

## テクニカルノート

# アドホックネットワークにおける指向性アンテナ導入効果のルーティング方式による影響評価

山元景誠<sup>†1</sup> 山本 幹<sup>†2</sup>

本稿では、アドホックネットワークで一部の無線端末に指向性アンテナが導入された状況を対象に、プロアクティブ型/リアクティブ型ルーティングプロトコルによるスループット改善効果の比較を行った。

## Comparative Performance Evaluation of Directional Antenna Deployment for Routing Protocols in Ad Hoc Networks

KAGENARI YAMAMOTO<sup>†1</sup> and MIKI YAMAMOTO<sup>†2</sup>

The paper evaluates performance improvement of ad-hoc networks with partial deployment of directional antenna. It especially evaluates influence of routing protocols, proactive and reactive routing, for throughput performance of ad-hoc networks.

### 1. ま え が き

アドホックネットワーク<sup>1)</sup>は、基地局などのインフラ設備を必要とせず無線端末が2台以上存在すればネットワークを構成できるので、非常に柔軟なネットワーク構成といえる。し

かし、アドホックネットワークの実現に向けては様々な技術課題があり<sup>1)</sup>、その中でもMAC層でRTS/CTSソフトキャリアセンスを行うことにより発生するさらし端末問題は、無線チャンネルの利用効率を低減させるため懸念される。

さらし端末問題の解決手段として端末に指向性アンテナを導入させる方法があり、これまで指向性アンテナ導入下で使用できるMACプロトコルとして多くのものが提案されている<sup>2),3)</sup>。しかし、これらはネットワーク内の全端末が指向性アンテナを導入した状況を仮定している。アドホックネットワークにおいては、端末が自律的にネットワークを構成するという性質から、無指向性アンテナ端末と指向性アンテナ端末が混在する状況が一般的である。このような状況で動作できるMACプロトコルとして、DVCS (Directional Virtual Carrier Sensing)<sup>4)</sup>が提案されており、筆者らはこのDVCSを用いて、指向性アンテナが一部の端末に具備されている状況でのネットワークスループット改善効果をリアクティブ型ルーティングプロトコルを対象に評価した<sup>5)</sup>。

本稿では、同状況においてプロアクティブ型/リアクティブ型ルーティングプロトコルを使用した際のネットワークスループット改善効果を評価し、ルーティングプロトコルの違いによる指向性アンテナ導入効果の考察を行った。

### 2. さ ら し 端 末 問 題 と 指 向 性 ア ン テ ナ

#### 2.1 さ ら し 端 末 問 題

さらし端末問題とは、ある端末が隣接する端末の制御フレームを受信することにより、自身のフレーム伝送が抑制される問題である。

さらし端末S2とは、送信端末S1と受信端末R1が存在した場合に、S1の電波傍受範囲内にはあるがS2の電波は受信端末R1には届かない端末である(図1)。本来、S1→R1とS2→R2のフレーム伝送は各受信端末R1, R2上で衝突を引き起こすことなく同時に通信可能であるにもかかわらず、キャリアセンスによりどちらか一方の通信が不可能となる。このことより無線チャンネルの利用効率が大きく低減される。

#### 2.2 指 向 性 ア ン テ ナ

さらし端末問題を解決する方法の1つに、指向性アンテナを用いたアプローチがある。指向性アンテナを用いることにより、送信端末は隣接端末のさらし端末化を回避し、受信端末と通信が行える。アンテナに指向性を持たせることで同じ空間内での電波干渉範囲を減少させることが可能になり、さらし端末問題の解決が可能である。

<sup>†1</sup> 関西大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kansai University

<sup>†2</sup> 関西大学システム理工学部  
Faculty of Engineering Science, Kansai University

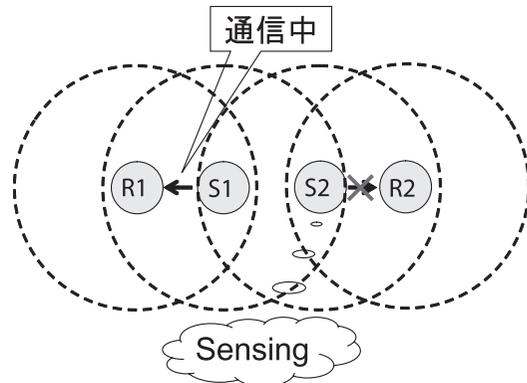


図 1 さらに端末問題  
Fig.1 Exposed terminal problem.

