

マルチチャネル環境下における 無線マルチホップネットワークの性能検証実験の報告

木本 瑞希[†] 植原 啓介[‡] 村井 純[‡]

[†] 慶應義塾大学 政策メディア研究科

[‡] 慶應義塾大学 環境情報学部

E-mail: {teddy, kei, jun}@sfc.wide.ad.jp

本稿では、マルチチャネル環境下での無線マルチホップネットワークの基礎的な性能検証実験結果について報告する。無線マルチホップ通信において、帯域を増やすために複数のチャネルを使ってノード間の無線リンクを構築することは有効的だと考えられてきた。しかし、過去の研究事例においては使用する周波数帯同士の近さや、ノード間の近隣性に着目した実験は行われていない。本研究では、マルチチャネル環境下においてノード 4 台を直線上に並べたライントポロジーの無線マルチホップネットワークを構築し、バックホールで使用するチャネルと、ノード間の距離を変更しながらスループット計測を行った。計測の結果、感度抑圧またはスプリアス干渉と考えられる原因により、チャネルを増やしてもスループットの改善が見られない場合があることを明らかにした。これにより、今後マルチチャネルで無線マルチホップ通信のルーティングプロトコルや、アーキテクチャを考案する上で考慮すべき点を指摘した。

Report of performance verification experiment with multi channel wireless multi-hop network

KIMOTO Mizuki[†] UEHARA Keisuke[‡] MURAI Jun[‡]

[†] Keio University, Graduate School of Media and Governance

[‡] Keio University, Faculty of Environment and Information Studies

In this paper, we report the results of experiments we conducted to measure the fundamental performance of wireless multi-hop networks under multi-channel environment. It is often thought that using multiple channels to build wireless links between nodes in wireless multi-hop networks is an effective method to increase network bandwidth. However, past studies do not perform experiments which pay attention to parameters such as distance between frequencies used in the backhaul links and distances between the nodes. In this paper, we built and measured the performance of a wireless multi-hop network which consists of 4 nodes arranged in a straight line. We changed the distance of the frequencies used in the backhaul link and the physical distance of the nodes as we measured the performance. From the results, we have discovered that increasing the number of channels used in backhaul links does not always result in better network throughput due to blocking effect and spurious interference. Therefore, we have shown that future ideas of routing protocol and architecture of wireless multi-hop networks under multi-channel environment should take these parameters into account.

1 はじめに

1.1 無線マルチホップ通信

無線 LAN のサービスエリアを拡張するための技術として、無線マルチホップ通信がある。無線マルチホップ通信では、アクセスポイントやユーザ端末同士が相互に接続されることによってネットワークが構成される。直接通信できる範囲外にある端末へメッセージを送信する際には、相互に接続された近

隣のノードを中継してメッセージが配送される。図 1 にノード A からノード B とノード C を経由して、ノード D へメッセージが送られる様子を示す。図 1 において点線の大きな円は直接通信できる無線通信の範囲を示している。無線マルチホップ通信を使った技術として、無線メッシュネットワークやモバイルアドホックネットワーク (MANET) などが存在する。

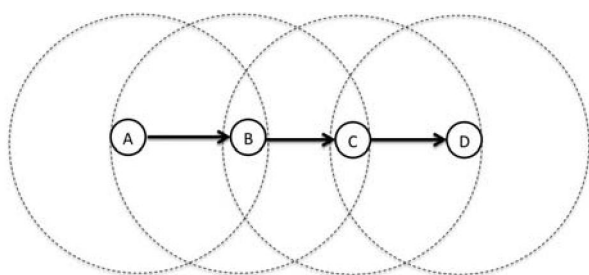


図 1: 無線マルチホップ通信

無線メッシュネットワークでは、固定されたアクセスポイント同士が無線マルチホップ通信を行うことによって、1 台のアクセスポイントが提供できる無線通信の範囲よりも広い範囲をカバーすることができる。無線メッシュネットワークに参加するアクセスポイントはアクセスポイント同士間、アクセスポイントと端末間の 2 種類の無線リンクをもつことになる。本稿では、アクセスポイント同士を接続する無線リンクをバックホールリンクと呼ぶ。

