

複数周波数帯を利用する アドホックネットワークの通信方式について

玉置 健太^{†1} Ari Raptino H.^{†4} 木谷 友哉^{†2}
萬代 雅希^{†3} 渡辺 尚^{†4}

近年, 無線アドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークは自律分散型のネットワークで, 既存のインフラストラクチャのない場所で無線端末が無線マルチホップ通信を行う。この無線マルチホップ通信の高送信レート化の研究が多く行われている。しかし, 単一の周波数に限定した高送信レート化の研究が多く, 複数周波数帯について考慮していない。そのため, 本稿は, 複数の周波数帯を効率化する無線通信方式を提案する。周波数帯によって, 特性や利用状況が異なることに着目し, 周波数帯の利用状況を考慮した通信方式を提案する。この通信プロトコルは周波数帯を効率良く利用するために, 遅延時間や混雑状況を考慮した通信方式である。まず, 周波数帯ごとに宛先までの遅延時間を求め, 遅延時間の小さい周波数帯を優先して通信する。提案方式を計算機シミュレータにより評価し, IEEE 802.11a 単独に比べて, スループットが最大約 1.6 倍, IEEE 802.11b 単独に比べて, スループットが最大約 4.7 倍向上することを示した。

An Ad-hoc Network Method Using Multiple Frequency Bands

KENTA TAMAKI,^{†1} ARI RAPTINO H.,^{†4}
TOMOYA KITANI,^{†2} MASAKI BANDAI^{†3}
and TAKASHI WATANABE^{†4}

Recently, wireless ad-hoc network has drawn much attention. Wireless ad-hoc network is an autonomous distributed network, each wireless device is able to do multi-hop communication independently without the need of infrastructure. There are many researches address the high transmission rate issue in wireless multi-hop communication. However, the majority of the high transmission rate studies only take account of single frequency bands without considering the multiple frequency bands issue. Therefore, This paper addresses the multiple

frequency bands issue and proposes a scheme on how to utilize them efficiently. We propose a scheme by considering each frequency band usage and unique characteristic. To be able to use the frequency band efficiently, the protocol need to consider the network latency and congestion. By calculating the source-destination end to end delay for each frequency, the proposed method prioritizes the frequency band which has the smallest end to end delay to be used for transmission. Performance evaluation by simulation shows that the proposed method can gain better end to end throughput up to 1.6 and 4.7 times compared to IEEE 802.11a and IEEE 802.11b, respectively.

1. はじめに

近年, 特定の制御局を必要としないため, 既存のネットワークインフラに頼ることなく通信を行うことのできる無線アドホックネットワーク¹⁾が注目されている。無線アドホックネットワークは複数の端末が自己組織的に分散制御でネットワークを構成し情報を共有することができる。そのため, 無線 LAN や携帯電話などとは異なり, 固定の基地局を必要としない。無線アドホックネットワークでは, 各端末が中継機能を持つことにより, 直接通信が不可能な端末にもマルチホップを使用することによって通信が可能となる。従って無線アドホックネットワークは, 人が進入困難な山奥, 砂漠などの地理的要因で通信インフラを設置できない場所において有効な通信手段である。例えば, 災害などによって通信インフラが機能しなくなった場合の緊急の通信手段においてもその効果が期待されている。

無線アドホックネットワークの通信には通常 1 つの帯域を用いる。しかし, 例えば ISM バンドは 2.4GHz 帯と 5GHz 帯が定義されているので複数の周波数帯を用いることも可能である。ただし, 周波数帯により, 通信距離や送信レート等の特性が異なる。本研究では, 複数帯域の周波数帯の特長を活用する通信方式を提案する。提案方式では, 各ノードがデータを送信する際に, 各周波数帯の特性と現在の利用状況を考慮し, 複数の周波数帯から適切

^{†1} 静岡大学大学院情報学研究所

Graduate School of Informatics, Shizuoka University

^{†2} 静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点

Division of Global Research Leaders, Shizuoka University

^{†3} 上智大学 理工学部

Faculty of Science and Technology, Sophia University

^{†4} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

なものを選択する。選択には、帯域によって構成される宛先への経路の違いや、送信レートの違いを利用する。提案方式を計算機シミュレーションで評価し、単一の周波数帯を用いる場合に比べて、スループットが改善されることを示す。

