

マルチホップマルチレートネットワークでの接続先選択ポリシーと 接続元別重み付けスケジューリングにおける通信性能評価

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

あらまし 近年、テザリングやモバイルアクセスポイントなどの移動無線ノードの普及および Wi-Fi ダイレクトを用いた仮想マルチホップ網の構成技術などにより、近接かつ多数のノードが連携するマルチホップネットワークの実現性が高まってきた。従来とは異なり、近接かつ多数のノードが連携するマルチホップネットワークでは、その QoS(例えばスループット)は、トラヒックリレー時の各ユーザの接続先選択方法に大きく依存する。例えば、1 端末でも遠方に低レートで接続してしまうと、マルチホップネットワーク全体が、Performance anomaly と呼ばれる通信品質劣化を起こしてしまう。しかし、近距離でマルチホップ通信時には、中継ノードは、それ自身が能動的な端末であるため、転送トラヒックだけでなく自身のトラヒックも送信する可能性が高いことも特徴として挙げられる。このような条件において、マルチホップ通信での転送トラヒックと自身のトラヒックの優先制御を行うスケジューリングや、マルチレート通信における特性を考慮した接続先選択制御に関する研究がそれぞれ行われてきたが、これらを同時に考慮した適切な接続先選択と、そのときのスループットとの関係はほとんど明らかになっていない。筆者らの研究において、すでに、マルチホップマルチレートネットワークにおいて、伝送レートと送信スケジューリング方法の組み合わせが全体スループットに与える影響について基本的なモデルで評価している。そこで本稿では、これを拡張して、異なる複数の経路から最大のスループットを得るために接続先選択を行った場合の、送信スケジューリング方法が全体スループットに与える影響について評価する。

キーワード マルチホップネットワーク, 無線 LAN, 接続先選択, スループット

Performance evaluation with packet scheduling in multi-hop multi-rate network with weighted round robin scheduling and connecting node selection

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

1. はじめに

Wi-Fi での通信カバーエリア拡大のために、モバイルアドホックネットワーク (MANET) 技術を用いた中継通信方法が注目されている。経路ノードとして、スマートフォンなどの Wi-Fi ユーザ端末を想定した場合、中継端末自身の経路メリットの考慮や自身のトラヒックの優先制御も必要である。本稿で

は、QoS を考慮し、新たなノードが MANET に接続する場合に、ノードの QoS ポリシーに沿った接続を行い、中継各ノードは、経路トラヒックと自身のトラヒックとの優先制御を行う送信スケジューリング方法が全体のスループットに与える影響について調査する。

送信目的ノードまでの接続経路が複数存在し、それぞれに伝送レートが異なる (マルチレート) ような MANET のスルー

プットは接続先選択に大きく依存する。この接続先選択において、本稿で検討対象とするのは次の二つの特性である；一つは、ノードからの距離が遠くなるにつれてマルチレート制御によって伝送レートが低下するため、スループットが低下してしまうこと、もう一つは、ホップ数増加にともなって CSMA/CA の送信機会の関係からスループットが大幅に低下してしまうことである。本稿では、さらに、中継ノードは転送トラヒックだけでなく自身のトラヒックも送信し、中継トラヒックと自身のトラヒックをノード自身が決めた配分で送信制御 (スケジューリング) する、という仮定をおく。このとき、このスケジューリングの内容はあらかじめ決められた後で広告され、他ノードは、このスケジューリングと伝送レートとホップ数を考慮して、接続先のノードを最適に選択するとする。

以下、2 章でマルチホップマルチレートネットワークに関する従来研究での制御について述べ、3 章ではマルチレート通信の特性とスケジューリングを考慮したモデルについて述べる。4 章でこのモデルの評価について述べ、最後に、4 章でまとめとする。