MANET は、特定のアクセスポイントなどを介さず、移動端末同士で構成する無線マルチホップネットワークである。閉じたネットワークを構築する場合もあれば、インターネットゲートウェイを介してインターネットに接続される場合もある。

このように、今日の無線マルチホップ通信は無線 LAN ネットワーク技術の一つとして注目されており、今後も利用範囲が広がることが期待されている。

1.2 無線マルチホップ通信の課題とマルチチャネル

無線マルチホップ通信はこれまでに多くの研究が行われており、その課題が挙げられている。その 1 つがマルチホップ通信によって生じるスループットの低下である。原因として電波の干渉によるフレームロス、隠れ端末問題、晒し端末問題が知られている。また、チャネルアクセス方式の問題もある。無線 LAN のアクセス制御機能として CSMA/CA が採用されており、その基本的な手順として IEEE802.11 で標準化された DCF(Distributed Coordination Function) が用いられている。同一チャネルに参加している各無線デバイスは、現在通信をしている無線端末が存在するかどうか確認し、存在している場合はランダム時間待機してから、他に通信をしていないことを確認してデータを送信する。CSMA/CA 方式により競合を回避することができるが、ある単位時間で通信を行うことのできる無線デバイスは限定され

る。このためマルチホップ通信を行った場合、ホップ数の増加に伴い待機時間も増加するためスループットが低下する。

CSMA/CA 方式ではチャネルアクセス競合を回避するため、無線マルチホップ通信において、ある時刻で利用できる帯域は限られた無線デバイスだけになり、結果としてホップ数が増えた場合には、スループットが低下する。図 2 に示すように、複数のチャネル (マルチチャネル) で無線マルチホップネットワークを構築することで、スループットの低下を避けられると考えられている [1, 2, 3]。図 2 において、デバイス 1 がデバイス 2 を介してデバイス 3 にデータを転送したいとする。バックホールリンクが単一チャネルの場合では、デバイス 2 と 3 が通信しているときにはデバイス 1 と 2 は通信できない。仮にデバイス 2 が 2 つ送受信モジュールを持ち、マルチチャネルでバックホールリンクが構築されている場合、デバイス 1 と 3 は同時にデバイス 2 と通信を行うことが出来る。

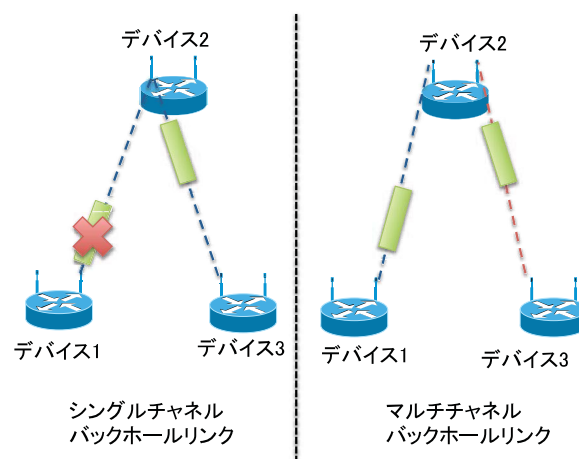


図 2: シングルチャネルとマルチチャネルの比較

1.3 本論文の構成

本稿は、以下のように構成される。第 2 章で研究を行うことになった動機について述べる。第 3 章で今回行った無線マルチホップネットワークの性能検証実験の詳細についてまとめる。第 4 章では、3 章で示した実験の結果を示す。第 5 章で実験結果の考察を行い、第 6 章で本稿をまとめる。

