

ワイヤレスメッシュネットワークへの取り組み

野崎 正典
中野 義久

門 洋一
近藤 浩司

近年、インターネットの普及にともない、無線LANの利用者が急増しており、その適用先も企業内ネットワークだけではなくとどまらず、家庭内ネットワークやホットスポットサービスなど、多岐にわたっている。この無線LANが普及している要因として、無線LAN製品（基地局や無線LANカードなど）の低価格化や、標準化機構であるIEEE802.11 WGやWi-Fi Allianceによる相互接続性の確保などが挙げられるが、何よりもユーザが通信ケーブルの煩わしさから開放されることに大きな利便性を感じているためだと考えられる。

一方、無線LANの電波到達距離は数十mから数百m程度であり、既存のセルラー方式である携帯電話やPHSのそれと比較してあまり大きくない。そのため、広範囲にわたって無線LANのエリアを提供しようとした場合、複数の基地局（AP: Access Point）を面的に設置する必要がある。通常、AP間の接続には、バックボーンとして有線ネットワークの敷設が必要となるため、AP追加時やレイアウト変更時において、柔軟性や拡張性が乏しくなるという課題があった。

そこで、このAP間の接続も無線通信で実現することで、これらの課題を解決しようとする取り組みが始まりつつある。このような通信形態は複数のAPが無線リンクで網の目状に接続されていることから、ワイヤレスメッシュネットワーク（以後、メッシュネットワーク）と呼ばれており、次世代の無線通信技術として注目されている。

本稿では、このメッシュネットワークの概要や適用先についての概説を行う。またメッシュネットワークの課題であるマルチホップ時のスループット低下に対して、その低下を抑制する方式の検討を行ったので簡単に報告する。

メッシュネットワークの概要

従来の無線LANでは、APに対してクライアント（STA: Station）が無線リンクで接続し、AP間は無線LANスイッチなどを経て有線ネットワークで接続されるアーキテクチャが広く用いられていた。この場合、無線リンクで接続される部分はAPとSTA間の一箇所であるた

め、このような接続形態はシングルホップ接続と呼ばれている。一方、メッシュネットワークのアーキテクチャでは、AP間の接続やSTA間の接続も無線リンクで行うことで、パケットの中継を実現する。このような接続形態は、複数の無線リンクをパケットが中継されていく様子から、マルチホップ接続と呼ばれている。この様子を図1に示す。

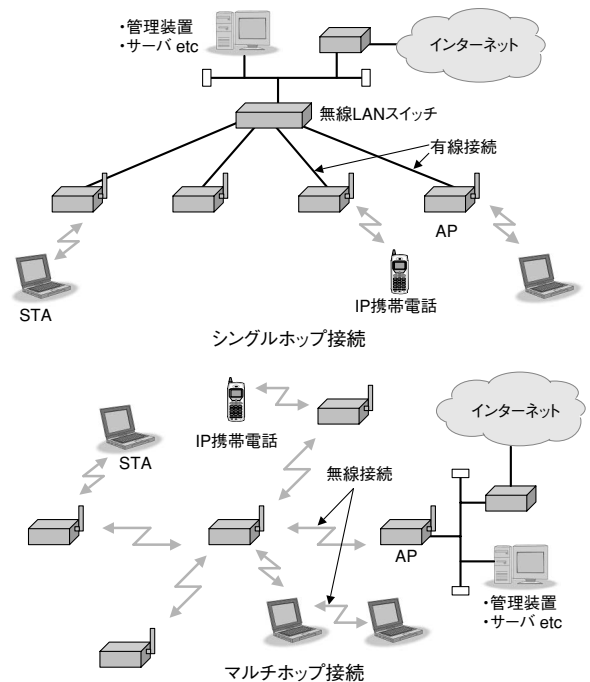


図1 無線接続形態の構成例

このマルチホップ接続を基本機能とすることで、メッシュネットワークでは以下のような特徴を持つ。

●設置の容易性

バックボーンの有線ネットワークが不必要であるため、ノードを設置するだけで広範囲にわたって無線ネットワークの構築が可能となる。

●柔軟な拡張性

各ノードが自律的に隣接ノードを検出し、マルチホッ

ブネットワークを構築することで、無線エリアの拡大や縮小などに柔軟に対応することができる。この機能は自己組織化 (Self-organization) 機能と呼ばれている。