2. 従来研究

2.1 関連研究

マルチホップあるいはメッシュネットワークにおける AP 選択方法は数多く検討されている [1] [2] [3]。さらに、マルチホップ無線ネットワークにおける制御として、中継ノードにおいて異なるフローのトラヒックに重みを付けて送出するスケジューリング技術も既に知られている。[4] では、自身のアップリンクトラヒックの packets を一つ送信するたびに転送アップリンクトラヒックの packets を一つ転送することで、ホップ数の異なるユーザ間のスループット差異を解消するスケジューリング方法を提案しているが、マルチレート通信における特性には言及していない。さらに、接続トポロジの変化、すなわち、スケジューリングの有利不利を考慮した下流ノードの接続方法については、考慮されていない。一方、[5] では、無線メッシュ網に接続するユーザが目的のサーバに到達するまでの経路上のマルチレート通信性能を考慮することで、最大のスループットを得られる AP 選択手法を提案しているが、スケジューリング方法には言及していない。しかしながら、これらスケジューリング方法と接続先選択制御を組み合わせた場合の通信特性は、より複雑なものとなる。なぜなら、下流ノードは、スケジューリング方法により異なる接続先を選択することで自身のポリシーに従う、あるいは自身の効用を高くできる場合があり、そのような接続を行う振る舞いにともなってシステム全体のリンク容量が変化するという依存関係が存在するからである。

2.2 マルチレートと Performance anomaly

無線 LAN では、フレーム受信状況に応じて適切な伝送を行うため、各端末それぞれに適した伝送レートが用いられる。CSMA/CA の送信機会均等性により既存の高伝送レート端末に対して低伝送レート端末が加わると、高伝送レート端末およびシステム合計スループットが著しく低下する Performance

anomaly と呼ばれる状況が生じる [6]。本稿では、キャリアセンス範囲内にすべてのノードが含まれるような小規模な MANET を対象としており、Performance anomaly はシステム全体に影響を及ぼす。

Performance anomaly を考慮した、送信端末数 n 台、1 ホップの場合のマルチレートの端末 1 台あたりのスループットは、

各端末の伝送レート v_i の調和平均 $\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}}$ によって、おおよそ

その値を求めることができる [5] とされているため、本稿でもこの計算式でスループットを算出している。たとえば、802.11g において、54Mbps 送信端末が 1 台と 6Mbps 送信端末が 1 台の無線 LAN では、それぞれのスループットは、前計算式より、5.4Mbps となり、システム容量の 20 % 程度のスループットしか得られないことを意味している。

3. 接続制御とスケジューリング制御

3.1 システムモデル

本研究では、図 1 に示すような無線中継ノードと未接続ノードと無線基地局 (AP と表記) とからなる無線 LAN システムを仮定する。AP と有線接続されている端末以外は、全てのノードは、お互いに相手をキャリアセンスドメインに含み、全てのノードは同じチャネルを用いて通信を行う。未接続ノード (テナントと呼ぶ) は、中継ノード (オーナーと呼ぶ) に接続し、有線端末と通信する。モデルにおいては、テナントとオーナーと AP は、非対称な位置関係にある。この位置関係がもたらすノード間距離と伝送レートの関係について説明する。全テナントは同じ位置にあり、それらとオーナー 1 は、比較的近いので、48Mbps の高伝送レートで接続できる。また、オーナー 2 とは、少し離れているため、伝送レートは、24Mbps 程度になる。一方、オーナー 1 と AP 間は少し遠いので、48Mbps となり、オーナー 2 と AP 間は、高速な 54Mbps で通信可能である。このとき、テナントは、高いスループットを得るためには、次の 2 つの条件を満足する必要がある。

(1) システム全体のスループットを高めるように接続する。

これは、システム全体のスループットの一部分が端末のスループットになるからである。そのためには、Performance anomaly を避けて、出来るだけ高い伝送レートで接続するべきである。

(2) 混雑を考慮して、接続する。

これは、マルチホップの場合には、同じノードに接続している n 台の端末トラヒックが、中継時には 1 つに集約されるため、端末あたりでは、伝送レートの $\frac{1}{n}$ になってしまうからである。このためには、高伝送レートで接続できるオーナーばかりに集中することを避けることも必要になる。

