

TCP における複合無線アクセスネットワークの優位性の検証

川原隆靖^{†1} 西矢恭^{†2} 安達直世^{†2} 滝沢泰久^{†2}

^{†1} 関西大学大学院理工学研究科^{†2} 関西大学環境都市工学部

近年無線通信において、周波数不足の解決のためコグニティブ無線の研究が活発に行われており、コグニティブ無線により無線機が広い周波数帯から利用可能な無線メディアを発見可能となる。このようなコグニティブ無線を前提として我々は利用可能な多数の異種無線メディアを複合して高スループットかつ低遅延を実現する無線アクセスネットワークを提案している。本方式では、無線アクセスネットワークを構成する複数の異種無線メディアにトラフィックを分配するが、その際に無線メディアの特性や利用状況によりトラフィックの到着順序乱れが発生し、有効なデータフローを提供できない可能性がある。本稿では、様々な TCP トラフィック量における複合無線アクセスネットワークのシミュレーション評価からトラフィック到着順序乱れの通信性能への影響を報告し、その影響に基づき複合無線アクセスネットワークの有効性に関して議論する。

1. はじめに

近年、携帯電話、無線 LAN システムなどの数多くの無線システムが普及してきている。同時に、無線通信において多様なコンテンツが増え、通信するデータ量、ユーザ数も増えている。このような現状で要求を満たす無線通信を実現するためには、広い周波数帯域が必要である。しかし、広い周波数帯域を確保する事が困難であり、空き周波数帯が不足している。この問題を解決する技術としてコグニティブ無線がある [1]。コグニティブ無線とは、無線機が周囲の電波利用状況を認識し、状況に応じて無線システムを適宜使い分ける技術である。無線アクセスネットワークはコグニティブ無線により発見された多様な無線メディアの中から最適な無線メディアを利用するに留まる。しかし、コグニティブ無線により発見される多様な無線メディアを集約することによって、単一无線メディアに比べ、広帯域な通信を提供することが可能である。従って、我々は同時に利用可能な多様な無線メディアを可能な限り組み合わせることで高度に活用する複合無線アクセスネットワーク (以降、CWAN) とそのトラフィック制御方式を提案している [2]。本方式は従来方式と比較して圧倒的に高いスループットと低い遅延時間を実現できる事を確認している。また、端末の移動に関して考慮するために、MobileIP (以下、MIP) との統合を実施して、CWAN を移動通信環境に適合した動的な構成方式 [3] としている。CWAN はそれを構成する複数の無線メディアにトラフィックを分配するが、その際に無線メディアの特性や利用状況によりトラフィックの到着順序乱れが発生し、有効なデータフローを提供できない可能性がある。本稿では様々な TCP トラフィック量における複合無線アクセスネットワークのシミュレーション評価からトラフィック到着順序乱れの通信性能への影響を報告し、その影響に基づき CWAN の有効性に関して議論する。

2. 複合無線アクセスネットワークの構成

無線通信環境が WiFi, WiMAX, LTE など多様な無線メディアが混在する環境となっている。従って、それらの重なっている通信カバレッジ内ではモバイル端末が複数の無線メディアを利用することができ、さらに、端末間においても無線メディアを利用する事ができる。以上のことから、想定する CWAN の一例を以下に示す (図 1 参照)。

- ・モバイル端末 (以降、MN: MobileNode) とアクセスポイント (AP) は、それぞれ IEEE802. 11b (以降、11b) と IEEE802. 11a (以降、11a) の 2 つの無線 I/F を装備する。
- ・ネットワークは IP ネットワークを想定する。
- ・MN1 は AP の 11a, 11b カバレッジ内にあるので 2 つの無線メディアを利用できる。
- ・MN2 は AP の 11b カバレッジ内にあるので 11b を利用でき、さらに、11a により MN1 と端末間で通信可能である。
- ・上記条件により、MN1, MN2 は 11a と 11b を並列に利用できるため、AP から MN1 にトラフィックを送信する場合は 11a, 11b を直接通信で並列利用して送信、AP から MN2 にトラフィックを送信する場合は 11b は直接通信、11a は MN1 を経由して通信で並列利用可能である。