2 無線メッシュネットワーク運用の実際

無線アドホックネットワークや無線メッシュネットワークは、会議ネットワークやイベントネットワークなどの一時的なネットワーク環境を構築するために有用である。このためレイヤ 2、3 に関わらずルーティングプロトコルが数多く提案されてきた。OLSR(Optimized Link State Routing)[4] や 802.11s[5]、B.A.T.M.A.N(Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking)[6] 等は、アドホックネットワークのルーティングプロトコルに含まれる。しかしながら、これらのルーティングプロトコルに関する研究はシミュレータによる検証がほとんどで、利用者がいる実運用で使われた例は少ない。そのため、無線メッシュネットワークを実際の現場で構築し、問題点を洗い出して整理することとした。

WIDE プロジェクト [7] では定期的に合宿形式の研究会を開催しており、100 人以上の参加者が一箇所に集まり研究活動を行う。2013 年 9 月に実施した合宿では 2 種類の無線メッシュネットワークの構築を行った。1 つはシングルチャネルバックホールリンクで組まれたネットワーク、もう 1 つがマルチチャネルバックホールリンクで組まれたネットワークである。目的は 2 つを比較して、マルチチャネルバックホールリンクのネットワークの有効性を示すことであった。バックホールリンクを構築するために 802.11a/n を用い、ルーティングプロトコルに OLSR を採用した。

しかし、2 つのチャネルを用いたネットワークは、チャネルを 1 つしか使わない場合と比べても帯域の改善は見られず、逆にスループットが悪くなるという結果になった。利用者の多い少ないに関わらず、スループット計測結果は変わらなかった。そのため、マルチチャネル無線マルチホップ通信の基本的な計測を行う必要があると判断した。

3 実験計画

本章では、今回行った実験の目的、及び実験環境と実施した手順について述べる。前章で述べたマルチチャネル環境下でのスループットの劣化という結果を受け、電波干渉によりフレームロスが発生してスループットの低下が発生しているという仮説を立てた。本実験でこの仮説を検証するために、次の 2 点に着目した。

- マルチチャネルで使用する 2 つの周波数の差

の大きさ

- 無線 LAN デバイスの物理的な距離

3.1 実験で採用するチャネルとマルチチャネルデバイスの実現方法

現在、無線 LAN 規格において定められている周波数帯は 2.4GHz 帯と 5GHz 帯である。アクセスポイント間の無線リンクをマルチチャネルで構築する際にはチャネル同士の干渉を考慮する必要がある。2.4GHz 帯で干渉を防ぐために選択できるチャネルは、1、6、11 チャネルの 3 つである。対して、5GHz 帯では W52、W53、W56 のタイプの中から、19 個のチャネル選択することが出来る。2.4GHz 帯と 5GHz 帯でチャネル干渉を考慮した場合、使用できるチャネル数に差があるため、今後マルチチャネルで無線マルチホップ通信を行う場合には 5GHz 帯が主流になっていくと考えられる。本実験でも 5GHz 帯での構築を行う。

通常 2.4GHz 帯、5GHz 帯に関わらず、無線 LAN デバイスを備えている通信機器は送受信モジュールを 1 つしか持たない。そのため、マルチチャネル環境を構築するためには、新たに通信機器に USB や PCI の無線 LAN デバイスを増設するか、もしくは無線 LAN デバイスを持つ機器同士を別のメディアを用いて接続し、仮想的に 1 台の機器が複数の無線 LAN デバイスを持っているかのように見せかける必要がある。無線 LAN デバイス間の物理的な距離がどの程度電波干渉に影響するかを測定するために、本実験では後者の無線 LAN デバイスを持つ機器同士の別メディア接続を採用する。

また本研究においては、無線メッシュネットワークや MANET を想定しており、アクセスポイントの設置の柔軟性を重要視している。ある特定の方向に電波を飛ばす事のできる指向性アンテナを用いたり、アクセスポイントの筐体に電磁波シールドをすることで電波干渉を防ぐことができるが、設置コストが大きくなってしまう。そのため、指向性アンテナではなくオムニアンテナを仮定し、電磁波シールドを使用しない環境を想定して実験を行うすることとした。