テナントとオーナーは、それぞれ、接続制御とスケジューリング制御をおこなう。それぞれについて次に説明する。

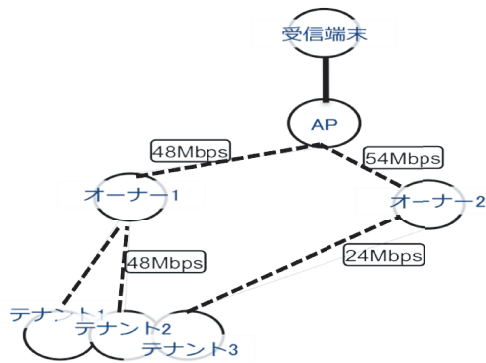


図 1 システムモデル

3.2 接続制御

テナントは、任意のオーナーに接続が可能であるとし、その接続先の選択を接続制御と呼ぶ。このテナントの接続方法について説明する。テナントは、それぞれ、何を目的として接続するオーナーを選択するかを決めているものとする。これをテナントのポリシーと呼ぶ。ここでは、テナントは、下記 5 種類の目的関数のうちいずれを最大化したいか (以下、接続ポリシー (i) ~ (v) と呼ぶ) のいずれかを選択するものとする。

- (i) システム全体スループット
- (ii) オーナー j (の自身のトラフィック分) のスループット
- (iii) オーナー $1 \sim m$ (の自身の総トラフィック分) の合計スループット

- (iv) テナント k のスループット
- (v) テナント $1 \sim n$ の合計スループット

これらのポリシーを選択する理由として、次のような例が考えられる。

- (i) 無線リソースの有効利用
- (ii)(iii) 中継というオーナーのボランティア行為に対する便宜
- (iv)(v) テナント自身の通信品質の向上

前記 5 種類のポリシーは、それぞれ独立の関係にある。あるポリシーに沿って接続したときに、それが、他のポリシーをとった場合の接続結果と同じになることもあり得る。本稿では、基本的な特性をまず明らかにするため、全てのテナントは、同一のポリシーであるとする。

3.3 スケジューリング制御

オーナーのスケジューリングの目的について述べる。オーナーもテナントと同一の 5 種類の目的のうちいずれかを選択するものとする。この目的を達成するために、スケジューリング制御を行う。スケジューリング制御とは、データ送信の優先制御に相当する。具体的には、テナント毎に送信待ちバッファを持ち、さらにオーナーの送信待ちバッファを持ち、これらのバッファからの送信量を変化させることで優先制御を行う。図 2 にこれを示す。ここでは、簡単のため、各バッファは Weighted Round Robin(WRR) キューで実現されるものとし、優先制御は、このキューからの取り出しの重み (ウエイト) 付けで実現する。例えば、2 つのキューがあり、ウエイトが 1:2 の比でつけられている場合、スループットも 1:2 となる。

本稿では、基本的な特性をまず明らかにするため、全てのテナントは、同一の目的を持ち、またスケジューリングメカニズムは同一とする。ただし、スケジューリングメカニズムで用いるパラメータ、すなわち各オーナーにおけるキューのウエイト付けは各オーナーで目的に適した値を個別に設定するものとする。

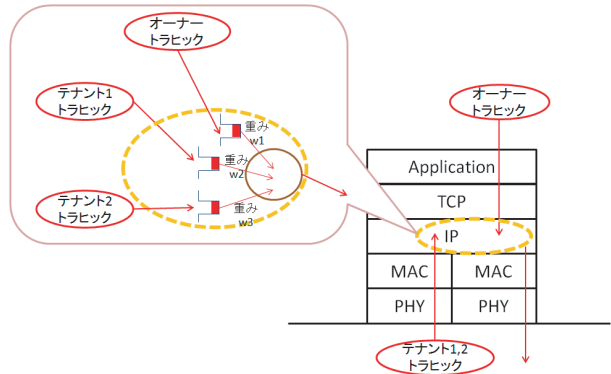


図 2 スケジューリング方法

3.4 接続制御とスケジューリング制御との関係

オーナーとテナントは、それぞれの制御方法を相手に公開するものとする。ただし、(1) テナントが先に接続ポリシーを決め、それを公開する (手順 1 とする)、(2) それに応じて、オーナーは、自己の目的を実現するようにスケジューリングを決め、それを公開するものとする (手順 2 とする)。さらに、このスケジューリングを考慮して、テナントは先に決めた自己のポリシーに合致するようなオーナーに接続する。

