

スマートネットワーク向け 無線マルチホップ通信技術

野崎 正典
久保 祐樹

西村 弘志
柳原 健太郎

近年、ICT技術を用いて電力網インフラの高機能化を実現するスマートグリッドや、情報システムやエネルギーシステム、交通システムなどが融合した新しい社会インフラとしてのスマートコミュニティが注目されている¹⁾。このスマートコミュニティを構成する要素技術として、電力使用量を測定するスマートメータや、太陽光発電で使用されるパワーコンディショナなどの装置を無線で互いに接続する無線マルチホップ通信が期待されている。一般的にこれらの装置は軒先やメータボックスに設置されるため、装置間の通信環境は見通し外となることが多い。そのため無線の特性としては、回り込み特性が良く、電波到達距離が長いことが要求される。そこで我々は、従来広く使用されている2.4GHz帯と比べて周波数が低い950MHz帯に着目し、国内規格であるARIB STD-T96²⁾および国際標準であるIEEE802.15.4d³⁾をベースとした無線マルチホップ通信方式の検討を行った。

システム構成

本稿で想定するネットワークシステムの構成例を図1に示す。本システムは、無線装置(WD:Wireless Device)、基地局(BS:Base Station)、ゲートウェイ(GW:Gateway)などから構成される。以下に各装置の特徴を示す。

WD：温度／湿度／照度、電力使用量などの各種センサ情報を測定し、無線マルチホップを用いて、収集したデータをBSへと中継する。

BS：WDで測定したデータを集約し、有線ネットワークを介してGWに中継する。できるだけ1ホップで接続可能なWD数を増やすため、当該装置は柱上や見通しの良い場所に設置する。

GW：複数のBSと有線ネットワークで接続され、収集したデータの保持やWDの管理機能などを備える。またBSに障害が発生した時に、障害BSに接続しているWDを隣接BSに切替える機能も備える。

このように、無線と有線を組み合わせたハイブリッドな階層的構造とすることで、数万台規模のネットワークシステムの構築を可能とする。

*1) ZigBee は、ZigBee Alliance, Inc. の登録商標です。

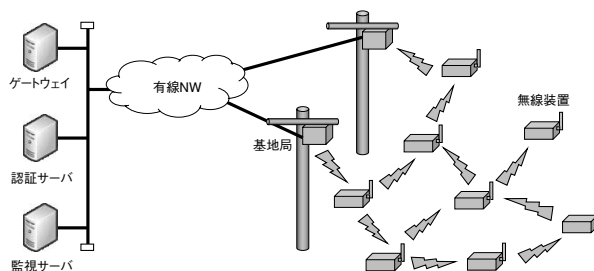


図1 システム構成例

従来方式の課題

本稿のネットワークシステムの主機能は、複数のWDで測定したデータをBS及びGWで収集することにある。このようなデータ収集型のトラフィックにはツリー型のトポロジーが適しており、そのようなルーティングプロトコルとしてZigBee^{*1)} 2007 Proスタックで定義されたMany to One方式⁴⁾が挙げられる。ただしZigBeeはHAN(Home Area Network)などの屋内の小規模なシステムへの適用を前提としているため、Many to One方式を本稿で想定するシステムに適用する場合に、以下の3つの課題が挙げられる。

① 屋外環境への対応

屋外に設置された環境では、ヒトや車などの障害物の影響により、WD間の無線リンクの品質が変動し、リンク瞬断によるパケット廃棄が発生する。この対策として、End to Endの再送制御が考えられるが、マルチホップ環境においては、途中まで中継されたパケットを送信元から改めて中継することとなり効率が悪い。そのためマルチホップ環境に適した再送制御が必要となる。

② 大規模化への対応

RREQ(Route Request)を受信したWDは必ず1回はRREQを再中継するため、WD数の増加につれて、制御トラフィック量が增大する。また、WD数が増加すると、全WDから送信されるRREC(Route Record)数も増加するため、BS周辺の無線帯域を圧迫する恐れがある。このため大規模な環境においては、できるだけ制御トラフィック量を削減することが必要となる。

③ 耐障害性への対応

長期間にわたり屋外に機器を設置する場合、機器故障などの障害対策を考慮する必要がある。障害対策の一般的な方法として設備の二重化が挙げられるが、全てのBSを二重化すると設置コストが増大してしまう。そのためBSの障害時には、自動的に正常なBSへと接続を変更するような耐障害機能が必要となる。