●高信頼性

従来のスター型ではなくメッシュ型のトポロジーを形成するため、複数のルーティングパスを持つことが可能となる。そのため障害発生時や電波環境の変化に対して、柔軟にパスを変更することができ、これにより高い堅牢性を保つことが可能となる。この機能は自己修復 (Self-healing) 機能と呼ばれている。

このような無線によるマルチホップネットワークは、以前よりアドホックネットワークとして研究が進められてきた。^{1) 2) 3) 4)} アドホックネットワークの標準化が進められているIETFのMANET WGでは、一時的に集めた無線ホストのみで構築されたネットワークを想定しており、各ホストで動作するルーティングプロトコルの標準化を主なターゲットとしている。一般にアドホックネットワークでは、ホストの移動や電源のオフなどにより、常に通信ルートが安定するとは限らない。そのため、通信要求時に目的ホストまでのルートを作成する方法 (reactive型) や、定期的なルート情報の交換によりルーティングテーブルを更新する方法 (proactive型) などのプロトコルが提案されている。メッシュネットワークは、このアドホックネットワークの概念を多く含んでおり、その定義は明確ではないが、一般的には、実際のアプリケーションを踏まえてより現実的な路線に絞り込んだネットワークとして位置づけられている⁵⁾。中でもモバイル・アドホック性の有無により、メッシュネットワークは次の2つの形態に分類することができる。

- ① 固定的に設置されたAPや特定の機器のみマルチホップ機能が実装される形態 (移動性を考慮しない)
 - ② すべてのAPや無線機器にマルチホップ機能が実装される形態 (移動性を考慮する)
- 適用可能な市場規模や、実現の容易性などの観点から、まずは①の形態から市場が立ち上がるものと予想される。

メッシュネットワークの適用例

このような特徴を活かしたメッシュネットワークの適用先としてさまざまな市場が考えられる。たとえば、前

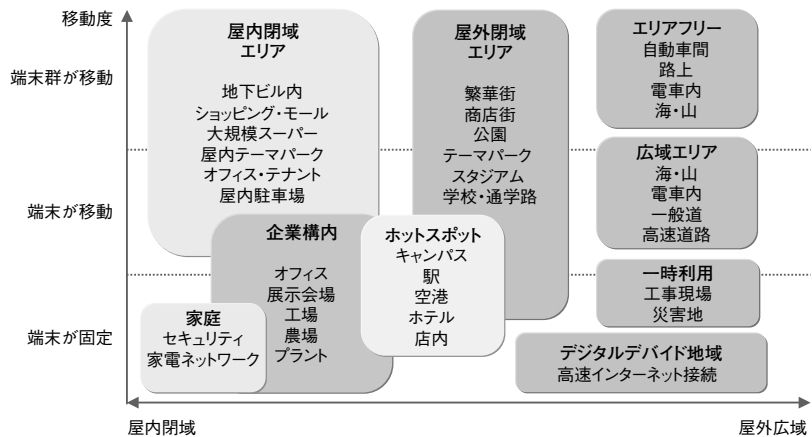


図2 メッシュネットワークの適用市場

述した①の移動性を考慮しない形態で現状のホットスポットサービスへ適用した場合、各AP間をマルチホップ接続することで、従来APを接続してきた有線ネットワークの敷設コストが軽減される。これにより、従来スポット的に提供されてきたサービスエリアを効率的にゾーンとして拡大することができる。また地理的な制約でADSLやFTTHなどのブロードバンドサービスが現在提供されていないような地域などには、屋外設置型のマルチホップに対応したAPを導入することで、高速インターネット接続回線としても利用することができる。

また、展示会や工事現場などで一時的にネットワークを構築したいようなケースにも、メッシュネットワークの特徴である設置容易性が有効的である。これにより従来のネットワーク構築と比較して設置/撤去コストの削減が期待できる。さらに、②で示した移動性を考慮した形態では、災害時におけるレスキュー隊員の連絡用端末や、車載器にマルチホップ機能を組み込むことで車々間通信などへの適用も期待されている。このような適用市場の一覧を図2に示す。なお図では横軸にサービスエリアの広さを、縦軸に移動性を示している。

メッシュネットワークの動向

現在、メッシュネットワークの開発や導入は、主に北米を中心として進められている。

たとえばTropos Networks社⁶⁾では、802.11bの技術をベースとして、AP間をマルチホップ接続可能な「Cellular Wi-Fi」と呼ばれるシステムを提供しており、既にホットスポットサービスのエリア拡大や警察の連絡無線用などとして試験導入されている。

