

トラヒックの方向が異なる複数無線 LAN の多重特性

熊谷菜津美[†] 村瀬 勉^{††} 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

^{††} NEC 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: [†]natsumi@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com, ^{†††}oguchi@computer.org

あらまし 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環境が多くなってきた。本研究では多くの無線 LAN システムが存在する環境で、全体の高性能化を計るために、性能に影響を及ぼす要因について評価を行っている。要因として、無線 LAN チャネル割当方法で決まるチャネル間干渉、チャネル内競合 (コリジョンによる性能低下) だけではなく、キャプチャエフェクトや AP のバッファ量なども考慮している。本論文では実機を用いた評価において、無線 LAN チャネルの割当を変えたときに、無線 LAN 全体のスループットがどのように変わるかを示している。特に、TCP トラヒックにおいては、uplink のみあるいは uplink/downlink 混合といったトラヒックの方向により、性能が 2 倍程度変わることを示している。

キーワード チャネル割当, 無線 LAN, 干渉, 競合

Throughput characteristics of multiple wireless LANs with different traffic directions

Natsumi KUMATANI[†], Tutomu MURASE^{††}, and Masato OGUCHI[†]

[†] Ochanomizu University Otsuka 2-1-1, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610 Japan

^{††} NEC Corporation

1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666, Japan

E-mail: [†]natsumi@ogl.is.ocha.ac.jp, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com, ^{†††}oguchi@computer.org

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いる。モバイルルータとは、インターネットとの接続には 3G 回線や WiMAX などの無線通信技術を使い、パソコンやゲーム機などの無線対応機器は IEEE802.11 [1] の無線 LAN で接続するルータである。またテザリングとは、スマートフォンをアクセスポイント (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。このとき、各無線 LAN へのチャネル割当、無線 LAN 数、トランスポートプロトコル、AP のバッファ量などの要因により、近接している全ての無線 LAN の合計スループット (トータルスループット) が大きく変

わってくる。すなわち、他の無線 LAN からの「干渉」と「競合」である。干渉とは、主として他のチャネルの無線 LAN からの cross-talk (チャネル間干渉と呼ぶ) であり、競合とは、同じチャネルで CSMA/CA にて帯域を共有し、衝突 (コンテンション) 制御を共有する無線 LAN からの影響 (チャネル内競合とよぶ) である。

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 に対しては有効な手法も、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 [2] [3]。干渉や競合の度合いは、様々な要因によって決まり、特に TCP 通信においては、重要な要因の 1 つにトラヒック方向が上げられる。そこで、トラヒック方向の違いが性

能に与える影響も実機にて計測する。

2. 従来研究

無線チャンネルは限られた資源であるため、これを有効活用する必要がある。例えば、利用希望の無線 LAN を漏れなく収容し、なおかつ最大のスループットを得ることが求められる。このとき、有効なのが、チャンネル割当制御である [4] [5] [6]。

チャンネル割当制御では、干渉などを考慮しながら、各無線 LAN に特定のチャンネルを割り当てる必要がある。古くは [4] のような無線 ATM システムで、すでに考えられていた。さらに、チャンネルへの無線 LAN 多重度と干渉の影響を考慮した理論的なチャンネル割当制御方法により、新規無線 LAN がチャンネルを選択するときの新規無線 LAN の期待獲得帯域を最大にする最適チャンネル選択制御の大枠は明確になってきた [7]。

しかしながら、多くの無線 LAN 全体を制御対象とし、全体のチャンネル割当を最適に編成するような制御方法については、未だ知られておらず、電波資源の有効利用という点からもこの検討が重要になる。さらには、実機において、このような理論的割当方法がどの程度妥当であるかどうかの調査も、必須である。無線 LAN の数が多い場合には、多くの無線 LAN が 1 つのチャンネルを共有することからチャンネル内競合によるスループット低下が起こる。しかしながら、こ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およびスループット特性調査については、従来研究ではなされていなかった。

そこで本研究では、多くの無線 LAN が近づく環境において、チャンネルを最適に割り当てるための基礎データを得るために、無線 LAN チャンネル割当の違いや AP パツファ量の違いなど様々な状況での無線 LAN 全体のスループットを評価する。

3. 干渉と競合

無線 LAN の性能 (本稿ではスループット) を劣化させるものとして、他のチャンネルの無線 LAN からの干渉と同チャンネルの無線 LAN との競合が挙げられる。まず、この干渉と競合について、劣化のメカニズムを説明する。

3.1 干 渉

干渉とは、他のチャンネルの無線 LAN の電波が自チャンネルの無線 LAN の電波に重なり、受信電波特性を劣化させることである。IEEE802.11 無線 LAN に許可されている 2.4GHz 帯では、あるチャンネルを使用する場合、出力される電波はチャンネルに対応した周波数を中心として広がるため、実際には隣接するチャンネルに相当する周波数帯も利用する。そのため、隣接するチャンネル同士を利用すると、どちらも同じ周波数帯を使用するため、無線 LAN フレームに、他のチャンネルの電波が重なってフレームが破壊される。あるいは、信号が受信に十分である場合には、キャリアとして見なされるため、送信待ちが発生する。ただし、無線 LAN の使用が同様に許可されている 5GHz 帯では、隣接チャンネルで干渉は発生しない。

