

近接した複数無線 LAN のチャネル間距離とスループット特性

森内 彩加[†] 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: [†] ayaka-m@ogl.is.ocha.ac.jp, oguchi@computer.org [‡] t-murase@ap.jp.nec.com

あらまし 近年、モバイルルータ、スマートフォンのテザリングの普及によって、AP と携帯端末や個人の PC 等の端末から構成される無線 LAN(WLAN)システム同士が移動して、お互いに近付くような機会が増加している。IEEE802.11WLAN は、限られたチャネル数しか持っていないため、同一チャネルや近隣のチャネルを使用せざる負えない場合、WLAN システムが近接すると、お互いの電波干渉によって、WLAN システムのスループットが、低下する。同一チャネル使用時の WLAN 間距離と QoS (スループット) 特性については、既に検証がなされているが、同一ではない近接チャネルを使用した時についてはまだ研究がなされていない。干渉は、同一チャネルを使用した時よりも、近接チャネルを使用した時の影響の方が大きいと言われている。そこで、本稿では、WLAN 間の距離とスループット特性の関係について、実機により評価する。この評価結果から、距離に応じて、最適なチャネル利用の組み合わせがあることを明らかにする。

キーワード WLAN, モバイルルータ, 干渉

Throughput characteristics of densely deployed multiple wireless LANs with different channels

Ayaka MORIUCHI[†] Tutomu MURASE[‡] and Masato OGUCHI[†]

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

[‡] NEC Corporation 1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666 Japan

E-mail: [†] ayaka-m@ogl.is.ocha.ac.jp, oguchi@computer.org [‡] t-murase@ap.jp.nec.com

Abstract Mobile wireless LANs (m-WLANs) are becoming popular. Mobile WLANs are connected to mobile access points, such as in the tethering of smartphones and terminals such as laptop PCs and other smart devices.

When mobile WLANs come close to each other, the quality of services (QoS) such as the throughput of the WLANs can be degraded due to interferences and capacity sharing by the WLANs. Because IEEE802.11 has only a few channels, i.e., eleven or thirteen, mobile WLANs that share the same channels or use adjacent channels that interfere with each other experience a degradation in QoS. Although the QoS characteristics of mobile WLANs using the same channel have already been investigated, those using different channels have never been studied. The interference between mobile WLANs from adjacent channels is believed to be more significant than that between WLANs sharing the same channel.

In this study, the throughput characteristics of mobile WLANs were investigated through experiments using real machines. The experiments reveal the relationship between the distance between mobile WLANs and the throughput of each WLAN in various combinations of channels used. The results were used for optimal channel assignment for densely deployed WLANs.

Keyword wireless LAN, mobile router, interference

1. はじめに

近年、WLAN 上でのマルチメディア通信の需要の増加に加え、モバイルルータが急速に普及している。本研究におけるモバイルルータとは、個人の端末とは IEEE の WLAN で接続し、インターネットとの接続には、WiMAX や 3G, LTE などと接続するルータやスマートフォンのテザリングのことをさす。このモバイル

ルータの普及により、ルータと個人の端末、例えば携帯電話やノート PC、タブレット端末等が併せて移動するネットワーク(モバイルネットワーク)が増加している。このことから、モバイルルータと個人の端末(本研究では、これらを併せて”WLAN システム”と呼ぶ)で大量のデータを送受信することが想定される。しかし、WLAN のチャネル数は限られており、その数以上

のルータが集まった時は、同一または近隣のチャンネルを使わなければならない、干渉が起こり、性能が低下してしまう。この性能劣化は、WLAN システム間の距離やチャンネル差によるものである。

従来は、固定してルータを利用することが多かったため、WLAN システム同士が移動して干渉することに関する研究は、あまり行われていなかった。しかし、モバイルネットワークでは、モバイルルータを持った人同士が自由に動き回るため、非常にダイナミックに干渉が起こり、干渉下での性能劣化、及びこの性能劣化に対する制御方法を検討することは必須である。

