線 LAN デバイスを駆動するクロック周波数を 1/2, 1/4 にダウンクロックする方式により実現している。

11ah における検討でも 11p と同様に 11ac のクロック周波数を 1/10 にダウンクロックする手法を用いる。したがって 11ac における 20, 40, 80, 160 MHz が 11ah における 2, 4, 8, 16 MHz の無線チャンネルに対応する。ただし、11ah では伝送距離を延ばし広域をサポートするため、更に低ビットレートの 1 MHz チャンネル幅をサポートすることになっている。このように多くのチャンネル幅が定義されているが、規格としての必須チャンネル幅は 1 MHz 及び 2 MHz である。

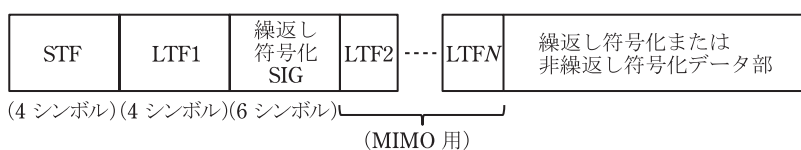
3.3 低伝送速度・広域用の 1 MHz モード

無線チャンネル幅 1 MHz モードのフレームフォーマットを図 4 に示す。プリアンプルの SIG (Signal) フィールドは後続データの伝送レート情報等が含まれる部分で、信頼性を向上させるために OFDM シンボル単位に 2 回繰り返して送信する。1 MHz モードでは伝送距離を拡大するため、データを 2 回繰り返して送信する方式を最低伝送レートの場合に用いる。また空間多重のストリーム数は最大 4 に制限している。

更に図 5 で示すように最低伝送レートの場合、チャンネル幅を 1/2 にするため、IEEE 802.11ac の 52 本のサブキャリアのうち 26 本のみを用いる周波数配置となっている。

3.4 省電力方式

IEEE 802.11ah では低消費電力のセンサ端末から携帯電話のオフロードに用いるブロードバンド端末までが対象となっている。動作モードとしてはセンサ端末モー



STF : Short Training Field, LTF : Long Training Field

図 4 1 MHz モードのフレームフォーマット

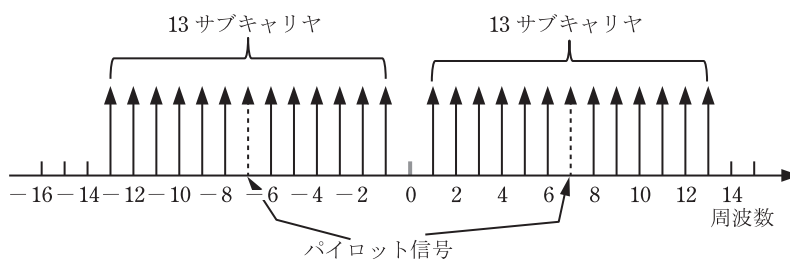


図 5 1 MHz モードのサブキャリア配置

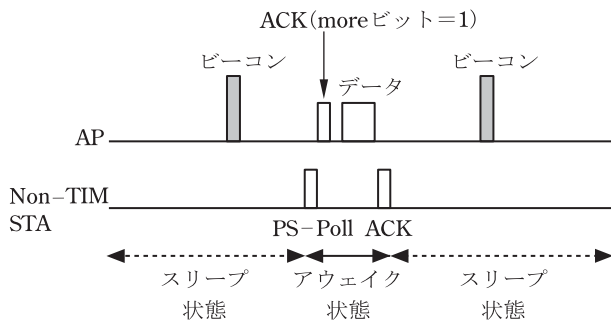


図6 non-TIM STA の PS-Poll 方式

ド、オフロードモード、混合モードの三つが想定されている。M2M 通信で重要な低消費電力用のセンサモードについては以下の点が重要となる。

端末は極力スリープ状態とし、動作を低下させることで消費電力を抑える。特にキャリアセンス時間やビーコン受信時間について従来の IEEE 802.11 規格に対して大幅に修正を加える必要がある。