このスケジューリングおよび接続先を決定するとき、テナントもオーナーもシステムの他の全ての情報 (伝送レート、接続状況) は、知ることが出来るとし、オーナーもテナントも、最適値を計算できるものとする。これにより、オーナーは適切なスケジューリングをとることで、テナントの接続を誘導でき、所望の目的を達成することが可能になる。

本稿では、オーナーのスケジューリング目的とテナントの接続ポリシーは、短期的にはダイナミックに変動せず、固定であるものとする。

4. スループット評価

4.1 評価モデル

オーナーのスケジューリング内容と接続先選択との関係を調査するために、図 1 に示すトポロジで、オーナー、テナント、システム全体のそれぞれのスループットを評価した。 $n (\geq 1)$ 台のテナントはオーナー $1 \sim m$ 、AP を経由し、AP と有線接続されている受信端末へ向けて片方向の飽和 UDP トラフィックを流す。各オーナーも同方向に自身の UDP トラフィックを流す。簡単化のため、 $m = 2$ (オーナーはオーナー 1 とオーナー 2 の 2 ノードのみ) とし、テナント数を変化させて特性を評価する。テナント s 台がオーナー 1 を経由、テナント t 台がオーナー 2 を経由するとする。 ($n = s + t, s, t \geq 0$)

ここで、各テナントは密集している。マルチレート制御によ

り、テナントからオーナー 1 までの距離は近いので高伝送レートでの通信が可能であるが、オーナー 2 までの距離は遠いため低伝送レートでの通信となる。一方、AP からオーナー 2 までの距離はオーナー 1 までの距離よりも近く、ここでも伝送レートの差が生じる。Performance anomaly の発生するようなこの条件下で、オーナーのスケジューリング内容と接続先選択との関係を調査する。

ここでは、スケジューリングのウエイトは、前述のように、各オーナーが個別に決定するのであるが、制御変数を少なくするため、以下のように簡単化したモデルで評価を行う。

[オーナー 1 自身のトラフィック分のスループット] :

[オーナー 1 経由のテナントトラフィック合計スループット]

$$= 1 : p$$

[オーナー 2 自身のトラフィック分のスループット] :

[オーナー 2 経由のテナントトラフィック合計スループット]

$$= 1 : (1-p)$$

これにより、パラメータ p の値を変化させることで、テナントにとって、オーナー 1 とオーナー 2 のどちらが、接続先として相対的に有利あるいは不利であるかを任意の割合で調整することができる。すなわち、この p の値を適宜に設定することで、各オーナーは目的に合致したスケジューリングを実現できる。

手順 1 として、 p の値に応じた最適な s, t の値は求まり、テナントはこれにしたがって接続する。これにより、 p の値に応じた接続先は決定している。このため、オーナーは手順 2 として、この接続先と自身のスケジューリング目的を照らし合わせて最適な p の値を設定することとなる。手順 1,2 を目的関数の組み合わせすべてに対しておこなう。これにより、それぞれについて最適な接続先選択とパラメータ設定を求める。表 1 のように、すべての組み合わせが考えられるが、本稿では、特に興味深い特性が現れる例 1~3 の 3 ケースについて、次章にて詳しく説明する。

表 1 調査するポリシー、目的の組み合わせパターン

	スケジューリング目的				
	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)
接続ポリシー	(i)				
	(ii)			例1	例2
	(iii)				
	(iv)				
	(v)			例3	

4.2 ポリシーとスループット

前節の評価モデルにおいて、 $n = 3, 0.05 \leq p \leq 0.95, m = 2$ とし、台数比 $s:t$ ごとの各スループットを図 3-6 に示す。

【例 1】

・接続ポリシー...(ii) オーナー j (の自身のトラフィック分) のスループット (図 3)

ここで、 $j = 2$ とする。

・スケジューリング目的...(iii) オーナー 1~ m (の自身の総トラフィック分) の合計スループット (図 4)