既に、WLAN システム自体が移動する場合について、同一チャンネル使用時の距離に応じたスループット特性評価の研究はなされている[1], [2], [3]。これらは、WLAN システム間の距離に応じたスループット特性だけではなく、干渉についても説明している。しかし、距離に応じて、どのようなチャンネル割り当てが最適なのかといった検証は行われていない。さらに、複数の WLAN システムが近接するネットワークにおいて、どの程度の近接度でどの程度の特性が出るかを知っていれば、最適なチャンネル割り当てが可能である。また、複数の WLAN システムが様々なチャンネルを使用した際のスループット特性についても、シミュレーションにより、その特性が明らかになっている[4]。文献[4]では、同一チャンネルを使用するよりも近接チャンネルを使用した方がスループットが低下する場合があることを示している。また、文献[3]や文献[4]はシミュレーションにより評価が行われているが、シミュレーションでは、干渉のモデル化に限界がある。一方で、現実の通信においては、キャプチャ効果などでシミュレーションではモデル化が非常に困難な効果の影響が大きいため、本研究では、実機実験により検証を行う。本稿では、モバイルネットワークにおいて、チャンネル差 N の時の、チャンネル間干渉を考慮した WLAN システムの距離に応じたフロー特性の評価を行った。さらに、この特性を考慮した最適なチャンネル割り当てを検討し、評価を行った。

具体的には、2 つの WLAN システム間距離とチャンネル差を変化させ、干渉が UDP フローの QoS 特性にどの程度影響を及ぼすのかを検証する。ルータ間距離が十分な時は問題なく通信できるが、ルータ間距離が小さくなると、お互いの通信が干渉を引き起こす原因となることが予想されるので、これを定量的に評価する。さらに、チャンネル差が変わった時に、この結果がどのように変化するかを調査した。

本稿ではまず、2 章で先に述べた関連研究とその問題点について説明し、3 章ではモバイルネットワークでの WLAN 間距離とチャンネル差によるスループット

特性の違いについて述べ、4 章では、本稿の実機実験について説明する。5 章では、最適なチャンネル割り当ての一検討と、評価結果を示し、最後に 6 章でまとめを述べる。

2. 関連研究

2.1. 関連研究

干渉による性能劣化の解決策に関する研究は、ハンドオーバを伴う WLAN ネットワークやアドホックネットワークにおいて、既に行われている[5], [6], [7]。これらは、各 AP の干渉を考慮し、最適なスループットが得られるモデルや手法を提案している。このような電波を感知して制御する手法は、固定の AP に対しては効果的である。しかし、本研究ではモバイルルータを用い、ルータ自体が頻繁に移動することを前提としているため、このような制御は有効であるとはいえない。

WLAN システム自体が動く場合の評価については、文献[3], [8]で既に行われている。文献[3], [8]は WLAN システム間の距離が小さくなると MAC レベルでのシステムのキャパシティが減少することをシミュレーションにて示している。しかし、この研究では、MAC フレームエラー及びキャパシティの変動が上位レイヤプロトコルに与える影響については述べていない。さらに、同一チャンネルを使用した複数の WLAN システムが近接するときの距離に応じたスループット特性については、既に検証がなされている[1], [2]。これらは、フローレベルの特性について説明している。システムの特性に加え、フローレベルの特性は、QoS 対応のアプリケーション設計や、QoS 制御の検討に必要であるため、検証する必要がある。

複数の WLAN システムが様々なチャンネルを使用した際のスループット特性についても既に研究がなされている[4]。文献[4]では、周囲のネットワーク利用状況に応じて、最適なチャンネル割り当てを行う手法について提案されており、近接チャンネル使用時のスループット特性についても定量化している。しかし、一般的に、ビットエラーやデバイス性能のような要因やマルチパス特性、他のノイズ等の干渉をシミュレーションでモデル化するのは難しい。そこで、実機による検証によって、より現実的なネットワーク構成に即した実験結果が求められる。

2.2. 同一チャンネル使用時の QoS 特性

2 つの WLAN システムを近接させる時、WLAN 間距離 d に応じて 3 つの状態が存在することが既に示されている[1], [2]。これらを、図 1 に示すように、状態 1, 2, 3 と呼ぶ。図 1 において、WLAN-1 と WLAN-2 は独立した WLAN システムで、それぞれの WLAN システムは 1 台のモバイルルータ R_i (i は WLAN システム番

号), R_i と接続する送信端末群 N_i , R_i と有線接続する 1 台の受信端末で構成されている. 点線は, キャリアセンスドメインのイメージを示す. 各無線端末は uplink 方向(端末から AP の方向)に通信を行う. WLAN は IEEE 802.11g を用いている. WLAN システム間の距離がルータ間距離 d に応じて, お互い干渉を与えない程度に十分離れている状態を状態 1, 他の WLAN システムと干渉し, お互いのスループットに影響を及ぼす距離にある状態を状態 2, 各 WLAN システムが完全に 1 つの CSMA/CA ドメインとなる程度に近距離にある状態を状態 3 とする.