普及している IEEE802.11g の 2.4GHz 帯においては、無線 LAN チャンネルは、13 のチャンネル (米国では 11 のチャンネル) があり、5Hz 間隔で配置されている。これらを周波数の低いほう

からチャンネル 1~チャンネル 13 と呼ぶ。干渉は、チャンネル差が 5 以上 (例えばチャンネル 1 と 6) では起こらず、4 以下では起こり、またその干渉の強さは、チャンネル差が小さいほど大きい。図 1 の矢印 () は、チャンネル差とチャンネル間干渉の大きさの違いを表したものである。チャンネル 1 と 13 のような端のチャンネルは隣接するチャンネルが少ないため干渉が少ないチャンネルとなる。一般的に、無線 LAN は、有限のチャンネルを最大限に利用し、干渉を避けるようなチャンネル割当を行うため、両端のチャンネルと真ん中のチャンネルつまり、1, 6, 11 (あるいは 11 の代わりに 13) をデフォルトで使用する事が多い [8] [9] [10]。

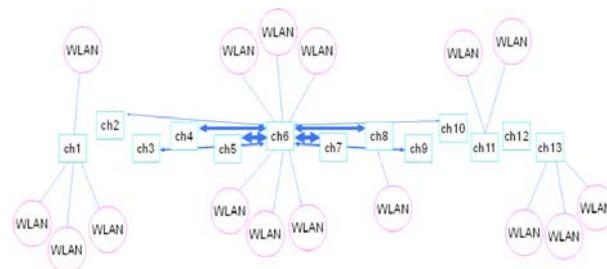


図 1 チャンネル利用状況と干渉

3.2 競 合

次に、競合とは、同じチャンネルで CSMA/CA を行い有限の帯域を共有するメカニズムにより、品質劣化の原因となるフレーム衝突 (コリジョン) が発生することである。衝突により、待ち時間が長くなり、またフレーム再送が行われるため、スループットは低下する。この衝突は、チャンネルを共有する無線 LAN が増加するほど多くなる。また、コリジョンが発生した場合でも、競合相手の電波が弱い等の場合にはキャプチャエフェクトにより、正常なフレーム受信が行われる。この現象は、2.4GHz 帯および 5GHz 帯において、同一チャンネル内で発生する。

4. チャンネル割当

以上の干渉と競合の特性を考慮して、チャンネル最適割当の基本方針を決定する。まず、5GHz 帯のようなチャンネル間干渉が起こらない、つまり競合のみの場合と、2.4GHz 帯のような干渉も競合も同時に起こりうる場合とに分けて考える。

4.1 競合のみの場合

2.4GHz 帯における干渉しないチャンネルのみを用いる場合、あるいは 5GHz 帯を用いる場合には、競合のみの影響を考慮して割当を行う。競合の度合いは、コリジョンの度合いであるため、コリジョンの特性を考慮した割当になる。コリジョンは、端末や AP が同時に送信を行う場合に発生し、送信する端末が多いほど大きくなる。また、コンテンションウィンドウ (CW) が小さいほど大きくなる。本稿では、多少となる全ての無線 LAN がデフォルト設定の CW を使用していると仮定する。これにより、送信する端末数 (アクティブ端末数) が競合の度合いを決めることになる。アクティブ端末数は、AP も含めて無線 LAN 内の、送信すべきデータを持っている端末数である。TCP-ACK 待ちでパケットを送ることが出来ない端末や、VoIP のように、定期的かつリンク容量に比べて低速でパケットを送信する端末

がパケットを送らない期間にいる端末などは、アクティブ端末数には計上されない。

従って、アクティブ端末が多い無線 LAN ほど、競合に大きな影響を与える。また、UDP のような片方向通信の場合よりも、TCP のような送達確認を行う双方向通信のほうが、アクティブ端末を増やす。アクティブ端末数の大きさと競合によるスループット低下の関係は、単純ではない。そのため、端末のトラヒック特性、AP と端末間の距離といった要因を考慮してチャンネル割当を行う必要がある。

また、一般的に考えて、チャンネルを有効に利用するような割当も重要である。チャンネルの利用効率を上げるために、次のような割当規則が適用可能である。各チャンネルの利用率を出来るだけ均等化する。すなわち、端末のトラヒック量が異なる無線 LAN がある場合、トラヒック量の少ない (unsaturated) 無線 LAN を複数用いて 1 つのチャンネルに割り当てるといったように、無線 LAN のトラヒック量の合計とチャンネルのリンク容量との差が小さくなるようにする。これにより、チャンネルのリンク容量が最大限使用されるため、無線 LAN のトータルスループットを大きくすることができる。しかしながら、1 つのチャンネルに無線 LAN をまとめるとアクティブ端末数が増えるため、衝突が起こりやすくなるというデメリットもある。一方、トラヒック量の少ない場合は、衝突も起こりにくいため、どの程度のトラヒック量とアクティブ端末数が最適であるかの検討は、今後の課題である。

