

スマートアンテナのビーム幅と送信電力の 適応的な制御方法について

青木 勇太^{†1} 木谷 友哉^{†2}
萬代 雅希^{†3} 渡辺 尚^{†4}

スマートアンテナとは、ビームの指向性を制御できるアンテナのことであり、これを利用することにより一定方向へビームを向け、通信端末間の干渉を防ぐことで無線通信の空間利用効率を向上できる。スマートアンテナの利点を活用するための指向性 MAC プロトコルの設計では、送受信アンテナの指向性(送受信ビーム方向・幅)、送信電力、送信レートの制御方法が主な課題となる。本稿では、まず、指向性制御に注目し、代表的な MAC プロトコルである DMAC をとり上げ、ビーム形成に関して移動環境における基礎評価をする。これにより、端末の移動とトラフィックフローによって最適なビーム幅が変動することを明らかにする。次に、この結果を用いて、通信端末の移動とトラフィックフローに応じて、通信端末のビーム幅を適応的に制御する方式 ADMAC (Adaptive Directional MAC) を提案する。性能評価により、DMAC におけるビーム幅 60° と比較して、端末が静止状態のときには最大 1.4 倍のスループット、端末移動最大速度が 40 km/h のときには、最大 1.2 倍のスループットを実現できることを示す。さらに、ADMAC に送信電力制御を加味した方式も考察する。

Adaptive control method of transmission power and beam width

YUTA AOKI,^{†1} TOMOYA KITANI,^{†2}
MASAKI BANDAI^{†3} and TAKASHI WATANABE^{†4}

Recently, using smart antennas in ad hoc network has attracted attention. Smart antennas can electronically control beam direction and extend transmission range. These potentials can improve the network capacity of ad hoc networks. Therefore, medium access control (MAC) protocols for ad hoc networks using directional antennas are proposed. In the design of directivity MAC protocol, to use the advantage of a smart antenna control techniques of directivity of transmitting and receiving antenna (direction of sending and receiving beam and width), transmitting power and transmission rates become the main

problem. In this paper, we pay attention to the directivity control, implement DMAC which is a typical MAC protocol, and evaluate it under the moving environment for the beam forming. Based on this basic evaluation, we propose a novel beam width adaptation protocol called ADMAC (Adaptive Directional MAC). We evaluate our schema through simulation study with different values of parameters such as the number of flows, mobility and beam width. The experimental results show that ADMAC can calculate the adaptive beam width though moving nodes or changing network traffic. Moreover, we design the method to add the transmitting power control in ADMAC.

1. はじめに

近年、無線通信技術の発展と無線機器の普及に伴い、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とは、複数の無線端末によって自律分散的に構築される無線ネットワークである。無線 LAN や携帯電話などと異なり、端末をマルチホップで中継することにより、直接通信できない端末との通信が可能となる。無線 LAN 国際標準規格である IEEE802.11 DCF に代表される従来の MAC プロトコルでは、無指向性アンテナの利用を想定している。しかし、無指向性アンテナによる通信は全方向に対し行われるため、複数のトラフィックフロー間で干渉が生じやすくなり空間利用効率が低くなることが知られている。そこで、無線アドホックネットワークにスマートアンテナを適用する MAC プロトコルの研究が盛んに進められている。スマートアンテナは、電氣的にアンテナの指向性を制御可能なアンテナであり²⁾³⁾、指向性ビームを特定方向に向けることによって複数端末の通信を可能とし、空間利用効率を向上させられるアンテナである。また、スマートアンテナの高い利得の指向性ビームは通信距離の延長を可能とする。

指向性 MAC の設計においては、送受信アンテナの指向性、送信電力、送信レートの制御方法が主な課題となっている。送受信アンテナの指向性制御とは、送信アンテナや受信ア

^{†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

アンテナのビームの方向や幅の制御を指す。送信電力制御は、送信範囲を拡大・縮小することによって、遠距離の端末との通信を可能にしたり干渉を軽減したりする方法である。送信レート制御は、距離や電波伝搬状況に応じて一定時間に送ることのできるビット数を増減させ通信時間を短縮しネットワークの容量を上げる方法である。これらの手法を組み合わせた統合的な手法が望まれるが、まだ十分に確立されていないのが現状である。

本稿では、主に送受信アンテナの指向性制御に注目し、まず、ビーム幅と端末の移動との関係を明らかにする基礎評価を代表的な MAC である DMAC を例に検討する。その結果を踏まえて、端末が移動する状況においても動的に指向性ビーム幅を制御できるプロトコルとして、動的かつ適応的にビーム幅を設定する ADMAC (Adaptive Directional MAC) を提案する。提案手法では、通信端末間の移動を考慮した通信端末のビーム角と、トラフィックフローを考慮したトラフィック割合から動的に適応的なビーム幅を計算する。ADMAC は端末の移動やトラフィックフローの増減といった動的な環境変化に対して、適応的なビーム幅を選択することで通信の干渉や通信の失敗を抑制する。さらに、送信電力制御により、距離が変動する端末との通信を効率化する方法についても考察する。

2. 関連研究

アドホックネットワークまたは指向性アンテナにおける MAC プロトコルの研究が盛んに行われている。本章では、指向性制御、送信電力制御、レート制御に関する既存方式の概略を説明する。

2.1 指向性制御方法

ビームフォーミング可能なアンテナは無線ネットワークにおける空間利用効率の向上を可能とする。特に、指向性ビームを形成するアンテナを想定した MAC プロトコルが研究されている。Choudhury らは従来の指向性送信制御に加え、待機状態における指向性受信制御にも着目している⁵⁾。多くの MAC プロトコルでは無指向性ビームで受信待機する。しかし、無指向性アンテナで受信することで、自分宛でないパケットを受信したときに、MAC 層において大量のパケットが捨てられることになる。これは、チャンネルの効率的な利用を阻み、ネットワークの性能を低下させる。そこで、著者は適したビームフォーミングをすることで同時通信におけるチャンネルの有効利用を行う MAC プロトコル CaDMAC (Capture-aware directional MAC) とルーティングプロトコル CaRP (Capture-aware Routing Protocol) を提案している。

