

無線 LAN マルチホップネットワークにおけるスループットの解析および実験

無線 LAN マルチホップを用いた構内通信の音声品質向上を目的とした基礎検討として、大学キャンパスにおけるフィールド実験および呼接続制御のためのスループット推奨方法について研究を行った。なお、本検討は千葉大学 大学院 融合科学研究科（阪田 史郎教授、関屋 大雄助教）との共同研究により実施した。

先進技術研究所

やぎゆう けんご
柳生 健吾

はぎわら じゅんいちろう
萩原 淳一郎

おおや ともゆき
大矢 智之

1. まえがき

家庭内や企業におけるネットワーク構築において無線 LAN (Local Area Network) の利用が進んでいる。無線 LAN による構内ネットワーク構築では、効率的な通信エリアの拡大や遮蔽物などによる不感領域^{*1}の解消が課題となっており、マルチホップ^{*2}技術による解決が期待されている。つまり、既存の通信エリア内にマルチホップ機能を搭載した無線 LAN アクセスポイント (AP)^{*3}を設置することにより、無線 LAN の通信エリアを容易に拡大することができる (図 1)。このような技術は IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802 委員会^{*4}において IEEE 802.11s^{*5}として標準化が進められている [1][2]。

同時に構内ネットワークにおいてデータ通信だけでなく音声通信の利

用も進んでいる。具体的には構内ネットワーク上で IP-PBX (Private Branch eXchange)^{*6}と IP 電話端末を用いた VoIP (Voice over IP) 通信により内線電話を構成する事例が増加している。このような事例に無線 LAN AP および無線 LAN に対応した IP 電話端末を適用することで構内無線内線電話が実現できる。さらに前述の無線 LAN マルチホップを組み合わせることで柔軟なネットワーク構成が可能となる。

ネットワークにおいて VoIP など

のリアルタイム通信を用いる場合、通信品質確保の検討が重要である。

無線 LAN マルチホップでの VoIP 通信に関しては、理論的な解析では精度の面で限界があり、フィールド実験による評価がほとんどされていないため、無線 LAN マルチホップにおいて問題となるホップ間の干渉による通信品質への影響の実験評価が必要である。また、ネットワークに収容可能なトラフィック量 (最大スループット) を推定し、収容可能なトラフィック量以上の通信を抑制

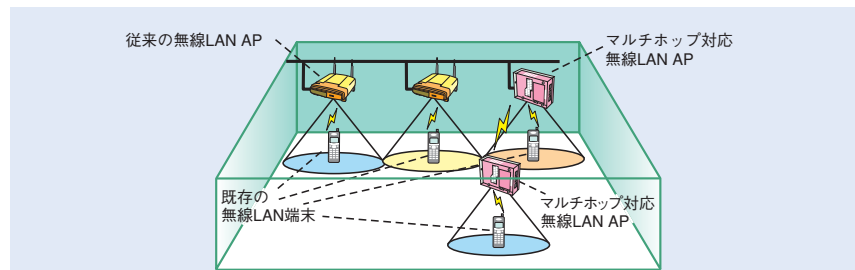


図 1 マルチホップによる無線 LAN 通信エリア拡大

- * 1 不感領域：電波が距離や建物の遮蔽により減衰し無線通信ができない領域。
- * 2 マルチホップ：複数のノードを経由(ホップ)することで目的地までパケットを送る伝送方式。
- * 3 無線 LAN アクセスポイント：無線 LAN 端末がネットワークに参加するために接続する管理ノード。接続した配下の端末の通信を仲介する。携帯電話における基地局に相当する。

- * 4 IEEE 802 委員会：IEEE において LAN および MAN (Metropolitan Area Network) に関する標準を規定する委員会。通称 LMSC (LAN/MAN Standards Committee)。
- * 5 IEEE 802.11s：IEEE 802 委員会が策定中のマルチホップ通信に関する国際標準規格。
- * 6 PBX：構内交換機と呼ばれる構内における音声呼の管理や外線との発着信の管理を行うノード。

することで通信品質を保証する呼続制御の検討が重要である[3].