端末の省電力化を行う場合、AP からの下りデータを受信するため、端末は運用中、ビーコンフレームに含まれる TIM (Traffic Indication Map) 情報だけを受信している。TIM 情報とは省電力モードの端末にデータ着信を知らせるための情報である。しかし、端末は毎回ビーコンフレームを受信しなければならず、消費電力が増加してしまう。この点を改善するため 11ah では、TIM 情報を受信しない端末 (non-TIM STA: Station) を新たに定義し対処する。図 6 に示すように、non-TIM STA は、自局が起動したタイミングで PS-Poll (Power Save-Poll) フレームを AP に送信し、下りデータフレームの有無を問い合わせる。non-TIM STA は以上の動作により、省電力化が可能となる。上りのデータフレームについては自局でデータフレームを送信したいタイミングで起動すればよい。

ただし、non-TIM STA の場合には、下りのデータフレームが既に AP に到達しているときでも、STA が起動するまでは受信することができないため、伝送遅延が大きくなる。したがって、伝送遅延への要求が厳しいアプリケーションには、従来の TIM 情報を用いた PS-Poll 方式が必要となる。

3.5 膨大な端末数により生じる上り回線のふくそう対策

IEEE 802.11ah では、ユースケースで想定されるように 6,000 台のセンサ端末を同時に収容する必要がある。このとき、例えばショッピングモールに設置されたセンサ端末では、火災があったときに煙センサ等が一斉にフレーム送信を試みる、上りトラヒックのふくそうが起り得る。上りトラヒックがふくそうすると、CSMA/CA に基づくシステムでは、スループットが大きく低下す

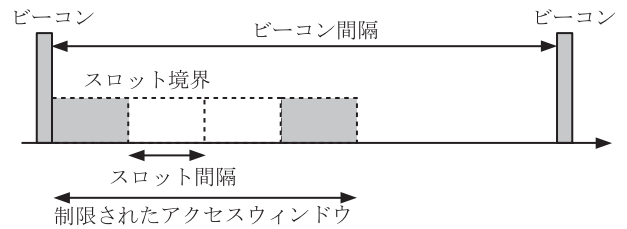


図7 RAW を用いた上り回線のグループ化

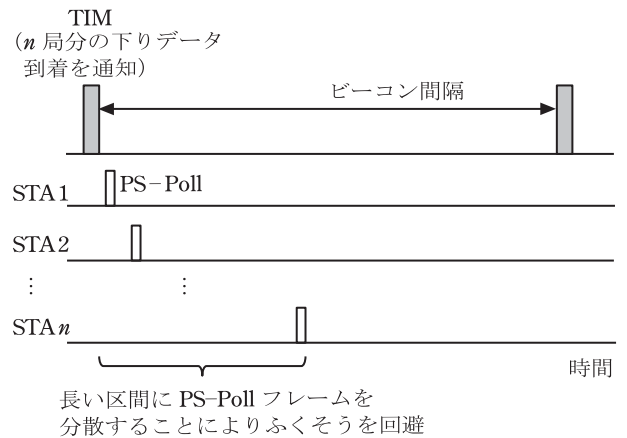


図8 PS-Poll フレームふくそうの対策

る。この上りトラヒックのふくそうを緩和するには、同時にフレーム送信を試みる端末数を意図的に減らせばよい。具体的には図 7 に示すように、制限されたアクセスウィンドウ (RAW: Restricted Access Window) を新たに設ける。RAW 内に複数個のスロットに分割し、どのグループに各端末が属するかは TBTT (Target Beacon Transmission Time) のタイミングにおいてビーコンフレームを受信し該当のスロットを識別する。自局に割り当てられたスロットにおいて、CSMA/CA プロトコルによるアクセス制御を行う。自局に割り当てられたスロット以外ではスリープ状態になることも可能である。

また、ビーコンフレームに含まれる TIM 情報を多くの端末が受信した場合、当該端末は一斉に PS-Poll フレームを AP に送信しふくそうが生じ、伝送特性が劣化する。この課題に対処するため図 8 に示すように、一斉に PS-Poll フレームを送信しない工夫として、ある時間幅を設定し、時間的に分散させる方法が提案されている。この分散方法としてはランダムに分散する方法と端末識別子である AID (Association Identifier) を利用して規則的に送信時間タイミングを決定する方法がある。