提案方式と特徴

前述した課題を解決するために、Many to One方式の改良方式の検討を行った。以下に改良方式の基本的動作について説明する。まず、各WDは、1ホップのブロードキャストでHelloを定期的送信し隣接WDを検出する。Helloを受信した隣接WDは、Helloの受信率や受信強度などから隣接WDとの双方向リンクコスト(LC)を算出する。この様子を図2に示す。

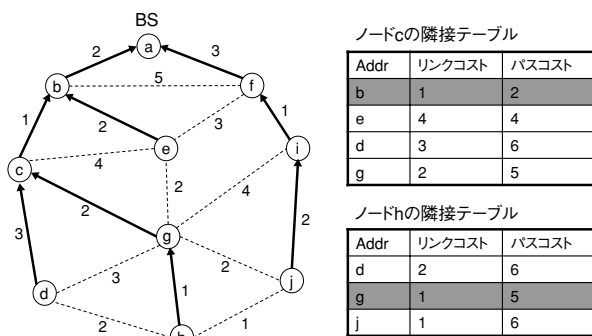


図2 上り経路の生成

図2ではaをBSとし、破線は接続可能な無線リンクを、リンク横の数字はLCを、実線矢印はBSまでの上り経路を示している。Helloにはパスコスト(PC)も記載され、WDから見てGWまでのLCの総和が最小となる値がPCとして伝搬される。各WDはこのPCに従って、上り経路の中継先となる親WDを選定する。

屋外環境への対応として、従来のEnd to Endの再送ではなく、中継に失敗したWDから中継を再開するHop by Hopの再送を行う。Hop by Hopの再送では、データリンク層での再送が失敗した時、ネットワーク層で数百msのオーダでパケットを保持し、周辺の輻輳状態が解消される頃を見計らってパケットの再送を行う。ただし、このネットワーク層での再送でもパケット到達が確認できない場合、送信先が輻輳中もしくは障害状態にあると判断し、一時的に中継先を変更する。この場合、現在の親WDの次に低いPCを持つWDを次の親WDとして選定する。以上の動作により、パケットの中継ロスが減少し、BSで

のデータ収集率の向上が可能となる。

大規模化への対応として、全てのWDから定期的送信されるRRECの削減方法の検討を行った。RRECには途中の経路情報が含まれるため、末端のWDが送信したRRECのみで全WDへの下り経路を作成することができる。そこでRRECの送信タイミングを調整することにより、中継WDからGWに送信されるRRECを削減する。この様子を図3に示す。

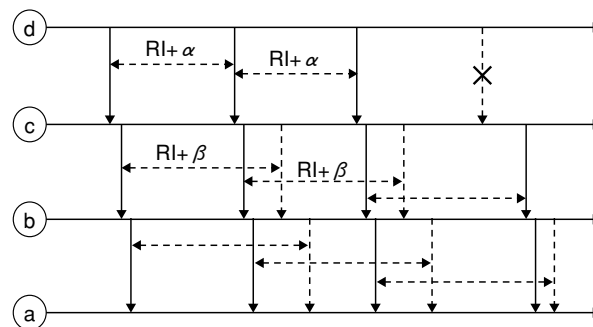


図3 送信タイミングの調整例

図ではRRECがd⇒c⇒b⇒aと中継される場合を示している。各WDはRREC送信周期RIにランダム揺らぎαを加えた間隔でRRECの送信を行う。dが送信したRRECを中継したcは、自身のRRECを送信する時刻をRI+β後に変更する。これにより、cはdからRI+β以下の間隔でRRECを受信する限り、自身のRRECを送信しない。もし、dがRI+αの時刻以内にRRECを送信せず、Cの送信予定時刻であるRI+βが経過した場合、Cは自身からのRRECを送信する。以上の動作により、末端WD以外のRRECが送信されなくなるため、RRECによる制御トラフィック量の削減が可能となる。

耐障害性への対応として、WDが接続しているBSの障害を自動的に検出し、隣接するBSに動的に経路を切替える方法の検討を行った。ネットワーク構成として1つのGWに対して複数のBSを有線ネットワークで接続する構成とした。この様子を図4(次ページ)に示す。障害発生前は、全BSからHelloが送信されるため、各ノードはPCの低いBSを選択し、左図のように最寄りのBSを経由してGWと接続する。この時BS2が障害により停止し、Helloが送信されなくなると、BS2周辺のWDは他BSから伝搬されるPCの方が低くなるため、他BSへと経路を変更する。以上の動作により、新たな制御情報の追加の必要なく、障害時におけるBSの動的な切替が可能となる。

