

スマートメータ用マルチホップ通信システム

Scalable Multi-Hop Network System for Smart Meters

岡田 幸夫
Yukio Okada

土橋 和生
Kazuo Dobashi

梅田 直樹
Naoki Umeda

佐々木 貴之
Takayuki Sasaki

要 旨

大規模ネットワークに対応可能で、900 MHz帯特定小電力無線および電力線通信の両方に適したマルチホップ通信プロトコルを開発し、親機1台あたり端末2000台規模のスマートメータシステムを実現可能なことを実環境評価により確認した。ルート探索対象を大幅に限定し、さらに相関性を考慮した複数のルートを生成することにより、ルーティング負荷の低減と伝送特性の変動に対する追従性向上という相反する課題を解決した。また、リンク品質やホップ数だけでなく、参入端末数を考慮したネットワーク形成や、マルチホップセル間の干渉を抑制するための完全分散型の動的周波数チャネル割り当てを実現することにより、親機設置設計の容易化と運用保守の省力化を可能とした。

Abstract

We have developed a scalable multi-hop routing protocol suitable for both 900 MHz wireless and power-line communication, and confirmed through field experiments that it can be applied to large-scale smart-meter networks of up to 2000 nodes. The contrary issues of low control overhead and high adaptability to varying transmission characteristics have been coped with by restricting the route discovery area and generating multiple routes with low correlation. Moreover, network formation based on not only link quality and hop count but also on the number of participating nodes, and fully distributed dynamic channel allocation to mitigate interference between multi-hop cells have been achieved, which facilitates deployment planning and operation management.

1. はじめに

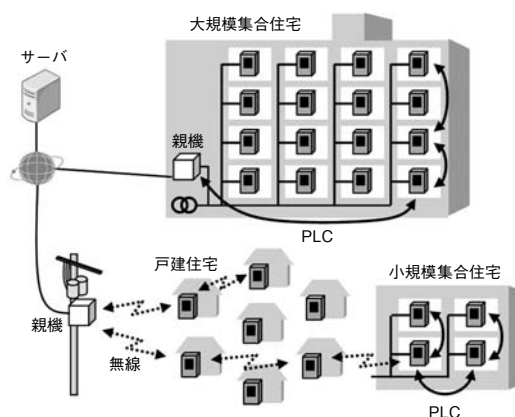
東日本大震災後の電力供給不足を受けて、再生可能エネルギーや省エネ型社会への関心が高まっている。これにともない、ピーク電力の抑制や電力安定供給実現のため、消費電力の可視化や需給制御などの機能を備えたスマートメータが注目を集めており、今後スマートメータを積極的に導入していくことが、政府方針でも示されている。

スマートメータに用いる通信方式として、特定小電力無線や電力線通信（PLC：Power Line Communication）が挙げられるが、直接通信だけで広範囲をカバーするのは困難であり、端末間で中継を行うマルチホップ通信が必須である。筆者らは、これまでにPLC用マルチホップ通信技術を開発し[1]、集合住宅向けのスマートメータや電力制御システムを実用化してきたが、これをベースに、900 MHz帯無線を用いた大規模ネットワークに適用するための開発を行った。本稿では、開発したマルチホップ通信プロトコルの原理と、実環境での性能評価に関して述べる。

2. スマートメータシステムの概要

スマートメータシステムは、各住戸の電力メータが通信機能を備え、集約装置である親機を介して電力会社

サーバなどと通信を行うものであり、電力量データを収集する遠隔検針や、電力会社の需給状況を通知して、需要家側で消費電力を削減するデマンドレスポンスなどを実現する。第1図のように集合住宅や戸建などの利用環境に応じて、電力配線形態や電波伝搬などの特性が異なるため、適切な通信方式を使い分けることが重要である。例えば、集合住宅では、パイプシャフト内に設置されたメータ間の電波伝搬ロスが非常に大きい場合があるため、PLCが有効である。戸建の場合は、柱上変圧器が分散しているため、PLCで広範囲をカバーするのは困難であり、無線が適する。小規模集合住宅の場合は、無線と



第1図 スマートメータシステム構成

Fig. 1 Diagram of smart metering system

PLCが混在したハイブリッド型も適用可能である。

マルチホップ通信において通信信頼性を高めるためには、リンク品質やホップ数などを考慮して、最適な中継ルートを生成する必要がある。しかしながら、ルート探索のために必要な情報は、ノード数の増加にともなって飛躍的に増大するため、既存のルーティングプロトコルでは大規模ネットワークに対応困難である。