4. メンテナンスフリーのためのマイクロ波電力伝送

自然災害予防システムなどで端末数が膨大になると、

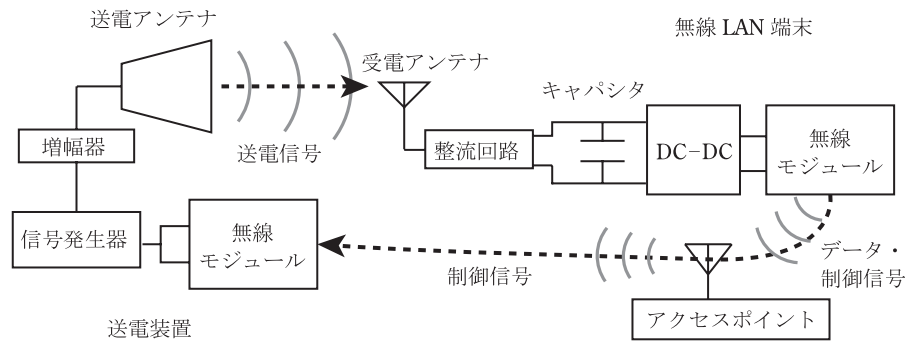


図9 給電・通信システムの構成例

端末に高いメンテナンスフリー性が求められるようになる。特に電源に関しては、バッテリーレスが望ましいと考えられる。この理由は、一次電池を端末の電源に用いると電池消耗時の交換が必要であり、また二次電池にも寿命⁽¹⁰⁾があり長期的には交換が必要であることである。したがって、電力線以外の何らかの手段でのその場での給電や、電気二重層キャパシタ等に充電しながらの給電を、長期的には視野に入れて検討する必要がある。

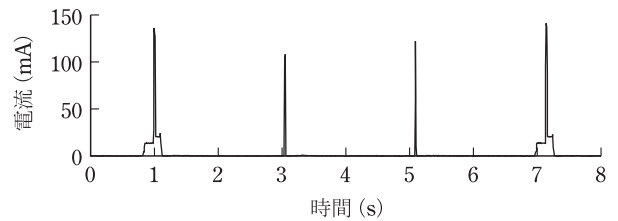
4.1 バッテリーレスのための給電手法

バッテリーレスを実現する給電手法として、ワイヤレス電力伝送⁽¹¹⁾やエネルギーハーベスティング（環境発電）⁽¹²⁾がある。エネルギーハーベスティングは、光やマイクロ波を含む電磁波、振動、熱など、環境中に存在するエネルギーを回収する技術である。一方、ワイヤレス電力伝送は、電磁波を介在させて能動的にエネルギーを送送する方法であり、手法として電磁誘導、磁気共鳴、マイクロ波給電が知られている。

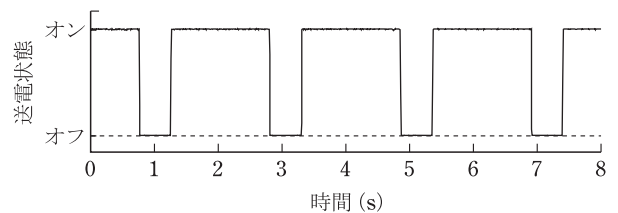
このような給電手法は、適材適所で使い分けられていくと考えられる。例えば、太陽光のある屋外であれば太陽電池が適切であろう。一方、屋内や短距離伝送には近年研究開発が進んでいるワイヤレス電力伝送や、振動や熱エネルギーによるエネルギーハーベスティングの利用が考えられる^{(13)~(15)}。特に、監視制御アプリケーションは常時通信を行う必要のないものが多く、送受信動作を行う時間割合で定義されるデューティ比が小さくても許容されるのであれば、供給電力の小さい給電方法も電源の候補となり得る。重要なことは、通信を可能とするために無線リソースだけでなくエネルギーも必要になることである。このため、供給電力に応じたデューティ比の適応的な調整⁽¹⁶⁾等が重要な技術になると考えられる。

4.2 マイクロ波電力伝送

ワイヤレス電力伝送の中で原理的に伝送可能距離の最も長いものがマイクロ波電力伝送である。マイクロ波電力伝送には、電波防護指針⁽¹⁷⁾により空間内の電力に例えば 1.5 GHz 以上では 1 mW/cm^2 という制約があるも