3.2 実験環境

本節では、今回実験で用いられた機材及びネットワーク構築に使われたパラメータ、及び実験場所の詳細について述べる。

機材はバッファロー社製の WZR-HP-AG300[8] に、OpenWRT[9] を搭載したものを利用した。OpenWRT は組み込み Linux に分類される Linux ディストリビューションのひとつで、家庭用ブロードバンドルータにインストールすることができる。本機材は、2.4GHz 帯、5GHz 帯のそれぞれ独立した送受信モジュールを備えており、2.4GHz 帯と 5GHz 帯を同時に使用することが出来る。また、LAN と WAN 用の合わせて 2 種類のポートを有線メディアとして持っており、OS から 2 つのインターフェイスとして認識される。本実験で使用した機材は次のような構成である。

- OS: Linux-kernel-3.10.34
- CPU: Atheros AR7161@680MHz
- Memory: 128MB
- Wireless Device: Atheros AR9220
- Wireless Driver: ath9k

ネットワーク構成について述べる。本実験では計 4 台の機器を利用した。そのうち 2 台は仮想的な 1 台のアクセスポイントの実現のために使われ、残りの 2 台と合わせて無線マルチホップネットワークを構成する。ネットワークトポロジを図 3 に示す。

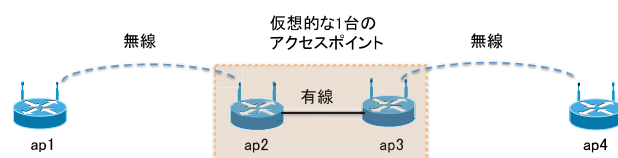


図 3: 実験トポロジ

ap1 から ap4 はそれぞれ無線 LAN インターフェイスをアドホックモードとして動作させる。また ap2-ap3 間はイーサネットケーブルで接続される。Linux のネットワークスタックでは、アドホックモードで動作する無線インターフェイスと有線のインターフェイスをブリッジで動作させることができない。そのため、ap1-ap2、ap2-ap3、ap3-ap4 間はそれぞれ別のサブネットでは区切られており、IP でルーティングされている。経路情報は、OpenWRT のネットワーク設定ファイルで設定を行い、正しくマルチホップ通信ができていないことを確認した。

バックホールリンクの無線 LAN パラメータは表 1 のように設定した。使用チャンネルはアクセスポイントにより異なる。ap1-ap2 間で使用するチャンネルは、

36 チャンネルのハイスループットモードで固定される。対して、ap3-ap4 間では、チャンネルを変更しながら使用した。このチャンネルは、ap1-ap2 間で使用するチャンネルに対してそれぞれ、同一、隣り合う、隣り合わないが近い、隣り合わなくて遠いチャンネルに対応する。チャンネル変更は次節の実施手順に則りながら、手動で設定を行う。バンド幅は 2 チャンネル分を利用するハイスループットモードとした。アンテナ出力は、各アクセスポイント同士の電波の干渉を最小限にするため、OpenWRT で設定できる最低値の 3dBm とした。OpenWRT でデータレートを固定に設定することはできないため Auto にしており、隠れ端末を防ぐためのフレームの RTS/CTS はオンにした。

実験は、慶應義塾大学湘南キャンパス体育館のアリーナで、他に利用者がいない時間帯で行った。また、アリーナには大学キャンパスで利用されているアクセスポイントが 2 台あることを Wi-Spy[10] を用いて確認した。

表 1: バックホールリンクの無線パラメータ

データリンク層プロトコル	802.11a/n
AP1-2 間 channel	36・40ch
AP3-4 間 channel	36・40ch
	44・48ch
	52・56ch
	100・104ch
バンド幅	40MHz
電波出力	3dBm
データレート	Auto
RTS/CTS	on