CaDMAC では、ネットワーク内の端末は時刻同期していると想定し、無指向性受信を行

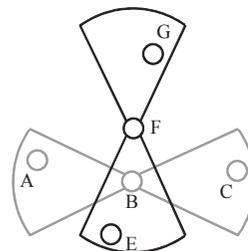


図 1 アイドル状態における B, F の受信待機ビーム

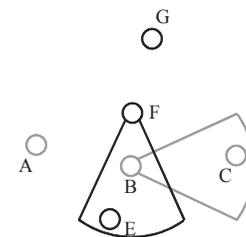


図 2 B, F による一方方向の送信ビーム

う ON 期間と指向性受信を行う OFF 期間を同期している。ON 期間中は、受信端末は近隣の全てのパケットを受信する。自分宛パケットあるいはブロードキャストパケット、そして他の端末宛のパケットのいずれかを受信する。期間中に受信したパケットが全て他の端末宛のパケットの場合、そのビームをブラックリストに追加する。ブラックリストは ON 期間の最後にリセットされる。OFF 期間中のときのビームフォームを図 1 に示す。ここでは、A が B 経由で C と通信し、E が F 経由で G と通信するトラフィックを想定する。OFF 期間中において B が E, G 方向へのビームを向けないことにより、A と B, C は E-G 間からの干渉パケット受信を防ぐ。一方、送受信において同様のビームパターンを用いると非効率であるため、図 2 に示すように送受信では一方方向ビームを設定する。CaDMAC は OFF 期間中における干渉パケットの受信を防ぎ、同時通信数を増加させる。CaDMAC では指向性制御のうち、特に指向性送信ビームの制御だけでなく指向性受信ビーム制御している。

2.2 送信電力制御方法

電力制御プロトコルは、ネットワークにおける電力保持を目的とした方式とネットスループット向上を目的とした 2 種類がある。ATPMAC (Adaptive Transmission Power controlled MAC)⁷⁾ は後者に該当する。ATPMAC は端末の同時通信を増加させるために、端末間で時刻同期して電力制御を行うプロトコルである。また、MRPC (Multi-Rate Power Controlled MAC protocol)⁶⁾ は ATPMAC の改良版であり、他の端末の通信と干渉がない限り、新たな通信の開始を可能とし、送信レート制御として送信レートの選択を ARF (Automatic Rate Fallback)⁹⁾ ベースに行う。

MRPC における通信シーケンスは CSMA に基づいて 4way の通信を行う。RTS には送信端末の送信電力と送信レートを付加し、受信端末は受信した電力を計算する。そして、その送信レートにおける最小受信電力閾値を計算しテーブルに記録する。受信端末は、近隣

端末の送信電力と通信時間を知っているため、送信端末に対し許容する送信電力を求める。そして、RTS フレーム同様に CTS フレームに許容する電力を付加し送信端末に送信する。MRPC は電力制御を行う ATPMAC にレート制御を加えている。このように、アドホックネットワークで制御可能な要素（ビーム送受信制御、送信電力、送信レートなど）のうち、送信電力と送信レートの組み合わせでの制御が行われている。

2.3 レート制御方法

既存のレート制御方式はパケット損失をもとにレート制御を行うものが多い。しかし、通信干渉の多いネットワークにおいてはレートが低下する問題点がある。RAF (Rate-Adaptive framing)⁸⁾ では、SINR を考慮し受信機側のキャリアセンシングをもとに適応的にレートとフレームサイズを選択する。物理層におけるキャリアセンシングの閾値は送信レートによって異なる。RAF では、キャリアセンス時に周囲の干渉と雑音の履歴を保持することにより、動的に適したレートを設定することができる。フレームサイズは、フレームサイズとスループットの関係を計算し、スループットが最大化するように計算される。また、フレームが短い場合にはフラグメントパケットを送信することになるのでデフラグメント方法も記述されている。RAF ではレート制御するにあたり、ネットワーク内の干渉や雑音を考慮している。

3. 指向性アンテナの基本性能

本節では、指向性制御に注目して端末の移動とトラフィックフローがネットワーク性能に与える影響について説明する。通信端末が移動する環境において狭い指向性ビームを用いると、送受信端末が通信範囲から外れる可能性が高く通信が失敗しやすい。また、トラフィックフローが多い環境において広い指向性ビームを用いると、他の通信端末の通信と干渉する可能性が高く通信が失敗しやすい。3.1 では通信中の端末移動によって生じる問題点を述べ、3.2 では通信中の複数端末におけるトラフィックフロー干渉によって生じる問題を述べる。

3.1 指向性アンテナを有する端末の移動

狭いビーム幅を設定している通信端末が移動する場合、それらの端末が通信範囲から外れて通信が失敗する可能性が高くなる。通信が失敗する例を図3に示す。図中では送信ビームを実線、受信ビームを破線で示し、送信ビームと受信ビームが重なり合った場合に受信成功とする。ここでは、端末 A が送信、端末 B が受信を行うことで通信し、端末が通信時間中における Δt だけ移動した場合を表している。x 軸と y 軸は空間上のビームの方向は移動前と移動後で変化しないものとする。端末 A、B が通信範囲から外れて通信が失敗する。通信の失敗が多くなると通信機会が減少し、ネットワークスループットが低下する問題が生じ

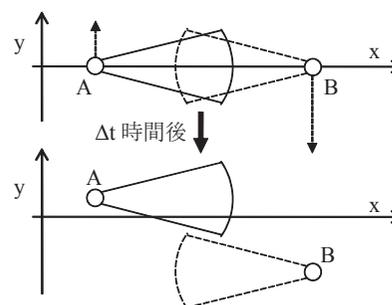


図3 端末の移動による通信の失敗例

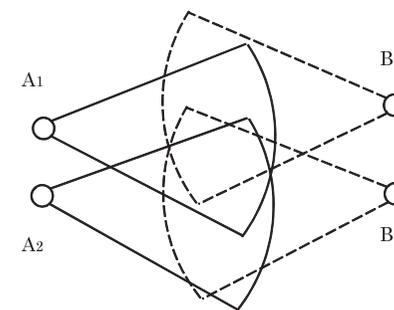


図4 2トラフィックフローにおける通信の干渉例

る。したがって、端末の移動量が多い場合にビーム幅を広げることで、通信端末が通信範囲内から外れにくくなりスループットが低下しづらい。

3.2 トラフィックフロー干渉

トラフィックフロー数が増加する環境では、広いビーム幅を設定している端末間の通信は干渉しやすくなり空間利用効率が低下する。トラフィックフロー数増加による干渉の例を図4に示す。ここでは、端末 A1 と端末 A2 がそれぞれ、端末 B1 と端末 B2 に対して通信を行っている。この場合、端末 A1 と端末 A2 の送信ビームが重なり合うことで干渉が起き、B1 と B2 は A1 と A2 の混ざった信号を受信することにより各々のデータを受信できない。この通信の失敗によってネットワークスループットが低下する。したがって、トラフィックフローが多いときにはビーム幅を狭めることで複数の通信における干渉を防ぐことができる。