本稿の章構成を示す。第2章では、始めに無線通信の受信電力と周波数の関係性について述べ、次に End to End のスループットとホップ数、送信レートの大きさの関係について述べる。最後に、現在の周波数帯の利用状況について述べる。第3章では、関連で述べた周波数の性質や利用状況を考慮して、複数の周波数帯を利用して通信するプロトコルについて提案する。第4章では、提案方式について評価し、考察する。最後に第5章でむすびとする。

2. 関連研究

本章では、無線通信の受信電力と距離、周波数帯の関係性について述べ、ホップ数とスループットの関係性、最近の周波数帯の使用状況について述べる。

2.1 無線通信の受信電力について

P_R , [W], P_T [W] をそれぞれ受信電力, 送信電力, G_R [dB], G_T [dB] をそれぞれ受信機, 送信機のアンテナ絶対利得, λ [m] を波長, d [m] を通信距離とすると, 以下のフリスの伝達公式 (1) が成立する。

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R P_T \quad (1)$$

式 (1) より, 同じ送信電力, 同じ送受信アンテナ利得でも, 距離が長くなり, また高周波数になると受信電力は小さくなる。

2.2 ホップ数とスループットの関係性について

無線通信では, 受信電力の大きさによって, 使用可能な送信レートが決定される。表1に Cisco の Aironet 無線 LAN の受信閾値の例を示す。式 (1) より, 長距離では受信電力が小さくなり, 送信レートは低くなる。反対に, 短距離では受信電力が大きくなる。

また, Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV)²⁾, Dynamic Source Routing (DSR)³⁾ などの従来のアドホックネットワークのルーティングプロトコルは, End to End の経路を最小ホップ数で構築する。つまり, 最小ホップ数で経路を構築するため, 長距離で送信レートの低い経路が構築される可能性がある。そのため, 文献 4) でも指摘されているように, End to End のスループットを考えた場合, 最小ホップ数の経路が必ずしも最大スループットになるとは限らない。

表 1 受信閾値

受信閾値 [dBm]	送信レート [Mbps]
-94	1
-93	2
-92	5.5
-86	6
-86	9
-90	11
-86	12
-86	18
-84	24
-80	36
-75	48
-71	54

表 2 IEEE 802.11 の利用周波数帯

規格	周波数帯
IEEE 802.11	2.4GHz 帯
IEEE 802.11a	5GHz 帯
IEEE 802.11b	2.4GHz 帯
IEEE 802.11g	2.4GHz 帯
IEEE 802.11n	2.4GHz 帯, 5GHz 帯

2.3 周波数帯の使用状況について

ここでは典型的な無線通信規格である IEEE 802.11 について述べる。IEEE 802.11 は複数の周波数帯について規格されている。これを表2にまとめる。文献 5) では, 802.11n のテストベッドによる性能評価実験を行ったところ, 5GHz 帯に比べ, 2.4GHz 帯は既存の無線機器により利用されているため, 干渉が起き, 性能が落ちる結果が示されている。

以上より, 複数の同周波数帯を用いる無線マルチホップ通信を効率化するためには, 端末間の距離, 送信レート, 帯域の利用状況を考慮して周波数帯を適応的に切り替えることが必要であることがわかる。

3. 複数周波数帯を利用する通信方式

提案方式は複数の周波数帯を利用して, 通信する方式である。まず, 提案方式の概要について述べた後, 詳細を述べる。その後, 動作例を示す。

3.1 概要

スループット向上させるために, 周波数帯を効率良く使い分ける方式である。この方式では各ノードはデータを送信する際に, 送信端末が利用できる周波数帯でそれぞれ宛先までの遅延を求め, 遅延時間の小さい順に周波数帯を優先度付けする。その後, 高優先度周波数帯から順にキャリアセンスし, キャリアが検知されなかった周波数帯で通信する。