また次に、AP と端末間の距離が異なるなど異なる伝送レートを用いている複数の無線 LAN へのチャンネル割当方法について説明する。AP と端末間の距離が大きくなった場合などに、伝送レートは自動的に低下するような仕組みが通常取り入れられている。伝送レートが小さくなると、無線 LAN のスループットは伝送レート以下になってしまう。伝送レートの低い端末 (あるいは無線 LAN) と高い端末で 1 つのチャンネルを共有した場合、スループットが著しく低下するという特性がある。そのため、伝送レートが小さい無線 LAN には、複数でチャンネルを共有させ、できるだけ伝送レートが大きい無線 LAN を別のチャンネルに割り当てることで、無線 LAN 全体のスループットを増加できる。

4.2 干渉も競合も起こる場合

競合に加えて、干渉も起こる場合には、干渉の影響と競合の影響の双方を考慮する必要がある。まず、干渉について述べ、ついで、干渉と競合を同時に考慮する割当方法について述べる。

干渉において、注目すべきは、トラヒック量の影響である。電波的な干渉については、3.1 節で述べたとおりチャンネル差に依存する。さらに、干渉の影響は、トラヒック量に依存する。干渉は、近隣のチャンネルがフレーム送信する際に発生する干渉波のため、トラヒック送出時間の大小が干渉の時間の大小と合致するはずである。フレーム送信をどの端末が行ったかには関係ないため、競合の説明で述べたような無線 LAN 数やアクティブ端末数には依存しない。

干渉が無い場合のスループットは送信トラヒック量に応じて増加し、干渉はトラヒック量に応じて増加する。従って、干渉

を最小にするトラヒック量が存在する可能性があり、その可能性は、いくつかの近隣チャンネルの送信トラヒック量により決まるはずである。競合と上記干渉の特性を考慮すると、次のような割当規則が妥当であろう。まず、基本規則は、無線 LAN 数が比較的少ないときには、干渉の影響を主として考えて、割当を行う。例えば、干渉が起こらない組み合わせであるチャンネル 1,6,11 のみを用いる。実際の干渉度合いを考慮すると、チャンネル差 4 でもほとんど干渉が起こらないとの報告があるので、チャンネル 1,5,9,13 という組み合わせも有効であろう。一方、競合の影響が現れるような数多くの無線 LAN の場合には、敢えて、干渉のあるチャンネルを用いて、競合の影響を緩和する。

競合の影響を緩和するため、アクティブ端末数、トラヒック量、伝送レートといった、コリジョンの発生率に寄与するパラメータを考慮して、バランス良く、チャンネルに割り当てることが重要である。詳細な割当方法については、今後の課題である。

次章では、多くの無線 LAN をチャンネルに割り当てるに当たって、競合と干渉がスループットに与える影響を実機により計測した結果を報告する。

5. UDP 通信特性と干渉および競合

5.1 実機実験モデル

実験にて使用した機材や設定について説明する。本実験は、移動無線 LAN システムを想定しているため、AP にはポータブルルータ (PLANEX MZK-MF300N パックファサイズ 566.9 パケット [11]) を使用した。モバイル環境ではスマートフォンを利用することが多くなっているため、送信端末には Android 携帯端末 (Nexus S, Galaxy S) を用いた。スループット測定にはアプリケーション Iperf を用い、無線 LAN には、現在最も使用されている IEEE802.11g を用いた。

実験システムの構成を示す。1 つの無線 LAN は、AP と無線でつながっている 1 台の携帯端末と有線で接続している PC とで構成した。本実験では、多くの無線 LAN が近接する場合の通信品質に与える影響の大きさを評価するため、AP を十分近接させ、おおむね互いに 50cm 以内の距離に設置した。また、移動無線 LAN を利用する場合、AP と AP に接続する端末間の距離は比較的近いと考えられるため、AP と所属する端末間の距離もおおむね 50cm 程度に近接させた。AP のパラメータ設定は、チャンネル番号設定を ACS にし、WMM (Wifi Multi Media), IAPP (Inter Access Point Protocol) 等の特殊機能を全て無効にした。端末は、WMM などが無効になっているデフォルトの設定で用いた、また、暗号は使用せず、オープンな無線 LAN 通信を行った。本実験は、通常のオフィス及び、大学内の会議室にて行ったため、ノイズや他の無線 LAN の影響が多少は含まれる。Android アプリケーションの Wifi Analyzer などでの計測では、検知された無線 LAN は、オフィスでは、チャンネル 4 を使用している 1 台のみであった。また、当該無線 LAN は、1 時間に数 100 パケット程度の非常に低レートのトラヒックであったため、ピーコン以外の干渉は、ほとんど実験結果に影響が無いと考えられる。この環境において、無線 LAN 単独で Iperf で計測した UDP スループット (端末 AP 方向)