お互いに干渉しない 2 つの WLAN システムが近付く時, 状態 1 と比較し, 近接する状態 2 や 3 では, 各端末のスループットは減少する. 状態 2 では, まずそれぞれの通信が相手にとってノイズ源となるために, お互いの通信がビットエラーとなって, その結果スループットが低下する. R_1 及び R_2 で通信を行っている端末数をそれぞれ N_1 , N_2 , $N_1+N_2=N$ とすると, 状態 3 でのスループットは, 1 つのルータを, N (台)で共有している状態とほぼ同じになる.

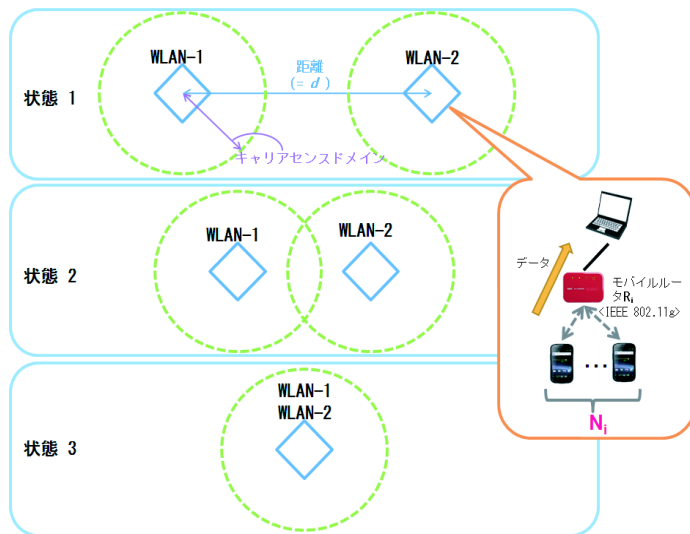


図 1 距離に応じた 3 状態

3. 近接チャネル使用時の QoS 特性

3.1. WLAN 間距離とチャネル差による QoS 特性

近接チャネル使用時の WLAN システムのスループット特性については, 既にシミュレーションにより検証がなされている[4]. チャネル差(ChD)はチャネル番号により, 定義される. 例えば, チャネル番号 1 と 3 の ChD は 2 である. 一般に, ChD N は, ChD $N+1$ よりも干渉が強い. もしも N が 4 より大きい時, 2.4GHz スペクトラムではチャネル間干渉はない. これは, IEEE802.11 の物理層のクロストークの性質による. 本論文では, 2.4GHz スペクトラムについて, ChD $N \leq 5$

についてのみ議論する.

チャネル差に加えて, 干渉は, WLAN 間の距離にも依存する. 2.2 章では, WLAN 間の距離によって, 3 つの状態が決まることについて説明している.

3.2. 評価モデル

スループット特性の評価に使用したモデルについて述べる. WLAN システムは, 1 台の AP と, 1 台以上の端末から構成される. ユーザがスマートフォンやノート PC 等をモバイルルータと共に使用することを想定しているので, AP や端末は 10cm 程度の近距離に配置する. これは, AP は自由に動き回ることが可能だが, AP と端末は十分近距離にあるということを示している.

トラフィックには, UDP のみを使用した. UDP や TCP のトラフィックは, チャネル容量を十分に使い切ることができる. しかし, ACK のオーバーヘッドや輻湊制御によって, TCP スループットよりも, UDP スループットの方が高くなる. さらに, 予備実験において, UDP と TCP の場合で実験を行ったが, 大差がなかったため, ChD N が 0 から 5 のときの UDP についてのみ調査する.