3.2 詳細

提案方式では各端末は同周波数帯と同じ数の送受信機を持っており, 複数の帯域で同時に通信できると仮定する。キャリアセンスを帯域ごとに別々に判定し, それぞれの周波数帯域

ごとにルーチングテーブルを所持する。各周波数帯域のルーチングは AODV に従い、利用する周波数帯を選択する。

提案方式は経路取得・優先度変更フェーズ、送信フェーズに分けられる。このフェーズはノードが実行する。まず、経路取得・優先度変更フェーズでは各帯域の経路、ホップ数を取得する。このホップ数を元に遅延時間を求め、複数ある周波数帯に対し、遅延が小さいものから高優先度帯とし、遅延の大きいものを低優先度帯と順に定める。このとき、周波数帯間でフラグメントサイズ異なる場合は最小のフラグメントサイズに設定する。

端末は全端末同一構成とし、複数の周波数分 K 個の送受信機を持つものとする。送信はある瞬間の 1 つの周波数帯でのみ送信可能とし、受信は複数の周波数帯を同時に受信可能で、送信時にも受信可能である。ただし、ある周波数帯で送信している場合は、ある周波数帯では受信できないものとする。K=2 の場合の例を図 1 に示す。

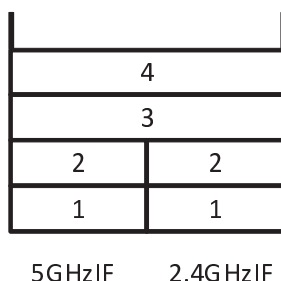


図 1 K=2 の場合の例

送信フェーズは複数ある第 2 層、第 1 層から利用するインタフェースを選択し、パケットを送信するフェーズである。高優先度帯を利用できる場合、高優先度帯で送信し、利用できない場合、低優先度帯で送信する。送信を繰り返し、ホップ数が経路取得・遅延再計算のホップ数 C と同じになった場合は再度経路取得・優先度変更フェーズへと遷移する。経路取得・優先度変更フェーズが終了すると、送信フェーズへと再び遷移する。各フェーズの遷移を図 2 に示す。

提案方式で利用するパラメータを表 3 に示す。K はノードが持つ送受信機の利用できる周波数帯の数である。C は一定ホップ数になったときに経路取得・遅延再計算をするホップ数である。

表 3 提案方式パラメータ

K	利用できる周波数帯の数
C	経路取得・遅延再計算のホップ数

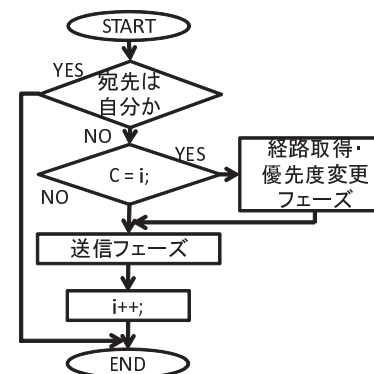


図 2 フェーズの遷移フローチャート

3.2.1 パケットフォーマット

パケットには第 2 層・第 1 層のインタフェース情報、現在のホップ数、経路取得・遅延再計算のホップ数 C の 3 つの情報を含む。インタフェース情報は利用するインタフェース情報を格納し、どのインタフェースを利用して通信するか判断する。ホップ数は現在のホップした数を記録し、次ノードへホップする毎に 1 ずつ増加する。次に、同周波数帯で転送し続ける経路取得・遅延再計算のホップ数を持つ。

3.2.2 遅延時間計算

RTS/CTS/ACK フレームを交換により送信抑制し、衝突を防ぐ、通信方式 IEEE 802.11 (4way) の場合の遅延時間の計算式を求める。各帯域の遅延時間を求めるためにホップ数を h 、時刻 t における第 4 層からのセグメントを分割したパケット数を n_t 、RTS/CTS/DATA のフレームサイズを RTS 、 CTS 、 $DATA$ 、送信レートを $RATE$ 、SIFS 時間と DIFS 時間を $SIFS$ 、 $DIFS$ とする。このとき、フレーム衝突が起きなかった場合の 1 回の送信時間 s は、次式のように表せる。

