

近接する多数の無線 LAN におけるマージ方法と特性評価

熊谷 菜津美¹ 磯村 美友¹ 村瀬 勉² 小口 正人¹

概要：近年，モバイルルータやテザリングなど移動無線 LAN システムが増加している．このことから，従来の想定以上の多くの無線 LAN システムが近距離にひしめくことが多くなってきた．近距離の場合，従来と違った要因で生じる品質特性が現れる．本稿では，TCP を用いた場合の多数の無線 LAN が密集する状況におけるスループット特性を，実機を用いて評価する．TCP の場合，送達確認を含む輻輳制御の機能を持つことから，UDP とは大きく異なる特性になりうる．さらに，複数無線 LAN を 1 つに統合する無線 LAN のマージ方法を検討し，端末数変化とパッファ量変化とキャプチャエフェクト変化などがスループットに与える影響を評価する．評価結果の応用の一例として，マージによりスループットと引き換えにパッタリの有効活用（省エネルギー），あるいは通信可能時間の延長に効果があることを示す．

Performance Evaluation of Merge Method in Densely Deployed Wireless LANs

NATSUMI KUMATANI¹ MITOMO ISOMURA¹ TUTOMU MURASE² MASATO OGUCHI¹

1. はじめに

近年，モバイルルータやテザリングなど移動無線 LAN システムが増加しており，会議室やカフェなどで使用される光景を目にすることが多い．モバイルルータとは，インターネットとは 3G 回線や WiMAX などの無線通信技術を用いて接続し，パソコンやゲーム機などの無線対応機器に対しては，IEEE802.11[1] 無線 LAN のアクセスポイント (AP) として接続させるルータである．またテザリングとは，スマートフォンを AP として，個人の端末をインターネットに接続する機能のことである．このモバイルルータやテザリングの普及は，個人が移動無線 LAN システムを持ち歩くことを意味し，多くの無線 LAN システムが一時的にあるいは恒久的に近接することにつながる．つまり，従来の想定以上の非常に多くの無線 LAN システムが近距離にひしめく可能性を示唆している．多くの無線 LAN を密集して使うことで，これまで想定していなかった干渉の影響が現れ，効率的に電波利用ができなくなり，QoS(TCP スループット) が低下することが懸念される．

一方，通信デマンドとしては，端末へのダウンロード型の通信に対して，アップロード型の通信が増加してくると思われる．例えば，Google Glass[2] などのウェアラブルカメラを用いて自分で撮影した映像などの動画ライフログ [3] やモバイル端末を分散クラウドとして使用するモバイルクラウド [4] などのアプリケーションでは，端末からデータを送出する uplink 方向のトラフィックが主となる．このようなアプリケーションは，今後増えていくと思われ，その際には，無線 LAN の帯域がボトルネックとなる可能性がある．そのため，本研究では端末から AP に向かう uplink 方向のトラフィックを扱う．

従来，無線 LAN の干渉に関する研究においては，主として固定の AP(あるいは固定の無線 LAN) を対象として評価が行われていた．しかしながら，固定の AP に対しては有効な評価も，移動して，非常に近接する AP がある場合，あるいは，固定 AP 群の中に新しく持ち込まれる AP がある場合，といったような様々な場合に適用するのは困難である．

これに対して，近接かつ多数の無線 LAN における干渉と競合を同時に考慮した特性評価を，筆者らは既に市販実機を用いて行っている [5][6]．同文献では，キャプチャエフェクトと干渉の影響で UDP の特性が決まることが示さ

¹ お茶の水女子大学
Ochanomizu University

² NEC
NEC Corporation

れている．この UDP の特性は，チャンネル容量とほぼ一致するため，周波数がどの程度有効利用されているかといった特性が把握できる．ただし，実際のアプリケーションの多くは，TCP を用いている．TCP は，トラヒックの双方向性や輻輳制御（再送制御）などの機能を持つため，UDP とは大きく異なり，無線 LAN 数（正確には AP 数）と AP バッファ量などもスループット特性に大きな影響を与える．この特性を把握できれば，より多くのアプリケーションが利用する TCP におけるスループット，すなわちアプリケーションが体感するスループットの特性を明らかにする重要な基礎データとなりうる．そこで本研究では，図 1 に示すような TCP を用いた場合の多数の無線 LAN が密集する状況におけるスループット特性の評価を行う．さらに，AP のバッファ量など TCP 性能を決める要因の影響を調査するために，複数無線 LAN を 1 つに統合する無線 LAN のマージ方法を検討評価する．マージにより，端末数を変更せず，すなわち同じ負荷量で，AP の数あるいは無線 LAN 数を変更して，性能要因の影響を調査することができる．無線 LAN のマージ結果を活用する一例として，マージによる帯域とバッテリーの有効活用が，省エネルギーあるいは通信可能時間の延長に効果があることを示す．これらの評価においては，スループットを決める要因である TCP レベルの要因と MAC レベルの要因とキャプチャエフェクトなど物理レイヤレベルの要因を切り分けるため，実機を用いて実験を行っている．