は、21Mbpsであった。これは、文献[12][13]等の実験結果と比較しても、IEEE802.11gにおいて通常観測される数値であるため、実験系以外のノイズなどの問題は少ないと判断した。

5.2 UDP 通信特性

チャンネル内競合による性能低下については、2つの無線LANが競合した場合の詳細結果が文献[12][13]にも述べられているが、より多数の無線LANが競合した場合について調査した。以下では、UDP通信を行った結果について述べる。図3は、1セットの無線LANを1チャンネルで通信させたときのスループット(a)と18セットの無線LANで1チャンネル(チャンネル1)を共有し(図2(a))、通信を行ったときの18セットのスループットの合計値(b)である。18セットの合計が1.27Mbpsという劣悪な通信品質となることが分かった。単独の無線LANでは、21Mbpsのスループットが得られることと比較すると、チャンネル内競合による品質劣化が非常に大きいことが分かった。次に、チャンネル間干渉による性能低下について調査した。図4は、13セットの無線LANが各チャンネルを1つずつ利用し(図2(b))、通信を行ったときの13台のスループットの合計値(b)と、もし仮に干渉が無かったとしたときに、13チャンネルの合計で得られるはずの計算値(21Mbps × 13=273Mbps)(a)を示している。その結果、この場合も13セットの合計が12.7Mbpsという劣悪な通信品質に低下してしまうことが分かった。チャンネル間干渉が通信品質に与える影響も非常に大きく、スループットが大きく低下することが分かった。

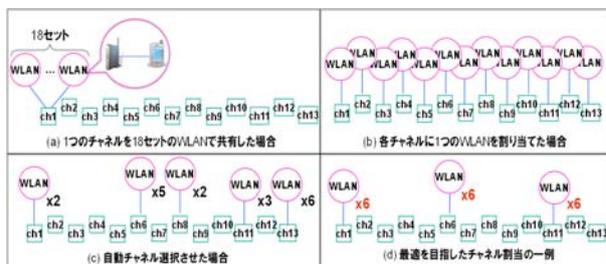


図2 チャンネル割当

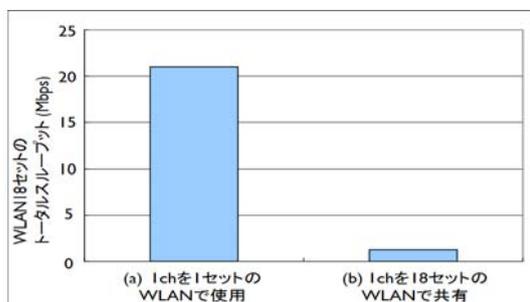


図3 チャンネル内競合

6. 市販実機のチャンネル割当と性能評価

6.1 自動チャンネル選択 (ACS)

チャンネル割当に関しては、IEEE802.11などが定める標準の範囲外である。そのため、市販の無線LAN(AP)には、ベン

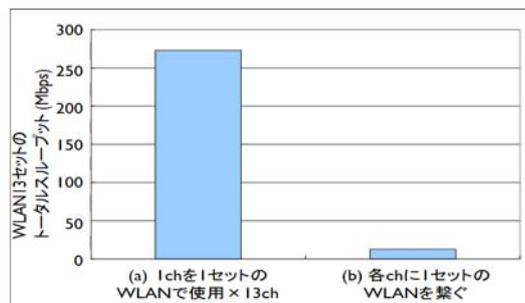


図4 チャンネル間干渉

ダー独自の自動チャンネル選択メカニズム(ACS)が備わっている。ベンダー独自ではあるが、一般的には、チャンネル全体のスループットを高めるため、チャンネル間干渉を避けるようなアルゴリズムが実装されている[7]。このアルゴリズムでは、特定のチャンネルを積極的に用いることが多い。特定のチャンネルとは、両端のチャンネル(チャンネル1,11)および両端のチャンネルからの干渉のない真ん中のチャンネル(チャンネル6)のことを指し、この組み合わせで、チャンネル同士が干渉することなく有効利用できる最大の数をとることができる。また、米国では、デフォルトでは、チャンネル6に固定されて出荷されているAPが多いとの報告もある[8][9][10]。ただし、今回は日本国内向けの機材を実験に使用しており、デフォルトでは、チャンネル設定は全ての機材でACSになっていた。

また通常、ACSは静的であり、つまり一度チャンネル決定を行うと、その後、電源入れ直すなどの何らかのリセット状態にならない限り、再センシングは行わず、同じチャンネルを使い続けるとされている。

