

論文

無線メッシュネットワークにおけるノード単位送信レート選択手法

岡田 啓^{†a)} 北原 弘隆^{††*} 間瀬 憲一^{††}

A Node-Based Transmission Rate Selection Scheme for Wireless Mesh Networks

Hiraku OKADA^{†a)}, Hirotaka KITAHARA^{††*}, and Kenichi MASE^{††}

あらまし IEEE 802.11 では複数の送信レートが提供されており、各リンクにおいて適切なレートを選択して通信することでスループット向上が期待できる。無線メッシュネットワークではノードは(半)固定設置されており、ノードの移動が生じないためにリンクの品質変動が少ない。そこで、リンクごとに適切な送信レートを求め、リンク品質が大きく変わらない間はこの送信レートに固定して設定することで高スループットが得られることが示されている。本論文では、ノード単位での固定レート設定方式に着目した送信レート選択手法を提案する。提案手法では送信レートを考慮したメトリックを用いてゲートウェイから各ノードへのスパニングツリーを計算し、このスパニングツリーを構成するリンクの接続性を維持する最も高速な送信レートを各ノードで選択する。シミュレーション及び測定実験により提案手法の性能を評価し、均一固定レート設定方式と比較して接続性を維持しつつ、性能を大幅に向上できることを示す。

キーワード 無線メッシュネットワーク, IEEE 802.11, 送信レート制御

1. ま え が き

無線通信技術の急速な発展に伴い、アドホックネットワークの技術を応用した無線メッシュネットワークの研究開発が進んでいる[1]~[3]。無線メッシュネットワークを構成するメッシュノードは無線インタフェースをもっており、互いが直接通信可能であればそのノード間にリンクを確立する。これを繰り返すことで、無線によるネットワークを構築する。任意のノード間で直接接続できない状況でも、他のメッシュノードを経由したマルチホップ伝送により、通信を行うことが可能となる。

無線メッシュネットワークでは IEEE 802.11 [4] に準拠した無線 LAN インタフェースを用いることが多い。この IEEE 802.11 では、変調方式の異なる複数の送信レートを利用できる。無線リンクの状況によって

スループットが最大となる送信レートは変わってくるため、通信を行うときにどのようにレートを選択するのかが重要となる。従来の無線 LAN では、このような複数のレートを利用できる環境では、状況に応じて動的にレートを調整できる適応レート方式が用いられる[5], [6]。しかし、無線 LAN インタフェースに標準で実装されている適応レート機能はアクセスポイントとステーション間の1ホップリンクで動作することを想定している。無線メッシュネットワークでは、マルチホップ通信時に起こるフロー内のリンク間干渉や、多数のノードが分散配置されているために生じる隠れ端末問題などの影響が想定されるため、従来の適応レートアルゴリズムでは高スループットが得られない[7]。また、隠れ端末からの干渉によるパケット衝突を考慮した適応レートアルゴリズムも存在するものの、実装されたドライバが入手できなかったり、IEEE 802.11 の MAC (Media Access Control) プロトコル自体を修正する必要がある[8]。

無線メッシュネットワークにおいて、バックボーンを構成するメッシュノードは(半)固定配置されることを想定している。このようなノードの移動が生じない環境では無線リンクの品質変動が少ない。そこで、リンクごとにスループットが最大となる送信レートを

[†] 名古屋大学エコトピア科学研究所, 名古屋市

EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Nishi-ku, Niigata-shi, 950-2181 Japan

* 現在, 九州通信ネットワーク株式会社

a) E-mail: hiraku@m.ieice.org

求め、リンク品質が大きく変わらない間はこの送信レートに固定して設定することで高スループットが得られることが示されている [7]. 送信レートを固定して設定する方法として、リンク単位 [9] で割り当てる方式とノード単位で割り当てる方式がある. 前者の方がネットワーク全体での性能が良くなると予想されるが、リンク単位で送信レートを割り当てる機能は一般的にはドライバに実装されていない.

そこで、本研究では簡易に実現できるノード単位での固定レート設定に着目する. 我々が知る限りではノード単位での固定レート設定方式はこれまでに十分な検討がなされていない. ノード単位でレートを固定設定する場合には、ネットワークの分断が発生しないようにノード間の接続性を維持しつつ、できるだけ高速な送信レートを使用することで通信性能が向上すると考えられる. 本論文ではこれを実現する送信レート選択手法を提案する. 提案手法では送信レートを考慮したメトリックを用いてゲートウェイ (GW: Gateway) から各ノードへのスパニングツリーを計算し、このスパニングツリーを構成するリンクの接続性を維持する最も高速な送信レートを各ノードで選択する. 提案手法の利点は、スループット向上が見込めることに加え、無線 LAN ドライバへの機能追加の必要がなく、実装が容易という点が挙げられる. 提案手法の性能をシミュレーション及びテストベッドを用いた実験によって評価し、その効果を明らかにする.

本論文の構成は以下のとおりである. 2. では固定レート設定方式について紹介し、提案手法を 3. において説明する. シミュレーションによる評価を 4. で行い、5. で実験による評価を行う. 最後に 6. において本研究をまとめる.

2. 固定レート設定方式

送信レートを固定に割り当てる場合に最も単純な方法は、すべてのリンクで同じ送信レートを用いる方法である. 本論文ではこれを均一固定レート設定方式と呼ぶ (図 1). IEEE 802.11 では複数の送信レートを利用できるが、リンクの品質に応じた送信レートを選択する必要がある. すべてのノードに 1 Mbit/s といった低速な送信レートを割り当てると、比較的品質の悪いリンクでも安定した通信をすることが可能であり、すべてのノードがネットワークを通して相互接続できる状態を保つことができる (図 1(a)). しかし、低速な送信レートを割り当てているため、スループットも低くなってしまう. 一方、高速な送信レートを割り当てると、高スループット特性が得られることが期待できる. しかし、品質の悪いリンクは安定した通信が行えなくなるため、リンク切断が起こり、ネットワークの分断が生じやすくなる (図 1(b)).