4. 基礎評価：送受信ビーム幅に対するスループット性能

4.1 シミュレーション仮定

ビーム幅がネットワーク性能、特にスループット性能に与える影響を定量的に検討するために、DMAC (Directional MAC)⁴⁾ を例に挙げ、計算機シミュレータを用いたビーム幅の基礎評価を行う。表1にシミュレーションの共通パラメータを示す。伝送速度は評価モデル簡易化のため ARF (Automatic Rate Fallback) 方式⁹⁾ などによる制御を行わず 2 (Mbps) 固定とした。ビーム幅は固定ビーム幅とし、全送受信端末が指定されたビーム幅で通信する。任意の端末に対し常に 1 つ以上の近隣端末が存在する環境を想定し、1000 (m) 四方に対して 30 個の端末をランダムに配置し、通信半径は全ビーム幅について 500 (m) とした。移動する環境では端末はランダムウェイポイントに従い移動する。速度は移動開始時に [0,

v] (km/h) の一様分布に従って決定される。また、ポーズタイムは 0 (s) とする。送信端末をランダムに選択し、宛先はパケット毎に空間上の 1 つのノードを選択する。データパケットは平均到着率 125 (packets/s) のポアソン分布に従い到着する。評価は 10 回試行の平均値をとる。図 5 以降の縦軸方向のバーは 95%信頼区間を示す。スループットについては、まず、送信端末 i におけるスループットを式 (4.1) で定義する。これらを全ノードにわたって合算したスループット (式 (4.2)) によってネットワーク性能を計測する。なお、トラフィックフローが k 個のときには、送受信端末が k ペア存在する。

$$Throughput(i) = \frac{Datasize(i) \times Received\ Number\ of\ Packets(i)}{SimulationTime} \quad (4.1)$$

$$Throughput = \sum_i Throughput(i) \quad (4.2)$$

表 1 シミュレーション共通パラメータ

PHY	802.11b
MAC	DMAC
Transmission rate	2 [Mbps]
Datasize	1024 [byte]
Simulation time	100 [sec]
Area size	1000m × 1000m [m ²]
number of Nodes	30
Node location	random
Mobility model	Random Way Point
Communication range	500 [m]

4.2 評価指標

ここではビーム幅、端末速度、トラフィックフロー数に対するスループットを評価し、それぞれについて述べる。

4.2.1 ビーム幅に対するスループット性能

各ビーム幅を 15° と 30° から 360° の 30° 間隔で設定する。端末最高速度は 0, 40 (km/h) とする。また、トラフィックフロー数は 1, 3, 5 とする。

4.2.2 端末移動速度に対するスループット性能

端末速度を 0, 5, 10, 20, 30, 40 (km/h) とする。トラフィックフロー数は 1, 5 フローとする。また、ビーム幅は 15, 30, 60, 180, 360 (°) とする。

4.2.3 トラフィックフロー数に対するスループット性能

トラフィックフロー数を 1, 2, 3, 4, 5 とする。端末最大速度は 0, 40 (km/h) とする。また、ビーム幅は 15, 30, 60, 180, 360 (°) とする。

4.3 ビーム幅に対するスループット性能評価

図 5 に静止状態における各ビーム幅のスループット、図 6 に端末速度 40 km/h における各ビーム幅のスループットを示す。横軸は設定した固定ビーム幅の角度で、縦軸はスループットである。図 5 より、トラフィックフローが 1 のときは自フローのみの干渉となり、どのビーム幅のスループットも 786 ~ 1004kbps である。複数トラフィックフローでは通信端末間で干渉が起りやすいため、ビーム幅が狭ければ干渉が少なくなりスループットが低下しない。トラフィック数 5 における 15° の合計スループットは 360° の合計スループットの 2.3 倍である。一方、ビーム幅が広くなるにつれ、周辺ノードとの通信干渉が増加しスループット性能が横ばいになる。トラフィック数 3 における 360° の合計スループットは約 1130kbps である。

図 6 より、30° のスループットと 60° のスループットを比較すると、トラフィックフロー数 1 では約 66%のスループット性能となっている。これは、端末が移動する場合、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすいため、ビーム幅が狭いとスループット性能が低下するためである。トラフィックフロー数 5 では約 107%のスループット性能となっているように、狭いビーム幅では、受信端末が送信端末の通信範囲から外れる影響があるものの、同時通信数増加によりスループットが向上している。

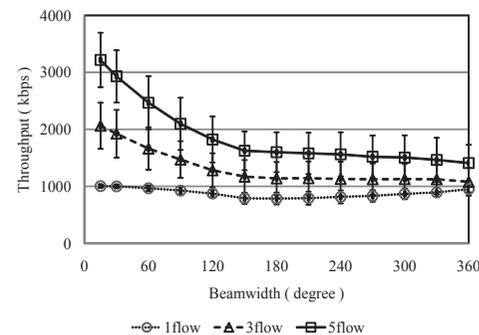


図 5 静止状態における各ビーム幅のスループット

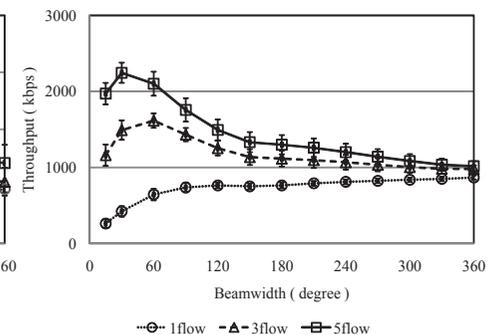


図 6 端末速度 40 (km/h) における各ビーム幅のスループット

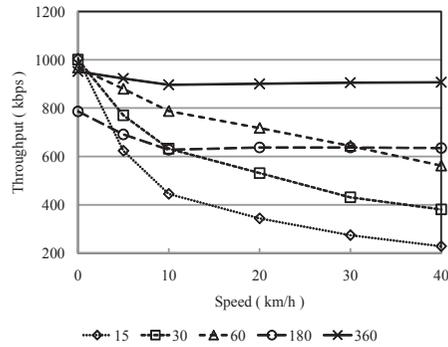


図7 トラフィックフロー数 1 における各端末速度のスループット

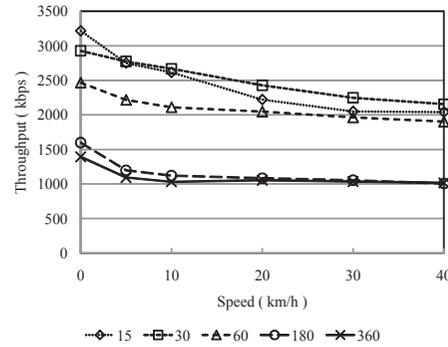


図8 トラフィックフロー数 5 における各端末速度のスループット

4.4 端末移動速度に対するスループット性能評価

図7にトラフィックフロー数1における各端末速度のスループット、図8にトラフィックフロー数5における各端末速度のスループットを示す。横軸は端末移動速度、縦軸はスループットである。図7より、ビーム幅が狭い場合には、端末最大速度が増加するに伴い、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすく低いスループットとなる。例えば、ビーム幅15°では速度が5km/hから10km/hへ変化するに伴い、スループットが623 kbpsから445 kbpsへ低下している。一方、ビーム幅が広い場合には、受信端末が送信端末の通信範囲から外れにくいため高いスループットを維持している。180°の場合は速度10km/h以降は約630 kbpsである。