$$s = \frac{RTS + CTS + DATA}{RATE} + 3SIFS + DIFS$$

図 3 は A から E へとマルチホップ通信しているときのシーケンスチャートである。図 3 の

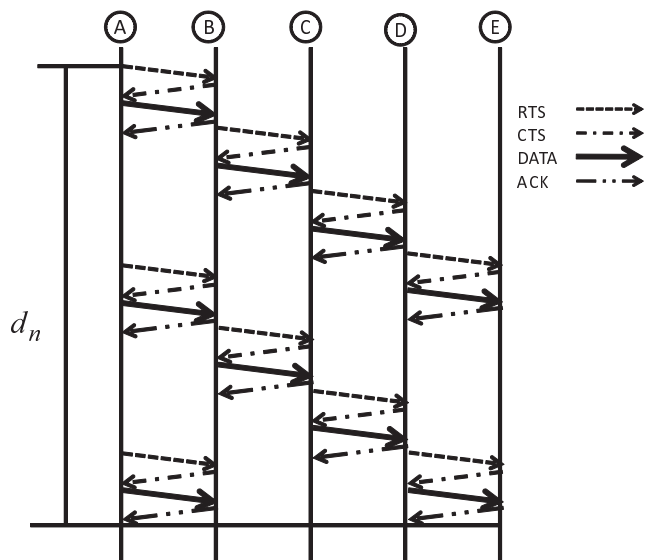


図3 シーケンスチャート

ようにマルチホップ通信する場合、1パケットを送信すると、ホップ数 h に対して遅延時間 d_1 は次式のように表せる。

$$d_1 = sh$$

このとき、 n_t パケット送信するとすると、4ホップ目 (D → E) で k 番目のパケットを送信しているとき、1ホップ目 (A → B) で $k+1$ 番目のパケットを送信できる。同様に3ホップ離れたとき衝突せずに同時に通信できる。そのため、 n_t パケット送信するときは、遅延時間 d_n は式 (2) と表せる。

$$d_{n_t} = 3s(n_t - 1) + sh \quad (2)$$

次に、パケットを十分に送ったとする。このとき、 n_t を ∞ に発散させると遅延時間 d_∞ は式 (3) と表せる。

$$d_\infty = \lim_{n_t \rightarrow \infty} \frac{3s(n_t - 1) + sh}{n_t} = 3s \quad (3)$$

遅延時間はパケット数がわかっている場合を除き、式 (3) を用いて計算する。パケット数がわかっている場合は式 (2) を用いて計算する。

3.2.3 フェーズ遷移

3.2節で述べたように提案方式は大きく分けて、経路を取得し、遅延時間を計算して優先度を変更する経路取得・優先度変更フェーズ、次ホップへ送信する送信フェーズと順に遷移する。フェーズの遷移は、経路取得・優先度変更フェーズ、送信フェーズと順に遷移する。

図2にフローチャートを示す。まずパケットが到着するとノードは宛先が自分かを見る。宛先であれば終了する。宛先が自分でなければ、経路取得・遅延再計算のホップ数 C と送信元から現在のノードまでのホップ数 i を比べる。経路取得・遅延再計算のホップ数 C とホップ数 i が同値であれば、経路取得・優先度変更フェーズへ遷移し、そうでなければ、ホップ数 i に1を加えて送信フェーズへ遷移する。

3.2.4 経路取得・優先度変更フェーズ

このフェーズではより遅延時間が小さい帯域で優先して送信するために、宛先までの経路を取得し、それぞれの帯域の遅延時間を計算して帯域に優先度を定める。まずそれぞれの帯域ごとに宛先までの経路を取得する。このとき、帯域ごとに宛先までのホップ数を記録する。このホップ数を元に、3.2.2節で求めた式 (3) で遅延時間 t を計算する。遅延時間を元に帯域の優先度を変更するフローチャートを図4に示す。K個ある周波数帯それぞれについて、遅延時間を計算し、 t_j に記録する。全ての帯域の遅延時間を計算した後、遅延時間の小さい順に昇順ソートし、遅延時間の小さい帯域を高い優先度の帯域とし、遅延時間の大きい帯域を低い優先度の帯域とする。