図 2 に示すリンク単位固定レート設定方式では、送信レートをリンクごとに選択する. このとき、スループットが最大になるように送信レートを設定することで、ネットワーク全体の性能向上が期待される. 無線リンクごとに送信レートを固定設定するためには、

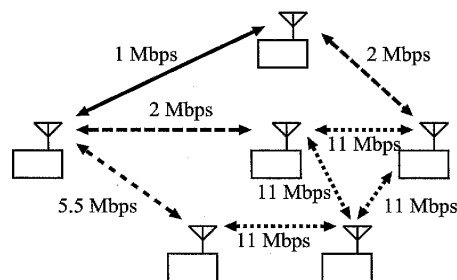


図 2 リンク単位固定レート設定方式
Fig. 2 Link-fixed rate assignment scheme.

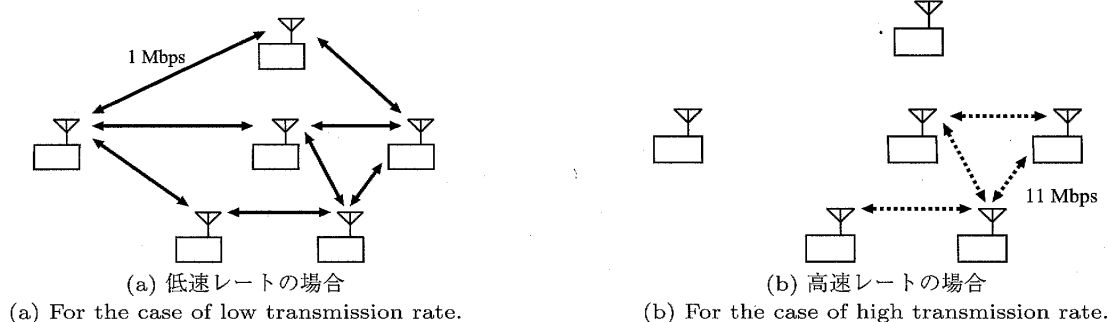


図 1 均一固定レート設定方式
Fig. 1 Uniformly fixed rate assignment scheme.

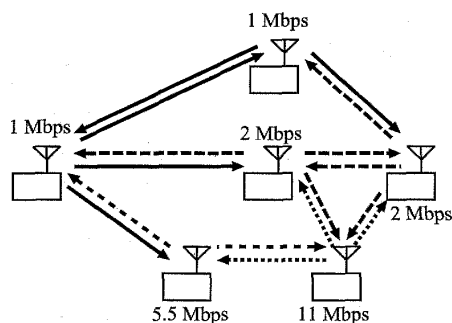


図 3 ノード単位固定レート設定方式
Fig. 3 Node-fixed rate assignment scheme.

各ノードで受信相手ごとに送信レートを選択する機能が必要である。しかし、一般的にはドライバ（例えば，[10]）にこのような機能が実装されていない。また，新たに実装する場合，送信相手ごとに送信レートを管理する表を作成し，これを参照して送信レートを指定してファームウェアに伝える機能をドライバに実装する必要がある。使用する無線 LAN インタフェースのチップセットやドライバにも依存するが，ファームウェアは公開されていないものが多く，実装するにはかなりのハードルがある [11]。

そこで本研究では，図 3 に示されるノード単位固定レート設定方式に着目する。ノード単位固定レート設定方式では，各リンクに対して送信レートを設定するのではなく，各ノードが使用する送信レートをノードごとに設定する。各ノードが送信レートを固定設定する機能はドライバに広く実装されている。

3. 提案送信レート選択手法

3.1 原理

ノード単位固定レート設定方式では，ノード単位で送信レートが選択される。あるノードに複数の無線リンクが存在する状況では，均一固定レート設定方式と同様，各リンクの品質を考慮して送信レートを選択しないとリンクの切断が起り，結果としてネットワークが分断する可能性がある。例えば，送信レートを変えながら各リンクのスループットの合計が最も高くなるように送信レートを決定する場合，品質の良いリンクの性能が支配的となり，品質の悪いリンクの接続性が無視されてしまう。逆に，各ノードにおいてすべてのリンクの接続性を維持するように送信レートを選択する場合，あまり使用されないリンクまで接続性を維持するように低い送信レートが選択されてしまう。無線メッシュネットワーク上を流れるフローの大部分は，

他のネットワークとの接続点である GW が始点または終点になる。ネットワーク全体のスループット向上のためには，GW と各ノード間の通信性能向上を図ることが有効であると考えられる。

提案方式では，GW と各ノードの接続性を維持しつつ，スループットをできるだけ大きくするように送信レートを選択する。接続性を維持するために，GW を根とするスパニングツリーを構築し，これに含まれるリンクの接続性を保証するように各ノードは送信レートを決定する。スループットを向上させるために，リンクの品質を反映するリンクメトリックを利用する。提案手法においてリンクメトリックとして用いることができる条件は，送信レートを考慮しており，ある経路のパスメトリックがその経路を構成するリンクのリンクメトリックの和で計算できることである。上記のスパニングツリーを構築するとき，この条件を満足するリンクメトリックを枝の重みとして用いて GW と各ノード間のパスメトリックを最小にすることで，通信性能向上を図る。