図8より、ビーム幅が狭い場合には、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすいものの、同時に通信できる機会が増加し高いスループットとなる。しかし、15°の場合は、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすい影響が大きく、速度5km/h以降において30°の性能と逆転する。また、360°は他のビーム幅に比べ通信端末間での干渉が多くなるため、速度10km/hにおけるスループットは60°の半分程度のスループット性能となっている。

4.5 トラフィックフロー数に対するスループット性能評価

図9に端末速度0 km/hにおける各トラフィックフローのスループット、図10に端末速度40 km/hにおける各トラフィックフローのスループットを示す。横軸をトラフィックフロー数、縦軸をスループットとする。図9より、受信端末が送信端末の通信範囲から外れないため、狭いビーム幅ほど高いスループットとなり、トラフィックフロー数が増加するほど

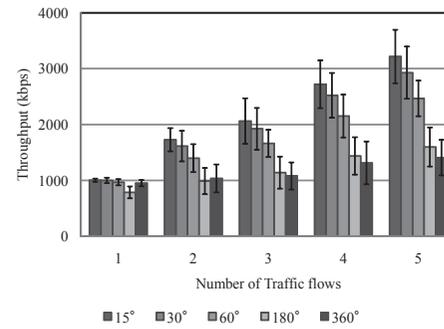


図9 端末速度 0 (km/h) における各トラフィックフローのスループット

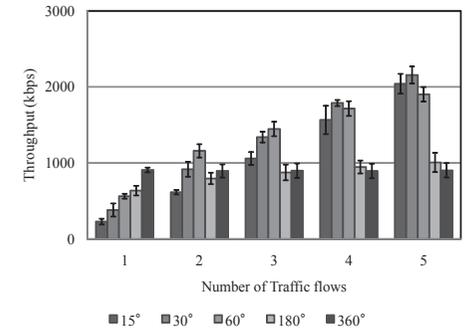


図10 端末速度 40 (km/h) における各トラフィックフローのスループット

顕著になる。トラフィックフロー数が3から4に変化するときには、30°のスループットが491 kbps向上し、15°のスループットは657 kbps向上する。一方、広いビーム幅では近隣の通信端末との干渉が生じるため、トラフィックフロー数が増加しても低いスループットとなる。180°のスループットは299 kbpsしか向上していない。

図10より、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすいため、少ないトラフィックフローのときには狭いビーム幅ほど低いスループットとなる。15°ではスループットが228 kbpsで比較対象のビーム幅の中で最も低いスループットとなる。また、トラフィックフローが増加するに伴い、同時通信数が増加するため高いスループットとなる。トラフィックフロー数が3から4に変化するときには、30°のスループットが448 kbps向上する一方で15°のスループットは506 kbps向上する。15°の場合は空間利用効率が上がるものの、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすくなり、30°よりスループット性能が低下する。

4.6 考察

以上のビーム幅の基礎評価より、指向性ビーム幅と端末の移動、トラフィックフローについて考察する。指向性ビーム幅を狭めることで同時通信可能な端末が増加し、空間利用効率が向上する。しかし、端末が移動する場合には、受信端末が送信端末の通信範囲から外れやすく端末の移動による通信の失敗が多くなる。したがって、端末速度が大きいときには広いビーム幅を設定し、トラフィックフロー数が増加するにつれビーム幅を狭める必要がある。また、端末速度が小さいときには端末移動の影響が小さいため、狭いビーム幅を設定することで空間利用効率を向上させることができる。以上より、表2と表3に、ビーム幅の広さと

表 2 狭いビーム幅のときのスループット

	少フロー	多フロー
速度大	×	○
速度小	△	◎

表 3 広いビーム幅のときのスループット

	少フロー	多フロー
速度大	◎	△
速度小	○	×

端末速度，トラフィックフローがネットワーク性能に与える影響を定性的に示す． $\times, \Delta, \circ, \odot$ の順に性能が高くなるものとする．表 2 より，速度が大きく少ないフローのときは，送信端末の通信範囲から受信端末が外れやすく，通信が失敗しネットワーク性能が低くなる．速度が小さく多いフローのときには，送信端末の通信範囲から受信端末が外れにくく，同時通信数が増加しネットワーク性能が高くなる．表 3 より，速度が大きく少ないフローのときは，送信端末の通信範囲から受信端末が外れにくく，通信が成功しネットワーク性能が高くなる．速度が小さく多いフローのときには，通信範囲内に通信端末以外の複数の端末が入りやすく，干渉が増加しネットワーク性能が低くなる．以上の考察より，本稿では端末の移動とトラフィックフロー数より動的かつ適応的なビーム幅の決定方法を提案する．

5. 提案方式 ADMAC (Adaptive Directional MAC)

本章では，動的な環境において高いスループットを維持する手法として，適応的にアンテナの送受信ビーム幅を決定する MAC プロトコル ADMAC を提案する．まず提案方式の概要を述べ，次に ADMAC の詳細を段階的に説明する．

5.1 概要

ADMAC は端末の移動とトラフィックフローをもとに，各端末がそれぞれ独自に通信すべきデータを持ったときに，アンテナの送受信ビームを適応的に決定する方式である．ADMAC は 3 ステップからなる．まず，第一ステップとして，各端末が持つ通信履歴テーブルを利用して，目的端末へのビーム方向とビーム角 Ψ' を求める．ビーム角 Ψ' は通信時間内で送信端末に対し受信端末が移動する角度である．次に第二ステップとして，各端末が持つ通信履歴テーブルを利用して，トラフィック割合 r を求める．トラフィック割合 r は，ネットワーク内の全トラフィックフローに対する送信端末から受信端末へのトラフィックフローの割合である．さらに第三ステップとして，求めたビーム角 Ψ' とトラフィック割合 r から設定するビーム幅の角度 θ を決定する．ADMAC の概略フローチャートを図 11 に示す．