市販の無線LANは、上記のような仕様とされているが、これは、チャンネル数と同程度の無線LANが存在するという前提で設計されている可能性が高い。チャンネル数に比べて遙かに多数の無線LANが存在する場合には、これらの仕様が最適な振舞いをするとは限らないため、このような特性を持つ無線LANを多数多重したときに、どのようにチャンネルが選択されるかを実機実験にて評価する。

6.2 割当結果の評価

各APにACSでチャンネルを選択させたときの結果の一例を示す。ACSは、電源を入れたときのみ起動されるといわれているため、ここでは、各APを一斉に起動した場合と、順次起動した場合との2通りを試した。一斉起動の場合は、他のAPのチャンネル選択結果を考慮することができずにチャンネルを決めるのではないかと予想され、順次起動の場合は、他のAPのチャンネル決定結果を考慮して決めることが出来るはずである。

図5は、全ての無線LANの電源を同時に入れたときの、各無線LANが自動でチャンネル選択した結果である。横軸がチャンネル番号、縦軸が、チャンネルを使用していた無線LANの数で、グラフの棒の中の番号は、無線LANの識別番号である。前述のように、無線LANはチャンネル間干渉を避けてチャンネル選択を行うため、選択結果のチャンネルも互いに干渉しないチャンネル1,6,13に集中する傾向にあるはずである。しかし、その他の

チャンネルを選択することもあり、チャンネル間干渉を完全に避けているとは言えないという結果を得た。

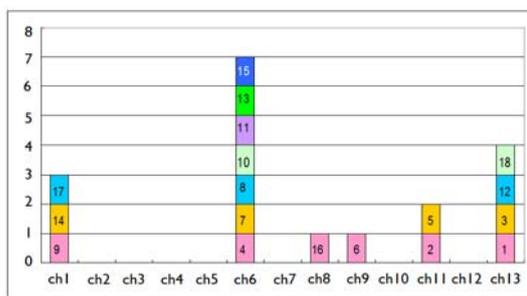


図5 自動チャンネル選択 (一斉起動)

一方、図6は同様の実験において、無線LANの電源を1台ずつ順に入れたときの、各無線LANが自動選択したチャンネルを時系列で示している。横軸は、無線LAN識別番号で、縦軸がチャンネル番号である。図は、識別番号の小さいAPから順に電源を入れた場合、先に接続されている無線LANにどの程度配慮して、チャンネルを決めているかを示している。順に繋がる場合においても、チャンネル間干渉を避けているが、同時に同じチャンネルを今回の場合3つ以上の無線LANが使わないように、つまりチャンネル内競争を避けて、同じチャンネルを使わないようにしているかのようにも振る舞った。なお、図には示していないが、先に述べたようにチャンネル4を使う他の無線LANが存在するため、起動している無線LANが少ない状況では、チャンネル1~4を避けているようにも思える。最終的には、チャンネル13においては、6個の無線LANがひしめき合うことになった。これは、チャンネル内競争を引き起こす危険性が大きいため、良い選択とは言えない。

チャンネル選択が、電源投入時のみに行われ、動的であることを確認するために、チャンネルを自動取得した後、チャンネル1に対して干渉するように利用していなかったチャンネル2に取って無線LANを3台割り当てた。これにより、チャンネル1はチャンネル2からの干渉を受けるが、他のチャンネルを利用せずチャンネル1を使い続けることが分かった。また、その後全ての無線LANの電源を入れ直すと、チャンネル1に繋がっていた無線LANはチャンネル2からの干渉を避け、チャンネル1には繋がらないという結果、およびチャンネル2の無線LANを元のチャンネル6に戻し、再度電源を入れ直すと、元々チャンネル1に繋がっていた無線LANの内2台はチャンネル1に戻ることで、チャンネル選択はダイナミックには行われていないことを確認した。

7. 自動チャンネル選択のスループット評価とチャンネル選択改善案

APがACSを行ったとき、チャンネル内競争とチャンネル間干渉について、どの程度考慮したチャンネル割当を行っているのかを検証するため、ACS時の無線LANのトータルスループットを計測することで明らかにした。

ACSにおいては、実験の度に選択するチャンネルが多少変化する。これは、チャンネル決定時の信号の強さや何らかのランダ

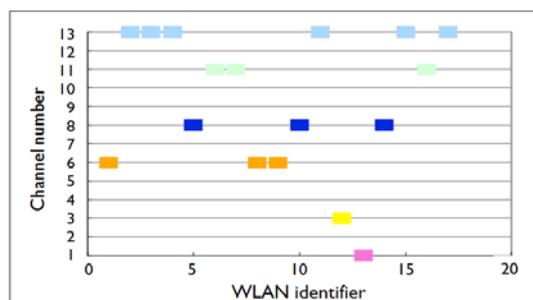


図6 自動チャンネル選択 (順次起動)