3.2 送信レート選択手順

提案手法は三つのステップから構成される。まず始めに，(1) 各リンクにおいてメトリックを算出して最適レートを決定し，次に (2) スパニングツリーを構築，最後に (3) 送信レートを選択する。図 4 を用いて，各手順について説明する。

(1) リンクメトリックの算出と最適レートの決定

各リンクにおいてメトリックの値が最良となる送信レートを最適レートと定義する。ETT のように送信レートを考慮したメトリックでは，同じリンクでも送信レートによってその値が異なる。まずは，各リンクにおいてメトリックが最良となる送信レートを求め，最適レートを決定する（図 4(1)）。そして，最適レートを用了ときのメトリックの値を，そのリンクのメトリックとして採用する。なお，採用するメトリックによっては同じリンクでも伝送方向によってリンクメトリックの値が異なる場合がある。その場合には各伝送方向ごとに最適レートを決定する。

(2) スパニングツリーの構築

手順 (1) で算出した最適レートにおけるリンクメトリックを用いて，図 4(2) のような GW を根とするスパニングツリーを計算する。この図では，計算の結果，ノード 1 とノード 3，ノード 2 とノード 5，ノード 3 とノード 5 の間のリンクがスパニングツリーに含まれていない。なお，伝送方向によりリンクメトリックの

値が異なる場合は、一般的に GW から各メッシュノードへ向かう下り方向のトラフィックの方が逆向きの上り方向よりも大きいので、下り方向において最良のパスメトリックをもつスパニングツリーを計算する。

(3) 送信レートの選択

各ノードは手順 (2) で構築したスパニングツリーに含まれるリンクの中で最も低速な最適レートを自身の送信レートとして選択する。図 4(2) において、GW は 1, 2, 5.5 Mbit/s のリンクをもっている。このため、図 4(3) に示すようにこのうち最も低速な 1 Mbit/s を選択する。他のノードにおいても同様の方法で送信レートを選択する。このようにすることで、GW との接続性を維持することができる。伝送方向により最適レートが異なる場合は、接続性を維持するため、両方

向の最適レートを考慮する。

なお、本論文では送信レート選択手法に着目している。本手法における手順 (2) は必ずしもルーチングのための経路を構築するためにスパニングツリーを構築するわけではない。もちろん、このスパニングツリーをそのままルーチングに用いることもできるが、手順 (2) で得られたスパニングツリーを用いずに OLSR (Optimized Link State Routing) [12] や AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [13] のようなルーチングプロトコルを動作させることも可能である。この場合、GW を根とした経路だけでなく、任意のノード間の経路も構築可能である。

4. シミュレーション評価

本章では提案方式の性能をシミュレーションによって評価する。ネットワークの分断が発生しないかどうかに加え、パスメトリックの観点で、均一固定レート設定方式やリンク単位固定レート設定方式と性能比較を行う。リンクメトリックとして ETT (Expected Transmission Time) [14] を用いる。これは、3.1 で述べたリンクメトリックとして用いることができる条件を満たすもののうち、基礎的であり WcETT (Weighted Cumulative ETT) [14] や airtime [15] など他のメトリックのもとにもなっている。

4.1 シミュレーション条件

表 1 にシミュレーション諸元を示す。1000×1000 m² のエリアにおいて、ノードをランダムに配置する。メトリックには ETT を用いる。ETT は送信時間の期待値を表す指標であり、値が小さいほど効率的な通信が可能であることを示す。あるリンクにおいてパケットを送信したときの順方向のパケット誤り率を p_f 、逆方向のパケット誤り率を p_r 、送信レートを R bit/s、パケット長を L ビットとすると ETT は、

$$ETT = \frac{L/R}{(1-p_f)(1-p_r)} \quad (1)$$

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation parameters.

Number of experiments	1000
Area	1000 × 1000 m ²
Number of nodes	5–50
Allocation of nodes	Random
Transmission rate	1, 2, 5.5, 11 Mbit/s
Path loss model	Two ray
Transmit Power	15 dBm
Noise Power	−98 dBm

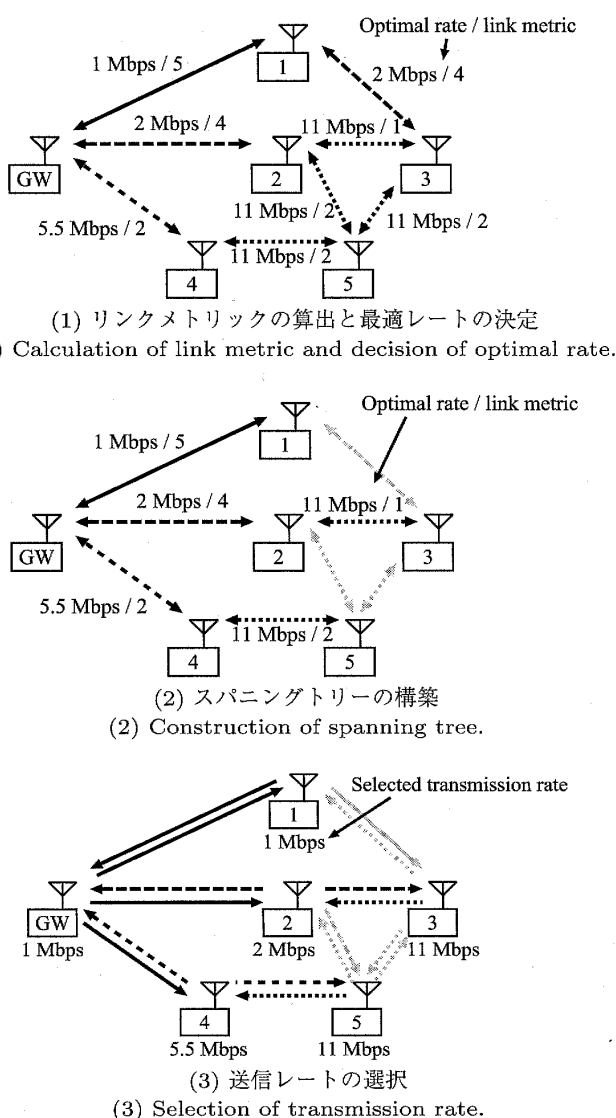


図 4 送信レート選択手順

Fig. 4 Selection process of transmission rate.