3.2.5 送信フェーズ

送信フェーズでは、帯域の使用状況に合わせて、より高い優先度で空いている帯域を利用して通信する。利用する帯域を決めるフローチャートを図5に示す。始めに、優先度の高い帯域のルーチングテーブルを参照し、キャリアセンスする。キャリア検出されなければ、パケット送信する。キャリア検出されれば、次に優先度の高い帯域のルーチングテーブルを参照して、キャリアセンスする。キャリア未検出であれば、パケット送信する。最も優先度が低い帯域でもキャリア検出された場合、バックオフし、同じように高優先度帯のルーチングテーブルを参照後、キャリアセンスを始める。

次にノードが送るべきパケット数 N を送信する場合について考える。図6始めにバックオフし、次にキャリアセンスする。キャリア検知されれば、バックオフし、同じ周波数帯でキャリアセンスする。キャリア検知されなければ、パケットを送信し、送ったパケット数に1を加える。これをパケット数 N になるまで繰り返す。

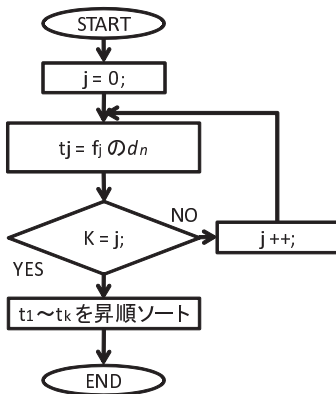


図 4 経路取得・優先度変更フェーズフローチャート

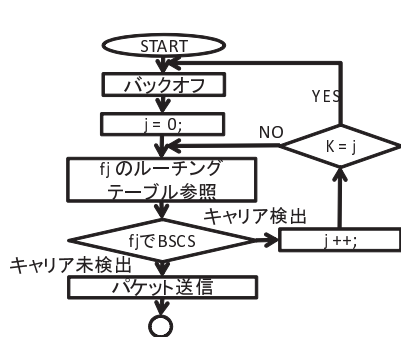


図 5 送信フェーズフローチャート 1

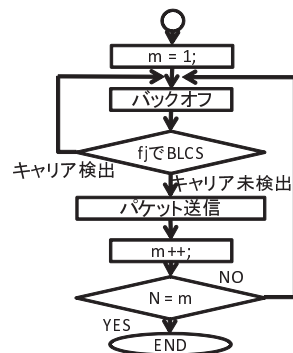


図 6 送信フェーズフローチャート 2

3.3 動作例

提案方式の動作例を示す。経路取得・遅延再計算のホップ数は 3 ホップとする。図 7 のようにノードが配置されているとする。

ノード A にノード H を宛先としたデータが発生した場合、ノード A はまず経路取得・優先度変更フェーズにより AODV に従い RREQ/RREP の交換により経路を取得する。この RREQ/RREP によりそれぞれの帯域でホップ数と経路を得る。それぞれの帯域後との経路を図 8 を示す。実線は 5GHz 帯の経路であり、点線は 2.4GHz 帯の経路である。

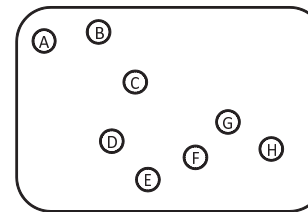


図 7 ノード配置

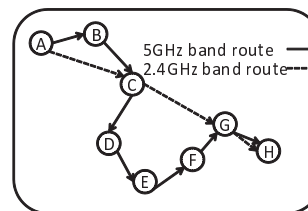


図 8 ノード A からノード H への経路例

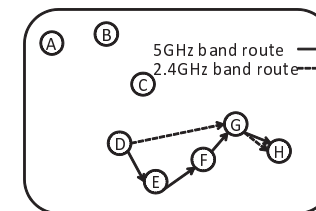


図 9 ノード D からノード H への経路例

このそれぞれの周波数帯の経路について、式 (3) で宛先までの遅延時間を求める。遅延時間を求めた結果、2.4GHz 帯に比べ 5GHz 帯の遅延時間が小さかった。そのため、5GHz 帯を高優先度帯とする。