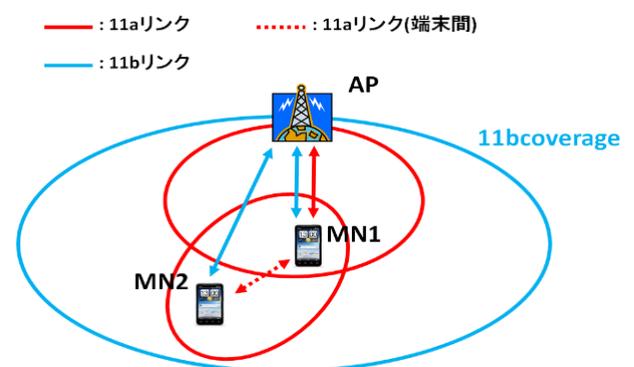


図 1 複合無線アクセスネットワーク

3. 複合無線アクセスネットワークのアーキテクチャ

本節では CWAN 使用時における端末の移動を実現するためのプロトコルである MIP 及び CWAN の MIP との統合方式について説明する。

3.1 MobileIP

MIP[6]は MN がアクセスネットワーク間を移動した(以降, ハンドオーバー) 場合において通信相手端末(以降, CN:CorrespondentNode)と通信を継続可能とする. MIP では, ネットワーク上に設置された HomeAgent(HA)と ForeignAgent(FA)とよばれるノードが, 移動に応じて変化しない固定なアドレスであるホームアドレス(HoA)と, MN が移動先のネットワークで一時的に利用する Care-ofAddress(CoA)との対応関係(以下, バインディングリスト)を管理する. MN のハンドオーバーに伴い, CoA が変更した場合, MN は HA に対してバインディングの更新を行う. CN は, MN の訪問しているネットワークに関わらず, 常に MN の宛先を HoA として送信する. HA がそれを受信して, バインディングリストから HoA に対応している CoA を宛先として更新し, HA が CN からのデータを FA を介して MN に転送する. これにより, CN から移動端末の移動を隠蔽できるようになり, 移動しながらの通信の継続が実現できる.

3.2 複合無線アクセスネットワークのレイヤ構造

MIP ではホストを識別する HoA とルータを識別する CoA を一つずつ割り当てられ, MN は1つの I/F かつ1ホップ(直接通信)によりアクセスネットワークを構成する. よって, MIP を利用して, 複数の I/F を同時に利用かつ MN 間のマルチホップにより CWAN を構成するには, MIP からは1つの I/F かつ1ホップで見えるようにする必要がある. これを実現するためには, プロトコルスタックにおいて, CWAN 構成するレイヤを MIP より下位レイヤに組み込み, MIP から CWAN のアクセス経路を単一の無線リンクとして隠蔽する必要がある. 以上より, 本稿では, CWAN と MIP を統合するために, IP レイヤと MAC レイヤの間に複数の無線リンクや経路を集約する Composite レイヤを用意する. このレイヤでは集約した無線リンクの遅延を均等化するパケット分配を行い, 高スループットと低遅延を実現する.(図2)

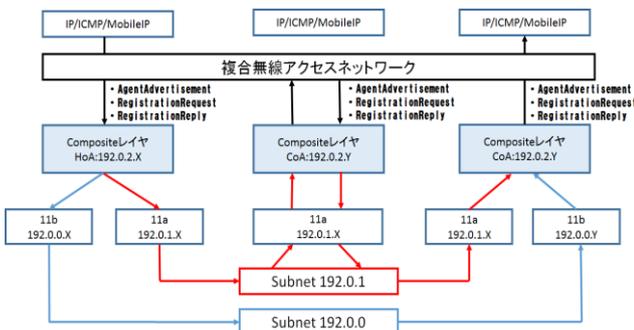


図2 複合無線アクセスネットワークのレイヤ構造

3.3 複合無線アクセスネットワークのネットワーク構成方式

CWANではMNは1つのHoAと複数のCoAを割当てられるが, CWANにおける移動検出及び位置登録の方法は下記手順になる(図3)

- APにおいてMIPからのCWANへのAgentAdvertisement (図3の矢印1番)を集約する各アクセスネットワークのAgentAdvertisementとして転送する. MNは受信した各I/FからのAgentAdvertisementをCWANで集約してMIPに引き渡す.
- バインディング処理として, MNにおいてMIPからのRegistrationRequest (図3の矢印2番)をCWANでAgentAdvertisementを受信した複数のI/Fへ送信する.
- APにおいて, CWANは複数のI/Fから受信したRegistrationRequestを集約してCWANのCoAとしてRegistrationRequestをMIPへ引き渡し, RegistrationReply (図3の矢印3番)をRegistrationRequestと応答として, 上記の逆方向にAPとMN間のCWANで交換する.