またMeshNetworks社⁷⁾ではマルチホップ対応のチッ

プセットやソフトウェアを提供しており、APだけでなく、さまざまな機器のメッシュネットワーク化を実現している。他にもいくつかのベンダーで製品化が行われているが、それぞれ独自の方式でメッシュ化の機能を実現しているため、現状、他ベンダー製品との相互接続性は確保されていない。そのため、従来の標準化機構IETFのMANET WGでの作業に加えて、IEEEにおいてもメッシュネットワークの標準化作業が進みつつある。IEEE802.11 ESS (Extended Service Set) Mesh SG (Study Group)として発足した検討グループは、2004年5月の会合でTG (Task Group) に昇格した。現在、概念のみが規定されていたWDS (Wireless Distribution System) の拡張や、利用モデルや用語の定義などが検討されている。今後はIEEE802.11sとして標準化が進められる予定である。

メッシュネットワークにおける課題

多くの特長を持つメッシュネットワークであるが、いくつかの解決すべき課題もある。たとえば、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式に基づいたメッシュネットワークのアーキテクチャでは、マルチホップの段数が増えるにつれて、スループットが低下するという課題がある。これは、隣接の無線局から受信したパケットを中継する際に、中継される無線パケットが他の無線局の干渉源となり、この干渉を受けた無線局では無線パケットの衝突や、送信待ち遅延が発生するためである。特に、今後利用の急増が予想されるVoIPなどの双方向通信では、上り方向と下り方向のパケット生成間隔は同じ周期となるため、一旦、上り方向と下り方向のパケット送信タイミングが重なってしまうと、以降のパケットが連続して衝突する確率が高くなるという課題がある。また中継パケットごとに、確認応答用のACKパケットが返信されるため、VoIPなどのショートパケットに対しては、このACKパケットが無線帯域を占める割合が高くなり、スループット低下の要因となっている。これらスループットの低下を抑制する方法としては、次の手法が考えられる。

●マルチチャネル化

複数の無線チャネルを同時に使用することで他無線局との干渉を低減する。また上り方向と下り方向を異なる無線チャネルとすることで双方向通信時における無線パケットの衝突を回避する。

●指向性アンテナ

指向性を持つアンテナを用いることで、電波のビームパターンを制御し、他無線局との干渉を低減する。

●送信タイミング制御

無線パケットの種別や統計情報などからパケット生成タイミングを検出し、無線パケットの送信タイミングを制御することで衝突確率を低減する。

●オーバーヘッド削減

ACKパケット量の削減や、同一宛先のパケットを一つのパケットに統合することで、無線区間でのオーバーヘッドを削減する。

マルチチャネル化や指向性アンテナの適用は、スループットの向上に有効であるが、無線チャネルの割当や無線局の設置設計が複雑化するため、メッシュネットワークの特徴である設置容易性が損なわれる恐れがある。そこで、我々は無線パケットの送信タイミングを制御する手法とオーバーヘッドを削減する手法についての検討を行った。

提案方式

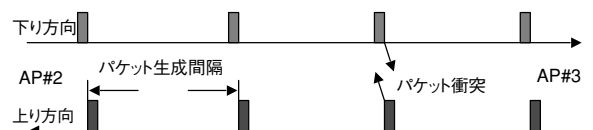
上記した課題を解決する方法として、以下の2種類の方式を検討した。

方式1：パケットの送信間隔を制御する手法

方式2：中継無線局でパケットを統合する手法

まずは方式1の詳細について説明する。図3のa)に双方向通信における無線パケットの送信タイミングが重なり、無線区間でパケット衝突が発生する確率が高くなっている様子を示す。この時、特定の無線局（たとえば有線ネットワークと接続するゲートウェイ無線局など）では双方向通信のパケットの生成間隔（ T_{int} ）とパケット到着時間（ T_{up} , T_{down} ）を観測し、上り方向と下り方向のパケットの送信タイミングが重なっている時には、図3のb)に示すように下り方向のパケットの送信タイミングを変更する。この変更はパケットをTbuff時間バッファに保持

a) 従来方式



b) 提案方式

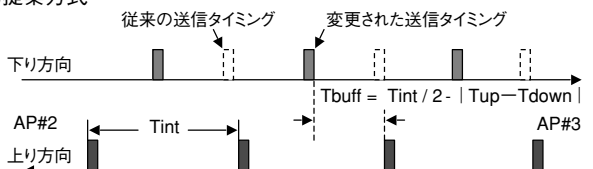


図3 無線パケットの送信制御例

することで実現する。これにより逆方向からの無線パケットとの衝突確率を低減することが可能となる。図では送信タイミングを変更する間隔をパケット生成間隔の1/2としているが、複数のセッションが中継されている場合は、各セッション間の送信タイミングも制御することでセッション間の無線パケットの衝突確率を低減することもできる。このような送信タイミング制御は一般的にシェーピングと呼ばれているが、通常シェーピングと異なり、逆方向からのパケット到着間隔を考慮している点が本方式の特徴である。またこのように無線パケットの送信タイミングを制御することで、各無線局での中継負荷を分散することも可能である。