次に、送信フェーズに遷る。5GHz 帯をキャリアセンスし、キャリアが空いていればノード A からノード B へと送信する。送信が完了したら、ホップ数に 1 を加え、再び 5GHz 帯をキャリアセンスし、ノード B からノード C と送信し、送信完了する度にホップ数に 1 を加える。5GHz 帯の経路を使いノード D まで送信する。

経路取得・遅延再計算のホップ数 C は 3 のため、ノード D まで到達した場合、3 ホップしたため、経路取得・優先度変更フェーズへと遷る。RREQ/RREP の交換により経路を再取得後 (図 9)、優先度変更フェーズでは新たに構成したリンクのホップ数から伝達時間を求める。2.4GHz 帯が伝達時間が小さい場合、2.4GHz 帯を高優先度帯として、送信フェーズへと遷る。

送信フェーズでは 2.4GHz 帯をキャリアセンスし、キャリアが空いていればノード D からノード G へと送信する。送信が完了したら、ホップ数に 1 を加え、再び 2.4GHz 帯をキャリアセンスし、キャリアが未検出であればノード G からノード H へと送信する。ノード H

は自身が宛先であるため、処理を終了する。

4. 評価

本章では提案方式が単一の周波数帯で通信するのに比べ、スループットが高くなり、遅延が小さくなることを示すために計算機シミュレータにより評価する。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーション環境について述べる。評価にはネットワークシミュレータ Qualnet⁽⁶⁾を利用する。シミュレーションパラメータを表 4 に示す。500m × 500m のエリアに縦横

表 4 シミュレーションパラメータ

number of Nodes	100
Area size	500m × 500m
Data rete	IEEE 802.11a 54Mbps IEEE 802.11b 11Mbps
Radio range	IEEE 802.11a 79m IEEE 802.11b 271m
Frequency bands	IEEE 802.11a 5GHz 帯 IEEE 802.11b 2.4GHz 帯
Simulation time	300s
Packet Size	1024bytes

50m 間隔でノードを 100 個グリッド配置する。各ノードは IEEE 802.11a (5GHz 帯) と IEEE 802.11b (2.4GHz 帯) を利用できるインタフェースを 2 つ持ち、利用できる周波数帯の数 K は 2 とする。経路取得・遅延再計算のホップ数 C は十分に大きいものとし、途中で経路は再取得しない。パケットを 1.0×10^6 個送るものとする。ルーチングは AODV に従い、送信元と宛先だけ指定し、1 フロー (図 10)、3 フロー (図 11) の場合について評価する。1 フローの場合、A から B へのフローのみ、3 フローの場合、A から B、C から D、E から F へのフローを設定した。

4.2 スループット評価

提案方式を AODV を利用した場合の IEEE 802.11a、IEEE 802.11b と比較して評価する。結果を図 12、13 に示す。横軸は Packet Seding Rate (packet/sec)、縦軸は Throughput (kbps) である。3 フローのときは 3 フローの平均スループットである。

1 フローのとき、高負荷になると IEEE 802.11b より高いスループットを示す。IEEE 802.11a とは同じ性能を示しているが、これは提案方式が、IEEE 802.11a の遅延が IEEE