3.3 実施手順

本節では、実験の実施手順について述べる。実験では、ap3-ap4 間で使用するチャンネルの設定と、ap2-ap3 間の距離を変更した後、スループットを計測する。

パフォーマンス計測ツールとして、iperf[11] を用いた。iperf は ap1 をクライアント、ap4 をサーバ側に設定した。スループットの測定は TCP と UDP それぞれ 10 回行った。UDP で計測する場合はデフォルトの送信レートが 1Mbps であるため、-b オプションを用いて 100Mbps に送信レートを設定した。ap1-ap2 間、ap3-ap4 間はそれぞれ 12m 離れている。本実験

を実施する前に行った予備実験では、仮想アクセスポイント間の距離を 300cm に離れたところスループットが良くなった. そのため本実験では、ap2-ap3 間の距離は 0、50、100、300cm と変更した. 図 4 は実験の様子を撮影したものである.

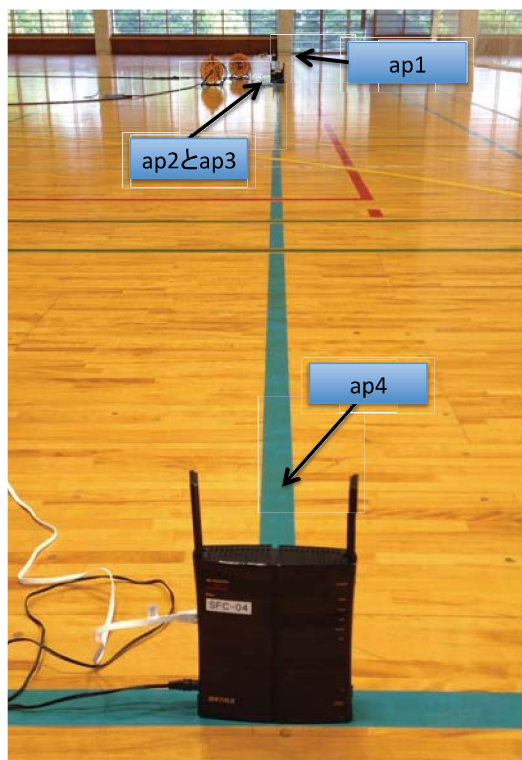


図 4: 実験風景

4 実験結果

本章では、実験結果について述べる. 図 5 と図 6 は TCP 及び UDP のスループットの計測結果を示したものである. スループット計測はアクセスポイントに接続される WiFi 端末を用いず、アクセスポイント本体で実行している. グラフは各チャンネルごとに色分けされており、横軸が ap2-ap3 間の距離及び ap3-ap4 間のチャンネル設定を示している. また、10 回測ったスループットを箱ひげ図で表している. 10 回計測したスループットの平均値を表 2 と表 3 に示す.

5 実験総括

本章では、まず実験結果の考察を述べ、原因の推測を行う. そして過去の研究事例と比較して本研究によって明らかになった点を明確にする. その後実

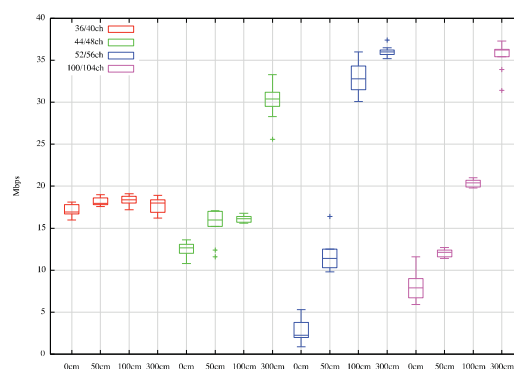


図 5: バックホールリンクスループット (TCP)

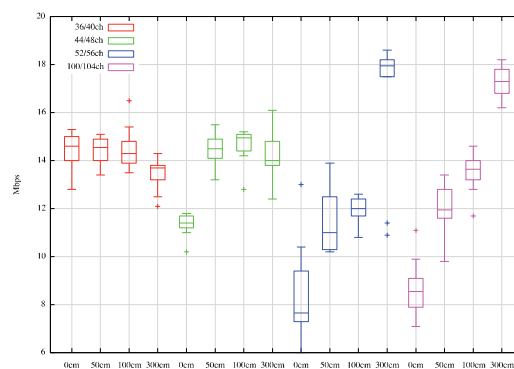


図 6: バックホールリンクスループット (UDP)

験の反省を踏まえて、今後の課題を明らかにする.