本稿ではまず，2 章で従来研究とその課題について述べ，3 章では関連する従来技術と，TCP スループットを決める要因について述べ，4 章では，ユースケースに基づいた通信モデルについて説明する．5 章では，無線 LAN のマージ方法について述べ，6 章では，無線 LAN マージ方法と TCP スループットの関係を実機にて計測評価し，その応用例の 1 つとして，省エネルギーを考慮したマージ方法と評価を述べ，最後に 7 章でまとめを述べる．

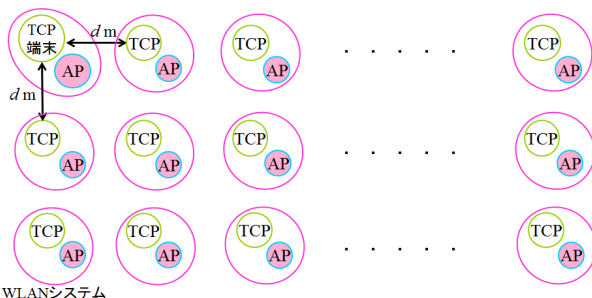


図 1 多数の近接した無線 LAN（均等な間隔で格子状に設置した端末）

2. 従来研究

無線 LAN の干渉については，昔から多くの研究がある

が，固定局を対象にしていたり，あるいは，移動を考慮していても，端末が移動を行うという前提での評価がほとんどであり，無線 LAN 自体が移動する場合の研究はあまり発表されていない．固定局同士の干渉 [7] については，干渉を防ぐような送信電力制御や，オーバーラップしないチャンネルを選択するなどといった制御が検討されてきている．また，端末が移動する場合には，ハンドオーバーや隠れ端末など端末と AP の位置関係に起因する問題を解決する必要がある．このためには，受信電力やスループットを考慮して AP を切り替えるハンドオーバー制御や RTS/CTS に代表される隠れ端末対策が行われてきている．しかしながら，本論文で検討しているような端末と AP の組（すなわち無線 LAN 自身）が移動する場合には，送信電力制御は非常に困難であり，またハンドオーバーや隠れ端末は問題とはならない．一方，無線 LAN 同士が干渉を起こすため，無線 LAN 同士での CSMA/CA やキャプチャエフェクトの増大などの新しい問題への対処が必要である．

従来研究 [8] では，固定の無線 LAN 同士，あるいは移動の無線 LAN が 2 個程度の場合の干渉の影響について調査しているが，無線 LAN が多数の場合には，複数の無線 LAN で同一チャンネルを共有する必要が出てくるため，スループットへの影響が大きくなる．これに対して，従来研究 [9] で，多数の無線 LAN が近接する場合に関する調査が行われている．[9] では，干渉関係にある全無線 LAN が持つことのできる最大容量を求めており，地理的近接度合いと無線 LAN 数とチャンネル近接度合いが最大容量に及ばず影響が大きいことを示している．しかしながら，この評価では，容量を求めるためにトランスポートプロトコルには，UDP を用いている．一方，実際に多くのアプリケーションが使用するトランスポートプロトコルは TCP である．TCP の場合は，送達確認を含む輻輳制御の機能を持つことから，UDP とは異なる特性になりうる．1 フローがデータと ACK の双方向通信であり，すなわち上り（端末から AP 向き）と下り（AP から端末向き）との双方向通信であることから，バッファオーバーフローによる輻輳制御がスループットに大きく影響する．具体的には，AP 数と AP のバッファ量がスループットに大きな影響を与える．また，ウィンドウ制御により，ACK が返ってこないという特性のため，AP と端末がピンポン状態を繰り返すような場合も生じる [10]．このことは，AP の送信機会が相対的に小さくなる端末が多い場合に発生する．このようなことから，これまでの UDP を用いた特性評価に加えて，TCP を用いた場合の近接する多数の無線 LAN の特性を評価する必要がある．

そこで，本研究では，近接する多数の無線 LAN を対象として，TCP についてのスループット評価を行う．キャプチャエフェクトなどシミュレーション評価では困難な現象も考慮する必要があるため，実機実験を用いた評価を行う．

3. TCP スループットと MAC スループット

3.1 MAC スループットと TCP スループットと物理帯域

MAC スループットと TCP スループットの関係について説明する。アプリケーションにとって、興味があるのはアプリケーションのスループットである。そこで、本論文では、アプリケーションスループットとほぼ同等の値となる TCP のスループットを評価尺度として用いる。次のように、TCP のスループットを定義する。無線 LAN 区間において、802.11 の帯域から物理レイヤオーバーヘッドや MAC フレームオーバーヘッドや ACK や MAC 再送にかかる帯域を引いたものが MAC スループットである。TCP スループットを、MAC スループットから TCP の再送分および TCP-ACK および TCP ヘッダオーバーヘッドを除外した値と定義する。すなわち、Iperf[11] などのプログラムが用いているように、データ量 m bit のデータを TCP で送信するのに要した時間を s 秒としたとき、TCP スループットは、 m/s bps とする。