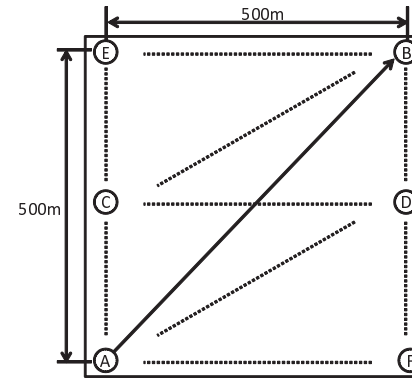


図 10 1 フローのときの送信元と宛先の組み合わせ

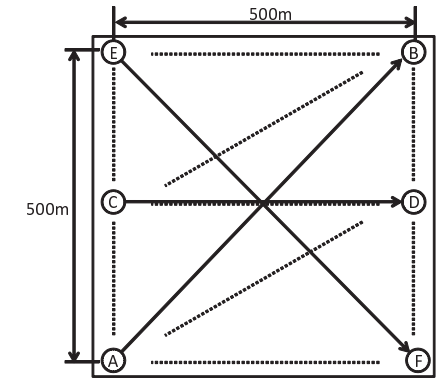


図 11 3 フローのときの送信元と宛先の組み合わせ

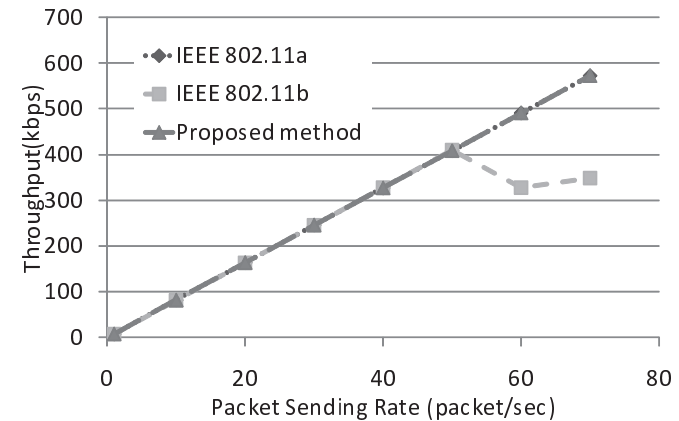


図 12 1 フローに対するスループット

802.11b に比べ、小さいと判断し、IEEE 802.11a を選択しているためである。また、IEEE 802.11b が 60 (packet/sec) でスループットが低下している。これは、RTS/CTS の制御フレームの衝突が増加したためである。

3 フローのとき、IEEE 802.11a/b に対して 20(packet/sec) から高いスループットを示す。特に、提案方式は高負荷のときに IEEE 802.11a に対して約 1.6 倍、IEEE 802.11b に対して約 4.7 倍の性能を示した。フローの遅延が小さくなる周波数帯を適切に選ぶことで、

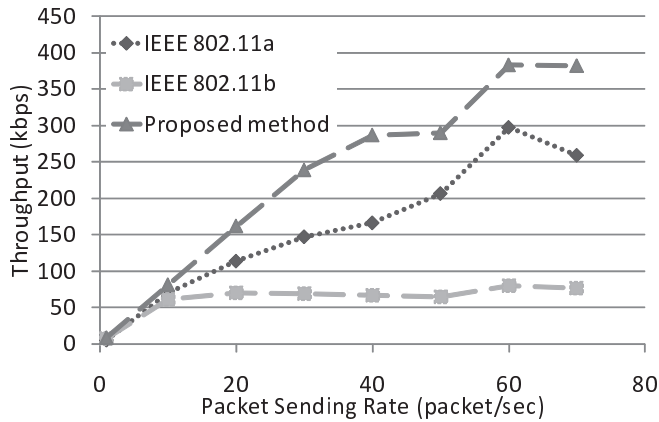


図 13 3 フローに対するスループット

フローのスループットが向上し、5GHz 帯と 2.4GHz 帯を利用するフローがあるため、トラフィックが緩和されたためである。

4.3 遅延評価

提案方式を AODV を利用した場合の IEEE 802.11a, IEEE 802.11b と比較して評価する。結果を図 14, 15 に示す。横軸は Packet Sending Rate (packet/sec), 縦軸は End to End delay (s) である。3 フローのときは 3 フローの平均遅延である。

1 フローのとき、高負荷になると IEEE 802.11b より遅延が小さい。全域にわたり IEEE 802.11a とは同じ性能を示しているが、これは提案方式が IEEE 802.11a を高い頻度で選択しているためである。

3 フローのときは IEEE 802.11a/b に対して 全般的に良好な特性である。IEEE 802.11a の遅延が小さいのは、通信範囲が狭く、衝突が起きにくいからである。提案方式の遅延が小さい理由としては、異なる周波数帯で通信することで他フローからの衝突が減ったことからである。提案方式は最大で IEEE 802.11a に対して約 2/3 倍、IEEE 802.11b に対して約 1/3 倍の性能を示した。