また、親機ごとに構成されるマルチホップセル間の信号干渉を抑制することも重要である。現在、特定小電力無線用に950 MHz帯が割り当てられているが、2012年に920 MHz帯への移行が予定されている。この帯域は、さまざまな用途に利用されることが予想されているため、他システムとの干渉も無視できない。

そこで、大規模ネットワークに対応可能なマルチホップルーティングプロトコルと、システム内外の干渉を抑制するための動的周波数チャネル割り当てアルゴリズムを開発した。通信信頼性の確保だけでなく、システム導入時の設定や運用保守の省力化も可能な設計とした。

3. マルチホップルーティングプロトコル

3.1 課題

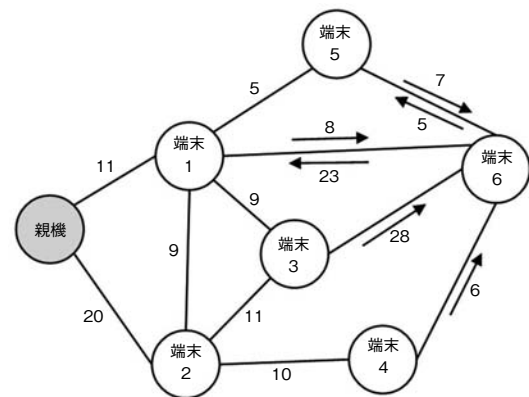
中継ルートを生成するためのルーティングプロトコルは、リアクティブ型とプロアクティブ型に大別できる。リアクティブ型は、通信要求発生時に宛先端末までのルートを探索する方法で、AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) やDYMO (DYnamic MANET On-demand routing) が標準化されている。ルート要求パケットをフラディングするため、端末台数が多くなると輻輳しやすく、大規模ネットワークには適さない。また、リンク品質を考慮したルート生成も困難である。

プロアクティブ型は、定常的にリンク情報を交換してルートを生成する方法であり、OLSR (Optimized Link State Routing) が代表的である。リンク品質を考慮したルート生成にも対応しやすく、スマートメータ用に適している。ただし、標準的なプロトコルでは、端末数の増加にともなってルート探索トラフィックが急増するため、数千台の大規模ネットワークには対応困難であり、また、伝送環境の変動に対する追従性も不十分である。

これらの課題を解決すべく開発したプロアクティブ型ルーティングプロトコルCMSR (Centralized Metric based Source Routing) の特徴を述べる。

3.2 低トラフィックでのルート検索

ルート探索トラフィックを低減するため、以下のような方式とした。



第2図 論理トポロジー

Fig. 2 Logical topology

- 1) フラディングを使用せず、親機までのルートに限定して探索
- 2) 仮のルートコストが良好な少数ノードに限定してリンク品質情報を交換
- 3) リンク品質調査後は、大きな変化がある場合のみ再調査 (差分情報のみを交換)

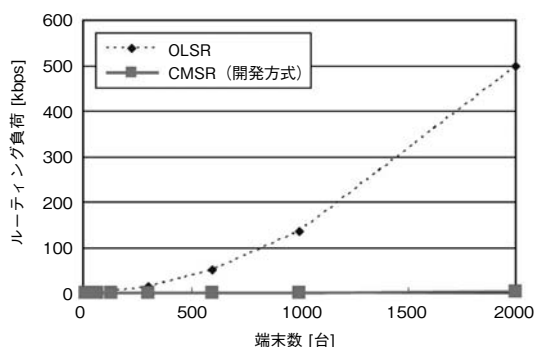
各ノード (親機および端末) は定期的にHELLOメッセージをブロードキャストし、隣接ノードとリンク品質情報を交換する。第2図において、リンクで接続されているノード (親機および端末) の間では信号を受信可能なことを示し、リンク横に示した数値はリンクコスト (リンク品質) を表す。隣接ノードからのHELLO受信時のリンクコストと、上位ルートコスト (親機までのルートコスト) から算出した仮ルートコストが低いノードを優先リンクとして選択する。第1表に示した端末6の隣接ノードテーブルにおいては、端末1, 5を選択する。優先リンクの個数はチューニング可能であるが、ここでは説明の都合上、2個とした。

第1表 端末6の隣接ノードテーブル

Table 1 Neighbor node table of node 6

隣接ノード	リンクコスト (Incoming)	リンクコスト (Outgoing)	上位ルートコスト	仮ルートコスト	ルートコスト
1	8	23	11	19	34
3	28		11+9	48	
4	6		20+10	36	
5	7	5	11+5	23	23