ム性を入れて決定しているためと推測される。従って、ACSの平均的なデータを取るため、18セットの無線LANの自動チャンネル選択を10回試行した。各回のスループットを平均した数値をプロットしている。18セットの無線LANの各APを順に起動させて、全てのAPが自動でチャンネル選択を行った後に、端末を通信させた。なお、APを起動させた直後に端末からの通信を行うことを各AP毎に順に行うという方法でも試したが、チャンネル選択結果もスループット計測値もほぼ同じであった。この実験において、ACSが選択したチャンネルの一例を挙げると、図2(c)のように(チャンネル1の無線LAN数, チャンネル2の無線LAN数, ..., チャンネル13の無線LAN数) = (2,0,0,0,0,5,0,2,0,0,3,0,6)であった。

18セットの無線LANのトータルスループット計測値を図7の左側に示す。スループットは、12.8Mbps程度であった。前述のように、干渉が発生するチャンネルを選択していることや、同じチャンネルを用いる無線LAN数にばらつきがあることなどにより、チャンネル内競争とチャンネル間干渉についてあまり適切に考慮されているとは考えにくい。

そこで、このACSよりもスループットが改善されるであろうチャンネル割当(最適を目指したチャンネル割当と呼ぶ(図2(d)))を考え、実際にスループットを計測した。この最適を目指したチャンネル割当では、チャンネル間干渉が起らない組み合わせであるチャンネル1,6,11を利用し、3チャンネルのチャンネル内競争の度合いを同じにするために各チャンネルに6台ずつ無線LANを共有させた。すなわち、(6,0,0,0,0,6,0,0,0,0,6,0,0)である。18セットの無線LANのトータルスループットは、13.6Mbpsと、少しであるが向上した。これらのことから、ACSでは、チャンネル内競争とチャンネル間干渉を考慮したチャンネル選択ができていないこと、さらに干渉を避けるだけの割当では、それほどの性能向上が得られないということが判明した。

今後、スループットの最大化には、チャンネル間干渉とチャンネル内競争の影響も同時に考慮したチャンネル割当の具体的方法の検討が必要である。

8. TCP通信特性とトラヒック方向

8.1 アクティブ端末数とTCP-ACKトラヒックとバッファ溢れ

無線LANにおけるTCPとUDPの振舞いの違いについて述べる。TCPは、双方向通信であるため、uplink方向(無線

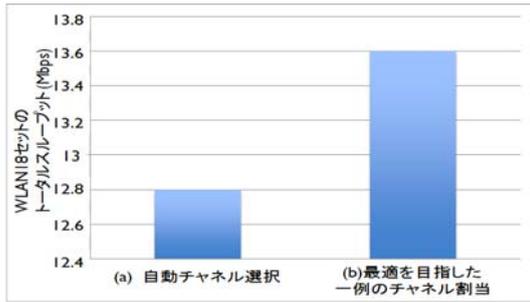


図7 自動チャネル選択及び最適を目指したチャネル割当のトータルスループット

端末から AP の方向) にデータを送出した場合に、downlink 方向に TCP-ACK のトラフィックが流れる。downlink 方向は、端末数の多い無線 LAN にとっては、ボトルネックになりやすく、バッファでの待ち時間が増えるが、場合によっては、バッファがオーバーフローし、パケットが廃棄されてしまう。このことは、TCP には 2 つの影響を与える。1 つは、TCP-ACK 待ちのため、送信端末はデータを送信できない非アクティブ端末になる。TCP-ACK パケットの少量の廃棄時には、影響は軽微であるが、多量の TCP-ACK パケットが廃棄されると、タイムアウトなどの輻輳制御が起動されスループットが大きく低下する。一方、データ送出方向が downlink である場合には、バッファオーバーフローによるパケット廃棄は、直ちに輻輳制御での送信レートにつながるため、影響は非常に大きくなる(いわゆる上下トラフィック不公平問題)。

上記影響は、AP バッファ量に依存するが、近年の市販 AP は、ポータブルタイプでさえも相当量のバッファを保持しており、downlink のトラフィック量をうまく調整できれば、上記影響はかなり軽減できるはずである。

8.2 TCP スループット

前節の議論を含めて、無線 LAN における TCP のスループット(再送分などを含むものを TCP トラフィックと呼ぶ)を決める要因について整理する。

スループットは、TCP レベルの TCP フロー制御と MAC レベルの再送制御に大きく依存する。TCP フロー制御において、TCP トラフィックは、TCP データの廃棄率で決まるので、AP のバッファ量が多いほど TCP スループットが高くなる。

一方、MAC レベルのスループットを決めるのは、アクティブな端末数、フレーム再送率である。このフレーム再送率は、コリジョン発生時にキャプチャエフェクトで救われずエラー受信されたエラーフレームの再送率である。さらに、後述のように、端末のパワーセーブなどの制御も、スループットに影響を与えると考えられる。