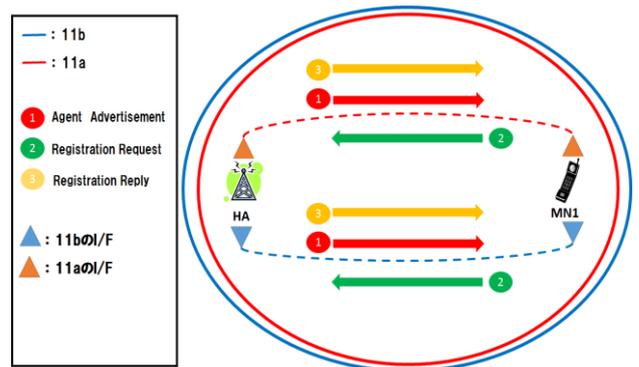


図3 ホームネットワークにおける位置登録の方法

上記手順でMIPはMNのCWANのCoAをHoAにバインディングし, CWANはMNの複数のI/FのCoAをCWANのCoAと関連づける. 以降, HoAのトラフィックはCWANへ転送され, 転送されたトラフィックはCWANで複数のI/F(CoA)へ分配される. さらに, バインディングが完了してAPまでの経路が確立したMNはCWANを構成するI/FからAgentAdvertisement (図4の矢印1番)を転送する.(図4)

上記転送により, 他の MN(マルチホップ MN)からRegistrationRequest (図4の矢印2番)を受信した場合, CWANはこれを受信I/Fを用いてAPへ転送する. APのCWANは, 前述と同様に, 複数のI/Fから受信したRegistrationRequestを集約してMIPへ引き渡す. APのMIPからのRegistrationReply (図4の矢印3番)をCWANは上記の逆の方向で転送する. これにより, MIPはマルチホップMNを直接通信するMNと認識し, さらにCWANはマルチホップMNの複数のI/F(CoA)を転送先として経路表を作成する.

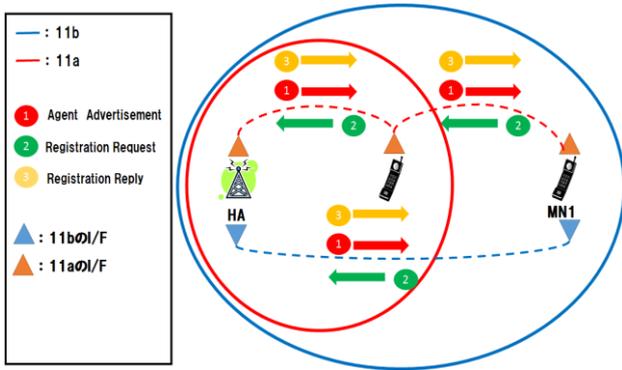


図4 ホームネットワーク外における位置登録の方法

パケット分配では遅延均等化を図ることにより、無線メディアの特性や利用状況を考慮して、最適にトラフィックを分配する[2]。遅延時間取得は図5のように、各ノードの各I/F毎に実施するが、マルチホップ経路の遅延はI/F毎の計測期間(図5の矢印1から矢印2までの期間)における遅延時間の和とトラフィック量をそのI/Fから構成された経路上を転送し、かつ中継ノードのI/Fの遅延およびトラフィック量を加算して、マルチホップ経路のe2eの平均遅延時間を次式のように算出する。

The average of delay time

$$\frac{\sum_{N} (\text{The amount of delaytime of each I/F})}{\sum_{N} (\text{The amount of transmitted packet of each I/F})} \quad (1)$$

$N = \text{The amount of I/F}$

このようにして複数のI/Fで算出された遅延を比較して、遅延が小さいI/Fにはより多くのトラフィックを分配し、遅延が大きいI/Fにはより少ないトラフィックを分配することになっている。