3.2 TCP スループットと MAC スループットを決める要因

無線 LAN における TCP スループットと MAC スループットを決める要因について説明する。MAC スループットを決めるのは、キャプチャエフェクトとアクティブ端末数である。TCP スループットを決めるのは、バッファ量である。それぞれについて説明する。

3.2.1 キャプチャエフェクトと性能

キャプチャエフェクトにより一般に MAC スループットは向上する。衝突が発生したときに、本来壊れるかもしれない MAC フレームがキャプチャエフェクトにより、正常に受信されるからである。このキャプチャエフェクトは、複数の MAC フレーム送信が同時にある場合に、受信強度の強い電力の信号が受信される、つまり、受信信号電力とその他の電力(受信ノイズの電力)にある程度の差がある場合には、信号が正しく受信されるというメカニズムによる効果である*1。この効果により、実際には衝突が存在してもフレーム送信は成功し、余計な再送やバックオフをもたらさないため、スループットが向上する。

この効果の大きさは、無線 LAN 内と無線 LAN 間とで異なる。無線 LAN 内では、複数の端末送信において、衝突が発生しても、最も強い受信信号のものが正しく受信される可能性がある。無線 LAN 間の場合には、LAN 内からの受信電波と LAN 外からのノイズとの差分に応じてキャプチャエフェクトが起こる。通常、LAN 内の AP と端末は、LAN 外の端末よりも距離が近いことが多いので、LAN 内

の端末から AP に送られた信号は、LAN 外から来る信号よりも強く、その結果、衝突が起こっても正しく受信できるというキャプチャエフェクトが得られる。例えば、異なる N セットの無線 LAN の各々 1 台の端末が同時に送信し衝突した場合には、それぞれの送信フレーム(つまり N フレーム)が正常にそれぞれの無線 LAN で受信される可能性がある(図 2 参照)[12]。

このように、キャプチャエフェクトは、使用する AP の数と端末の配置の仕方に依存する。AP 数が増加すると、つまり無線 LAN の数が増加すると、より多くの MAC フレーム衝突の可能性が高く、それだけ、キャプチャエフェクトが現れる可能性も高まる。また、LAN 内端末が AP に近く設置されるほど、LAN 外端末からの信号が相対的に弱くなりキャプチャエフェクトが高まる。

なお、衝突した信号がキャプチャエフェクトによって正しく受信される確率は、受信信号強度、復号化デバイス性能、ノイズ信号強度など、様々な要因で決まるため、キャプチャエフェクトを計算機シミュレーションなどでモデル化することは非常に困難であり、実機を用いた計測が必要である。

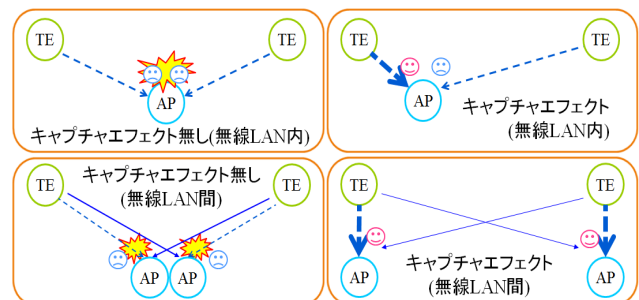


図 2 AP の位置とキャプチャエフェクトの有無

3.2.2 アクティブ端末数と性能

アクティブ端末数の増加が MAC スループットに与える影響について述べる。アクティブな端末が多くなることで、コリジョン発生率が増大し、MAC スループットが低下する。アクティブ端末とは、AP を含めた無線 LAN 内の、送信すべきデータを持っている端末である。TCP-ACK 待ちでパケットを送ることができない端末や、パケットを送らない端末などは、アクティブ端末に含まれない。uplink 方向の端末数が多い無線 LAN の場合、無線 LAN 内のアクティブ端末数は、AP と端末 1 台の合計 2 つとなる。その理由を以下に説明する。

無線 LAN の端末数が増えると、AP の送信機会が少なくなるため、TCP-ACK が AP のバッファにどんどん溜まっていく。端末は TCP-ACK が返ってこないため、次のデータを送れなくなってしまう。この状態(TCP-ACK 待ち)になると、AP しか送信可能な端末がないため、AP が TCP-ACK を送信し、この TCP-ACK を受け取った端末が

*1 正しく受信される条件には、ここで述べた受信信号電力と受信ノイズの電力の差という条件のほかに、受信デバイスの性能や復号技術の性能などで決まる条件がある。

その ACK を受けたことによりウィンドウ切れから回復し、データを送信する。そしてまた、無線 LAN 内の端末は全て TCP-ACK 待ちになる。このような動作を繰り返すため、1 つの無線 LAN 内のアクティブ端末数は、高々 2 となる。従って、このアクティブ端末数は、無線 LAN が増加するに連れて単調増加する。無線 LAN が N セットあり、全ての無線 LAN が 1 つのチャンネルを CSMA/CA で共有している場合を考える。AP を含めた全ての端末の送信機会は均等のため、 N 個の AP は平均的に順番に TCP-ACK を送信すると見なして、動作を説明する。1 つ目の AP が TCP-ACK を端末に送信すると、TCP-ACK を受け取った端末が瞬間的にアクティブ端末となり、データを送信する。その端末は直ちに TCP-ACK 待ちになるため、再び全ての端末は TCP-ACK 待ちになり、すなわち、非アクティブ端末になる。別の AP が TCP-ACK を端末に送信し、TCP-ACK を受け取った端末がデータを送信するということを繰り返すため、 N セットの無線 LAN 全体のアクティブ端末数は、おおよそ、 N 台の AP と端末 1 台の $N+1$ と見なせる。