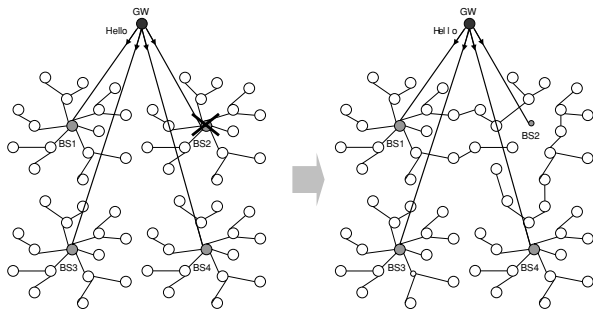


図4 BS切替の様子

検証システムの開発

前章で述べた改良方式の性能を検証するために、950MHz帯無線を用いた検証システムを開発した。開発したWDのハードウェア諸元を表1に示す。

表1 ハードウェア諸元

機能	仕様
無線部	周波数帯：950MHz～956MHz 変調方式：GFSK 通信速度：100kbps 無線規格：IEEE802.15.4d 最低受信感度：-100dBm 送信出力：+3dBm
アンテナ	外付けロッドアンテナ
インタフェース	シリアルIF：RS232C センサIF：D/IO, A/I
消費電力	0.5W
サイズ	148mm (W)×77mm (D)×28mm (H)

本検証システムのソフトウェア構成を図5に示す。WDのソフトウェアはPHY/MAC層をIEEE802.15.4dに準拠し、NWK層にMany to One改良方式を実装した。APS層(アプリケーションサポートレイヤ)にはポート番号ごとにパケットを振り分ける機能を持ち、その上位層に評価用アプリを実装した。評価用アプリには、WD間の受信

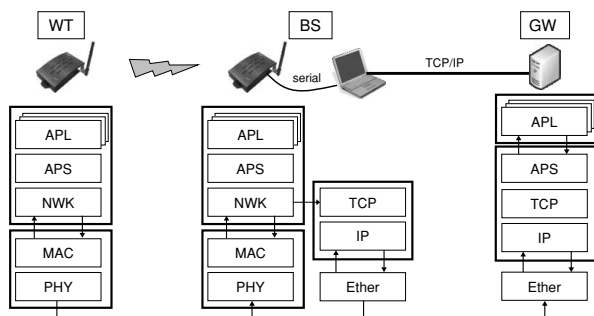


図5 ソフトウェア構成

電界強度やパケットエラー率、スループットや遅延の測定など、数種類の機能を実装した。GWには下り経路の管理機能を実装しており、複数のBSとの接続を可能としている。またGWは上位のアプリケーションともTCP/IPで接続する機能を持っているため、ネットワーク管理機能と評価アプリを別の装置上で実行することも可能である。

実機を用いた性能評価

試作した950MHz帯のWDの基本性能を評価するために、社内敷地内での屋外電波伝搬測定を行った。BSは、ポールをワイヤで固定し、アンテナ高が6mとなるように設置した。WDは移動局として、キャスタ付きの台にアンテナ高が2mとなるように設置した。また2.4GHz帯のZigBee装置を同様に設置し、送信出力1mWでの電波伝搬特性の比較を行った。この様子を図6に示す。

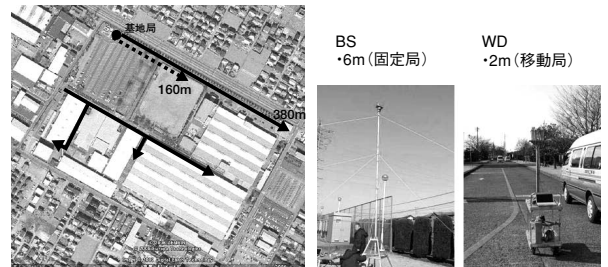


図6 電波伝搬測定の様子

図の実線の矢印は950MHz帯の特性を、破線の矢印は2.4GHzの特性を示している。2.4GHzの測定結果では、160m付近でパケットエラー率が99%となりBSとの接続が困難となった。それに対して950MHzでは、直線距離で380m以上の電波到達が可能であった。また950MHzは、建物の影など見通し外環境においても電波の回り込み特性が良いことが分かった。なお、後日別の場所で測定し、送信出力が10mWの場合、見通し内環境において1500m程度の到達距離が可能となることを確認した。

次に社内に110台のWDを設置し、ネットワークの性能評価を行った。実験パラメータとして、Hello送信間隔(HI)を64秒、RREC送信間隔(RI)を512秒とし、異なるフロアごとにBSを2台設置した。動作手法としては、従来の再送なしに加え、改良手法であるリンク再送/経路切替手法の3種類の手法の比較を行った。この結果を図7に示す。図の横軸はランダム発生区間を、縦軸はGWでのデータ到着率を示している。図よりランダム発生区間が短いほどトラフィックが集中し、パケットのロスが発生しているが、リンク再送や経路切替によりデータの到着率が改善していることが分かる。