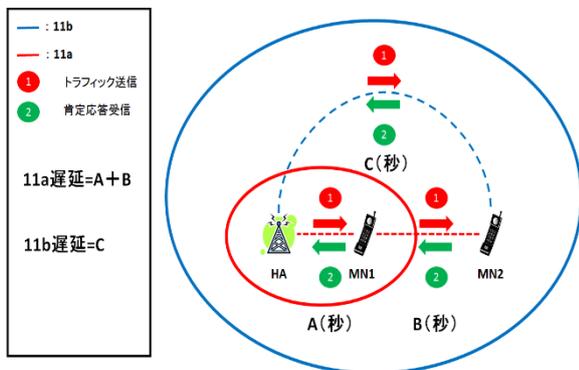


図5 複合無線アクセスネットワークにおける遅延取得

以上により、マルチホップMNのトラフィックはAPおよび中継MNにおいて経路として確立した複数のI/Fへ分配される。

4. パケット到着乱れ

4.1 複合無線アクセスネットワークにおけるパケット到着乱れ

CWANはCompositeレイヤで集約する無線リンクにパケットを分配する。しかし、パケット分配した無線リンクは、異種の無線メディア(送信速度,送信手順が異なる)であり、また通信状況(競合するノード数やトラフィック量など)も異なる。従って、パケットが送信順に到着することが保証されない(図6)。パケットが送信順に到着しない(パケット到着乱れ)場合、上位レイヤのデータフローとして無効になる可能性が高く、複数の無線メディアを集約した効果を得られなくなる問題がある。また、送信先までにマルチホップする場合、ホップするノード間の通信状況は異なるので通常のシングルホップに比べてパケット到着乱れの発生可能性が高くなる。

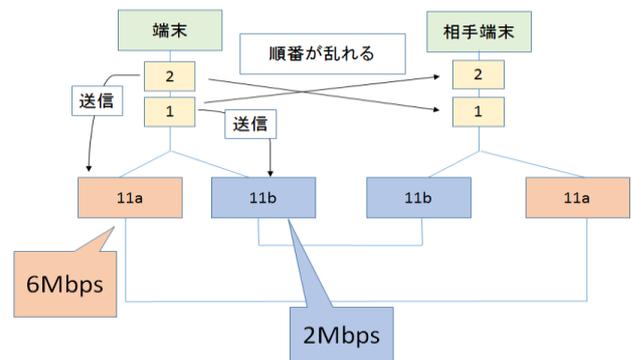


図6 パケット分配

4.2 パケット到着乱れがTCPに与える影響

CWANにおいて、パケット分配においてパケットが通信速度が遅い無線メディアに分配され、後発のパケットが速い無線メディアに分配された場合、パケット到着乱れが発生する可能性がある。(図6)パケット到着乱れによりTCPにおいてデータセグメントの追い越しが発生するとTCPは再送を要求する確認応答を送る。この確認応答が3回連続するとTCPは輻輳発生と判断し高速再送制御を実施する。高速再送制御はTCPの輻輳ウインドを半減して送信を抑制する(図7)。従って、CWANで複数の無線メディアを集約して帯域を拡大しても、TCPはCWANによるパケット到着乱れを輻輳と判断して送信を抑制する。さらに、TCPにおいて再送制御のためのパケットにより帯域を浪費する。すなわち、広げた帯域を有効活用できないことになり、上位アプリケーションの通信性能を向上が図れない。