5. むすび

本稿では、無線通信の周波数帯の利用状況について述べ、その上で複数周波数帯を利用する通信方式を提案した。この通信方式は複数周波数帯から宛先までの遅延時間が小さくな

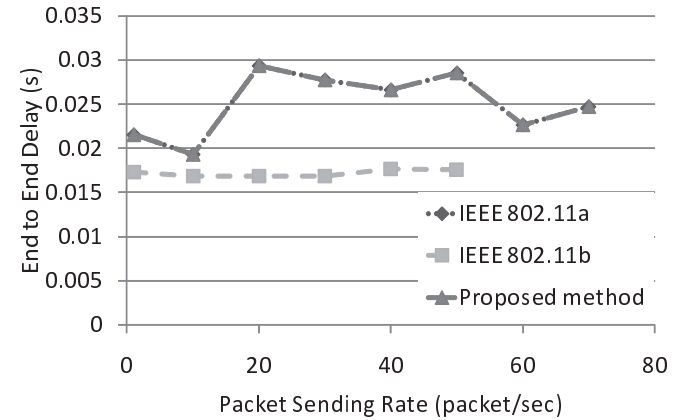


図 14 1 フローに対する遅延

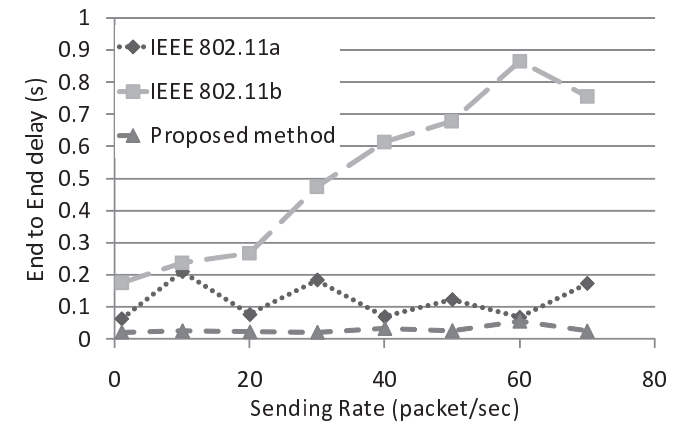


図 15 3 フローに対する遅延

る周波数帯を選ぶ方式である。シミュレータ Qualnet を用いて、AODV を利用した場合の IEEE 802.11a, IEEE802.11b と提案方式を比較評価した。その結果、スループット評価では 1 フロー、3 フローともに提案方式が高いスループットを達成できた。特に 3 フローのとき、IEEE 802.11a 単独に比べて、スループットが最大約 1.6 倍、IEEE 802.11b 単独に比べて、スループットが最大約 4.7 倍向上が得られた。

今後は、グリッド配置以外、例えばランダムにノードを配置した場合などについても評価する。

謝 辞

本研究は科研費基盤研究 A (20240005) の助成を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) R. Jurdak, C. V. Lopes and P. Baldi,: A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc Networks, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 6, no. 1, First Quarter 2004.
- 2) C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. R. Das,: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, RFC3561, July 2003.
- 3) Davis B.Johnson, David A.Maltz, and Y-C. Hu.: The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR), draft-ietf-manet-dsr-09.txt, April 2003.
- 4) Xiaoxin Wu, Gang Ding, Wenwu Zhu,: Load-Based Route Discovery Through Searching Range Adaptation for MANET Throughput Improvement,: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, No. 4, May 2009
- 5) 中村 幸平, 岡田 啓, 間瀬 憲一, 佐々木 武彦, 渡邊 一弘, 板倉 英三郎, : IEEE 802.11n 無線メッシュネットワークのチャンネル構成とテストベッドを用いた性能評価, 信学技報 IEICE Technical Report AN2010-73, March 2011
- 6) QualNet, <http://www.scalable-networks.com>