本稿では、無線LAN マルチホップネットワークにおけるVoIP通信品質向上を目的として、千葉大学キャンパスを用いたフィールド実験評価およびスループット解析を行った結果を解説する。なお、本研究は無線LAN マルチホップ研究に関して実績のある千葉大学 大学院 融合科学研究科と共同で行った。

2. 隠れ端末による品質劣化と劣化低減手法

無線LANはCSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)^{*7}方式により多元接続^{*8}を実現しているため、複数の無線LANノードが存在すると、同時送信が確率的に発生して送信されたフレームの衝突が発生する。マルチホップ通信では、それに加えてキャリアセンス範囲外のノードとの同時送信によりフレームが衝突する隠れ端末^{*9}問題が発生し、通信品質劣化の原因となる。トラフィック量が大きくなればなるほど衝突の発生する確率が上がるため、特に輻輳制御機能のないVoIPなどのUDP (User Datagram Protocol)^{*10}通信では通信品質劣化の原因となる。

1台のAPと、そのAPに接続する複数の端末からなる従来のBSS (Basic Service Set) 型^{*11}の無線LANでは、ネットワークのトポロジがAPを介する最大2ホップの無線通信

であったため、隠れ端末の通信を事前に通知する仮想キャリアセンス^{*12}を使用することで問題を回避することができたが、無線LAN マルチホップでは3ホップ以上のマルチホップ通信になり、仮想キャリアセンスを使用すると端末間の送信機会の不公平性や無線使用効率低下の原因となるさらし端末^{*13}問題が発生する。同時に仮想キャリアセンスは付近のなるべく多くのノードが受信できるように低い通信レートで送信される必要があり、高いレートでの通信が可能な高速無線LANでは無線リソースの圧迫要因となる。

そのため本検討における無線LAN マルチホップネットワークでは、仮想キャリアセンスは用いないことを前提とする。無線LAN規格のフレーム再送規定は、通信エラー後に規定回数フレームを短時間で再送して規定回数を超えるまでに通信成功すればフレーム損失とならない。本検討ではこの特長を利用し、ネットワークに収容可能なトラフィック量を推定し、収容可能なトラフィック量以下に抑えることで隠れ端末による衝突の発生確率を減らし、衝突が発生しても規定再送回数以内に送信成功となることで通信品質劣化を抑制することとする。

3. 隠れ端末問題による品質劣化の実験評価

フィールド実験にて無線LAN マルチホップのスループットを定量的

に測定することで、隠れ端末が通信品質に与える影響を確認した。千葉大学西千葉キャンパス工学部棟の約300 mの長い渡り廊下にマルチホップ対応無線LAN APを設置して、エリアを拡大することを想定し長ホップの実験を行った。実験にはドコモが試作したマルチホップ対応無線LAN APを用い(写真1)、7ホップのストリング(直線型)トポロジを形成して両端間のスループットを測定した(図2)。主な実験仕様を表1に示す。アプリケーションはVoIPを想定した168 byteのUDP/CBR (Constant Bit Rate)^{*14}のトラフィックとし、図2のトポロジにおける両端のマルチホップ対応無線LAN APに有線接続したノートPCの間で片方向フローまたは双方向フローにてトラフィックを発生させた。データの発生間隔を変えることでネットワークへの印加トラフィック量を変化させてスループットの変化を測定した。送信可能距離およびキャリアセンス範囲に関しては、事前に予備実験により測定した結果を掲載した。

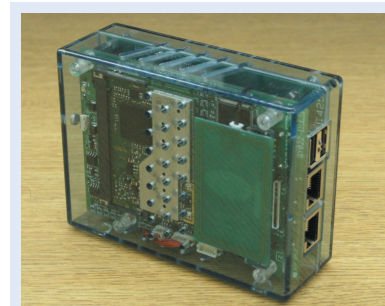


写真1 試作したマルチホップ対応無線LAN AP

*7 CSMA/CA：他のノードがフレーム送信していないかを確認(キャリアセンス)した後送信することで、他のノードとの衝突をなるべく避ける方式。
*8 多元接続：複数のノードが同じ無線リソースを共用して通信すること。共用する際に無線リソースをどのように分割するかでさまざまな方式が存在する。
*9 隠れ端末：互いに電波が届かない場所に位置し、相手の通信状況を把握できない

端末。

*10 UDP：トランスポート層のプロトコルの1つで送達確認や輻輳制御などを行わないため処理が軽く、途中でデータが抜け落ちて問題が少ないリアルタイム通信に用いられる。

*11 BSS型：無線LANにおいて、通信を制御する中心局(AP)が存在し、その他の端末はすべて基地局に接続するスター型のトポロジを構成するネットワーク。

*12 仮想キャリアセンス：送信ノードから直接電波が届かないノードに対して、受信ノードが通信を通知することにより受信ノードの通信範囲内にある全ノードが送信ノードの通信を検知する方式。