5.2 通信手順

ADMAC の通信手順は DMAC 同様である．すなわち，RTS/CTS/DATA/ACK フレームを交換し通信する．

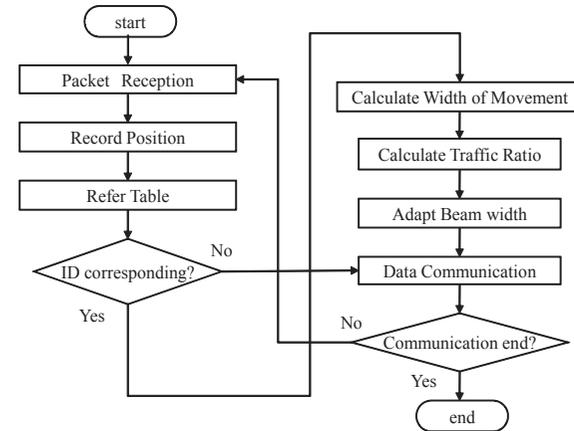


図 11 提案方式の概略フローチャート

5.3 通信履歴テーブル

ADMAC では各端末が通信履歴テーブルを持っている．通信履歴テーブルは表 4 に示すようにインデックス，位置情報登録時間，相手端末 ID と位置，通信開始時間と終了時間から成る．通信開始・終了時間は自身と関係した通信あるいは傍受した通信の時間とする．テーブルへの記録はバケット受信の度にされる．各端末は GPS を持ち，自身の位置情報を取得できる．端末の位置情報は，上位層プロトコルによる位置情報交換や，ハローパケットによる各端末の近隣情報交換により知ることができる．

表 4 位置情報の登録

Index	Time	Node ID	Location	Start Time	End Time
1	T_0	N_0	L_0	S_0	E_0
2	T_1	N_1	L_1	S_1	E_1
3	T_2	N_2	L_2	S_2	E_2
4	T_3	N_3	L_3	S_3	E_3

提案方式のステップ 1 では通信履歴テーブルを参照することでビーム方向とビーム幅を求め，ステップ 2 では通信履歴テーブルを参照することでトラフィック割合を求める．

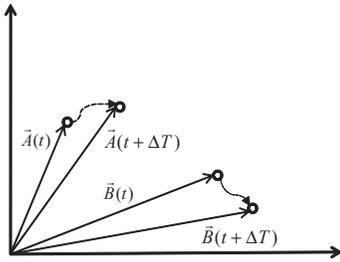


図 12 端末 A, B の移動ベクトル

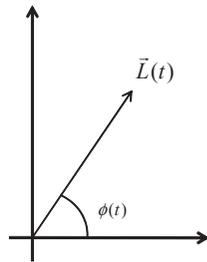


図 13 A, B における相対位置ベクトルの極座標表現

5.4 ステップ 1: 相対位置ベクトルからビーム角を求める

はじめに、送信端末から見た受信端末の相対位置ベクトルを求める。次に、送信端末から見た受信端末の相対移動速度ベクトルを求める。最後に、求めた相対位置ベクトルと相対移動速度ベクトル、通信時間をもとにビーム方向とビーム角を求める。ここでは、図 12 のように配置されている端末 A から端末 B へ通信する場合の端末 A の判断を例に説明する。\$A(t)\$, \$B(t)\$, \$A(t + \Delta T)\$ および \$B(t + \Delta T)\$ は、それぞれ時刻 \$t\$ における端末 A と端末 B の位置、時刻 \$t + \Delta T\$ における端末 A と端末 B の位置である。位置情報は 5.3 の通信履歴テーブルより求める。破線は端末が時刻 \$t\$ から時刻 \$t + \Delta T\$ までに移動する経路を示す。

5.4.1 相対位置ベクトル

時刻 \$t\$ における端末 A から見た端末 B の相対位置ベクトルは式 (5.1) で表される。

$$\vec{L}(t) = \vec{B}(t) - \vec{A}(t) \quad (5.1)$$

図 13 のように極座標表現にすると式 (5.2) で表される。\$\phi(t)\$ は時刻 \$t\$ の A から見た B の相対的な移動角度を表し、\$|\vec{L}(t)|\$ は A から見た B の相対的な移動距離を表している。

$$\vec{L}(t) = (|\vec{L}(t)| \cos\phi(t), |\vec{L}(t)| \sin\phi(t)) \quad (5.2)$$

5.4.2 相対移動速度ベクトル

次に、端末 A から見た端末 B の相対移動速度ベクトル \$\vec{v}(t)\$ を以下のように求める。

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\vec{L}(t + \Delta T) - \vec{L}(t)}{\Delta T} \quad (5.3)$$

\$\vec{v}(t)\$ の \$x\$ 成分 \$v_x(t)\$, \$y\$ 成分 \$v_y(t)\$ は、

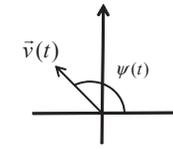


図 14 A, B における相対速度ベクトルの極座標表現

$$v_x(t) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{(Bx(t + \Delta T) - Bx(t)) - (Ax(t + \Delta T) - Ax(t))}{\Delta T} \quad (5.4)$$

$$v_y(t) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{(By(t + \Delta T) - By(t)) - (Ay(t + \Delta T) - Ay(t))}{\Delta T} \quad (5.5)$$

である。これらを極座標表現し、

$$\vec{v}(t) = (|\vec{v}(t)| \cos\psi(t), |\vec{v}(t)| \sin\psi(t)) \quad (5.6)$$

とする。\$|\vec{v}(t)|\$ は A から見た B の相対的な距離変動速度を表し、\$\psi(t)\$ は相対的な角度変動速度を表す。これを図 14 に示す。

5.4.3 ビーム角の導出

5.4.1 と 5.4.2 にて求めた相対位置ベクトルと相対移動速度ベクトルより、時刻 \$t\$ における端末 A から見た端末 B の相対的なビーム角 \$\Psi\$ を式 (5.7) で求める。\$\tau\$ は A から B に対して、これから送信するパケットの送信に要する通信時間とする。

$$\Psi = \psi(t) \times \tau \quad (5.7)$$

相対速度から求まる角度 \$\psi\$ は単位時間における角度変動であり、通信時間 \$\tau\$ を掛けることにより通信時間当たりの角度変動を表す。式 (5.7) より、通信期間中に必要なビーム幅を

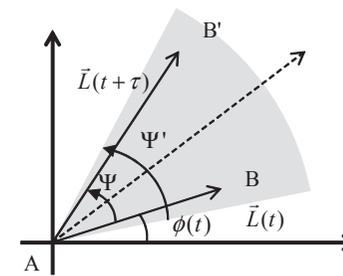


図 15 適応的なビーム幅の決定

求められるが、これにマージン a を加え、次式で A から B へのビーム幅 Ψ'_{AB} を求める。

$$\Psi'_{AB} = \Psi + a \quad (0^\circ < \Psi' \leq 360^\circ) \quad (5.8)$$

以上より、端末 A は端末 B に対して $\phi(t) + \frac{\Psi}{2}$ の方向を中心とし、幅 Ψ'_{AB} のビームを作成する。作成したビームの概念図を図 15 に示す。図 15 では A を原点とした B の相対的な移動関係を表している。B' は通信時間 τ だけ経過したときの B の相対位置である。通信時間 τ 間に、A が形成したビームから B が外れなければ、AB 間の通信は成功する。