3.3. 実験概要

実験機器には, 一般的な端末を使用した. AP としては, モバイルの AP である Planex の MZK-MF300N[9] と NEC の AtermWM3500R[10]を選んだ. WLAN は, IEEE802.11g(2.4 GHz)で, 使用可能なチャネルは, 1 から 13 までである. 実験には, 1 から 11 までを使用した. 実験の構成図を図 2 に示す. 送信端末には, スマートフォンを使用した. スマートフォンは, OS が Android2.3.7 の Nexus S[11]と Nexus One[12]を使用した. これらのスマートフォンは, 簡単にカーネルの細部の機能についてまで操作可能で, CPU や無線チップは一般的なスマートフォンと同程度の性能を持つ. WLAN システムの端末は, 各システムごとに送信側の無線端末 2 台と, 受信側の有線端末 1 台からなるものとする. これは, 一般的な WLAN の設定では, 送信端末 2 台以上のときに, 最大のスループットを獲得できるからである. UDP トラフィックは, 2 台の送信端末から, AP を介して iperf[13]を使用して, 1500byte のデータを送出し, UDP のスループットは, iperf の受信側で測定した. また, 後述のように端末の影響を調べるために, 今回は, uplink(端末から AP の方向)にのみトラフィックを送信する.

実験場所は, お茶の水女子大学(東京都文京区)の学内において, 20m の距離を確保可能な会議室である. 会議室には, 実験系以外の AP も検出されたが, ほとんど通信トラフィックが無いことを確認した. この会議室にて, 1 台の送信端末から UDP トラフィックを流し, チャネル容量を確認したところ, 26Mbps であった. 従

って、実験系以外の干渉はほぼないといえる。また、今回は、実験場所の制約のため、電波強度を実機最大値の15%に落として実験しているため、スケールは小さくなっているが、強度を最大にしても、特性には変わりはない。

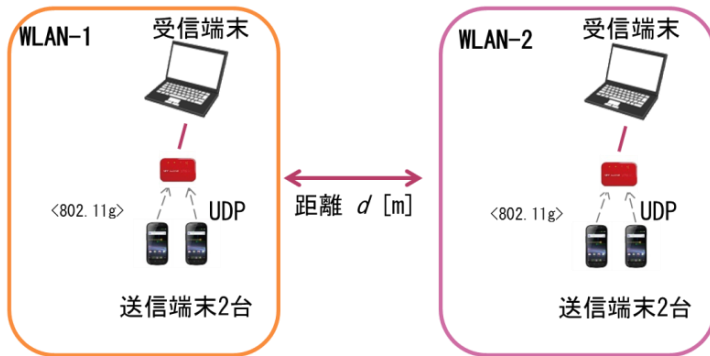


図2 実験構成

4. 近接チャネル使用時の QoS 特性

WLAN 間距離が変化することにより、電波環境が変化し、QoS パフォーマンスに影響が出ることが予想される。そこで、WLAN 間距離 d を変化させ、各フローのスループット測定を行った。近接度に応じた最適なチャネル割り当てを検証するため、チャネル差に応じたスループット特性の評価を行う。本研究における最適なチャネル割り当てとは、全 WLAN システムの合計スループットが最も高くなるチャネルの組み合わせを指す。実験としては、2つの WLAN システムが近接する際に、チャネル差を変化させ、距離に応じてどのようなスループット特性が得られるかを検証した。

チャネル差を N とし、 N が 5 以上で干渉なくなることが既知であるため、 $N=0/1/2/3/4/5$ と変化させ、チャネルの隣接度と WLAN システム間の距離とスループット特性の関係を調べた。

評価は実機を用いて行った。これは、シミュレーションでは、干渉のモデル化に限界があり、現実の通信においては、キャプチャ効果などシミュレーションではモデル化が非常に困難な効果の影響が大きいからである。WLAN 間距離 d とチャネル差 N を変化させた際のスループット特性を図3に示す。図3において、AP は Planex を使用している。実験は数回に渡って行い、はずれ値(extraordinary samples)を除いて、その平均値を示している。

今回の実験では、シミュレーション結果[4]と同じく、チャネル差 4 と 5 のときは、ほぼ干渉がない状態であった。一方、シミュレーションとは異なり、ChD 3 は、ChD 0, 1, 2 と比較して、常にスループットが高いという結果が得られた。また、距離に関しては、ChD $N=0$

のときと同様に、状態 1, 2, 3 に分けて考えられるような特性となった。状態 3 においては、ChD $N=3$ 以外では、ほぼ同じスループットが得られた。

しかしながら、状態 2 における距離に対するスループットの変化は、ChD の N の値により、異なっていた。これは、シミュレーションでも示されていた特性である。このとき、一番干渉が小さい ChD N の値は、WLAN システム間の距離に依存して変化し、その変化は、状態 2 の全般で起こることが分かった。さらに、WLAN 間の距離に応じて、最も性能が高くなる ChD N の値は、異なることが分かった。これは、シミュレーション結果とは異なり、スループット低下は、干渉だけではなく、他の要因も影響しているからである。