のとき

手順 1 において、テナントとしては、システム全体のスループットをできるだけ大きくする必要があるのである。そのため、 p の値によらず、 $s = n, t = 0$ が最適である。さらに、手順 2 において、テナントが上記のように接続先を選択した場合、オーナーとしては、オーナー 1 のスループットをできるだけ大きくする必要があるのであるため、 p の値を最小にするのが最適である。実際に、 $n = 3$ のとき、手順 1 より、 $s = 3, t = 0$ が最適となり (図 3)、手順 2 より、この接続を行ったとき (図 4, 黄色太線)、 $p = 0.05$ とするのが最適である。

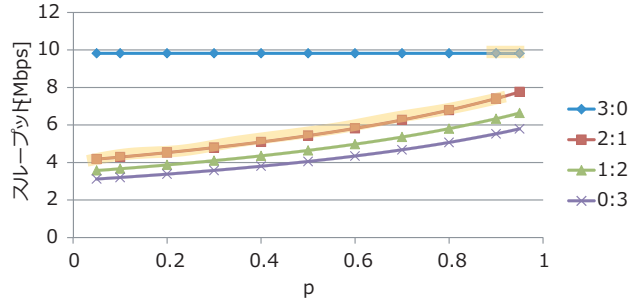


図 3 オーナー 2 (の自身のトラフィック分) のスループット

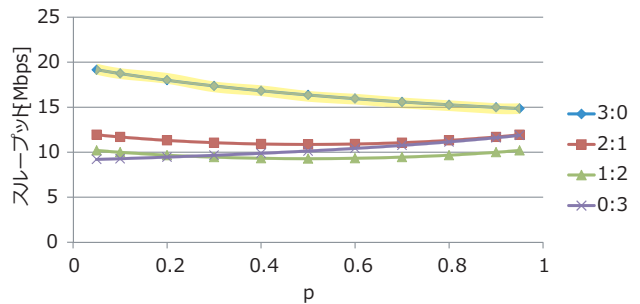


図 4 オーナー 1~2 (の自身の総トラフィック分) の合計スループット

【例 2】

・接続ポリシー...(ii) オーナー j (の自身のトラフィック分) のスループット (図 5)

ここで、 $j = 1$ とする。

・スケジューリング目的...(v) テナント 1~ n の合計スループット (図 6)

のとき

$s = 0, t = n$ のとき、オーナー 1 のトラフィック分のスループットは p の値によらず一定である。一方、 $s \geq 1$ のとき、 p の値が小さければ小さいほど、オーナー 1 のトラフィック分のスループットは大きくなる。したがって、手順 1 において、テナントとしては、 p がより 0 に近い値のときは $s = n, t = 0$ が最適、 p がより 1 に近い値のときは $s = 0, t = n$ が最適である。この境界となる p の値を p_a とする。また、手順 2 において、 $s = n, t = 0$ のとき、テナントの合計スループットを最大化するためには、オーナー 1 のスループットをできるだけ大きくする必要があるのであるため、 p の値をできるだけ 1 に近づけるのが最適である。 $s = 0, t = n$ のときは、この逆である。したがっ

て、 $p = p_a$ が最適となる。実際に、 $n = 3$ のとき、手順 1 より、 $p \leq 0.6$ のとき $s = 3, t = 0$ が最適、 $p \geq 0.6$ のとき $s = 0, t = 3$ が最適となり (図 5)、手順 2 より、この接続を行ったとき (図 6, 黄色太線)、 $p = 0.6$ とするのが最適である。