5.5 ステップ 2：トラフィックフローからトラフィック割合を求める

トラフィックフローによってビーム幅を決定する方法について 4.6 の考察を元に検討する。トラフィックフローが多いときには、ビーム幅を狭くすることで空間利用効率を向上させる。ここで、端末 A から端末 B への通信を想定する。トラフィック情報は 5.3 の通信履歴テーブルより求める。A と B の通信におけるトラフィックを $f_{A,B}$ と示す。 $f_{A,B}$ は式 (5.9) のようにデータサイズとデータ発生頻度の掛け合わせで定義する。

$$f_{A,B} = \text{Data Size} \times \text{Data Arrival Rate} \quad (5.9)$$

提案方式では、A から B へのトラフィックがネットワーク全体のトラフィックに対して多いときに、トラフィック割合を小さくしてビーム幅を小さくする。その反対のときにはトラフィック割合を大きくする。トラフィック割合は、ネットワーク全体に対する通信端末のトラフィックフローの割合が考えられる。しかし、複数のトラフィックが均一の場合には上記の条件を満たすが、不均一な場合には満たさない。本研究では、トラフィック割合 r は式 (5.10) に定義する。 $\sum_{i \neq j} f_{i,j}$ はネットワーク内の全トラフィックフローを表す。 b はマージンである。

$$r_{AB} = \frac{\frac{1}{f_{A,B}}}{\sum_{i \neq j} \frac{1}{f_{i,j}}} + b \quad (0 < r \leq 1) \quad (5.10)$$

例えば、不均一な 4 つのトラフィックフロー f_1, f_2, f_3, f_4 がそれぞれ 70, 90, 100, 130 (kbps) である場合には、 r_1, r_2, r_3, r_4 は 0.33, 0.26, 0.23, 0.18 となる。

5.6 ステップ 3：ビーム幅角度を求める

最終的に設定するビーム幅 θ は、式 (5.8) によって求めたビーム角 Ψ' と式 (5.10) によって求めたトラフィック割合 r を用いて式 (5.11) のように求める。

$$\theta_{AB} = \Psi'_{AB} \times r_{AB} \quad (0^\circ < \theta \leq 360^\circ) \quad (5.11)$$

5.7 端末の移動ベクトルより求めるアンテナの電力制御

送信端末に対し受信端末が通信範囲外方向に移動する場合には、通信範囲から端末が外れ

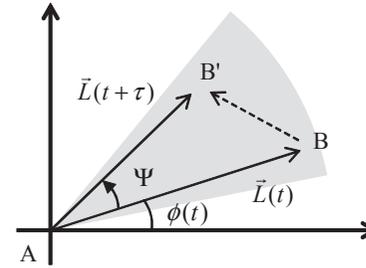


図 16 通信端末同士が近づく場合

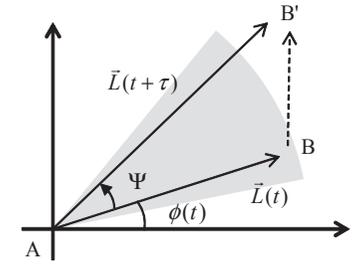


図 17 通信端末同士が遠ざかる場合

やすくなり、通信の失敗が起こりやすい。そこで、送信端末の送信電力を制御することによって通信失敗を抑制する方法を考察する。送信電力制御方法としては、通信中に電力を変化させない Conservative 方式と、通信中においても電力を変化させる Aggressive 方式を提案する。

5.7.1 Conservative 方式

Conservative 方式は、通信時間中は電力の変更を行わず、通信ごとに電力制御する方式である。通信端末の位置が近づく場合と遠ざかる場合の例を図 16 と図 17 に示す。Conservative 方式は通信時間中における通信失敗を防ぐため、 t における相対距離 $|\vec{L}(t)|$ と $t + \tau$ における相対距離 $|\vec{L}(t + \tau)|$ を比較して、大きい方にもとづいて送信電力の計算を行う。したがって、図 16 の場合は $|\vec{L}(t)|$ に合わせた送信電力を設定し、図 17 の場合は $|\vec{L}(t + \tau)|$ に合わせた送信電力を設定する。送信電力 P_t を求める式は、 $|\vec{L}(t)|$ と $|\vec{L}(t + \tau)|$ を用いて次式で計算する。

$$P_t = P(\max(|\vec{L}(t)|, |\vec{L}(t + \tau)|)) \quad (5.12)$$

関数 P は与えられた距離から送信電力を計算し、送信電力を返す関数である。引数として、時刻 t における通信端末の相対距離と時刻 $t + \tau$ における通信端末の相対距離の最大値をとっている。つまり、 τ 期間中に移動をしても、送信端末の通信範囲から受信端末が外れないように電力制御を行う。

5.7.2 Aggressive 方式

Conservative 方式では通信時間 τ において通信の失敗を抑制する方式であった。Aggressive 方式は通信時間中においても連続的に送信電力制御を行う方式である。端末が通信範囲から

遠ざかる場合、すなわち式 (5.4) または式 (5.5) が正の場合には、ビーム幅は足りているが通信範囲から外れやすい。近づく場合、すなわち式 (5.4) または式 (5.5) が負の場合には、通信範囲から外れにくいものの余分な通信範囲によって他の端末の通信と干渉しやすい。したがって、短い期間において連続的に受信端末の移動によって送信電力を調節する方法について検討する。ここで、 $[\tau = n \times \Delta t]$ (n は自然数) を満たす Δt を定義すると、送信電力を増減させる回数は τ 期間に Δt 間隔で n 回である。また、 Δt において、A から B への相対的な距離 $|\vec{L}(t)|$ は $|\vec{L}(t + \Delta t)|$ に変化する。この距離の差 $|\vec{L}_{diff}|$ は、

$$|\vec{L}_{diff}| = |\vec{L}(t + \Delta t)| - |\vec{L}(t)| \quad (5.13)$$

となる。ここで、 $|\vec{L}_{diff}|$ の値が負のときには A に対し B が近づいているので、電力を小さくすることで通信干渉を少なくできる。 $|\vec{L}_{diff}|$ の値が正のときには A に対し B が遠ざかっているため、通信距離を伸ばすために電力を大きくする必要がある。以上より、アンテナ送信電力 P_t を式 (5.14) のように定式化する。また、 H, S は変数であり $0.0 < S < 1.0, 1.0 \leq H$ とする。

$$P_t = \begin{cases} S \times P_t & (|\vec{L}_{diff}| < 0) \\ H \times P_t & (|\vec{L}_{diff}| \geq 0) \end{cases} \quad (5.14)$$

式 (5.14) より、 $|\vec{L}_{diff}| < 0$ のときは、A に対して B が近づく移動をする。そのため、電力を小さくすることにより複数の通信が可能となり空間利用効率が向上する。 $|\vec{L}_{diff}| \geq 0$ のときは、A に対して B が遠ざかる移動をするため、電力を大きくすることで通信範囲内から端末が外れることを防ぐことができる。Aggressive 方式では、通信中においても連続して電力制御を行うため、常に適した電力を割り当てることができる。