5.1 実験結果考察

TCP と UDP 共に、ap1-ap2 間と同じ 36 チャンネルを使用した場合、アクセスポイント間の距離を変えてもスループットの差に大きな違いは見られなかった. これはキャリアセンスが原因だと考えられる. CSMA/CA 方式では、フレームを送信する各無線アクセスポイントがキャリアセンスを行い、フレーム衝突を回避しようとする. キャリアセンスはある閾値が規定されており、802.11a の場合では -62dBm が閾値となる [12]. キャリアセンスを行い -62dBm 以上の電力レベルが検出された場合は、ビジー状態と判断してフレームの送信を待機する. 今回変更したアクセスポイント間の距離は最大でも 300cm であったため、この閾値が -62dBm を下回ることではなく、スループットに差が見られなかったと推測出来る.

TCP で隣接チャンネルの 44 チャンネルを使用した場合、300cm 以外を設定すると、36 チャンネルの時と

表 2: 10 回計測したスループットの平均 (TCP)

	36/40ch	44/48ch	52/56ch	100/104ch
0cm	17.1Mbps	12.5Mbps	2.7 Mbps	8.0 Mbps
50cm	18.1Mbps	15.4Mbps	11.7 Mbps	12.1 Mbps
100cm	18.4Mbps	16.1Mbps	32.8 Mbps	20.3 Mbps
300cm	17.7Mbps	30.1Mbps	36.0 Mbps	35.6 Mbps

表 3: 10 回計測したスループットの平均 (UDP)

	36/40ch	44/48ch	52/56ch	100/104ch
0cm	14.4Mbps	11.3Mbps	7.5 Mbps	8.7 Mbps
50cm	14.4Mbps	14.5Mbps	8.5 Mbps	11.9 Mbps
100cm	14.5Mbps	14.7Mbps	12.0 Mbps	13.6 Mbps
300cm	13.5Mbps	14.3Mbps	16.7 Mbps	17.2 Mbps

比較するとスループットが悪くなった。これは、上述したキャリアセンスによって電波を検出したことと検出せずにフレームを送信したとしても、アクセスポイント間の距離が近いことにより干渉によりフレームロスが発生していると考えられる。そのため、ap3-ap4 間の距離を 300cm とした場合では干渉が起らず、スループットが向上したと考えられる。300cm にしても UDP の場合はスループットに大きな変化は見られなかったが、これは UDP の特性によるものと考えられる。UDP は、TCP と違い、トランスポート層での輻輳制御は行わない。そのため、セルフクロッキングがきかずバースト的なトラフィックとなる。バーストトラフィックが発生した場合、パケットの衝突や CSMA/CA のバックオフが発生し、スループットが低下したと考えられる。

TCP と UDP の両プロトコル共に、52、100 チャネルのように 36 チャネルとのチャネル間の距離が離れた場合では、アクセスポイント間の距離が近い場合スループットが極端に悪くなることが観測できた。これは感度抑圧 [13] とスプリアス干渉 [14] が影響していると考えられる。無線 LAN デバイスには、ある希望する周波数の信号を通してそれ以外の周波数を通さないバンドパスフィルタと呼ばれる回路が組込まれている。しかしこのフィルタは希望外の周波数を減衰させることはできるが、完全に排除することはできない。そのため、ある干渉側の信号が強い場合、例えば周波数が異なってもノイズが発生し感度抑圧として被干渉側に影響してしまう。またスプリアス干渉とは、ある無線送信機において所定の周波数帯域の信号以外に出てしまう不要