(a) センサ端末の消費電流



(b) 送電装置からの送電の有無

図10 給電・通信スケジューリングの実例

の、1 cm 四方の面積で原理的には最大 1 mW の給電が可能である。仮に省電力化が進んでいる無線 LAN チップの消費電力として、送受信動作時に 100 mW、スリープ時に GainSpan 社 GS1011M を参考とし数 μW と仮定すると、単純にはデューティ比を 1/100 程度に抑えればよい。もちろん、利用場面に応じて、受信点以外の点での電力の制約や、距離減衰を含めた検討は必要である。

ただし、受信電力が大きいマイクロ波電力伝送を行う場合、通信と別帯域を用いるとしても通信の受信フィルタに給電電力が干渉として漏れ込む可能性がある⁽¹⁸⁾。このような場合には、時間的に給電と通信を直交させた動作が必要となり、常時給電でなく間欠給電となる。

また、複数の端末に給電するためにも時間的なスケジューリングが必要である。更に、定期的なデータ駆動の packets と、緊急情報収集のようなクエリ駆動の packets など多様なものが考えられ、加えてこれらの間のトレードオフの関係を念頭に設計する必要がある。

通信として 2.4 GHz 無線 LAN を用いる際の給電・通信システムの構成を図9に示す。このシステムは送電装置、無線 LAN 端末、AP から構成されている。無線

LAN 端末はセンサのようなイメージであり、データを AP に送るだけでなく、給電のための制御情報を AP 経由で送電装置に送る。また、給電・通信スケジューリングの実装例を図 10 に示す⁽¹⁹⁾。無線 LAN 端末は、2,048 ms おきに送信している DTIM (Delivery Traffic Indication Message) の含まれるビーコンの受信タイミングの前後以外はスリープさせている。図 10(a)はセンサ端末の消費電流の実測値であり、DTIM の含まれるビーコンの受信タイミングの前後で大きな消費電流が計測されているほか、特に時刻 1 s, 7 s 付近ではセンサデータの送信も行っており、消費電流が更に高くなっている。図 10(b)は送電装置からの送電の有無の実測値であり、DTIM の含まれるビーコンの前後を除外して送電できていることが確認できる。

5. む す び

M2M 無線アクセスネットワークの要求条件として求められる、伝送速度は低いもののサービスエリア半径が大きく、膨大な数の端末の収容を可能とするための物理/MAC 層の技術として、IEEE 802.11ah にて検討が進められている内容を述べた。標準規格だけでなく帯域割当も各国で進行しているため、M2M 無線アクセスネットワークは実利用が目前に迫っている注目すべきトピックと考えられ、ここ 5 年程度の喫緊の課題である。

もう一つの要求条件として、メンテナンスフリーを実現するバッテリーレスのための技術について述べた。特に給電と通信のスケジューリングは、今後 10 年程度の長期的な課題である。

謝辞 本稿の一部は科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 24360149) によるものであり、数万のバッテリーレス端末による M2M 無線ネットワークを ENTERPRICE M2M ネットワーク (Machine to Machine network consisting of Enormous Number of TERminals without PRImary CELls) と名付けて研究を進めているものである。

文 献

- (1) IEEE 802.11 Task Group ah (TGah) Sub 1 GHz license-exempt operation, http://www.ieee802.org/11/Reports/tgah_update.htm.
- (2) IEEE 802.15 WPAN Task Group 4k (TG4k) Low Energy Critical Infrastructure Networks, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4k.html>.
- (3) 総務省, “ワイヤレスブロードバンド実現のための周波数検討ワーキンググループとりまとめ,” Nov. 2010.
- (4) D. Halasz, “Sub 1 GHz license-exempt PAR and 5C,” IEEE 802.11-10/0001r7, July 2010.
- (5) R. d. Vegt, “Potential compromise for 802.11ah use case document,” IEEE 802.11-11/0457r0, March 2011.
- (6) M. Cheong, “TGah functional requirements and evaluation methodology,” IEEE 802.11-11/0905r5, Jan. 2012.