となる。送信レートは 1, 2, 5.5, 11 Mbit/s の 4 種類、チャネルモデルは 2 波モデル（平面大地反射モデル）[16]、送信電力は 15 dBm、雑音電力は -98 dBm とする。この条件において、各リンクでの受信信号対雑音電力比を求め、送信レートごとにパケット誤り率を導出し、式 (1) に代入して ETT を算出する。用いたシミュレーション条件では、送信レートが同じであればリンク ETT は伝送方向によらず同じ値になる。3.2 で述べた手順に従い、各ノードの送信レート及び経路を計算する。

比較対象として、均一固定レート設定方式、リンク単位固定レート設定方式を用いる。リンク単位固定レート設定方式では、各リンクに最適レートが用いられているものとする。それぞれ、割り当てられた送信レートにおけるリンクメトリックを用いてスパニングトリーを計算することで、経路を構築する。

4.2 ネットワークの接続性

各リンクにおいて最適レートよりも速い送信レートを用いてパケットを送信した場合、そのパケットは受信ノードにて正しく受信できず、リンク切断が発生すると仮定する。リンク切断の結果、任意のノード間に経路を構築することができない場合、ネットワークが分断される。このネットワークの分断が発生しない確率をネットワークの接続性と定義する。

図 5 にノード数に対するネットワークの接続性を示す。一定のエリアにノードを配置しているため、ノード数が多くなるとノード密度は密になる。この図より、均一固定レート設定方式では送信レートを速くすると接続性が悪くなることが分かる。特にノード数が少なくノード密度が疎な場合では、送信レートを低くしな

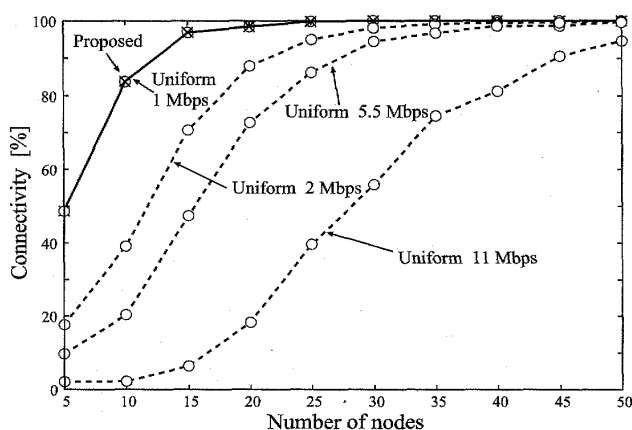


図 5 ネットワークの接続性 (シミュレーション)
Fig. 5 Network connectivity (simulation).

いと接続性が保てない。ノード密度が疎な場合において、1 Mbit/s の均一固定レート設定方式でも接続性が 100% でないのはノードをランダムに配置しているためである。一方、提案手法は 1 Mbit/s の均一固定レート設定方式と同じ特性が得られており、ノードが疎な場合でも接続性を高く保つことができる。なお、リンク単位固定レート設定方式は、すべてのリンクの接続性が保たれるため、提案手法や 1 Mbit/s の均一固定レート設定方式と同じ特性になる。

4.3 平均パスメトリック

図 6 に平均パスメトリック特性を示す。平均パスメトリックは GW と任意のノード間におけるパス ETT の平均値を示しており、値が小さいほどネットワーク全体の通信性能が良くなる。なお、ネットワークの分断が発生しない場合のみを用いて平均パスメトリックを計算している。提案手法においては、手順 (2) でスパニングトリーを用いたときのパス ETT の値ではなく、送信レートを割り当てた後、各リンクのリンク ETT の値を実際に用いられる送信レートを用いて算出してからパス ETT を計算し直している。図 4 (3) に示されるように、あるリンクでは送信の向きによって送信レートが異なるため、パス ETT を求める際、両方向の平均を用いている。

ノード数が少ない場合、提案手法やリンク固定レート設定方式は 5.5, 11 Mbit/s といった高速な送信レートにおける均一固定レート設定方式と比べ、特性が悪くなっている。しかし、高速な送信レートによる均一固定レート設定方式は接続性を犠牲にしており、実用上は望ましくない。一方、接続性を維持できる提案手

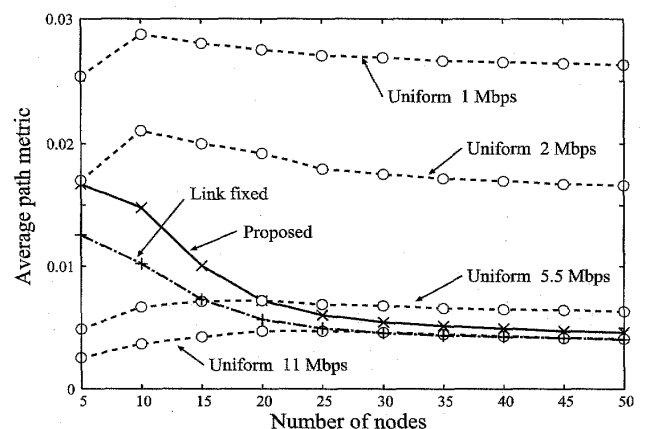


図 6 ゲートウェイと任意のノード間の平均パスメトリック (シミュレーション)
Fig. 6 Average path metric between gateway and each node (simulation).