8.3 TCP スループット特性

本モデルにおいて、TCP のスループット増加要因と減少要因について述べる。無線 LAN 数を多くすると、AP が多くなり、その結果、AP の総バッファ量が多くなる。すなわち、TCP は、少ない本数で同じ容量のバッファを共用できるため、オーバーフロー確率は減少する。このことは、TCP トラフィックを減

小さく、TCP スループットを向上させる。また、AP を増やすと、近くの AP と通信することが出来るため、図8に示すようにキャプチャエフェクトにより、コリジョンが起こった場合でも正常に受信できる確率が高まる。このことは、MAC レベルのスループットを向上させる。一方、無線 LAN 数を増やすことで、AP 数も増加するためアクティブ端末数も増加し、コリジョン発生率が增大する。

これらの増減要因の影響の大きさは、実験などにより定量的に検証する必要がある。キャプチャエフェクトなどをシミュレーションで検証するのは困難なので、実機を用いた実験を行った。

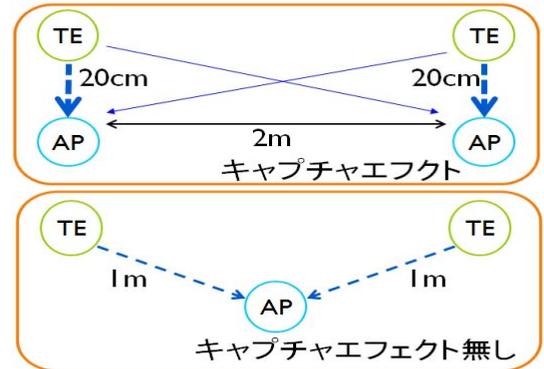


図8 AP 配置とキャプチャエフェクト

9. 実機実験におけるスループット特性

9.1 性能評価モデル

上記のような特性を考慮し、多数の無線 LAN が 1m 程度の距離に近接した場合の特性を評価した。全ての無線 LAN が 1 つのチャネルを共用する。端末数は固定し、AP 数(つまり無線 LAN 数)を変化させた(図9)。トラフィックは、TCP とし、トラフィックの方向の影響を調べるため、(a)uplink 端末のみの場合と、(b)uplink/downlink 端末が 1 つの無線 LAN で同数混在する場合、(c)downlink 端末のみの場合の 3 通りとした。端末と AP は、図9に示すように間隔 1m の格子状に配置し、端末数よりも AP が少ない場合には、最寄りの AP に接続させるように AP への割振りを行った。

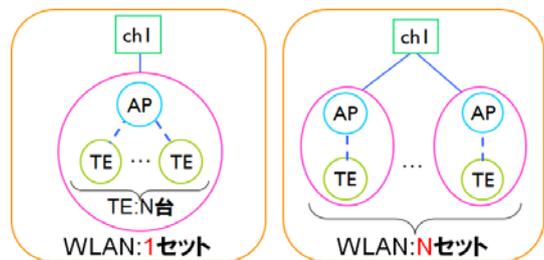


図9 WLAN 数と各 WLAN 端末の接続

9.2 スループット特性

図 10 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値を (a)(b) の場合について示す。無線 LAN 数が 1 では、18 台の端末が 1 台の AP に接続され、18 の時は、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する状況を意味する。無線 LAN 台数を増やすに連れて、総スループットが向上している。これは、より近距離で検証した結果 [3] と反対の特性を示している。この理由は、前述のキャプチャエフェクトであり、MAC フレーム再送率が、無線 LAN 台数が増えるほど、減少していることを確認している。無線 LAN 台数が少ないときには、バッファオーバーフローが発生するため、(a) よりも (b) の場合のスループットは低く、半分程度である。一方、無線 LAN 台数が、9 台を越えると、TCP の輻輳ウィンドウが最大になっても、TCP データパケットを全て AP バッファで受けきれぬため、バッファあふれが生じず、downlink の TCP の不利が無くなるため、(b) の性能は向上する。今回使用した AP は、約 500 パケット分のバッファを搭載しており、帯域遅延積から考えて、数本の TCP フローをバッファあふれ無く収容できる。本実験では、無線 LAN 台数が 18 台において、(a)(b)(c) の総スループット値は理論的には同値になるはずであるが、計測値は (c)(b)(a) の順に高かった。この原因についてはまだ解析が不十分であるが、端末として利用したスマートフォンの特性 (例えば、省電力機能) などが可能性として挙げられる。

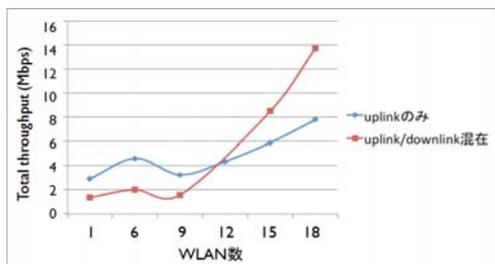


図 10 トラフィック方向と無線 LAN 数とスループット特性

10. おわりに

テザリング端末を会議参加者の多くが使うといった場面を設定したときに、多数の移動無線 LAN が近接する場合の通信品質評価が重要となる。無線 LAN が近接すると干渉が、また多くの無線 LAN があると競合が発生するため、無線 LAN 数と無線 LAN 間距離などに着目して、評価を行った。また、無線 LAN の容量という点で、UDP 通信を、アプリケーションの体感品質という点で、TCP について評価した。