### 3. DVCS (Directional Virtual Carrier Sensing)

本稿では、指向性アンテナと無指向性アンテナの双方が混在する一般的な状況で動作可能な MAC プロトコルである DVCS<sup>4)</sup> を対象とする。DVCS では従来の IEEE 802.11 MAC プロトコルに以下の機能を加えている。

- AOA Caching  
各端末は隣接端末からの信号を受信すると、その電波の到来方向を AOA (Angle Of Arrival) キャッシュに保存する。
- Beam Locking  
各端末は隣接端末からの信号を受信すると、その受信電力の最大方向に指向性アンテナのメインローブをセットする。
- DNAV Setting  
通常の NAV (Network Allocation Vector) に指向性を持たせた DNAV (Directional NAV) を設定する。DNAV は IEEE802.11 DCF で用いられる NAV と同じタイミングで設定され、同一端末において複数 DNAV が同時期に設定可能である。なお、これら複数の DNAV は個々のタイマにより制御される。

DVCS では上記 3 機能の追加以外は、従来の IEEE802.11 DCF と同様の動作を行う。すなわち、端末 A と端末 B が通信を行う際は、以下の手順に従う (図 2 参照)。

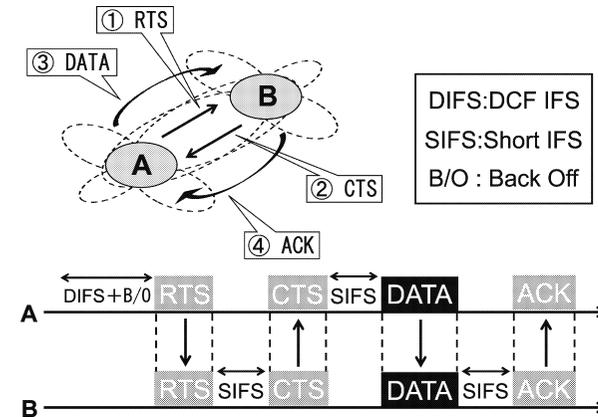


図 2 DVCS でのデータ転送  
Fig. 2 Data transmission using DVCS.

#### 1. RTS 伝送

端末 A が B にデータを送る際、自身の AOA に B の情報が保存されているとその方向に向けて指向性 RTS を送出する。なお、AOA に端末 B の情報がない場合には従来の無指向性アンテナで RTS を送出する。

#### 2. CTS 返送

端末 B が A からの (指向性) RTS を受信すると、この受信電波強度が最大となる方向にアンテナの指向性を向け、CTS を送出する。

#### 3. DATA 送信

端末 B からの指向性 CTS の受信により端末 A は自身の AOA をより正確な方向に訂正し、アンテナの指向性をこれに合わせてうえてデータ転送を行う。

#### 4. ACK 返送

端末 B からの ACK 伝送をもってデータ転送が終了し、アンテナの指向性を解除する。なお、受信側が無指向性アンテナのみを実装している状況では、端末 A の指向性アンテナから送出された RTS に対して、無指向性アンテナでの CTS 送出で応答することで A と B の間の通信が可能となる。つまり、一部の端末が指向性アンテナを導入し、他の端末は無指向性アンテナで従来の IEEE 802.11 DCF を用いている状況に十分対応可能である。

#### 4. 性能評価

本稿では、指向性アンテナを実装している端末の割合を変化させ、それに対するネットワークスループットをプロアクティブ型/リアクティブ型ルーティングプロトコルを使用した状況下で評価した。なお、トランスポート層に UDP を用いた場合について評価を行った。

##### 4.1 シミュレーションモデル

本稿では、アドホックネットワークの指向性アンテナ導入効果について基本特性を評価するため、端末の移動は考慮しない静的アドホックモデルを用いた。

ルーティングプロトコルはプロアクティブ型として STAR<sup>6)</sup>、リアクティブ型として AODV<sup>7)</sup> を用い、ネットワーク内の 40 端末からデータ送受信対をランダムに 8 対選択した。また、シミュレーションフィールドは 1,800 [m] 四方正方形とし、各端末の配置は、シミュレーションフィールドを全端末数のセルに分割し、そのセル内でランダムに 1 端末を配置する均一性を考慮したランダム配置モデルを用いた。シミュレーションにおける他の条件を表 1 に示す。以上の条件下で、10 個の評価トポロジそれぞれに対して Seed を 10 回ずつ変化させ評価を行った。なお、シミュレータとして商用シミュレータ QualNet version3.9 を用いた。