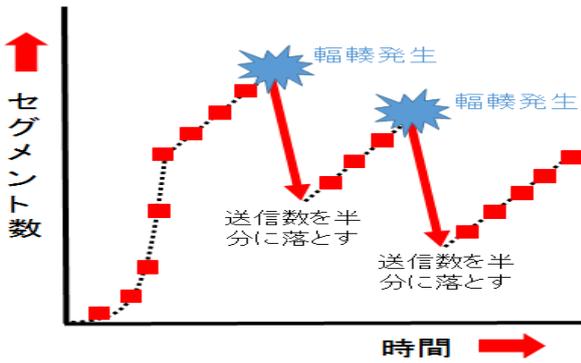


図 7 パケット到着乱れが輻轉ウインドウへ与える影響

5. シミュレーション

本章では様々なトラフィック量におけるシミュレーション実験を通じて到着順序乱れがアプリケーションの通信性能に与える影響を TCP を用いて検証を行う。

5.1 シミュレーション評価方法

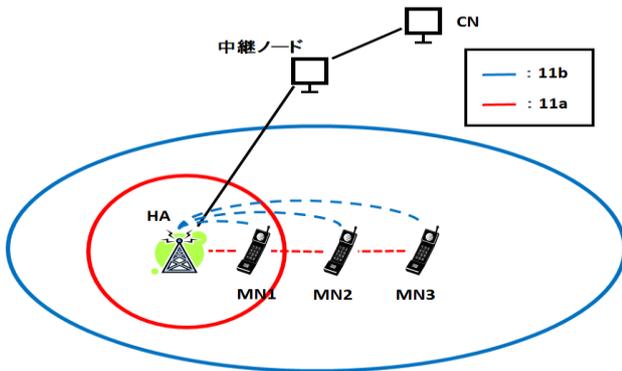


図 8 複合無線アクセスネットワーク構成図

評価条件は次の通りである。

	伝送速度	通信範囲
IEEE802.11a	54Mbps	100m
IEEE802.11b	11Mbps	200m

表 1 無線メディアの伝送速度と通信範囲

	FTPServer/FTPClient	装備 I/F
HA	FTPServer	11a/11b
MN1	FTPClient	11a/11b
MN2	FTPClient	11a/11b
MN3	FTPClient	11a/11b

表 2 HA 及び MN の役割と装備 I/F

- ・今回の評価ではMNは移動しないものとする。
- ・アプリケーショントラフィックはFTPServerからFTPClientへのFTPダウンロードトラフィックとする。

以上の条件下で,MN1,MN2,MN3 における FTP スループットを CWAN 経路(11a による node1 経由のマルチホップ

経路と 11b リンクを並列利用)使用の場合,11a リンクのみ
の経路使用の場合,11b リンクのみ
の経路使用の場合で比較した。

5.2 MN1 におけるシミュレーション結果と考察

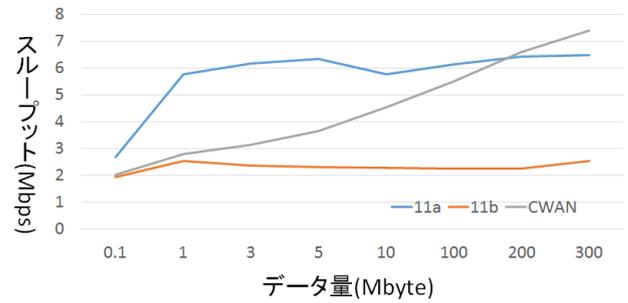


図 9 MN1 宛 FTP トラフィックに応じたスループット

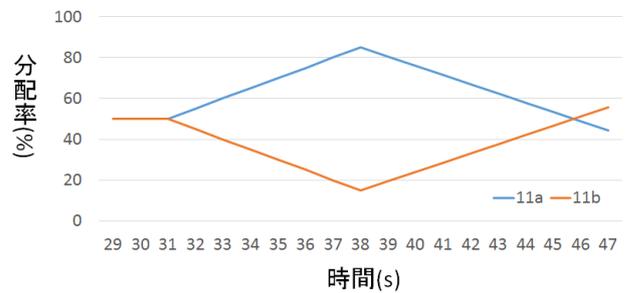


図 10 MN1 宛 FTP ダウンロードトラフィックが 10Mbyte 時のパケット分配率

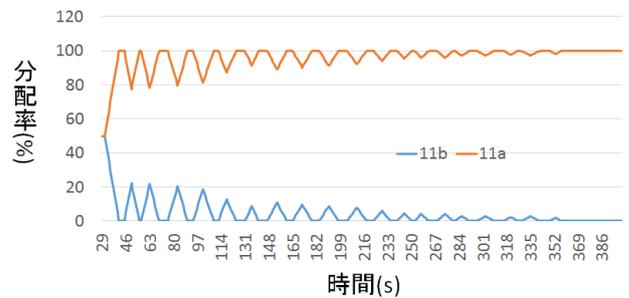


図 11 MN1 宛 FTP ダウンロードトラフィックが 300Mbyte 時のパケット分配率

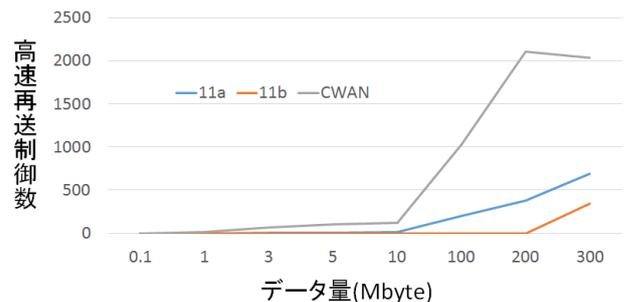


図 12 高速再送制御発生数 (1hop)