*13 さらし端末：近隣の端末が通信中のため送信が抑制される端末。

*14 CBR：固定の間隔(ビットレート)でフレームが送信される通信。音声通信など固定レートの通信を模擬する際に用いられる。

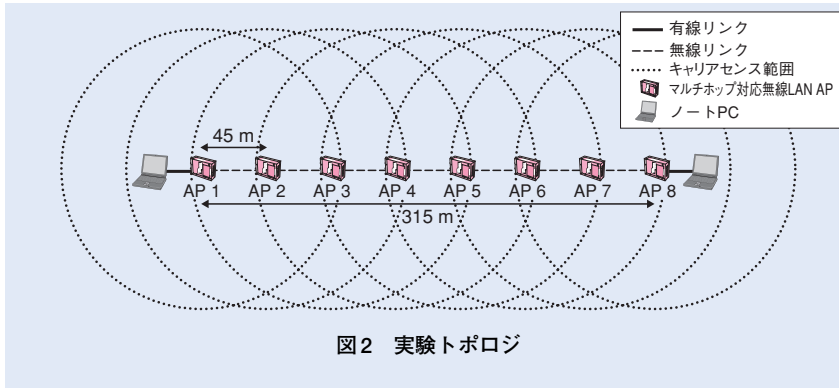


図2 実験トポロジ

測定結果のスループットを図3に示す。今回想定したトポロジにおいて最大で0.68 Mbit/sの双方向スループットが確認された。G.711^{*15}を用いたVoIP通信に換算すると5コールの同時通信が収容できることに相当する。表1に示したとおりAP間距離が45m、キャリアセンス範囲が120mであるため4ホップ先のAPとは同時通信可能であり(例えばAP1とAP5は同時通信可能)、また18Mbit/sの物理層通信速度で168byteのデータ通信を行った場合、シングルホップでは5.1Mbit/s程度のスループットであるため、隠れ端末を想定しない単純計算では1/4の1.3Mbit/s程度のスループットが出るはずである。この計算値と実験結果との隔たりは隠れ端末が主な原因であると考えられる。

またトラフィックが過負荷の状態(印加トラフィック量大)の双方向フローにおいて特にスループットが劣化していることが確認された。これは双方向通信のUDPアプリケーションであるVoIP通信においてト

ラフィックの過負荷が問題となる可能性があることを示している。フローの双方向と片方向でスループットの傾向が異なっている理由は以下のとおり説明できる。まず、双方向フローにおいては印加トラフィック量にかかわらず逆向きのフローのフレームによって隠れ端末による衝突が発生するためフレームの再送が発生し、無線リソースを圧迫するため収容可能なトラフィック量が小さくなる。一方、片方向フローの場合はデータ発生間隔が一定の間隔、つまりキャリアセンス範囲内には衝突するフレームが存在しない最短の間隔よりも小さくなるまで隠れ端末による衝突が発生しないため、無線リソースに余裕ができて収容可能なトラフィック量をより大きくすることが可能となるのである。

4. 解析による最大スループット推定

本章ではフィールド実験により得られた知見を基に双方向フローのトラフィックを解析し、隠れ端末を考

表1 実験仕様

プロトコル	IEEE 802.11a (5GHz帯)
フレーム・ペイロード	168byte
物理層通信速度	18Mbit/s
ACK通信速度	12Mbit/s
送信バッファサイズ	100frame
経路制御	手動設定
送信可能距離	60m
キャリアセンス範囲	120m
ノード間距離	45m

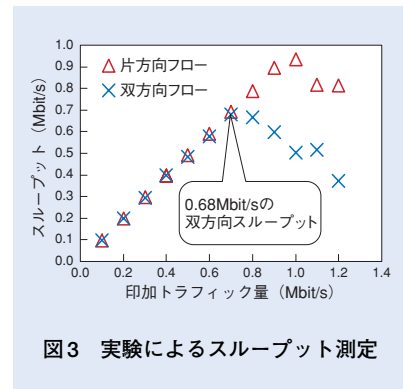


図3 実験によるスループット測定

慮した収容可能なトラフィック量を見積る手法の検討結果を解説する[4]。3章のとおり、無線LANマルチホップネットワークでは隠れ端末問題により収容可能なトラフィック量が低下し、また同時にキャリアセンス範囲外の離れたノードどうしは同時に通信可能となる周波数再利用効果により収容可能なトラフィック量の向上が期待できるため、無線LANで規定されているリンク速度のみから利用可能なトラフィック量を推定するのでは誤差が発生し不十分である。そこで本研究は隠れ端末との衝突やノード間の同時送信の可・不可を考慮に入れた収容可能なトラフィック量推定技術の検討を行った。

* 15 G.711：国際電気通信連合 電気通信標準化部門ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) により制定された音声符号化の標準規格。固定電話網内の音声信号の伝送に用いられている。64kbit/sの固定ビットレート。

従来の検討は、複雑なトポロジであることによる計算量の増加やモデルの複雑化を避けるため片方向フローに限定されており、構内での音声通信を想定した環境とは隔たりがあった。