3.2.3 バッファ量と性能

AP のバッファ量が TCP スループットに与える影響を説明する。1 つの AP に対して、接続する端末数が増えると、端末 1 台当たりの AP のバッファ量が減る。同じ容量のバッファを多くの TCP 端末で共有せざるを得ないため、オーバフロー確率は増大する。これにより、TCP スループットが低下してしまう。バッファオーバフローで TCP のパケットが廃棄されると、それがデータか TCP-ACK に関わらず、TCP の再送を増加させ、フロー制御により送信レートが低下するからである。

特に uplink 方向の場合を詳細に説明する。端末から AP の方向にデータを送信した場合、AP から端末の方向に TCP-ACK が送られてくる。端末数の多い無線 LAN では、AP の送信機会が少なくなるため、TCP-ACK が AP のバッファに溜まり、TCP-ACK が返るまでの時間が長くなる。また、バッファがいっぱいになると TCP-ACK が溢れて、パケットが破棄される。送信端末は TCP-ACK 待ちのため、データを送ることができなくなる。また、多量の TCP-ACK が破棄された場合は、タイムアウトなどの輻輳制御が起こり、データを送信できなくなるため、TCP スループットが低下する。また、TCP-ACK が 1 つ無くなった場合、次の ACK が返るまでデータを出せなくなるため、TCP スループットは低下する。

4. 多数の近接した無線 LAN モデルとトラフィックモデル

本研究で扱う通信モデルおよび評価モデルについて述べる。会議室やカフェなど人が多く集まる空間において、モバイルルータやテザリングなど移動無線 LAN システムを

各ユーザが用いる場合、多数の近接した無線 LAN が同時に稼働することになる。このとき、移動無線 LAN の AP は、インターネットとの接続には 3G/LTE 回線や WiMAX などの無線通信技術を用いて接続し、パソコンやゲーム機などの無線対応機器との接続には無線 LAN を用いて接続する。近接する無線 LAN は、お互いに干渉をできる限り避けるため、異なるチャンネルあるいはオーバーラップしないチャンネル (例えば、チャンネル 1, 6, 11) を使用するべきである。しかしながら、多くの無線 LAN が近接する場合には、異なるチャンネルの使用にも限界がある [5]。ここでは、多くの無線 LAN が同一チャンネルを用いた時に、どのような通信特性になるかを調査するため、近接する多くの無線 LAN が全て同一チャンネルを用いたとして、その通信特性を評価する。

通信トラフィックとしては、端末からデータを送出する uplink 方向のトラフィックを想定する。通信のデマンドとしては、これまでの端末へのダウンロード型の通信に対して、今後はアップロード型の通信が増加してくると思われる。例えば、Google Glass などのウェアラブルカメラを用いて自分で撮影した映像などの動画ライフログをインターネットのサーバに upload (あるいは、即時放送 [ustream]) するといったアプリケーションやモバイル端末を分散クラウドとして使用するモバイルクラウドなどのアプリケーションが今後増加すると思われる。このようなアプリケーションでは、端末からデータを送出する uplink 方向のトラフィックが主となる。このような uplink 方向に大きなトラフィックを生じるアプリケーションが増加すると、無線 LAN の帯域がボトルネックとなる可能性がある。そのため、本研究では端末から AP に向かう uplink 方向のトラフィックを扱い、その通信特性を評価する。また、多くのアプリケーションで用いられている TCP は、上記のようなアプリケーションでも用いられる可能性が高いため、トランスポートプロトコルは TCP を用いる。

評価モデルにおいては、図 1 のように端末の位置は固定し、均等な間隔の格子状に設置する。この端末に対して、AP を複数台設置し、端末をこれらの AP に所属させ、複数セットの無線 LAN を構築する。例えば、18 台の端末を設置したときに、AP を 18 個にした場合には、図 1 のように 1 つの AP と 1 つの端末で無線 LAN を構築し、AP を 6 個にした場合には、図 3 のように各 AP に 3 台の端末が接続されることになり、すなわち、端末を 3 台ずつ収容する無線 LAN が 6 セット構築されることになる。

各 AP は、3G/LTE や WiMAX などの広域無線メディアでインターネットに接続されていることを想定する。一般に、このような広域無線メディアでは、収容端末数が多く数百台規模であるので、収容端末数が数台程度変化しても、使用できる帯域はほぼ固定である。そこで、AP 数が変動しても、AP からインターネットへの AP1 台当たりの