選択した優先リンクについて、受信方向のリンクコストをHELLOに格納して送受信することにより、双方向のリンクコストを把握する。双方向のリンクコストを元に算出した正式ルートコストが最小のものをルートとして決定する。第1表においては、端末5経由のルートが選択される。



第3図 ルーティング負荷のシミュレーション結果

Fig. 3 Simulation result of routing overhead

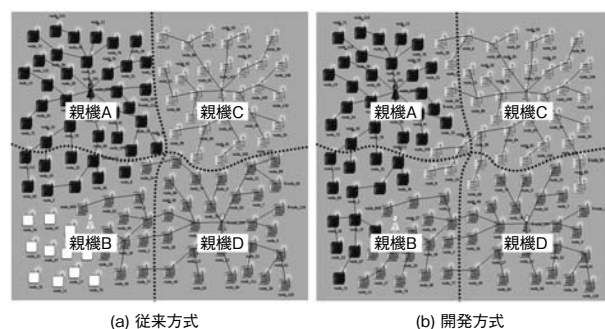
なお、送信元がルート指定するソースルーティング方式を用いることで、中継ノードでのルートテーブル保持を不要とし、RAM使用量低減を図った。

端末数を2000台まで変化させ、シミュレーションを行った結果を、第3図に示す。HELLO送信間隔は3分とした。標準的なOLSRに比べて、CMSRでは、端末数の増加に対して、負荷の増加が緩やかで、極めて低トラフィックであることがわかる。900 MHz帯の無線やkHz帯PLCの実効スループットは数十kbpsであるため、OLSRではルーティング負荷だけで帯域を超過してしまうが、CMSRの場合は2000台でも2 kbps程度に収まっており、帯域の大部分をアプリケーション通信で利用可能である。

3.3 伝送環境変化への対応

プロアクティブ型は、一般的に伝送状態の変化に対する追従が遅く、HELLO送信間隔に比例した時間がかかる。これを改善するため、MAC (Media Access Control) 層での送信エラーを検出して、リンクコストを変更する。さらに、2ホップ以上先での通信失敗に対しては、リアクティブ型で用いられるルートエラー通知機能を設け、早急なルート切り替えを可能とした。この際、ルート切り替え後の通信成功率を高めるため、元ルートとの相関性が低い代替ルートを優先的に用いる。

また、親機の故障や保守による停止時には、既に参入している親機のセルから、別の親機のセルに変更してルートを再生成する。しかしながら、RAMリソースや通信帯域の制約により、各親機に収容可能な端末台数に制限があるため、停止した親機に属していた端末を周辺親機に収容しきれない可能性がある。親機に十分な収容余力をもたせて運用していれば解決できるが、コスト増を招く。このため、各親機の収容残数を考慮して、セルを選択し、ネットワークを形成する[2]。スループットや消費電力などを考慮したルート生成の研究例[3]はあ



(a) 従来方式

(b) 開発方式

第4図 親機停止時の適応セル変更

Fig. 4 Adaptive virtual cell forming

るが、端末台数を考慮したルート生成はあまり検討されていない。

親機4台のうち1台を停止した場合のシミュレーション結果を、第4図に示す。実線は、親機B停止後のルートを表し、端末は所属する親機セルごとに色分けしている。また、点線は、親機B停止前のセル境界を示す。収容残数を考慮しない場合、親機Bに属していた端末は、隣接する親機A、Dにセル変更しているが、収容台数上限に達したため、すべての端末を収容し切れていない。(a) 左下部の白色で示した端末は、セル変更できずに、ルートを喪失している。収容余力のある親機Cのセルとは離れているため、参入できない。

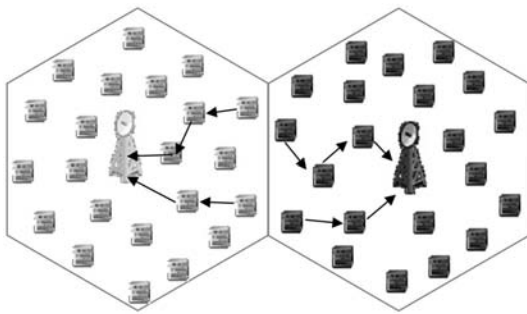
これに対して、収容残数を考慮した場合、もともと親機A、Dに属していた端末の一部が、親機Cのセルに変更することにより、(b) に示すように、親機Bに属していた全端末が収容された。なお、収容台数の状況は、HELLOに付加して送信するため、トラフィックを増やすことなく実現している。