図9においてデータ量が0.1Mbyteの場合ではCWAN方式使用のスループットは11bシングルリンク使用場合と比較して同等であるが、データ量を増加させていく毎にその差は増大しており、300Mbyteの場合では3倍になっている。11aシングルリンク使用の場合と比較するとデータ量が0.1Mbyteの場合、スループットは0.7倍であるがデータ量を増加させていく毎にその差は収縮しており、300Mbyteの場合では1.2倍になっている。従って、CWAN方式使用は11bシングルリンク使用に対して優位性を確保している。しかし、11aシングルリンク使用に対してはデータ量0.1Mbyteから100Mbyteの場合で優位性を確保できていないことがわかる。図10は、MN1宛にFTPダウンロードトラフィック10Mbyte送信した場合の分配率の変動を表したものである。図10では分配率が収束状態にないことがわかる。すなわち、データ量がCWANの packets 分配探索には十分でなく、CWANがスループットを最大化する以前にシミュレーションが終了している。そのため、11aのスループットを越えることができない。11aシングルリンク使用の場合におけるデータ量1Mbyteから300Mbyteにかけてスループットの上昇が見られないのは11aの通信速度の上限に達しているからであると考えられる。CWANの場合はデータ量が増えるに従い、パケット分配探索が最適解を見つけるのに十分なデータ量に近づくため、スループットが上昇する。300Mbyteでは、CWANが11aのスループットを超える。これは、FTPトラフィックがパケット分配が最適解を見つけるのに十分なトラフィック量以上となったためである。また、図12において、データ量が増えるに従い、CWANの高速再送制御発生数は大幅に増加している。パケット到着乱れ等を原因とする高速再送制御はTCPの輻輳ウィンドウを半減する。多発した場合、CWANはこの通信量制限により大幅にスループットが低下する可能性がある。しかし、図9においてスループットは上昇し続けている。これはCWAN方式の複数経路による通信で11aシングルリンクおよび11bシングルリンクよりもTCPの輻輳ウィンドウの増加が早く、輻輳ウィンドウが半減しても短期間に回復し、シングルリンクの輻輳ウィンドウを超えるからである。すなわち、CWANの複数経路による帯域拡大はパケット到着乱れによるデメリットを相殺し、さらにそれ以上の効果をアプリケーションに提供すると考えられる。従って、300MbyteにおいてCWANは高速再送制御の多発による送受信可能トラフィックの抑制を受けても、11aの帯域より広帯域を確保する。