法と 1, 2 Mbit/s といった低速な送信レートにおける均一固定レート設定方式を比べると, 提案手法の方が特性が良い. 特にノード数が多い場合はその差が顕著である. 提案手法により, 接続性を保ちながら平均パケット特性を向上できる. 提案手法とリンク固定レート設定方式では, ノード数が少ない場合は若干の差が生じるが, 全般的にそれ程大きな性能差はない. リンク固定レート設定方式は実装上の問題があるため, 提案手法は非常に有効な手段であることが分かる.

5. 実験評価

本章ではテストベッドを用いて実験を行い, ネットワークの接続性やスループット特性を測定することで, 実環境における提案手法の性能を評価する. 比較対象として, 均一固定レート設定方式を用いる. 実験で使用した無線 LAN ドライバではリンクごとにレートを固定設定することができなかったため, リンク固定レート設定方式の測定は行わない.

リンクメトリックとして, スループットの逆数を用いる. スループットの逆数は 1 ビットを送信するのに要する時間を表し, これは ETT に相当する. パケットメトリックはリンクメトリックの和で求めることができる.

5.1 テストベッド

新潟県長岡市旧山古志村の竹沢地区に 9 台, 虫亀地区に 3 台, 合計 22 台のノードからテストベッドが構成されており, 無線メッシュネットワークの実験を行うことが可能である [17]. ノード配置を図 7 に示す. 本研究ではこのノード数の異なる二つの地区で実験を行った.

5.2 実験方法

実験は大きく分けて, 各リンクの最適レートの測定

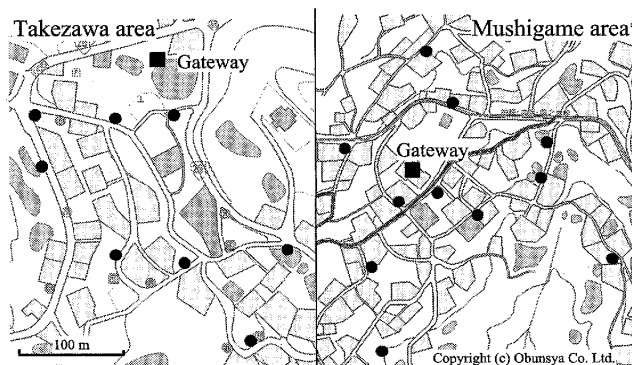


図 7 テストベッドのノード配置
Fig. 7 Node location in the testbed.

と, その結果を用いて各ノードが送信レートを選択した場合のエンドツーエンドのスループット測定がある. 表 2 に実験条件を示す. どちらの測定においても, Iperf [18] を用いて UDP (User Datagram Protocol) スループットを測定する. パケットサイズは 1472 バイト, 測定時間は 10 秒である.

無線メッシュネットワークでは, リンク品質の変動が少ないことが予測されるが, 実際には測定時期が大きく変わるとリンク品質が変動し, それに伴って最適レートも変動すると予想される. こうした時間変動の影響を減らすため, 最適レート測定を行った後, 各ノードに設定する送信レートを決定して, 連続してスループット測定を行う. この測定を日を変えて合計 10 セット行う.

本実験では実験を行うためのサーバを用意している. このサーバから各ノードに対して順に最適レート測定を行い, すべてのノードで測定が終わったら, その測定結果をサーバに集めて解析プログラムを実行して, 各ノードの送信レートを決定する. そして, サーバが各ノードの送信レートを設定し, スループット測定の指示を出す. これらの工程はすべて IEEE 802.11 の MAC プロトコル自体は変更せず, linux のシェルスクリプトレベルで動作させることができる.

5.2.1 最適レート測定

本測定は, 1 リンクずつ各伝送方向に対して送信

表 2 実験条件
Table 2 Experiment conditions.

Common	
Number of measurement sets	10
Number of nodes	Takezawa area: 9 Mushigame area: 13
Phy/MAC	IEEE 802.11g
Wireless LAN driver	Madwifi (r1460) [10]
Channel	5
RTS/CTS	off
Transport protocol	UDP
Measurement tool	Iperf (version 2.0.2) [18]
Packet size	1472 bytes
Measurement duration	10 s
Measurement of the optimal transmission rate	
Transmission rate	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s
Number of measurements at each rate	3
Measurement of end-to-end throughput	
Transmission rate	18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s
Number of measurements at each rate	1

レートごとにスループットを計測し、最もスループットが高いものを最適レートとして決定する。測定したスループットの逆数からリンクメトリックを算出する。測定は1リンク当り3回、IEEE 802.11gで設定可能な8レートで行う。この測定では1リンクずつユニキャストで測定を行うため、測定にかなりの時間を用する。測定時間短縮のため、事前にブロードキャストによるパケット受信成功率を測定し、これが10%以下である通信品質の悪いリンクを測定対象から除外している。

なお、4.のシミュレーションとは異なり、スループットは各リンクにおいて伝送方向によって値が異なる。そのため、最適レートやリンクメトリックも伝送方向によって異なる値となる。