4. 動的周波数チャネル割り当て

4.1 課題

マルチホップ通信における周波数チャネル割り当てに関しては、リンクごとにチャネルを変えて周波数再利用効率やスループットを高める研究が行われているが[4]、端末が複数の無線インターフェースを備えることを前提としたものが多く、低コストのシステムには適さない。ここでは、単一の無線インターフェースを前提とし、マルチホップ仮想セル内では同一のチャネルを用いるものとする。

第5図において、隣接セルが同一チャネルを利用している場合、セルの境界付近の端末において干渉が発生する。したがって、干渉を低減するよう適切に周波数チャネルを割り当てることが重要である。チャネル割り当て



第5図 隣接仮想セルのチャンネル情報収集

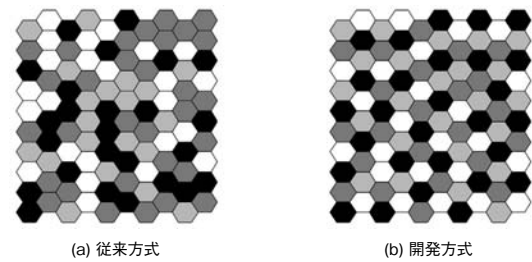
Fig. 5 Channel information sensing of neighboring cells

は、FCA (Fixed Channel Allocation) とDCA (Dynamic Channel Allocation) に大別できるが、動的に変化する環境に適応するには、DCAが必須である。チャンネル割り当ては、グラフ理論の頂点彩色問題であり、NP完全問題に相当するため、実用的な時間で完全な解を求めるのは困難である。無線LANのアクセスポイントのチャンネル割り当てにおいて発見的解法が研究されているが、上位の管理装置で割り当てを行う集中型や、アクセスポイント間の通信を必要とするものが多い。分散型[5][6]の方式も提案されているが、マルチホップ通信への適用は想定されていない。

4.2 分散型チャンネル割り当てアルゴリズム

マルチホップネットワークにおいて、親機間の通信を必要としない完全分散型でのチャンネル割り当てを実現する。親機同士は距離が遠く、隣接チャンネルの情報を直接把握することは困難であるため、セルの境界付近に位置する端末が隣接セルで使用しているチャンネルを検出する。検出した隣接セルのチャンネル情報は、第5図に矢印で示したように親機に通知する。チャンネル情報収集のための新たなパケットを設けず、ルーティングパケットを利用することにより、トラフィック増加を抑制している。

収集したチャンネル情報をもとに、親機では隣接セルとの干渉有無を判断し、干渉発生時には、ほかの未使用チャンネルを、未使用チャンネルがなければ最も使用数が少ないチャンネルを選択する。候補が複数ある場合は、ランダムやチャンネル番号の小さいものを選択する方法[6]があるが、複数のセルが同じチャンネルに変更してしまう可能性が高い。これを回避するため、固有ID (例：親機のアドレス) を用いて、チャンネル変更を行うセルを限定する。ただし、完全に限定せず、変更確率をIDの確率密度関数とした。また、SA (Simulated Annealing) 要素を加味し、干渉状態の悪化を確率的に許容した。これらにより、チャンネル割り当ての局所解からの脱出を図り、最適解への早急な収束を可能とした。



第6図 チャンネル割り当てシミュレーション結果

Fig. 6 Simulation result of dynamic channel allocation

セル100個を六角格子配置し、シミュレーションを行った結果を、第6図に示す。利用周波数は4チャンネルで、割り当て結果を色分け表示した。(a)は親機付近のチャンネル干渉状況を検出して割り当てを行う従来方法であるが、隣接セルでチャンネルが重複している箇所が多い。これに対し、(b)に示した開発方式ではほとんど重複がなく、少ないチャンネル数で効率よく割り当てられている。