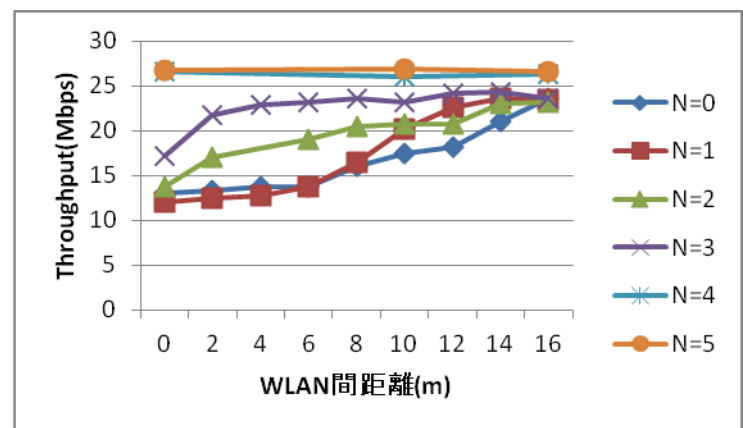


図3 チャネル差に応じた WLAN 間距離とスループット特性 (Planex)

この干渉の影響が機器によってどのように異なっているのかを機器を取り替えて実験し、機器依存の度合いを調査した。まず、干渉を受けた信号に対して、受信機（この場合は、AP）においては、受信性能（イコライザやフィルタなど）がスループットに影響を与える。そこで、AP を Planex から NEC に交換して計測した結果を図4に示す。図4と図3の比較により、受信性能がスループット性能に及ぼす影響は異なるが、 $N=3/4/5$ については、その特性に顕著な違いは出ないという結果であった。また、 $N=0/1/2$ については、受信機種毎に、距離と ChD におけるスループットの大小順位が多少変動するという結果であった。

次に、送信端末の送信性能の影響を見るために、送信端末を Nexu S から、Nexus One に変更して実験を行った。AP は Planex を使用した。その結果を図5に示す。図5の結果は、図3の結果とほぼ同様である。すなわち、送信端末による違いはほとんど無かった。

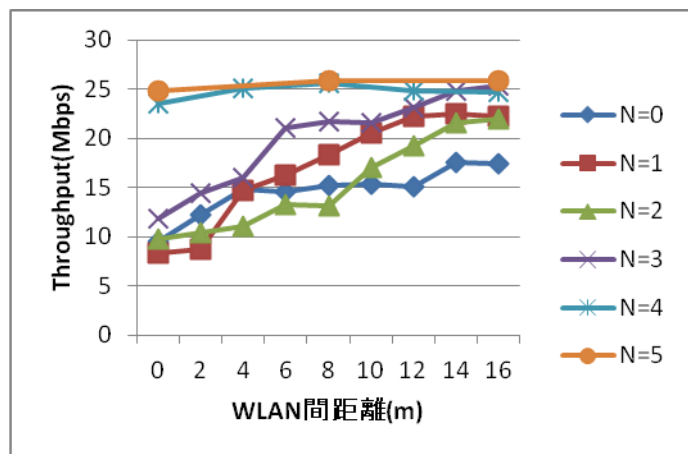


図 4 チャンネル差に応じた WLAN 間距離とスループット特性 (NEC)

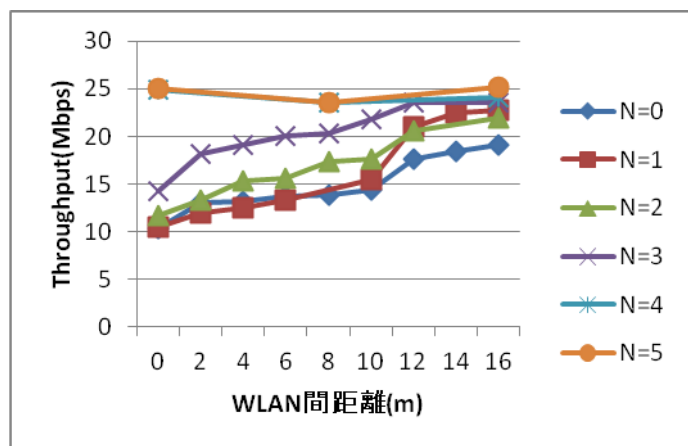


図 5 チャンネル差に応じた WLAN 間距離とスループット特性 (Nexus One)