一方、方式2では、無線区間のオーバーヘッド量を削減することで、スループットの向上を実現する。図4(a)に従来のCSMA/CA方式を用いて隣接無線局にパケットを中継している様子を示す。従来手法では上り方向と下り方向の無線パケットが中継されるごとに、受信側の無線局がそれぞれACKパケットを返信していた。さらにAP#2がパケットを中継する際には、AP#1, AP#3のどちらかのAPしか、パケットを受信することができなかった。

そこで方式2では各APで中継パケットを一旦バッファに保持し、逆方向からのパケットが到着した場合は、それぞれのACK情報を含めて一つのパケットに統合し、この統合パケットを隣接APに対してマルチキャストする。図4(b)にAP#2でパケットが統合され、AP#1, AP#3に対して同時にパケットが中継されている様子を示す。これにより、AP#2からの中継パケット数を低減することが可能となり、無線区間でのオーバーヘッド量の削減が実現できる。なお本方式では中継無線局でパケットをバッファリングする時間を規定する必要があるため、逆方向からのパケットが一定時間内に必ず到着するような双方向通信に好適である。またこのバッファリングにより中

継タイミングが周期的になることから、マルチホップによるパケット遅延の揺らぎを抑制することができ、VoIPでのQoS向上が期待できる。

まとめ

次世代の無線通信方式として注目されているワイヤレスメッシュネットワークに関する動向や適用先の紹介を行った。またマルチホップ化によるスループット低下の課題に対して、パケットの送信制御やオーバーヘッドを削減する方式の検討を行った。今後はシミュレーションによる提案方式の定量的な評価を行い、標準化の動向を見据えながら、メッシュ機能を有した無線ネットワークシステムの開発を行う予定である。◆◆

参考文献

- 1) 電子情報通信学会論文誌, “無線アドホックネットワーク技術論文特集”, Vol.J85-B No.12, 2002年12月
- 2) Masanori NOZAKI, Koichi GYODA, and Makoto KAWAI: “Dynamic Segmentation Schemes for a Wireless Ad-Hoc Community Network” IEEE MDMC'98 (The 3rd International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications), pp.202–206, Sep, 1998
- 3) 門洋一: “無線フラッシングにおける中継データおよび発信データの多重化方式”, 信学技報IN2002-117, pp.7–10, 2002年11月
- 4) 中村信之, 門洋一, 野崎正典, 福永茂: “アドホックネットワークにおける低遅延ルート切り替え方式に関する一検討”, 信学技報 IN2003-115, pp.13–18, 2003年11月
- 5) 日経エレクトロニクス, “米国で実用化の機運が高まるメッシュ・ネットワーク”, pp.65–70, 2004年3月15日
- 6) <http://www.tropos.com/>
- 7) <http://www.meshnetworks.com/>

筆者紹介

野崎正典: Masanori Nozaki. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

門洋一: Youichi Kado. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

中野義久: Yoshihisa Nakano. IPソリューションカンパニー ソリューション開発本部 インキュベーション推進部

近藤浩司: Kouji Kondou. IPソリューションカンパニー ソリューション開発本部 インキュベーション推進部

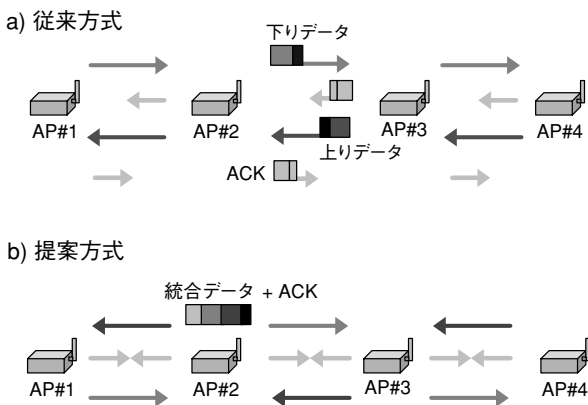


図4 パケット統合方式