な信号成分が、被干渉側に影響を与えてしまう干渉である。

感度抑圧とスプリアス干渉が本実験にどのような影響を与えたかを考察する。52 チャネルや 100 チャネルは 36 チャネルとのチャネル間の差が大きく、キャリアセンスを行っても閾値以下で信号が検出される。その結果 ap1-ap2 間と ap3-ap4 間で同時にフレームが送信される。例として、ap2 と ap4 が送信して、ap3 が受信するとする。ap2 と ap4 はキャリアセンスによって互いに送信できることを確認して、送信を行おうとする。このとき ap2 と ap3 のアクセスポイント間の距離が近いと、希望する周波数以外の信号がノイズとして受信してしまい、本来受信するはずの ap4 からのフレームを正しく受け取ることができない。そのため、ap3 と ap4 の通信でフレームの再送が起り、結果としてスループットが落ちると推測することが出来る。

5.2 関連研究と本研究の貢献

無線マルチホップネットワークにおいて、スループットの解析や実験はこれまでに多くの研究がされてきた [15, 16, 17]。文献 [15] では、アドホックネットワークで用いられる各ルーティングプロトコルのパフォーマンスを比較している。パフォーマンス計測は、シミュレーションで行われており、物理層までの解析は行っていない。文献 [16] では、無線マルチホップネットワークにおいて、TCP と MAC 層がどのようにパフォーマンスに影響を与えているかを明らかにしている。文献 [15] と同様に、シミュレーション上でパフォーマンス計測を行っており、物理層の影響を考慮していない。文献 [17] では、特定の無線ネットワーク環境に限らず、どのような環境下でも最適なスループットを出すためのモデルを提案している。特にこのモデルでは、電波干渉に着目しておりマルチチャネル環境下も考慮している。ただし、本稿で示したような感度抑圧やスプリアス干渉の影響に関しては考慮していない。

またマルチチャネル環境下での無線マルチホップ通信の解析も行われてきた [18, 19]。文献 [18] では、チャネルが複数用いられる場合において、必要なチャネル数とその割り当て方法をモデル化している。ここで使われている電波干渉モデルは文献 [20] を用いている。このモデルでは [20]、ノードの配置、トラフィックパターン、チャネルアサイン、ノード間の距離といった環境要因が考慮されている。ただ

し、実際に計測や実験は行われてはいない。文献 [19] では、マルチチャネル環境下で無線マルチホップ通信を行い、スループットの改善ができたとしても、CSMA/CA 方式では、その性能を最大限利用できていないことを問題点として挙げており、改良プロトコルを提案している。このプロトコルにおいて電波干渉について考慮されているが、隣接ノードとの感度抑圧には触れられていない。

以上のようにこれまでの多くの研究では、物理層についてあまり考慮されていない。それに対して本研究では、実機を用いた無線マルチホップの基礎的なパフォーマンス計測を行うことで、物理層で起こる現象がスループットに影響を与えるということを示唆した。

5.3 今後の課題

本実験で明らかにしてきた点は 2 つある。1 つ目は同じチャネルや隣接チャネルを用いた場合、ノード間の距離が近いと CSMA/CA のチャネルスキャンを行った時に、電力レベルが -62dBm 以上の信号を検知してしまい、スループットに差が見られなかったことである。2 つ目は十分にチャネル間の距離が離れた場合でも、ノード間の距離が近い場合、感度抑圧とスプリウス干渉が発生してスループットが悪くなるということである。しかし、この分析は十分ではない。1 つ目で挙げた点は、実際にフレームをキャプチャリングして信号強度が具体的にどの程度示しているかを明らかにする必要がある。同様に感度抑圧やスプリウス干渉が原因でフレームの再送が行われていると考察したが、それを実証するにはフレームが再送された回数を示す、Retry transmit count を観測する必要がある。これらの要求を満たすためには、同様の実験を行うときには観測用機器を用意し、パケットキャプチャを行うべきである。パケットキャプチャを行うことで、今回分析できなかった TCP や UDP といった上位層の分析も可能である。