5. WLAN 間距離とチャンネル差の特性を考慮したチャンネル割り当て

近接度とチャンネル差に応じたスループット特性が得られたので、実際にチャンネル間干渉を考慮して、チャンネル割り当てを行う数値例を示す。例として、3つのWLANシステムが1～5のチャンネルを競合する場合を検討する。5つのチャンネルを3つのWLANシステムで割り当てる場合、干渉を考慮して、それぞれのチャンネルを(WLAN-1のチャンネル, WLAN-2のチャンネル, WLAN-3のチャンネル)=(1, 3, 5)というように、一番チャンネル差が大きくなるように振り分けるのが、他の振り分け方に比べて、直観的に最も良さそうであると考えられる。チャンネル割り当てとしては、図6のようなイメージである。

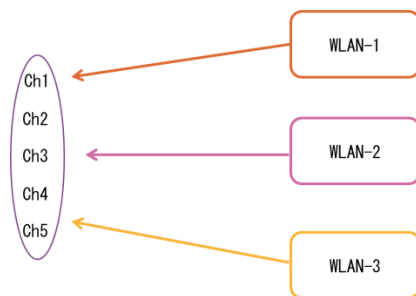


図 6 チャンネル割り当てのイメージ

しかし、先の結果により、チャンネル差4でも十分に干渉がないことが分かったので、(1, 1, 5)といった割り当てでも高品質であると予想でき、なおかつ、距離に応じてこの結果も変化すると予想できる。

そこで、チャンネルを(1, 1, 5)と割り当てた場合と(1, 2, 5)と割り当てた場合、(1, 3, 5)と割り当てた場合について、全WLANシステムの合計スループット(全フロアの合計スループット)を比較した。評価方法としては、図7のような実験構成において、今回は d を0mと12mとして実験を行った。具体的には、WLAN-1, WLAN-3をWLAN-2から d mずつ離して設置し、チャンネルをそれぞれ(1, 1, 5)とした場合と、(1, 2, 5)とした場合、(1, 3, 5)とした場合で実験を行い、それぞれの全WLANシステムの合計スループットを比較した。その他の設定は、先に述べた図2の実験構成と同様である。0mと12mを選んだ理由としては、図3において、単純に3つのWLANシステムのスループットをチャンネル差を考慮して足し合わせると、0m地点と12m地点では、最適なチャンネル割り当てが異なるからである。

その結果、0m地点では(WLAN-1のチャンネル, WLAN-2のチャンネル, WLAN-3のチャンネル)=(1, 1, 5)が最もスループットが高く、12m地点では(WLAN-1のチャンネル, WLAN-2のチャンネル, WLAN-3のチャンネル)=(1, 2, 5)が最もスループットが高いことが分かった。具体的な総スループットは、0m地点では、(1, 1, 5)は32.6Mbps, (1, 2, 5)は24.7Mbps, (1, 3, 5)は23.6Mbps, 12m地点では、(1, 2, 5)が58.0Mbps, (1, 1, 5)が56.4Mbps, (1, 3, 5)は54.2Mbpsで、0m地点については、最もスループットが低い場合と比べて、38%もスループットが向上した。