5.2.2 エンドツーエンドのスループット測定

最適レート測定の結果を用いて、スパニングトリーを計算し、各ノードは送信レートを選択する。先に述べたように、リンクメトリックは各リンクにおいて伝送方向により異なる。スパニングトリーは、GWから各メッシュノードに向かう下り方向で計算する。送信レートを選択する際、接続性を維持するために、両方向の最適レートを考慮する。スパニングトリーを構築する際に下り方向のリンクメトリックしか用いていない、また、送信レートを割り当てた後のリンクメトリックは最適レートを用いたものと異なる場合があるため、送信レートを割り当てた後、上り、下り方向のそれぞれについて、割り当てられた送信レートのリンクメトリックを用いて経路を再計算する。

経路が構築されたら、GWと各ノード間の双方向でエンドツーエンドのスループットを測定する。測定では、Iperfで発生させるUDPフローの送信帯域をスループットが最大になるよう変化させる。

比較対象である均一固定レート設定方式でも、提案手法と同様に最良のパスメトリックをもつスパニングトリーを構築して経路を設定する。経路を構築した後、エンドツーエンドスループットを測定する。

5.3 実験結果

5.3.1 選択された送信レート

図8に最適レート測定の結果を用いて選択された送信レートの利用頻度を表す。各ノードで選択された送信レートは、最低で12 Mbit/s、最大で36 Mbit/sであった。測定ごとに利用されているレートに若干変動が見られる。これは日を変えて測定を行っているため、一部のリンクで最適レートが変動したためと考えられる。

5.3.2 ネットワークの接続性

図9にネットワークの接続性を示す。使用する送信レートにおいて、最適レート測定実験でスループットが測定できた場合にリンクが確立しているものと定義する。そして、ネットワークの接続性は、シミュレーションの場合と同様、すべてのノードに対してGWから経路が構築できる確率と定義する。この図より、送信レートが36 Mbit/s以上の均一固定レート設定方式では、接続性が100%維持できていないことが分かる。一方で、提案手法ではどちらの地区においても接続性が維持されている。これは、図8に示されるように、

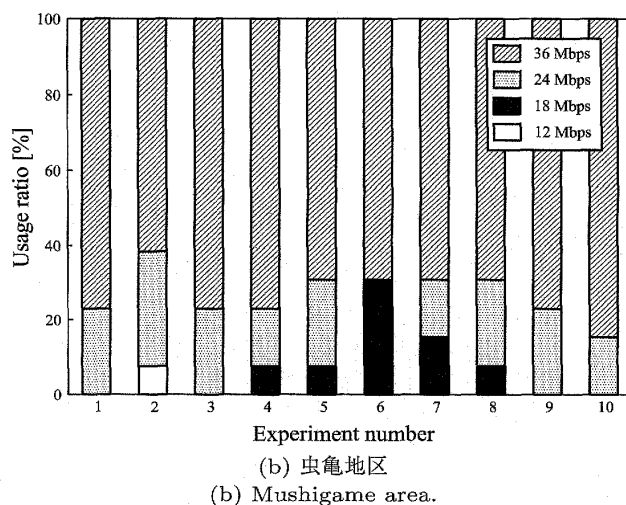
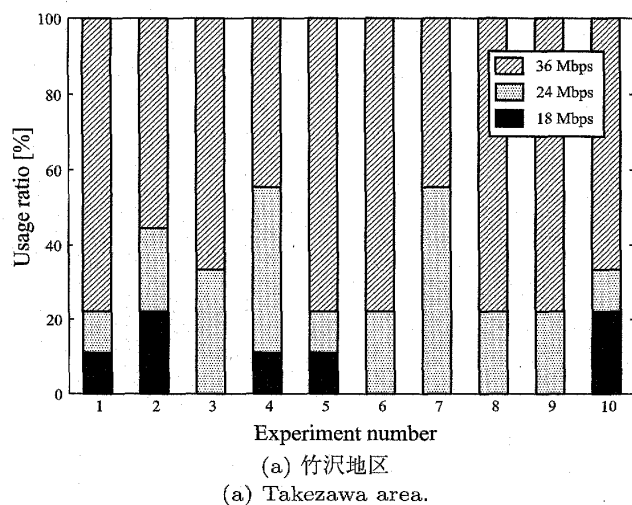


図8 各ノードで選択された送信レートの割合 (実験)

Fig. 8 Usage ratio of selected transmission rate (Experiment).