接続帯域は、固定と想定する。

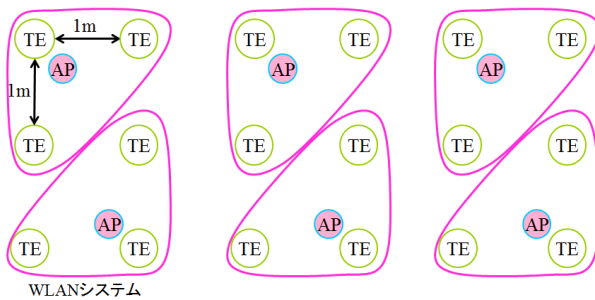


図 3 無線 LAN6 セットの場合の評価モデル

5. 無線 LAN マージ方法

無線 LAN のマージについて説明する。ある端末と AP の組み合わせで構成される無線 LAN に対して、これを別の無線 LAN と合流 (マージ) させるとは、AP を共用にして、そこに元の無線 LAN の端末を收容することで、複数の無線 LAN から単一の無線 LAN を構築することである。実際の用途としては、複数ユーザがそれぞれ個別に AP を稼働させ、それに自端末を接続して、無線 LAN を運用しているときに、この複数ユーザが自端末をだれかの 1 つの AP にのみ接続して、ユーザ全員で 1 つの無線 LAN を運用する、といったことが考えられる。マージを行うことで、使用する AP 数を減らすことができ、電力削減が望める。また、従量制課金ユーザは、定額制課金ユーザの無線 LAN にマージしてもらうことで、通信料金を低減することが可能になる。マージによる電力削減と性能との関係については、7 章で詳しく述べる。

マージを行う際の AP の設置場所およびマージによる通信特性の変化について述べる。位置的に固定された複数の端末と無線 LAN 数に応じて位置を変更できる AP があるとき、AP と端末の組み合わせ方は、無線 LAN 数に応じて変更した。同じ AP を共有する端末の選び方は、ある端末の上下左右に位置する端末を選んだ。また、キャプチャエフェクトを出すために、AP の配置は、自分自身に接続している端末との距離は近く、他の AP に接続する端末との距離は遠くなるようにした。これにより、無線 LAN の数および 1 つの無線 LAN に收容される端末数が異なるマージ結果が複数できる。

このマージにより、AP と端末の構成が変化することで、TCP スループットを決める要因も変わる。すなわち、無線 LAN をマージし、AP 数が減ることで、キャプチャエフェクト、アクティブ端末数、アクティブ端末当たりの AP バッファ量、が減少するためである。キャプチャエフェクトの減少とアクティブ端末当たりの AP バッファ量の減少は TCP スループットを減少させ、一方、アクティブ端末数の減少は TCP スループットを増加させる。

なお、キャプチャエフェクトの減少は、MAC スループットを減少させ、そのため TCP スループットを低下させる。本モデルの場合、キャプチャエフェクトを増加させるために、AP を最適な場所、例えば端末群の重心など端末群の中央付近に設置する。これにより、各無線 LAN では、内部の AP と端末は近く、逆に他の無線 LAN の AP や端末とは遠いため、キャプチャエフェクトを顕著にすることができる。

AP は TCP-ACK を持つため、AP 数が減少すると、アクティブ端末数も減少する。アクティブ端末が少ない場合には、フレームを同時送信する可能性も低いため、コリジョン発生率が減って、MAC スループットが増加する*2。

これらのスループット増減要因によって、総スループットの値が変化する。この増減要因が結果的にスループットを増加させるか否かを調査するために、次章では、マージ結果に応じて、どの程度の TCP スループットが得られるかを定量的に明らかにする。

6. 無線 LAN マージ方法と TCP スループットの関係の評価

6.1 実機実験構成

評価モデルと、評価実験に使用した機材とパラメータについて説明する。

まず、前章でも述べたように、ユーザは、自身の端末 (スマートフォン、ノート PC、ゲーム機器など) を自身の AP に無線 LAN 接続し、この AP を 3G あるいは LTE など公衆無線回線でインターネットに接続しているというモデルを仮定する。ただし、複数無線 LAN のトータルの最大スループットを計測するために、本実験では、実際には 3G/LTE を用いず、受信端末を AP と有線接続し、3G/LTE のボトルネックを排除している。また、このようなユーザが会議室やカフェなど比較的近距離にて多数存在する場合を仮定する。すなわち、これは、多くの無線 LAN が近接して通信していることに相当する。

実験機材と用いたアプリケーションについて述べる。移動無線 LAN システムとして、AP には手のひらサイズのポータブルルータ (PLANEX MZK-MF300N バッファ量推定 566.9 パケット [13]) を使用し、送信端末には Android 携帯端末 (Nexus S, Galaxy S) を用いた。無線 LAN には、現在最も使用されている IEEE802.11g を用い、TCP スループット測定にはアプリケーション Iperf を用いた。Android はバージョン 2.3。TCP は TCP-CUBIC である。