- (7) M. Park, “Proposed specification framework for TGah,” IEEE 802.11-11/1137r11, Sept. 2012.
- (8) H.-R. Shao, C. Ngo, Y. Seok, J. Choi, J. Kim, J.S. Kwak, C.C. Wang, J. Wang, J. Liu, V. Ponnampalam, J. Yee, T. Pare, K. Uln, M. Fischer, E. Wong, F. Tong, S. Aust, M. Park, T. Tetzlaff, E. Qi, Y. Liu, H. Zhang, S. Srinivasa, S. Merlin, A. Asterjadhi, A. Jafarian, S. Abraham, M. Wentink, H. Sampath, V.K. Jones, G. Calcev, O.A. Magd, Y. Hoon, B. Zhao, D. Yangxun, B. Zhen, S. Bo, L. Kaiying, M. Cheong, J.S. Lee, H. Kwon, H. Yu, J. Park, S.-k. Lee, S. Choudhury, T. Kim, K. Doppler, C. Ghosh, E. Tuomaala, R. Chitrakar, K. Mori, S. Zheng, H. Wang, W.L. Yeow, Z. Lei, J. Shankar, A.T. Hoang, J.T.C. Ming, S. Shimada, M. Iwaoka, D. Gong, Z. Luo, “Channel selection for 802.11ah,” IEEE 802.11-12/0816r0, July 2012.
- (9) IEEE Std 802.11p-2010, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, Amendment 6: Wireless access in vehicular environments,” July 2010.
- (10) S. Roundy, P.K. Wright, and J. Rabaey, “A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,” Computer Communications, vol. 26, no. 11, pp. 1131-1144, 2003.
- (11) 篠原真毅, “無線電力伝送の概要と動向,” 信学誌, vol. 95, no. 1, pp. 34-37, Jan. 2012.
- (12) 桑野博喜, エネルギーハーベスティング技術の最新動向, シーエムシー出版, Oct. 2010.
- (13) A. Kansal and M. Srivastava, “An environmental energy harvesting framework for sensor networks,” Proc. the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design 2003 (ISLPED '03), pp. 481-486, Aug. 2003.
- (14) 篠原真毅, 松本 紘, 三谷友彦, 芝田裕紀, 安達龍彦, 岡田寛, 富田和宏, 篠田健司, “無線電力空間の基礎研究,” 信学宇宙太陽発電研資, SPS2003-18, pp. 47-53, March 2004.
- (15) 阪口 啓, ラギルプロトワイヤレスグリッド, 水谷圭一, タンザカン, “電力伝送と融合したワイヤレスグリッド,” 信学技報, RCS2009-316, pp. 339-344, March 2010.
- (16) J. Hsu, S. Zahedi, A. Kansal, M. Srivastava, and V. Raghunathan, “Adaptive duty cycling for energy harvesting systems,” Proc. the 2006 international symposium on Low power electronics and design (ISLPED '06), pp. 180-185, Oct. 2006.
- (17) 総務省, “電波防護指針,” 電気通信技術審議会答申諮問第 38 号電波利用における人体の防護指針, June 1990.
- (18) 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,” 信学宇宙太陽発電研資, SPS2009-12, pp. 11-15, March 2010.
- (19) 山下翔太, 井元則克, 市原卓哉, 山本高至, 守倉正博, 篠原真毅, “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の実験,” 2013 信学総大, no. B-19-1, p. 545, March 2013.

(平成 24 年 11 月 30 日受付 平成 25 年 1 月 29 日最終受付)



やまもと こうじ
山本 高至 (正員: シニア会員)

平 14 京大・工・電気電子卒。平 17 同大学院情報学研究所博士課程了。同年同大学院助手。平 23 同准教授。平 20~21 スウェーデン王立工科大客員研究員。博士 (情報学)。M2M 無線ネットワーク, ゲーム理論の応用に関する研究に従事。本会平 19 年度学術奨励賞, 平 22 年度論文賞各受賞。



もりくら まさひろ
守倉 正博 (正員: フェロー)

昭 54 京大・工・電気第二卒。昭 56 同大学院工学研究所修士課程了。平 19 同大学院情報学研究所教授。昭 63~平元カナダ政府通信研究所客員研究員。博士 (工学)。衛星通信用 TDMA 装置, 高速無線 LAN 装置の研究に従事。平 11 年度本会論文賞, 平 17 年度本会業績賞, 平 19 文部科学大臣表彰各受賞。