今回は、0m地点と12mの地点についてのみ評価したが、他の地点においても、それぞれチャンネル間干渉を考慮した最適なチャンネル割り当てが存在するといえる。

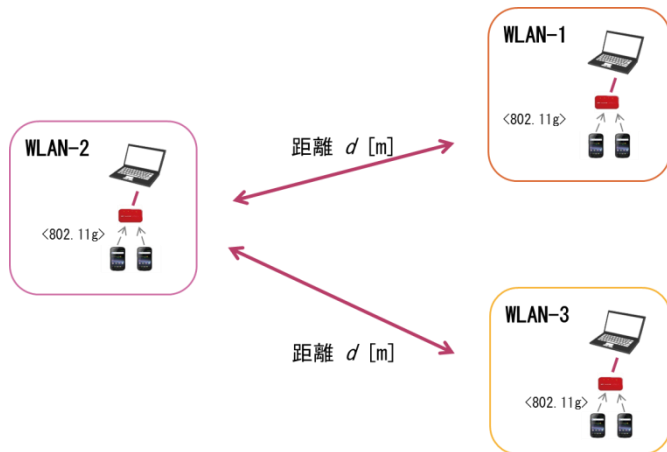


図 7 最適チャネル割り当ての実験構成

6. おわりに

IEEE802.11 規格の WLAN において、WLAN 間距離とチャネル差に応じた QoS スループット特性の調査を行った。

具体的には、チャネル差 N である複数の WLAN システムが近接した場合の各状態のフローレベルのスループット特性について検証を行った。これらの特性は、電波信号の干渉と端末上で動作しているデバイスの動作に依存すると考えられるため、シミュレーション結果とは異なる振る舞いをする。そこで、本稿では、実機での評価を行った。

モバイルネットワークでは、チャネル差に関係なく、チャネル差 0 の時と同様に、スループットの低下に応じて 3 つの状態モデルがあることを確認した。さらに、チャネル差と WLAN 間の距離が、スループットに影響を与えることを明らかにした。また、この特性は、送信端末を変更しても、同様の特性が得られたため、送信端末には依存しないことが分かった。

この特性を近接 WLAN システムの最適なチャネル割り当てに使用したところ、例えば 3 つの WLAN システムをチャネル 1~5 に割り当てる場合、直観で最適と思われる (1, 3, 5) よりも、0m 地点では、3 つの WLAN システムにそれぞれ (1, 1, 5)、12m 地点では (1, 2, 5) というようにチャネルを割り当てるのが最適であることが分かった。つまり、チャネル間干渉と WLAN 間距離を考慮すると、最適なチャネル割り当てが変化する。

今後の課題としては、iPhone やノート PC、ゲーム機やセンサのような様々なタイプのデバイスを使用して、実験を行いたい。

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。

文 献

- [1] Remi Ando, Tutomu Murase, and Masato Oguchi: "Influence of Interference with Moving Terminal in Wireless LAN Environment and Evaluation of Behavior of QoS-TCP" In Proc. The Fourth International Workshop on Information Network Design (WIND2011) in conjunction with the Third IEEE International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS2011), pp611-616, Nov 2011.
- [2] Remi Ando, Tutomu Murase, and Masato Oguchi: "TCP and UDP QoS Characteristics on Multiple Mobile Wireless LANs" In Proc. the 35th IEEE Sarnoff Symposium 2012 (Sarnoff2012), No. 18, May 2012
- [3] Akash Baid, Michael Schapira, Ivan Seskar, Jennifer Rexford, Dipankar raychaudhuri: "Network Cooperation for Client-AP Association Optimization" 10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks(WiOpt), 2012 10th International Symposium on, pp431-436, 14-18 May 2012.
- [4] E. G. Villegas, E. Lopez-Aguilera, R. Vidal, and J. Paradells. Effect of adjacent-channel interference in IEEE 802.11 WLANs. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on, pp118-125, 1-3 Aug. 2007.
- [5] K. Jain, J. Padhye, V. Padmanabhan, and L. Qiu. Impact of Interference on Multi-hop Wireless Network Performance. ACM MobiCom 2003, pp.66-80, Sep. 2003.
- [6] I. Ramani, and S. Savage. SyncScan: Practical Fast Handoff for 802.11 Infrastructure Networks. Infocom 2005, pp.675-684, Mar. 2005.
- [7] S. Seo, J. Song, H. Wu, and Y. Zhang. Throughput-based MAC layer handoff in WLAN. Infocom Workshops, pp.1-2, 2009, Mar. 2009.
- [8] Micah Z. Brodsky, Robert T. Morris, "In Defense of Wireless Carrier Sense", ACM SIGCOMM 2009 conference on Data communication, pp.147-158, Aug. 2009.
- [9] MZK-MF300N: <http://www.planex.co.jp/product/router/mzk-mf300n/>
- [10] AtermWM3500R: <http://121ware.com/aterm/>
- [11] Nexus S <http://www.android.com/devices/detail/nexus-s>
- [12] Nexus One <http://www.crunchbase.com/product/nexus-one>
- [13] iperf: <http://sourceforge.net/projects/iperf/>