実験システムの構成を示す。多数の無線 LAN を使用する場合の通信特性および前述のマージ (AP の台数を変化さ

*2 バッファ量の減少は、例えば、無線 LAN が 2 セットから 1 セットになるような場合には、端末当たりの AP バッファ量が 1/2 倍になるといったように、無線 LAN 数が少ない場合には、バッファ量の変動が顕著になる。

せた時の) 特性を評価するため、多数の無線 LAN を充分干渉する距離に近接させた。具体的には、端末は固定し、間隔 1m の格子状に設置した。AP は、マージ数に応じて変化させ、1 台～端末数まで変化させた。従って、無線 LAN 数も 1 台～端末数まで変化する。AP の配置は、このマージ数に応じてカバーすべき端末に対して前述のように最適な地点に配置した。全ての無線 LAN は 1 つのチャンネルを共用する。今回はチャンネル 1 番を用いた。トラフィックは、TCP とした。AP のパラメータは、全て同一の値に設定した。例えば、WMM(Wifi MultiMedia) 等の特殊機能は全て無効にした。端末も同様に設定した。無線の実験では、実験場所により、特性が異なることが考えられるため、実験場所を適切に選択することが重要である。本実験は、無線 LAN が実際に多く近接する場合の通信特性を評価するため、多くの人が集まることが予想される場所の 1 つである大学内の会議室で行った。

6.2 TCP スループット特性

図 4, 5 に、送信端末を 18 台にしたときの、無線 LAN 数に対する総スループット特性をキャプチャエフェクト無しにした場合 (0m) とキャプチャエフェクトが十分にある場合 (1m) について示す。無線 LAN が 1 では、18 台の端末が 1 台の AP に接続され、18 では、AP と端末が 1 台ずつで 18 セットの無線 LAN が 1 つのチャンネルを共有している。キャプチャエフェクトが無くなるように端末をほぼ 0m の近距離にした場合、無線 LAN 数が多いほど、スループットが低くなった。一方、キャプチャエフェクトが十分に出るように端末を 1m 間隔で格子状に配置した場合には、無線 LAN 数が多いほどスループットが高くなった。

図 6 に、このスループットが、キャプチャエフェクト、アクティブ端末数、バッファ量のどの要因によって得られたのかを示す。まず、0m の場合は、無線 LAN が多いほど、アクティブ端末数が増加してスループットが低下する効果が、バッファ量が増加してスループットが向上する効果を上回ったため、黄色の矢印だけスループットが低下した。具体的には、図 5 に示すように、無線 LAN が 2 セットから 18 セットに増加した場合、総スループットは 0.5Mbps 程度、すなわち 31%低下した。一方、1m の場合は、図 6 に示すように、無線 LAN 数が多いほど、キャプチャエフェクトによってスループットが向上する効果が大きくなったため、緑色の矢印だけそれぞれスループットが向上した。その結果、図 5 に示すように、無線 LAN が 2 セットから 18 セットに増加した場合、総スループットは 5.2Mbps 程度、すなわち 69%向上した。