5. 実環境における性能評価

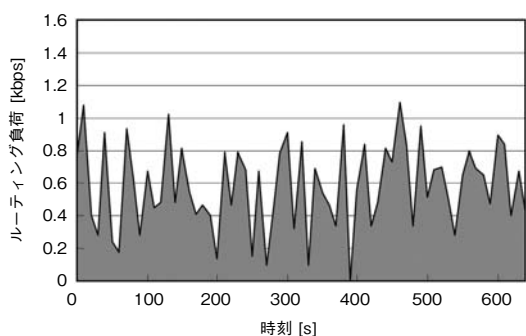
5.1 マルチホップ通信性能

本プロトコルを950 MHz特定小電力無線に適用した場合の性能を検証するため、当社構内の300 m×500 mの範囲に約130台の端末を設置し、性能評価を行った。多数の端末を模擬するエミュレーション動作を併用し、2000台規模の環境を模擬している。変調方式はGFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)、送信出力は10 mW、伝送速度は40 kbpsである。構内はトラックなどの往来が頻繁にあり、伝送環境変化が発生しやすい。メータが取り付けられる高さを想定して、端末は街路灯や建物側面の地上2 mの高さに設置した。実験環境の様子を、第7図 (国土地理院2007年撮影空中写真を使用) に示す。四角のアイコンは端末を、実線はルートを表しており、



第7図 実環境評価の様子

Fig. 7 Configuration of field experiment

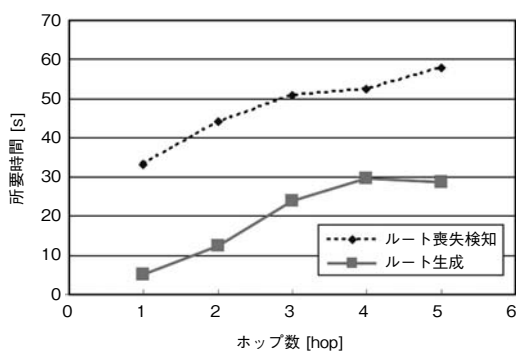


第8図 ルーティング負荷の実測結果
Fig. 8 Experimental result of routing overhead

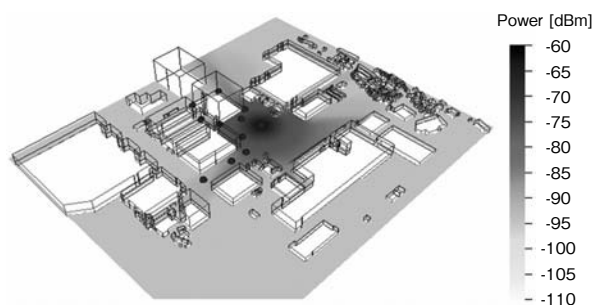
1～4ホップのルートが生成されている。

最もトラフィックが多い親機付近でパケットを観測した結果を、第8図に示す。なお、端末2000台の環境を模擬するため、HELLO送信間隔を短縮して15秒としている。ルーティング負荷は1 kbps以下で、第3図における2000台の場合と同等である。この環境において、遠隔検針を想定したアプリケーション層の通信エラー率を測定した。1秒ごとに通信を行い、3日間測定した際のエラー率は 5×10^{-3} 程度であった。これは、アプリケーション層の再送を行わない値である。再送を含めた場合の通信エラーはゼロであり、十分な信頼性を得られている。

次に故障や保守によって停止した場合に、ほかのセルに変更してルートを再生成するまでの所要時間を測定した。第9図に示すように、停止した親機に属する端末がルート喪失検知し、新たにルート生成するための所要時間は、いずれもホップ数に比例する。HELLOによってルート喪失検知や生成を行っており、1ホップ増すごとにHELLO送信間隔分の遅延が増えるためである。おおむね、HELLO送信間隔の数倍～十倍程度の所要時間であり、環境に適応して早急なルート変更が可能であるといえる。なお、端末が停止した場合も、同程度の所要時



第9図 親機停止時のセル変更所要時間
Fig. 9 Response time for cell change



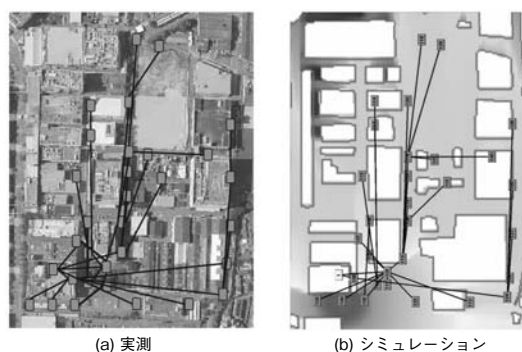
第10図 電波伝搬シミュレーション例
Fig. 10 Example of ray tracing simulation