5.3 MN2におけるシミュレーション結果と考察

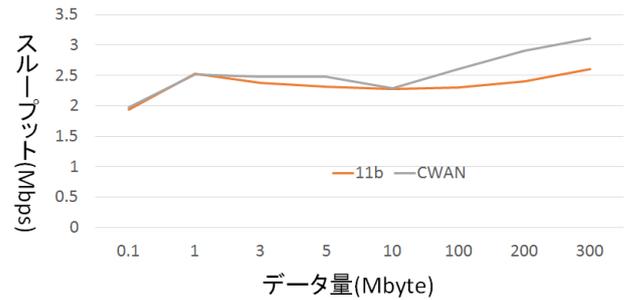


図 MN2 宛 FTP トラフィックに応じたスループット

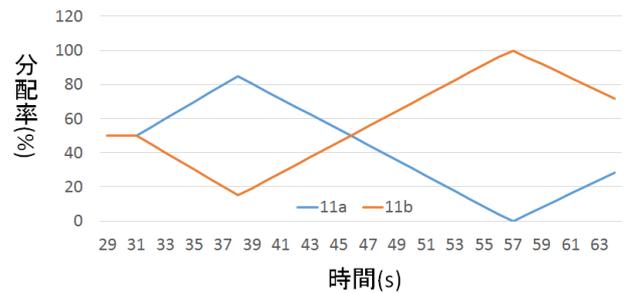


図 14 MN2 宛 FTP ダウンロードトラフィックが 10Mbyte 時のパケット分配率

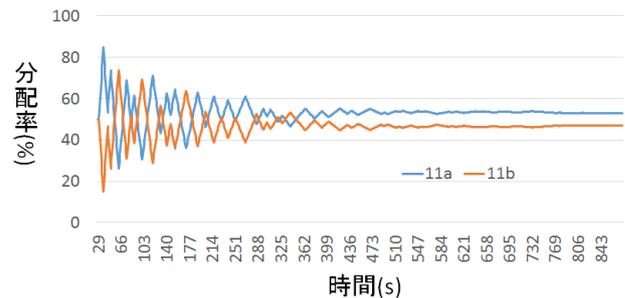


図 15 MN2 宛 FTP ダウンロードトラフィックが 300Mbyte 時のパケット分配率

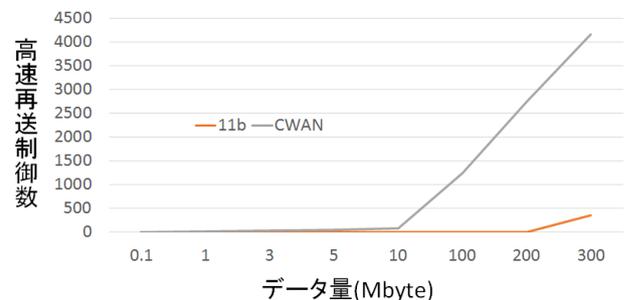


図 16 高速再送制御発生数 (2hop)

11a シングルリンクはカバレッジ外となりトラフィックを転送できない。従って、以降は 11b シングルリンクのみと比較を行う。図 13 においてデータ量が 0.1Mbyte の場合では

CWAN 方式使用のスループットは 11b シングルリンク使用の場合と比較して同等もしくは 1.1 倍程度であるが、データ量を増加させていく毎にその差は増大しており、300Mbyte の場合には 1.4 倍になる。データ量 0.1Mbyte から 10Mbyte の場合では、11b のスループットが同等である。図 14 ではシミュレーションが終了するまでに分配率が収束状態にないことがわかる。すなわち、データ量が CWAN のパケット分配探索には十分でなく、CWAN がスループットを最大化する以前にシミュレーションが終了している。11b シングルリンク使用の場合におけるデータ量 1Mbyte から 300Mbyte にかけてスループットの上昇が見られないのは 11b の通信速度の上限に達しているからであると考えられる。CWAN の場合はデータ量が増えるに従い、パケット分配探索が最適解を見つけるのに十分なデータ量に近づくため、スループットが上昇する。100Mbyte からは、CWAN が 11b のスループットを超える。これは MN1 (1 ホップ) の場合と同じ傾向で同じ原因であると考えられる。