6.3 応用例：マージを用いた省エネルギーの実現

上記の結果により、無線 LAN をマージすることで AP 数と無線 LAN の総スループットを変化させることができ

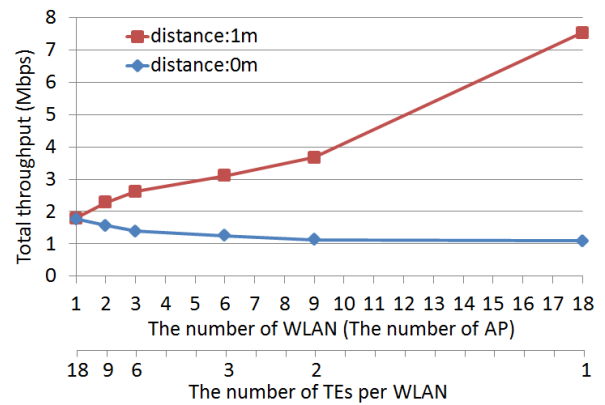


図 4 無線 LAN 数に対するスループット特性

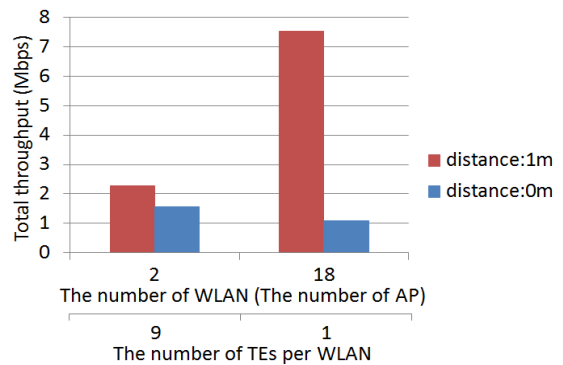


図 5 無線 LAN 数が少ない場合 (マージあり) と多い場合 (マージ無し) のスループット特性比較

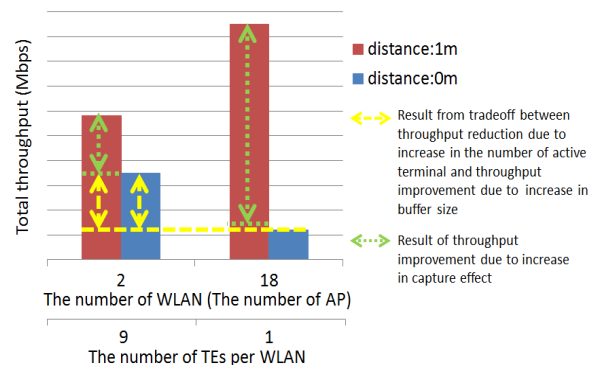


図 6 キャプチャエフェクト、アクティブ端末、バッファ量の要因で決まるスループットの内訳

ることが示されたので、この結果の 1 つの応用例として、省エネルギーについて検討する。本稿における省エネルギーとは、使用する AP 数を減らして、電力消費を削減する、あるいはバッテリー持続時間を延長することを指す。本稿では、計算の簡単のため、バッテリーは、AP を用いている時間に比例して、消費すると仮定する。

省エネルギーと品質は、一般的にトレードオフの関係にある。今回の場合、品質を少し犠牲にすると、大きな省エネルギー効果が得られる可能性があるため、それを数値例を用いて説明する。前章で述べたように、多くの AP を

使ったとしても、無線 LAN 帯域がボトルネックになり、全 AP の合計帯域を使い切ることができず、3G 回線が無駄になってしまっている。

そこで、AP 数を減らして、無線 LAN をマージすることによって、無線 LAN 帯域は少し減少するが、3G の回線を余すところなく使うことができる。例えば、18 台の端末を 1m 程度の距離に近接させて利用する場合、これを無線 LAN k セットに収容するものとする。3G 回線のスループットが 2Mbps である場合、図 7 に示すように、無線 LAN 18 セットの場合、3G 回線の合計帯域は 36Mbps になるが、無線 LAN の合計帯域はそれより少ない 7.5Mbps である。これをマージして無線 LAN 6 セットにした場合、3G 回線の合計帯域は 12Mbps になるが、無線 LAN の合計帯域も約 5.0Mbps になり、これにより、12 個の AP の電源を切ることができる。さらにマージして無線 LAN 1 セットにした場合、ほぼボトルネックが解消され、さらに 5 個の AP の電源を切ることができる。もし、3G 回線のスループットがより小さい 0.6Mbps である場合、図 8 に示すように、無線 LAN 18 セットの場合、3G 回線の合計帯域は 10.8Mbps になるが、無線 LAN の合計帯域はそれより少ない 7.5Mbps である。これをマージして無線 LAN 5 セットにした場合、3G 回線の合計帯域は 3.0Mbps になるが、無線 LAN の合計帯域も約 3.0Mbps になり、ほぼボトルネックが解消される。これにより、13 個の AP の電源を切ることができる。このように 18 セットから 5 セットにマージすることで、スループットは 60% 低下する。しかしながら、無線 LAN のボトルネックによる 3G 回線容量の無駄を回避しつつ、72% の省電力が実現できる。このように、マージによるスループット低下は著しいが、無駄な電力は軽減できるため、とにかく省エネルギーを優先したい場合には、その目的と合致する。

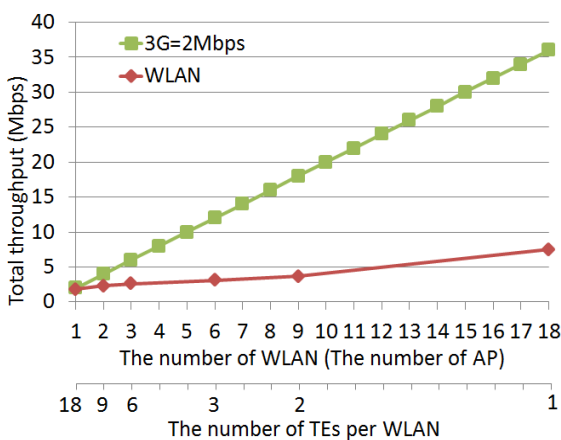


図 7 無線 LAN の総スループットと AP からインターネットへの 3G 回線の合計帯域 (2.0Mbps/3G 回線)

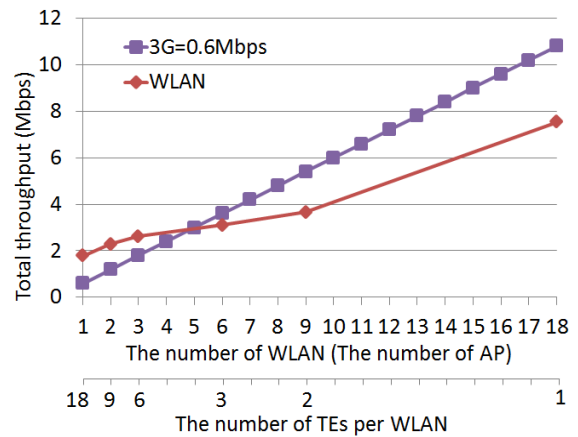


図 8 無線 LAN の総スループットと AP からインターネットへの 3G 回線の合計帯域 (0.6Mbps/3G 回線)