6. 性能評価

提案方式による動的な環境における高いスループットの維持を定量的に示すために計算機シミュレータを用いた基礎評価を行う。本稿ではアンテナの電力を一定とするため、5.7 で述べた制御は行わないものとする。評価指標は、端末移動速度に対するスループット性能と、トラフィックフロー数に対するスループット性能とする。共通パラメータは表 1 に従う。その他のパラメータについても 4 章の基礎評価に従う。提案方式のビーム角のマージン a とトラフィック割合のマージン b の値は 0 とする。

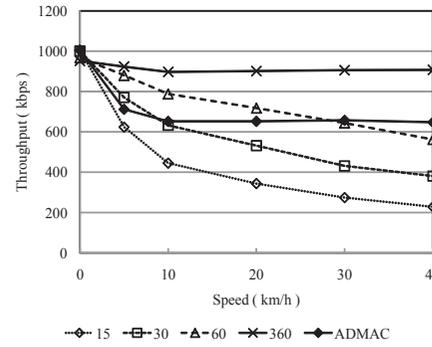


図 18 トラフィックフロー数 1 における各端末速度のスループット

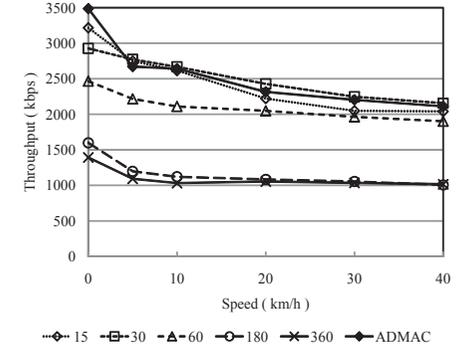


図 19 トラフィックフロー数 5 における各端末速度のスループット

6.1 端末移動速度に対するスループットの性能評価

端末移動速度に対するスループットの性能評価を示す。図 18 にはトラフィックフロー数 1 における各端末速度のスループットを示し、図 19 にはトラフィックフロー数 5 における各端末速度のスループットを示す。横軸は端末移動速度、縦軸はスループットである。図 18 では提案方式 ADMAC は 180° 付近のスループットと近似している。しかし、 360° のビーム幅より、常に 200 kbps 程度低いスループットとなっている。提案方式は 2 端末の相対ベクトルからビーム幅を決定しているため、 180° より大きいビーム幅の選択がなされることはない。したがって、方式として 360° が選択されるように改良が必要となる。図 19 は端末速度が変化しても ADMAC 方式が高いスループットを維持している。したがって、複数フロー数では適応的なビーム幅の決定がなされている。

6.2 トラフィックフローに対するスループットの性能評価

トラフィックフローに対するスループットの性能評価を示す。図 20 には端末速度 0 km/h における各トラフィックフローのスループットを示し、図 21 には端末速度 40 km/h における各トラフィックフローのスループットを示す。横軸はトラフィックフロー数、縦軸はスループットである。図 20 では ADMAC が常に高いスループットを維持している。図 21 では最高のスループットではないものの高いスループットを維持している。したがって、提案方式 ADMAC は適応的にビーム幅の選択が行われている。

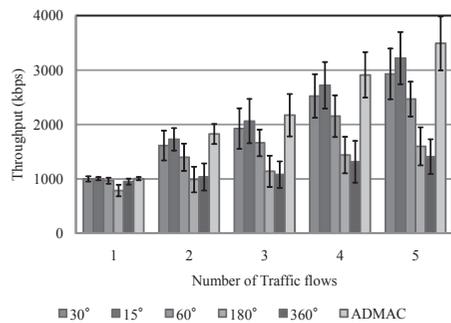


図 20 端末移動速度 0 (km/h) における各トラフィックフローのスループット

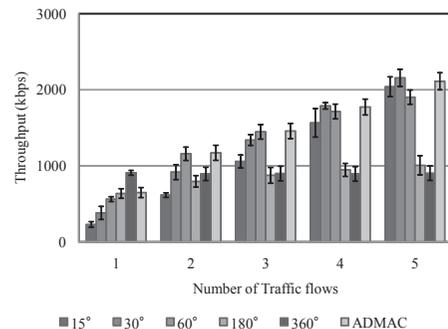


図 21 端末移動速度 40 (km/h) における各トラフィックフローのスループット

6.3 設定ビーム幅の個数

6.1 や 6.2 での性能評価において設定した、各ビーム幅個数をヒストグラムで示す。個数はビーム形成時に集計しているため、計算したビーム幅を設定しているとき以外のビーム幅も集計している。図 22 には端末速度 40km/h、トラフィックフロー数 1 のビーム幅設定回数を示し、図 23 には端末速度 40km/h、トラフィックフロー数 5 のビーム幅設定回数を示す。横軸はビーム幅の角度、縦軸はビーム幅の設定回数である。

図 22 より、140° の設定回数は 180° の 7.2 倍の設定回数となっている。130° 以下の設定回数は疎らであるが、10° のような狭いビーム幅も一定時間に動く距離が少ないときがあ

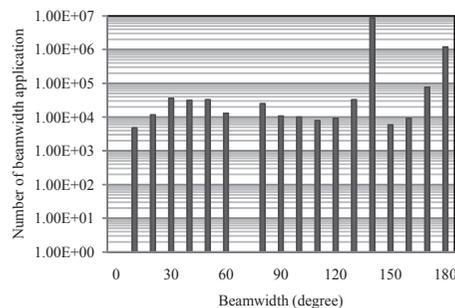


図 22 最高速度 40km/h、トラフィックフロー数 1 における各ビーム幅の設定回数

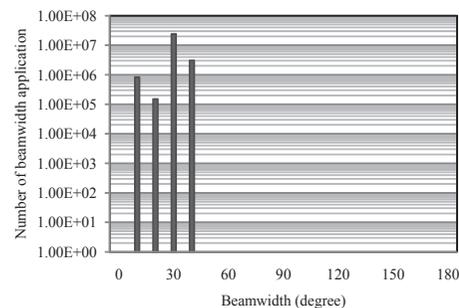


図 23 最高速度 40km/h、トラフィックフロー数 5 における各ビーム幅の設定回数

るので設定される場合がある。トラフィックフロー数が 1 の場合、端末速度が大きく、トラフィックフローが少ないときには広いビーム幅が設定されやすくなっている。図 23 では、50° 以上のビーム幅が設定されていない。端末移動速度は大きいもののトラフィックフローが多く混み合っている状態になっているので、狭いビーム幅の設定がされやすい。