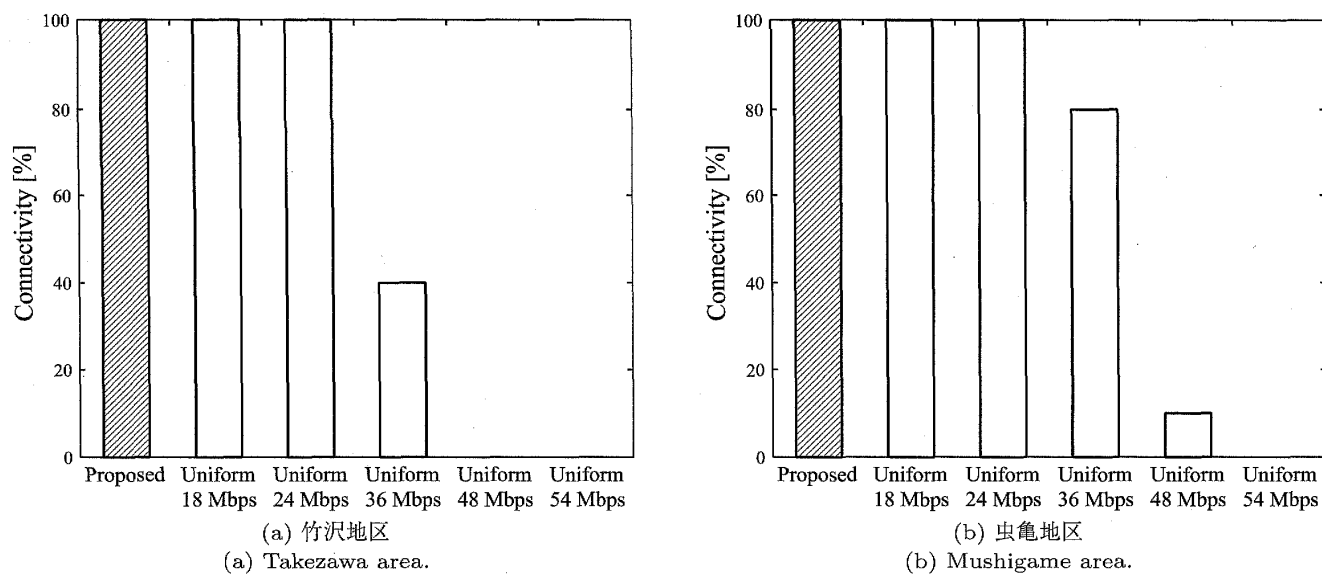


図 9 ネットワークの接続性 (実験)
Fig. 9 Network connectivity (Experiment).

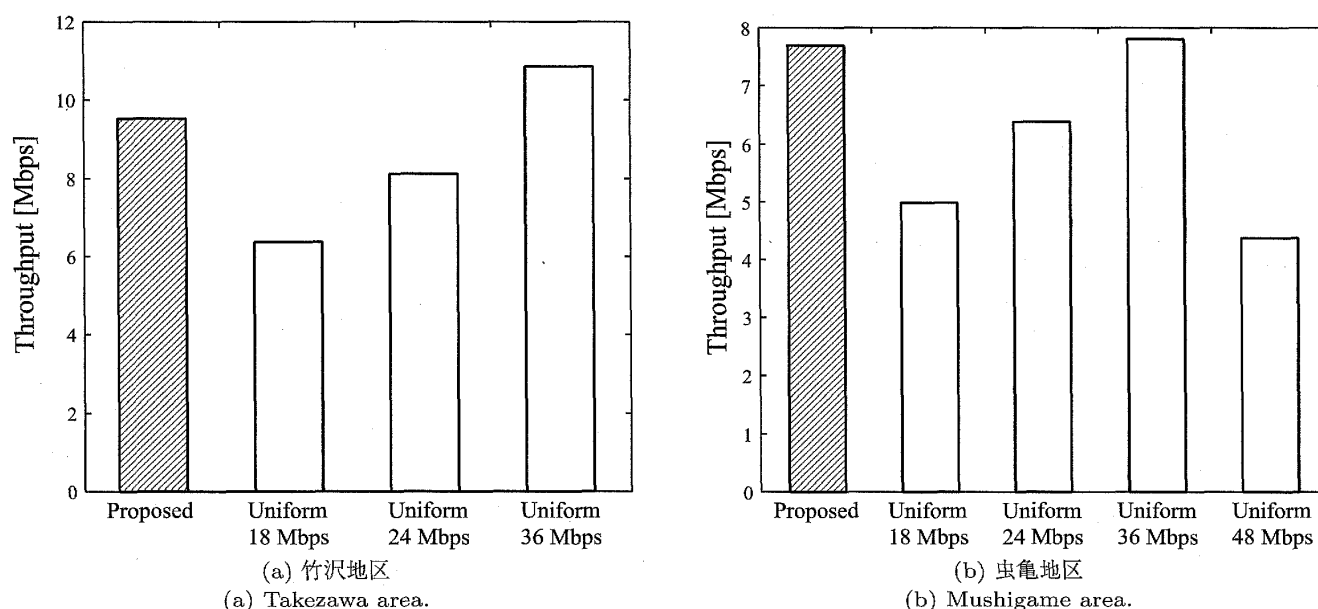


図 10 エンドツーエンドのスループット (実験)
Fig. 10 End-to-end throughput (Experiment).

接続性を維持するために一部のノードで 24 Mbit/s より低速な送信レートを選択しているためである。

5.3.3 エンドツーエンドのスループット測定

図 10 にエンドツーエンドスループット測定結果の平均値を示す。提案手法と均一固定レート設定方式と比較した場合、接続性で劣る送信レートが 36 Mbit/s 以上の均一固定レート設定方式の方が、若干スループットが高い結果となった。接続性を 100% 維持することを条件とした場合、均一固定レート設定方式では 24 Mbit/s 以下の送信レートが当てはまる。このと

き、提案方式は均一固定レート設定方式より約 20% のスループットの向上が見られる。ノード間を中継してデータを送るような無線メッシュネットワークではボトルネックとなるノードの影響が大きく、低レートで送信しているノードに引きずられてエンドツーエンドスループットの特性が良くならない可能性がある。ただ、フローによってはその経路上のすべてのリンクで送信レートを高く設定できる場合もあるため、提案方式によりエンドツーエンドスループットの平均値が向上していることが確認できる。以上の結果から、実験

においても提案手法の有効性が確認できる。

6. む す び

本研究では、ノード単位固定レート設定方式において GW との接続性を維持しつつ性能向上を図る送信レート選択手法を提案した。提案手法をシミュレーションとテストベッドを用いた測定実験によって評価した。シミュレーションの結果、提案手法はネットワークの接続性を維持しつつ、平均パケット遅延特性を向上させることを示した。また、ノード密度が密になれば、リンク単位固定レート設定方式の特性に近づけられることも示した。テストベッドを用いた測定実験においてもシミュレーションと同様、提案手法はネットワークの接続性を維持できることを示した。接続性を100%維持することを条件とした場合、均一固定レート設定方式と比ベスループットが大幅に向上することを確認した。これより、シミュレーション及び測定実験の両方において、提案手法の有効性を示した。