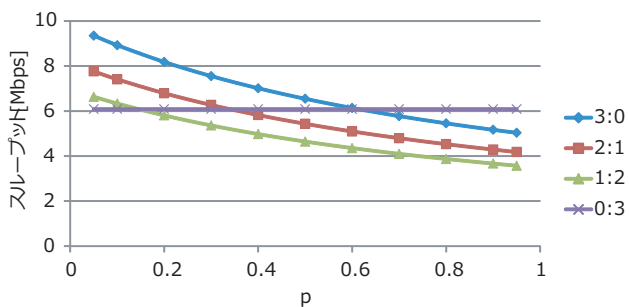


図 5 オーナー 1(の自身のトラフィック分)のスループット

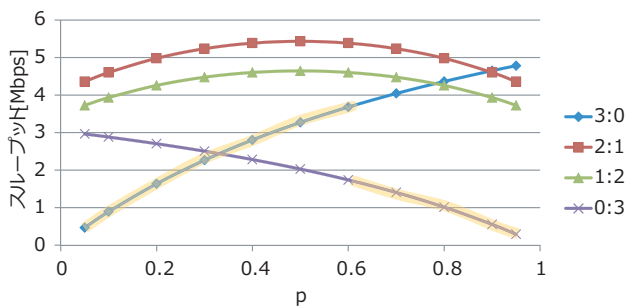


図 6 テナント 1~ n の合計スループット

【例 3】

- ・接続ポリシー...(v) テナント 1~ n の合計スループット (図 6)
- ・スケジューリング目的...(iii) オーナー 1~ m (の自身の総トラフィック分) の合計スループット (図 4) のとき

手順 1 において、スケジューリングにより、1 つのオーナーに接続するテナントのスループットは制限されているため、テナントの合計スループットを最大化するためには、 $s \neq 0$ かつ $t \neq 0$ にすべきである。また、このとき、システム全体のスループットをできるだけ大きくする必要があるため、 s の値はできるだけ大きい値にすべきである。さらに p について、オーナー 2 に接続することで Performance anomaly が発生し、システム全体のスループットが低下してしまうことも考慮する必要がある。したがって、 p がより 0 に近い値の場合には、 $s = n + 1, t = 1$ が最適であり、 p がより 1 に近い値の場合には、 $s = n$ が最適である。この境界となる p の値を p_b とする。また、手順 2 において、オーナー 2 のスループットを最大化するためには、システム全体のスループットをできるだけ大きくするため、 p の値によらず、 $s = n, t = 0$ とするのがよく、このときのスループットは p によらず一定であるため、 $p \geq p_b$ が最適である。実際に、 $n = 3$ のとき、手順 1 より、 $p \leq 0.9$ のとき $s = 2, t = 1$ が最適、 $p \geq 0.9$ のとき $s = 3, t = 0$ が最適となり (図 6)、手順 2 より、この接続を行ったとき (図 3, 黄色太線)、 $p \leq 0.9$ とするのが最適である。

5. ま と め

複数のモバイル端末やモバイルルータがマルチホップネットワークを構成し、距離や伝送レートが異なる複数の経路が可能であるネットワークにおいて、中継ノードが転送トラフィックおよび自身の送信トラフィックに対して、あるスケジューリングを設定することができる。ここで、各ノードはそれぞれが異なる目的関数をもって接続先選択やスケジューリングパラメータの設定をおこなう。このとき、各目的関数に応じた最適な接続先選択とスケジューリングパラメータ設定が求まることを示した。

文 献

- [1] L. Luo, H. Liu, M. Wu, and D. Li, "End-to-end performance aware association mechanism for wireless municipal mesh networks," Computer Communications, Vol.31, No.8, pp.1602-1614, 2008.
- [2] H. Gong, K. Nahm, and J. Kim, "Distributed fair access point selection for multi-rate IEEE 802.11 WLANs," IEICE TRANS. INF. & SYST., Vol.E91-D, No.4, pp.1193-1196, 2008.
- [3] D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing," Proc. ACM/IEEE MOBICOM '03, pp.14-19, 2003.
- [4] J. Jun, and M. L. Sichitiu, "Fairness and QoS in Multi-hop Wireless Networks," IEEE VTC, Vol.5, pp.2936-2940, Oct.2003.
- [5] 三木富美枝, 野林大起, 福田豊, 池永全志:無線メッシュ網における経路特性を考慮した AP 選択手法, 信学技報, IN2009-158, pp.85-90, 2010 年 3 月.
- [6] M. Heusse, F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel and A. Duda, "Performance anomaly of 802.11b," Proc. of IEEE Inforcom 2003, vol.2, pp.836-843, Mar.2003.