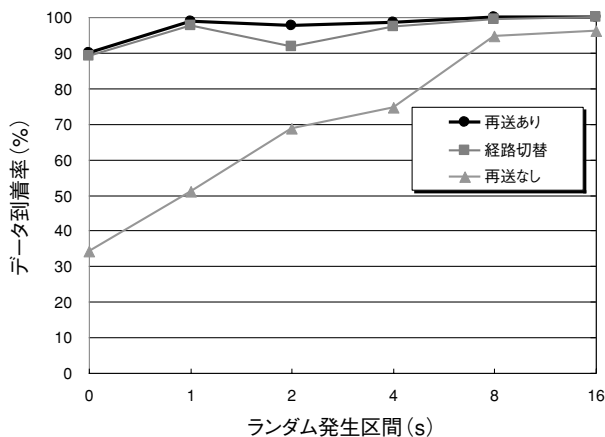


図7 データ到着率

次にRREC最適化の効果を検証するために、RRECの送信モードを変更し、GWでのRREC受信パケット数を測定した。また、親WDを変更した時に即座にRRECを送信するリアクティブモードも実装し、従来のプロアクティブモードと比較して4種類のモードの比較を行った。この結果を表2に示す。

表2 RRECの受信率

モード	RREC受信数(pkt/h)	増減率
Proactive	1549	1
Reactive	1886	1.21
Optimize	1163	0.75
Reactive + Optimize	1719	1.10

表はGWで受信した1時間あたりのRREC受信数と、プロアクティブモードを基準とした場合の各モードのRREC増減の割合を示している。表より、プロアクティブモードと比べて、RREC最適化は25%のRRECを削減できることが分かる。

さらにBSの動的切替機能を検証するために、2台のBSのうち1台を停止させ、正常なBSですべてのWDからのRRECを受信するまでの時間を計測した。この結果を図8に示す。左図はBS1に障害が発生した場合、右図はBS2に障害が発生した場合である。図よりHIが短い程、全体の切替時間が短いことが分かる。これはHelloの交換により正常なBSの情報が伝搬される時間が短くなるためである。リアクティブモードではプロアクティブモードに比べて切替時間が短くなり、さらに最適化モードを併用することで切替時間を短縮することが可能となる。

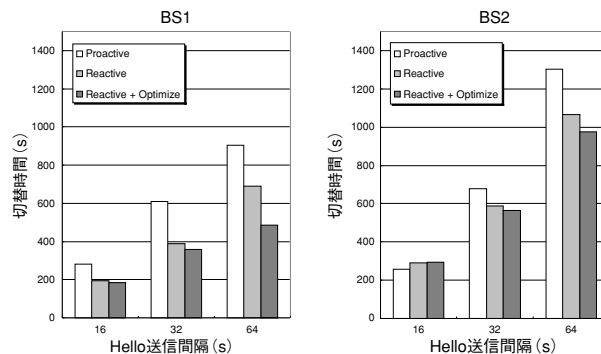


図8 BSの切替時間

まとめ

大規模なセンサネットワークシステムにおいて、制御トラフィックの削減とデータ到着率の改善及び障害時の信頼性を向上する無線マルチホップ通信方式を提案した。現在、装置のIPv6化に向けてIETFで標準化されている6lowpanやrplなどの機能を開発中である。また本稿で述べた方式は下位層でのメッシュ機能であるmesh-under方式としてIPv6化を実現している。◆◆

参考文献

- 1) スマートコミュニティフォーラムにおける論点と提案
<http://www.meti.go.jp/press/20100615006/20100615006-2.pdf>
- 2) STD-T96特定小電力無線局950MHz帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備、社団法人電波産業会、2008年6月
- 3) "Amendment 3:Alternative Physical Layer Extension to support the Japanese 950MHz bands", IEEE802.15.4d, 2009年4月
- 4) ZigBee Specification, ZigBee Document 053474r17, ZigBee Alliance, pp.392-402, October 2007

筆者紹介

野崎正典: Masanori Nozaki. 研究開発センタ システム技術研究開発部
 西村弘志: Hiroshi Nishimura. 研究開発センタ システム技術研究開発部
 久保祐樹: Yuki Kubo. 研究開発センタ システム技術研究開発部
 柳原健太郎: Kentaro Yanagihara. 研究開発センタ システム技術研究開発部