提案手法を導入する場合、各ノードの送信レートを決定するための測定手法と、それに基づき各ノードに送信レートを設定することが必要になる。本論文では提案するノード単位固定レート設定方式の性能評価に主眼を置いているため、最適レート及びリンクメトリックの測定誤差の影響を避けるために、各リンクにおいて送信レートごとにスループットの測定を行った。この方法には、最適レート測定に時間を要する、集中管理するサーバが必要になるという欠点がある。実運用では簡略化された測定方法により自律分散的に行う必要がある。このような送信レート決定方法については、例えば半固定レート方式 [19] を用いることが考えられる。各ノードで送信レートを固定設定する方法自体は、例えば今回実験で用いた無線 LAN ドライバでは、簡単なコマンドを実行するのみである。このため、提案手法は無線 LAN ドライバへの機能追加が必要なく、IEEE 802.11 規格のノードで構成された無線メッシュネットワークに広く適用できる。このように実装が容易な点において、提案手法は無線メッシュネットワークの高性能化に有効な手法であるといえる。

謝辞 本研究は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の研究委託結果に基づくものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] I.F. Akyidiz and X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.43, no.9, pp.S23-S30, Sept. 2005.
- [2] R. Bruno, M. Conti, and E. Gregori, "Mesh networks: Commodity multihop ad hoc networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.43, no.3, pp.123-131, March 2005.
- [3] P. Kyasanur, J. So, C. Chereddi, and N.H. Vaidya, "Multichannel mesh networks: Challenges and protocols," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol.13, no.2, pp.30-36, April 2006.
- [4] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," 1999.
- [5] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band," *Bell Labs Tech. J.*, vol.2, no.3, pp.118-133, Aug. 1997.
- [6] J.C. Bicket, Bit-rate selection in wireless networks, M.S. Thesis, MIT, Feb. 2005.
- [7] 高橋義彦, 兼子陽市郎, 間瀬憲一, "無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証," *信学論 (B)*, vol.J90-B, no.3, pp.311-314, March 2007.
- [8] Q. Pang, V.C.M. Leung, and S.C. Liew, "A rate adaptation algorithm for IEEE 802.11 WLANs based on MAC-layer loss differentiation," *IEEE International Conference on Broadband Networks*, pp.709-717, 2005.
- [9] K. Mase, Y. Owada, H. Okada, and T. Imai, "A testbed-based approach to develop layer 3 wireless mesh network protocols," *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communications*, 2008.
- [10] The madwifi project, <http://madwifi-project.org/>
- [11] 長谷部聡, "Linux 無線 LAN ドライバの L3 メッシュネットワーク向けカスタマイズ," 2010 信学ソ大 (通信), BT-3-3, Sept. 2010.
- [12] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," *IETF RFC 3626*, 2003.
- [13] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," *IETF RFC 3561*, 2003.
- [14] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks," *ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.114-128, 2004.
- [15] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Mesh networking, IEEE P802.11s/D12.0, 2011.
- [16] S. Haykin and M. Moher, *Modern wireless communications*, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [17] Y. Takahashi, Y. Owada, H. Okada, and K. Mase, "A wireless mesh network testbed in rural mountain areas," *The Second ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization*, pp.91-92, 2007.
- [18] Iperf, <http://sourceforge.net/projects/iperf/>

- [1] I.F. Akyidiz and X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.43, no.9,

- [19] 伊藤梓佐, 岡田 啓, 間瀬憲一, “無線メッシュネットワークにおける半固定レート設定方式の提案,” 信学技報, AN2008-67, March 2009.

(平成 23 年 4 月 21 日受付, 8 月 8 日再受付)



岡田 啓 (正員：シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報卒. 平 9 同大大学院博士課程前期課程了. 平 11 同大学院博士課程後期課程了. 工博. 同年日本学術振興会特別研究員. 平 12 名大・助手. 平 18 新潟大・超域研究機構・助教授, 平 21 埼玉大・大学院理工学研究科・准教授. 平 23 名大・エコトピア科学研究所・准教授, 現在に至る. パケット無線通信, マルチメディアトラヒック, 符号分割多元接続方式, マルチホップネットワーク等の研究に従事. IEEE 会員. 平 8 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞, 平 10 本会学術奨励賞, 平 14, 平 18, 平 21 本会通信ソサイエティ活動功労感謝状受賞.



北原 弘隆

平 20 新潟大・工・情報工卒. 平 22 同大大学院自然科学研究科修士課程了. 同年九州通信ネットワーク(株)入社. 無線メッシュネットワークの研究に従事.



間瀬 憲一 (正員：フェロー)

昭 45 早大・理工・電気通信卒. 昭 47 同大大学院修士課程了. 同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所. 以来, 通信網構成法, ダイナミックルーティング, ネットワーク設計法, 通信品質, コンピュータネットワーク, モバイルアドホックネットワーク, 無線メッシュネットワーク等の研究に従事. 昭 53~54 米国コロンビア大客員研究員. 平 6 年 7 月, NTT 通信網研究所・通信品質研究部長. 平 8 年 7 月, NTT マルチメディアネットワーク研究所・情報通信アセスメント研究部長. 平 11~15 新潟大・工学部・情報工学科教授. 平 16 より同大・大学院自然科学研究科教授, 工博. 平 5 年度本会論文賞受賞. 平 9 年度第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞. IEEE フェロー. 著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」(共著), 「無線 LAN とユビキタスネットワーク」(共著) など.