UDP 通信の評価においては、多数の無線 LAN が特定のチャンネルを使用するとき、チャンネル割当が不適切な極端な 2 つの場合のスループットを評価した。1 つのチャンネルを 18 セットの無線 LAN が使用すると、1 セットの無線 LAN のスループットにも満たないわずか 1.27Mbps のスループットを 18 セットで共有することになることを明らかにした。一方、13 チャンネルに 1 セットずつ無線 LAN を割り当てた場合には、13 セットの

スループットの総和が、12.7Mbps しか出ないことを確認した。次に、市販機器のチャンネル割当 (自動チャンネル選択) が妥当であるかどうかを調査した結果、最適ではないと考えられる割当が行われることを確認したが、それほど悪い割当ではなかった。

一方、TCP 通信においては、TCP プロトコルの特徴から、AP のバッファ量、キャプチャエフェクト、アクティブ端末数が性能に影響するため、これらの要因を評価することを目的とし、端末数を固定して、AP の数すなわち無線 LAN 数を変更した。具体的には 1 つのチャンネル内で、18 台の端末を 17:18 個の無線 LAN に分割したときの、総スループットの違いを調査した。1m 間隔で無線 LAN を設置した場合においては、キャプチャエフェクトなどの効果により、従来研究における密集状況の場合とは異なり、無線 LAN 数を増やすべきであることを明らかにした。また、無線 LAN のトラフィック方向の違いによるスループット特性の調査では、全ての無線 LAN が uplink 方向に通信する場合と uplink 方向と downlink 方向に通信する無線 LAN が混在する場合を比較した。その結果、無線 LAN 分割数が少ない時は TCP トラフィックの上下不公平特性により前者が 2 倍程度良くなることを確認した。また、無線 LAN 分割数が多い時は、上下公平になるとされているが、逆に後者の方が通信性能が良い結果を得た。これは、端末のパワーセーブなどの機能が起因していると思われる。

謝辞 本研究は一部、独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術の研究開発・課題ウ 新世代ネットワークアプリケーションの研究開発」によるものである。また本研究を進めるにあたり大変有用なアドバイスを頂いた神戸大学の太田能准教授に深く感謝致します。

文 献

- [1] IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802, June 2007.
- [2] 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.
- [3] 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," 信学技報, CQ 研究会 CQ2012-68, Nov. 2012
- [4] G.F. Marias, D. Skyrianoglou, L. Merakos, "A centralized approach to dynamic channel assignment in wireless ATM LANs," IEEE INFOCOM '99, vol.2, pp.601-608 vol.2, 21-25 Mar 1999.
- [5] 松村祐輝, 熊谷慎也, 小原辰徳, 山本哲矢, 安達文幸, "無線 LAN システムにおけるチャンネル棲み分けに基づく動的チャンネル配置の適用効果," 信学技報, vol. 112, no. 89, RCS2012-64, pp. 123-128, 2012 年 6 月.
- [6] Experimentation on interference, http://www.itmedia.co.jp/enterprise/articles/0810/28/news006_2.html, as of 19 September 2012.
- [7] Jihoon Choi, Kyubum Lee, Sae Rom Lee, Jay (Jongtae) Ihm, "Channel selection for IEEE 802.11 based wireless LANs using 2.4GHz band," IEICE Electronics Express (ELEX), Vol. 8 (2011) No. 16 P 1275-1280, 2012.
- [8] Default channel setting in WiFi access point, <http://compne>

tworking.about.com/od/wifihomenetworking/qt/wifichannel.htm, as of 19 September 2012.

- [9] Default channel setting in Netgear WiFi access point, <http://documentation.netgear.com/dg834n/enu/202-10197-02/Wireless.4.3.html>, as of 19 September 2012.
- [10] Recommended channel setting in Netgear WiFi access point, <http://documentation.netgear.com/reference/fra/wireless/WirelessNetworkingBasics-3-05.html>, as of 19 September 2012.
- [11] 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,” DEIM2012, C2-4, Mar. 2012.
- [12] Remi Ando, Tutomu Murase, Masato Oguchi, “Characteristics of QoS-Guaranteed TCP on Real Mobile Terminal in Wireless LAN,” IEEE Sarnoff Symposium 2012, May 2012.
- [13] 安藤玲未, 村瀬 勉, 小口正人, “無線 LAN 環境におけるモバイルルータユーザ間の公平性制御手法の提案,” 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, C2-1, Mar. 2012.