7. おわりに

多数の無線 LAN が密集する状況での TCP スループット特性の評価を実機を用いて行い、また TCP レベルの要因と MAC レベルの要因とキャプチャエフェクト要因を切り分けた。その結果、既存研究で示されている UDP の場合とは異なり、トラヒックの双方向性や輻輳制御 (再送制御) のため、スループット特性は、アクティブ端末数や AP パッファ量に大きく依存する。18 台の TCP 端末を 1~18 セットの無線 LAN に分割して、全ての無線 LAN が同じチャンネルを用いる実験を通して、端末をほぼ 0m の近距離にして、キャプチャエフェクト無しの場合には、無線 LAN 数が多いほど、アクティブ端末数増加のマイナス効果が、パッファ量増加のプラス効果を上回って、スループットが低くなった。一方、1m 間隔で格子状に端末を配置した場合には、アクティブ端末数増加のマイナス効果よりもキャプチャエフェクトによるプラス効果が大きいことにより、無線 LAN 数が多いほどスループットが高くなった。具体的には、無線 LAN が 2 セットから 18 セットに増加した場合、0m の場合は、総スループットは 31% 程度低下した。一方、1m の場合は、69% 程度向上した。

さらに、この特性を考慮し、複数無線 LAN を 1 つに統合する無線 LAN のマージ方法による省エネルギー通信について検討評価した。無線 LAN のマージにより、スループットと AP 数と 3G 回線容量を変化させることができる。例えば、18 台の端末を無線 LAN k セットに収容する場合、3G 回線のスループットが 2Mbps である場合、無線 LAN 6 セットにマージした場合、3G 回線の合計帯域は 12Mbps になるが、無線 LAN の合計帯域も約 5.0Mbps になり、これにより、12 個の AP の電源を切ることができる。もし、3G 回線がより小さい 0.6Mbps である場合、無線 LAN 5 セットにマージした場合、3G 回線の合計帯域は 3.0Mbps になるが、無線 LAN の合計帯域も約 3.0Mbps に

なり,ほぼボトルネックが解消される。これにより,スループットは60%低下するが,72%の省電力が実現できる。このように,マージによるスループット低下は著しいが,無駄な電力は軽減できるため,とにかく省エネルギーを優先したい場合には,その目的と合致する。

参考文献

- [1] IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802, June 2007.
- [2] Google Glass: <http://www.google.com/glass/start/>
- [3] Juha Laurila, Daniel Gatica-Perez, Imad Aad, Jan Blom, Olivier Bornet, Do, Olivier Dousse, Julien Eberle, Markus Miettinen, "The mobile data challenge: Big data for mobile computing research," Mobile Data Challenge by Nokia Workshop, Newcastle, UK (2012).
- [4] Moo-Ryong Ra, Jeongyeup Paek, Abhishek B. Sharma, Ramesh Govindan, Martin H. Krieger, Michael J. Neely "Energy-delay tradeoffs in smartphone applications," Mobile Systems, Applications, and Services(MobiSys) pp255-270, Jun. 2010.
- [5] 熊谷菜津美,村瀬 勉,小口正人,"多くのAPが近接する場合の通信品質評価,"信学技報,NS研究会,NS2012-94, Oct. 2012.
- [6] 熊谷菜津美,磯村美友,村瀬 勉,小口正人,"無線LANアクセスポイントのチャンネル内競合とチャンネル間干渉を同時に考慮したチャンネル割当手法,"信学技法,CQ研究会CQ2012-68,Nov. 2012
- [7] Akash Baid, Michael Schapira, Ivan Seskar, Jennifer Rexford, Dipankar Raychaudhuri, "Network Cooperation for Client-AP Association Optimization," Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc Wireless Networks (WiOpt), 2012 10th International Symposium, pp431-436, on 14-18 May 2012
- [8] 森内彩加,村瀬 勉,小口正人,"異種WLANシステムが近接する場合における通信特性,"データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM)2013, E6-2, Mar. 2013.
- [9] 磯村美友,熊谷菜津美,村瀬 勉,小口正人,"移動無線LANの集中度合における干渉と競合の影響,"データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM)2013, F1-6, Mar. 2013.
- [10] 森内彩加,安藤玲未,村瀬 勉,小口正人,"多様な移動体通信環境における無線LANシステム同士の競合,"マルチメディア,分散,協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, 8B-2, Jul. 2012.
- [11] Iperf: <http://sourceforge.net/projects/iperf/files/iperf-2.0.5.tar.gz/download>
- [12] 熊谷菜津美,村瀬 勉,小口正人,"トラヒックの方向が異なる複数無線LANの多重特性,"データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM)2013, E6-3, Mar. 2013.
- [13] 森内彩加,安藤玲未,村瀬 勉,小口正人,"無線LAN環境におけるハンドオーバを伴う移動端末のノード間干渉に関する一検討,"データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM)2012, C2-4, Mar. 2012.