6.4 RTS 送信失敗率

狭いビーム幅における通信失敗は、特に端末が移動している環境では多く発生する。狭いビーム幅を設定してスループットが上がる場合でも、通信失敗が多く発生する場合を知るために、データ通信開始前の RTS 送信の失敗が起きている割合を示す。図 24 にはトラフィックフロー数 1 における各端末移動速度の RTS 送信失敗率を示し、図 25 にはトラフィックフロー数 5 における各端末移動速度の RTS 送信失敗率を示す。横軸が各固定ビーム幅、縦軸が RTS 送信失敗率である。

図 24 より速度が大きくなるにつれ、60° 以下の狭いビーム幅の RTS 失敗率が大きくなり、180° 以上のビーム幅の RTS 失敗率は一定の確率に収束する。速度が大きい場合、狭いビーム幅の設定により、通信範囲内から端末が外れやすく、RTS 通信の失敗が増加する。15° の場合は速度 20 km/h において 8 割の RTS 送信が失敗している。広いビーム幅の設定により、通信範囲内から端末が外れにくく、RTS 通信の失敗が減少する。ADMAC は 6.1 の性能評価同様、180° と同程度の失敗率となり最大 0.4 程度に抑えられている。6.1 において最も高スループットの 360° は RTS 送信失敗が少ないことにより、データ送信の機

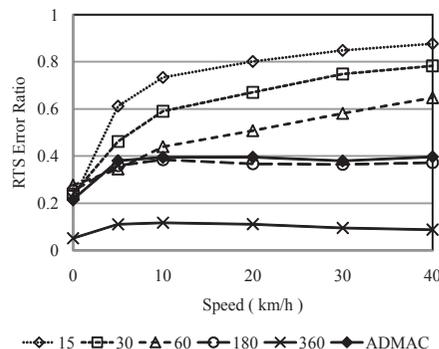


図 24 トラフィック数 1 における各端末移動速度の RTS 失敗率

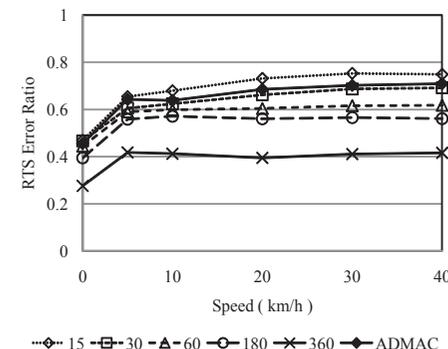


図 25 トラフィック数 5 における各端末移動速度の RTS 失敗率

会が多く得られていると考えられる。

図 25 では、0 km/h から 5 km/h へ移動速度が変化する場合失敗率は大きくなるが、それ以上の速度では一定の確率に収束する。トラフィックフロー数が増加すると、通信範囲内に存在する端末数が大きく変化しないため、角度によって RTS 送信失敗率も大きな変化が見られない。ADMAC は 360° と比較して約 1.7 倍の RTS 失敗が起きている。ADMAC はビーム幅を狭めているので端末移動の影響を受けやすいものの、同時通信数が多いという利点がある。また、360° は RTS 送信失敗が少ないものの、通信端末の通信機会が減少しているため 6.1 においては低スループットとなっている。

6.5 考 察

端末の移動速度と移動方向をもとにビーム角を決定する段階を検討する。2 端末の相対ベクトルを算出してビーム角を求めている。そのため、提案方式は 180° より大きなビーム幅を設定せず、トラフィックフローが少ないときには適したビーム幅を利用できない。そこで、提案方式で 180° より大きなビーム幅を設定する方式が必要となる。

ネットワーク内のトラフィックをもとにトラフィック割合を決定する段階を検討する。ネットワーク内のトラフィックフロー数が多い場合か、注目している端末のトラフィックが大きいときに狭いビーム幅を設定する。しかし、トラフィックフロー数に比例するようにビーム幅が狭くなるため、さらに多くのトラフィックフローが存在する環境において、ビーム幅が狭くなりすぎてしまう可能性がある。6 章の性能評価より、端末が動く環境においてトラフィックフロー数が増えていく場合は、狭いビーム幅のほうがスループットが低くなる結果が得られている。したがって、トラフィック割合算出の際には、空間利用効率と端末の移動性の影響のトレードオフを考慮した定式化をする必要があると考えられる。

7. ま と め

本稿では、まず固定ビーム幅がネットワーク性能、特にネットワークスループットに与える影響を調べるため、ビーム幅の基礎評価を行った。基礎評価より、端末移動速度が小さい場合は、狭いビーム幅を設定することでスループットが向上することがわかった。また、端末移動速度が大きくトラフィックフロー数が少ない場合には、広いビーム幅を設定することでスループットが向上し、一方で、トラフィックフロー数が多い場合には、狭いビーム幅のスループットが向上する傾向にあることがわかった。しかし、速度が大きくなるに伴い、空間利用効率よりも端末の移動による影響が大きくなり、狭いビーム幅と広いビーム幅の性能が逆転することがわかった。基礎評価より動的な環境において高いスループットを維持する

ために、適応的なビーム幅を求める MAC プロトコル ADMAC を提案した。ADMAC は指向性送受信の度に、通信端末の移動から求めるビーム角と、ネットワーク内のトラフィックから求めたトラフィック割合から適応的なビーム幅を求める方式である。性能評価において、特に複数フローにおける高いスループットの維持が実現していることを示した。

今後は、送信電力制御方式のより詳細な検討とシミュレーション評価を行い、実機を用いた実験を行う予定である。

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, pp.2-16 (2004).
- 2) P.H. Lehne and M.Pettersen.: An Overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.2, No.4 (1999).
- 3) J.H. Winters.: Smart Antennas for Wireless Systems, *IEEE Personal Communications*, Vol.5, No.1, pp.23-27 (1998).
- 4) R.R.Choudhury, X.Yang, R.Ramanathan and N.H.Vaidya.: On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.5, No.5, pp. 477-491 (2002).
- 5) R.R.Choudhury and N.Vaidya.: Mac-layer capture: A problem in wireless mesh networks using beamforming antennas, *IEEE SECON*, pp. 401-410 (2007).
- 6) P.Li, Q.Shen, Y.Fang, and H.Zhang.: Power controlled network protocols for Multi-Rate ad hoc networks, *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Vol.8, No.4, pp. 2142-2149 (2009).
- 7) P.Li, X.Geng, and Y.Fang.: An adaptive power controlled MAC protocol for wireless ad hoc networks, *IEEE Transsaction on Wireless Communications*, Vol.8, No.1, pp. 226-233 (2009).
- 8) C.-C.Chen, H.Luo, E.Seo, N.H.Vaidya, and X.Wang.: Rate-adaptive framing for interfered wireless networks, *IEEE INFOCOM*, pp. 1325-1333 (2007).
- 9) A. Kamerman and L. Monteban.: WaveLAN-II: a high-performance Wireless LAN for the Unlicensed Band, *Bell Labs Technical Journal*, Vol.2, No.3, pp. 118-133 (1997).