本解析ではスループットが最大となる点において、各端末は送信バッファ内に送信すべきパケットを常にもっている、つまり全端末が常にパケットを送信する機会を待っていて、各端末の送信確率は等しいと仮定した。

まずトポロジ内の各ノードにキャリアセンス範囲や通信範囲から発生し得る隠れ端末による衝突パターンを割り出した。例えば図2のトポロジでは、双方向フローの場合データフレームとデータフレーム、データフレームとACKフレーム^{*16}の隠れ端末による衝突が発生する。次に各衝突パターンの発生確率を算出し、ネットワーク内でボトルネックとなるノードを割り出した。ボトルネックとなるノードの最大スループットがネットワークの最大スループットとなる。ボトルネックとなるノードの最大スループットは、ノードの送信トラフィック量から衝突率分を差し引くことで算出できる。

図2のトポロジにおいて最大スループットを解析した結果と図3の実験による最大スループット測定結果の比較を表2に示す。解析により隠れ端末の存在する状況で高精度に最大スループットを推定することが可

表2 実験結果と解析結果のスループット比較

	実験値 (Mbit/s)	解析値 (Mbit/s)	誤差 (%)
片方向フロー	0.816	0.853	4.5
双方向フロー	0.680	0.757	11.3

能となった。誤差の原因としては各APから定期的を送信されるビーコンフレーム^{*17}の影響や伝搬によるエラーの影響が挙げられる。ここでは長ホップのストリングトポロジを例として解説したが、それ以外の多様なトポロジにも本手法は適用可能である[5]。

5. あとがき

本稿では、無線LAN マルチホップネットワーク上で音声通信を行う環境を想定し、許容トラフィック量の的確な推定を可能とするために、マルチホップ環境における双方向トラフィックのスループットを解析し、実験による検証とほぼ一致することを確認した。また、ドコモにて試作した実験機を用いて実測評価を行い、理論検討の正当性を実証したことにより、実環境での有効性を示すことができた。

本研究においては、ほかにも多様な通信レートでのVoIP 端末収容台数の実験的検証に関する検討や[6]、無線LAN マルチホップネットワークにおいて、高速無線LAN 通信を行うと高速なACK フレームを復号できない離れたノードに不公平性が発生する問題の検討も行った[7]。今後は、理論検討の結果を呼接続制

御に適用するための具体的な方式の検討を進めてゆく。

文 献

- [1] 阪田 史郎, 青木 秀憲, 間瀬 憲一: “アドホックネットワークと無線LAN メッシュネットワーク,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No.6, pp.811-823, Jun. 2006.
- [2] 青木, ほか: “IEEE 802.11s 無線LAN メッシュネットワーク技術,” 本誌, Vol. 14, No. 2, pp.14-22, Jul. 2006.
- [3] 藤原 淳, 大矢 智之: “無線メッシュネットワークにおけるVoIP トラフィックの呼受付制御,” 電子情報通信学会技術報告, RCS 2006-93, pp.205-208, Jun. 2006.
- [4] 稲葉 雅彦, 富田 佳宏, 松本 真沙樹, 関屋 大雄, 谷萩 隆嗣, 阪田 史郎, 柳生 健吾: “無線マルチホップネットワークにおける最大スループットに関する解析及び実験,” 電子情報通信学会技術報告, RCS 2007-121, pp.55-60, Jun. 2007.
- [5] 松本 真沙樹, 関屋 大雄, 谷萩 隆嗣, 阪田 史郎, 柳生 健吾: “少ホップ無線ネットワークにおける双方向フローの最大スループット解析,” 電子情報通信学会総合大会, Vol. B-21-25, pp.626, Mar. 2008.
- [6] 富田 佳宏, 新井田 博之, 稲葉 雅彦, 阪田 史郎, 関屋 大雄, 柳生 健吾: “無線LAN メッシュネットワークにおけるVoIP 許容台数の実験的検証,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Vol. B-21-30, pp.432, Sep. 2007.
- [7] 新井田 博之, タンヌウォン・ノクパリン, 藤原 敏秀, 関屋 大雄, 阪田 史郎, 谷萩 隆嗣, 柳生 健吾, 藤原 淳: “無線LAN メッシュネットワークにおける送信端末間の不公平性について,” 電子情報通信学会技術報告, IN 2006-17, pp.1-6, Jun. 2006.

* 16 ACK フレーム: データフレームの受信ノードが正常に受信した際に送信ノードに返送する受信確認フレーム。ACK は、Acknowledgement の略。

* 17 ビーコンフレーム: AP が配下の端末や周辺のノードに定期的を送信する周知情報を含んだフレーム。