5.4 MN3 におけるシミュレーション結果と考察

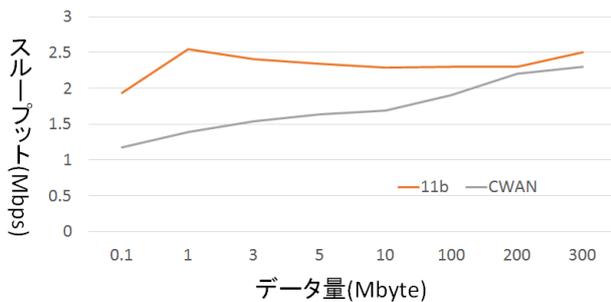


図 17 MN3 宛 FTP トラフィックに応じたスループット

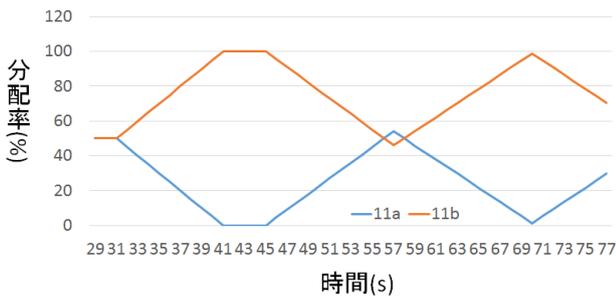


図 18 MN3 宛 FTP ダウンロードトラフィックが 10Mbyte 時のパケット分配率

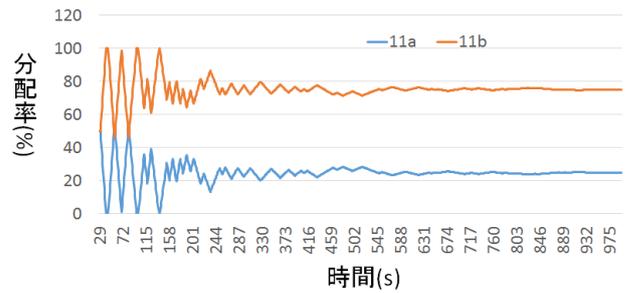


図 19 MN3 宛 FTP ダウンロードトラフィックが 300Mbyte 時のパケット分配率

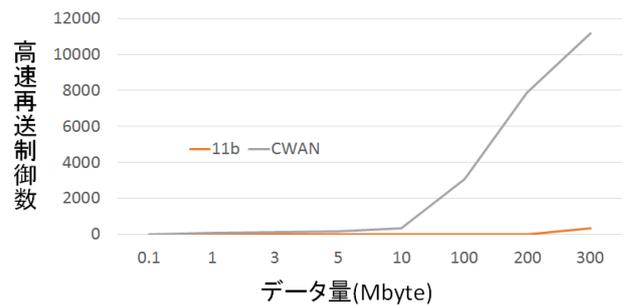


図 20 高速再送制御発生数 (3hop)

図 17 においてデータ量が全ての場合において CWAN 方式使用のスループットは 11b シングルリンク使用の場合と比較して低い値である。データ量を増加させていく毎にその差は収縮しており、0.1Mbyte では CWAN は 11b に対して 0.6 倍にあるが、300Mbyte では 0.9 倍になっている。CWAN のスループットが上昇する原因は MN1, MN2 と同等である。しかし、300Mbyte において分配が収束しても 11b に対して劣っている。

11b と CWAN のスループットの差はデータ量が大きくなる毎に収縮しているが 11b に対して優位性を確保できていない。300Mbyte でパケット分配は収束しているのにも関わらず、11b を超えられない理由としてはパケット分配率が収束する以前のスループットが低い事が挙げられる。また、マルチホップ経路の e2e の遅延は経路を構成する無線リンクの遅延時間を集約して得られるため、その各無線リンクの遅延時間を経路上を伝搬されることによる遅延が発生する事、遅延伝搬パケットをロスすることにより、取得した遅延時間が現在のトラフィック量を反映した時間として算出されず、e2e の実際の遅延時間から乖離して、適正なパケット分配に至っていない事が考えられる。遅延伝搬パケットのロスをして現在のトラフィック量を反映していない遅延時間を算出した場合、本来少なく送るべき無線メディアに今までよりも多く分配してより多くのパケット到着乱れ等を発生させスループットを大幅に低下させる可能性がある。従ってこの遅延伝搬パケットロスの問題はトラフィック量が増え、またホップ数が増えると発生可能性が高くなるた

め,大きな問題と考えられる.

6. 結論と今後

CWAN 方式ではトラフィック量が少ない場合にパケット分配が収束前に終了する. また, ホップ数の多い経路を併用した場合, e2e の遅延時間取得が, 遅延時間伝搬パケットの遅れやロスから実際の遅延時間と乖離し, パケット分配効果が得られない. これらについて, 後者は移動環境では発生する可能性が高いので大きな課題である. 今後はトラフィック量が少ない場合, パケットロス等に対応したパケット分配方式を検討していく.

参考文献

- [1]原田博司, “コグニティブ無線機の実現に向けた要素技術の研究開発”, 電子情報通信学会論文誌 BVol.J91-B, No.11, pp.1320-1331(2008).
- [2]滝沢, 植田, 小花: “IEEE802.11 と IEEE802.16 を用いた複合アクセス経路のパケット分配制御方式”, 情報処理学会論文誌, Vol.52No2, pp543-557(2011).
- [3]滝沢, 野田, 安達: “移動通信環境における複合アクセスネットワークの MIP との統合”, 研究報告マルチメディア通信と分散処理(DPS), Vol.153, No.10pp1-8(2012).
- [4] <http://www.7key.jp/nw/tcpip/tcp/tcp2.html>
- [5] <http://www5e.biglobe.ne.jp/aji/3min/42.html>
- [6]村井純, 湧川隆次 (2009) 「モバイル IP 教科書」 (インプレス標準教科書シリーズ) インプレス R & D.