間でルート変更が可能である。

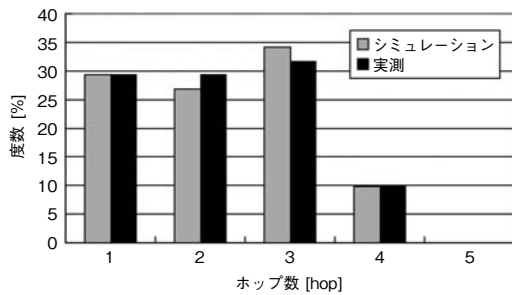
5.2 シミュレーションとの比較

実環境での性能評価は重要であるが、工数、費用の面で負担が大きく、多箇所を実施するのは困難であるため、シミュレーション活用が望まれる。ルーティングプロトコルのシミュレーションにおいては、レイヤ2以上を重視し、電波伝搬は自由空間モデルや統計的伝搬モデルを用いるのが一般的であるが、建物の形状や分布密度、道路幅などに依存するため、実環境とは合わない場合がある。そこで、3D地図データを用いた電波伝搬と、プロトコルの総合的なシミュレータを開発した。

第10図は、構内で実際に端末を設置した位置に送信点を置いて、レイトレース法による電波伝搬シミュレーションを行った例である。さらに、上位プロトコルのシミュレーションを行って生成されたルートを、第11図に示す。同一品質のルートが複数ある場合、HELLO受信タイミングなどの確率的要素によって選択されるため、実測と若干異なる部分もあるが、おおむねよく一致している。また、第12図に示したルートのホップ数分布も実測と非常に高い一致性を示した。したがって、さ



第11図 生成されたルート
Fig. 11 Generated route



第12図 シミュレーションと実測のルート比較

Fig. 12 Route comparison between simulation and experiment

さまざまな場所での実環境性能をシミュレーションで高精度に予測可能であるといえる。

6. まとめ

低トラフィックでのルート探索が可能なルーティングプロトコルを開発し、大規模ネットワークに対応可能なマルチホップ通信システムを実現した。機器の停止や、伝送環境の変動に対する追随性を高め、さらに分散型の動的周波数チャネル割当て法によって、システム導入設計や運用の省力化を可能にした。実環境評価で十分な性能があることを確認するとともに、シミュレーションによる実環境性能予測を高精度で行えることを示した。

電力安定供給や環境調和型社会の実現に向けて、スマートシティが注目を集めている。これは、エネルギーを統合管理し、再生エネルギーや蓄電池などを組み合わせて、地域全体でのエネルギー利用効率を高める社会システムであり、国内外で社会実験やプロジェクトが活性化している。

当社では、PLC方式などのスマートメータを既に実用化しているが、対象領域は必ずしも十分ではない。今後、900 MHz帯無線を用いたスマートメータや、無線/PLCハイブリッド型のシステムを早急に実用化するとともに、HEMS (Home Energy Management System) などとの連携を図り、スマートメータの本格的な普及に貢献することが重要である。

参考文献

- [1] 岡田幸夫 他, “低速電力線通信に適したプロアクティブ型マルチホップルーティングプロトコルCMSR,” 信学技報 AN2007-25, pp.61-66, 2007.
- [2] 岡田幸夫 他, “大規模ネットワーク対応のスマートメータ用マルチホップ通信,” パナソニック電工技報 vol.59, no.3, pp.18-24, 2011.
- [3] 森崎明 他, “通信状態を考慮したアドホックルーティングプロトコルの検討,” 情報処理学会 DICO2010, vol.2010, no.1, pp.645-651, 2010.
- [4] A. Subramanian et al., “Minimum interference channel assignment in multiradio wireless mesh networks,” IEEE Trans. Mobile Computing, vol.7, no.12, pp.1459-1473, 2008.
- [5] D. Leith et al., “A self-managed distributed channel selection algorithm for WLANs,” Proc. of IEEE RAWNET, pp.1-9, 2006.
- [6] R. Akl et al., “Dynamic channel assignment in IEEE 802.11 networks,” Proc. of IEEE PORTABLE, pp.309-313, 2007.

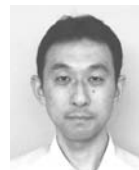
執筆者紹介



岡田幸夫 Yukio Okada
エコソリューションズ社 エナジーシステム事業グループ
Energy Systems Business Group, Eco Solutions Company



土橋和生 Kazuo Dobashi
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Eco Solutions Company



梅田直樹 Naoki Umeda
エコソリューションズ社 エナジーシステム事業グループ
Energy Systems Business Group, Eco Solutions Company



佐々木貴之 Takayuki Sasaki
エコソリューションズ社 エナジーシステム事業グループ
Energy Systems Business Group, Eco Solutions Company