6 まとめ

本論文では、マルチチャネル環境下における無線マルチホップネットワークの性能検証実験について述べた。マルチチャネル無線マルチホップネットワークを実運用したところ、シングルチャネルの場合と比べてスループットが悪くなったことをモチベーションとして、マルチチャネルの無線マルチホップ

通信の基礎的な実験を行った。本実験で既存研究では示されていない感度抑圧とスプリウス干渉が無線マルチホップ通信に影響があることを示した。これらの現象は例えばチャネル間の距離が十分に離れた場合でも、ノード間の距離が近い場合では干渉を発生させてしまい、フレーム再送が行われる。これにより、今後マルチチャネルで無線マルチホップ通信のルーティングプロトコルや、アーキテクチャを考案する上で考慮すべき点を明らかにした。

謝辞

本研究の一部は IJ 研究所からの委託研究によって実現したものです。ご支援に感謝いたします。本研究は JSPS 科研費 26330115 の助成を受けたものです。また本論文を執筆するにあたり、ご助言を頂いた慶應義塾大学環境情報学部三次仁博士と WIDE プロジェクトのみなさまに感謝いたします。

参考文献

- [1] Ashish Raniwala and Tzi-cker Chiueh. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 2223–2234. IEEE, 2005.
- [2] Pradeep Kyasanur and Nitin H Vaidya. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 10(1):31–43, 2006.
- [3] Richard Draves, Jitendra Padhye, and Brian Zill. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In *Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 114–128. ACM, 2004.
- [4] Thomas Clausen and Philippe Jacquet. draft-ietf-manet-olsr-11.txt. Technical report, IETF, July 2003.
- [5] Hidenori Aoki, Shinji Takeda, Kengo Yagyu, and Akira Yamada. IEEE 802.11s Wireless

- Lan Mesh Network Technology. *NTT DoCoMo Technical Journal Vol.8 No.2*.
- [6] A. Neumann, C. Aichele, and M. Lindner S. Wunderlich. draft-openmesh-b-a-t-m-a-n-00. Technical report, IETF, March 2008.
- [7] WIDE Project. <http://www.wide.ad.jp>.
- [8] Buffalo WZR-HP-AG300H. <http://buffalo.jp/products/catalog/network/wzr-hp-ag300h>.
- [9] OpenWRT. <http://openwrt.org>.
- [10] Wi-Spy. <http://www.ibsjapan.co.jp/products/Wi-Spy.html>.
- [11] Iperf. <https://iperf.fr>.
- [12] Masahiro Morikura and Shuji Kubota. *802.11 高速無線 LAN教科書*. January 2005.
- [13] Keiji Tatekawa. *最新デジタル移動通信*. 2002.
- [14] 総務省情報通信審議会 情報通信技術分科会 ITS 無線システム委員会. 隣接他システムとの共存条件の検討内容について. http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/its-radio-system/24718.html.
- [15] Josh Broch, David A Maltz, David B Johnson, Yih-Chun Hu, and Jorjeta Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 85–97. ACM, 1998.
- [16] Mario Gerla, Ken Tang, and Rajive Bagrodia. Tcp performance in wireless multi-hop networks. In *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on*, pages 41–50. IEEE, 1999.
- [17] Kamal Jain, Jitendra Padhye, Venkata N Padmanabhan, and Lili Qiu. Impact of interference on multi-hop wireless network performance. *Wireless networks*, 11(4):471–487, 2005.
- [18] Murali Kodialam and Thyaga Nandagopal. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 73–87. ACM, 2005.
- [19] Jingpu Shi, Theodoros Salonidis, and Edward W Knightly. Starvation mitigation through multi-channel coordination in csma multi-hop wireless networks. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 214–225. ACM, 2006.
- [20] Piyush Gupta and Panganmala R Kumar. The capacity of wireless networks. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 46(2):388–404, 2000.