##### 4.2 UDP スループット

図 4 に UDP におけるスループット特性を示す。横軸はシミュレーションフィールド内の全端末数における指向性アンテナを導入した端末の割合を示し、縦軸はネットワークスループット（ただし 1 端末あたりの平均スループット）を示す。なお、図中の各プロット点は、UDP におけるトラフィック負荷を上げた際の飽和スループットを示している。具体的には、図 3 に示すようにネットワーク内のトラフィック負荷を上昇させたときのスループットの飽和点が、ネットワーク全体のスループットを示すと考え、これをネットワークスループットとして定義している。この値をそれぞれの D について求めプロットしたものが図 4 である。なお、図 3 はルーティングプロトコルに AODV を用いた場合の特性であるが、STAR についても同様の方法で図 4 のプロット値を求めている。

図 4 において、STAR, AODV とともに D が増加した際のスループットが増加しているが、STAR はほぼ線形に増加するのに対し、AODV は D が高くなるに従って増加率も上昇している。D が 0.8 未満の範囲では STAR の方が高いスループットを示しており、0.8 以上になると両プロトコルのスループットが逆転しているのが分かる。

図 5 にルーティング制御パケット数を示す。横軸に指向性アンテナ導入率を、縦軸はネッ

表 1 シミュレーション条件  
Table 1 Simulation Parameter.

Number of node	40 Nodes
Traffic model	CBR traffic generation
Omni directional radius	300 m
Directional beamwidth	45-degree
Directional beamlength	390 m
Wireless band	2 Mbps

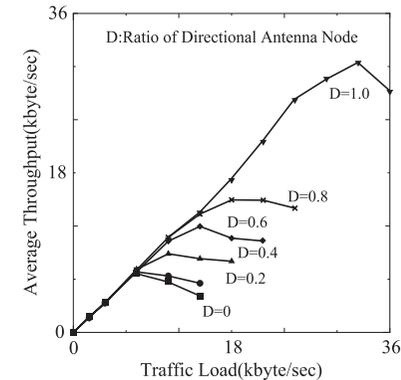


図 3 UDP ネットワークスループット (AODV の場合)  
Fig. 3 UDP network throughput using AODV.

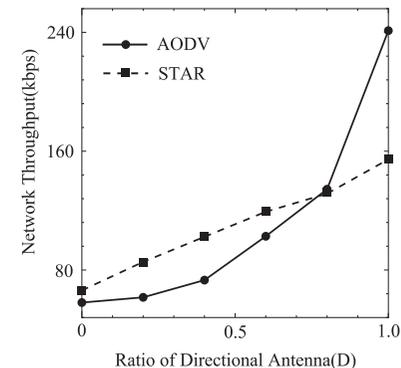


図 4 UDP ネットワークスループット特性  
Fig. 4 UDP network throughput.

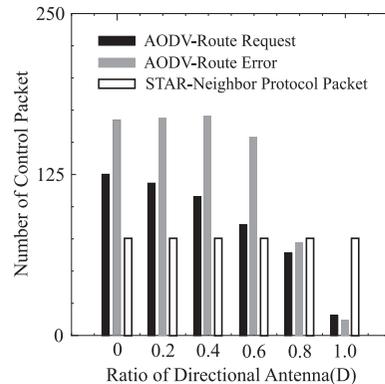


図5 UDP時のルーティング制御パケット数  
Fig. 5 Number of control packet using UDP.

ネットワーク内に送信端末が送信したルーティング制御パケット数をそれぞれ示している。図5より、STARの制御パケット数はDにかかわらずほぼ一定である。それに対し、AODVはDが増加するに従って減少している。Dが0.8未満の範囲ではSTAR < AODV、Dが0.8以上の範囲ではSTAR > AODVとなる。STARは経路構築や更新の際、ルーティング制御パケットをデータ転送の有無にかかわらず定期的にフラッシングする。これに対し、AODVは通信要求が発生した際に経路構築を行い、その経路が無線干渉などで使用不可になるまで経路更新や再構築を行わず、経路が切断されると再構築するために制御パケットを送送する。

ネットワーク内に無指向性アンテナ端末が多い状況では、複数セッションによる電波干渉により経路切断が頻繁に発生するため、再構築のために制御パケット数が増大する。なお、この際の経路切断は、電波干渉により第2層でのフレーム伝送が7回連続して失敗することで起こるものである。一方、指向性アンテナ端末が多い状況では端末間の電波干渉範囲が減少し、その結果経路切断回数が少なくなるため制御パケット数が減少する。ルーティング制御パケット数が少なくなると、その減少分をセグメント送信に有効利用できるため、スループットが増大する。これが、Dが0.8以下の範囲ではSTARのスループットが、Dが0.8より大きい範囲ではAODVのスループットが高くなる理由と考えられる。

## 5. むすび

本稿では、アドホックネットワークでの指向性アンテナ導入率に対するネットワークスループット改善効果を、リアクティブ型(AODV)とプロアクティブ型(STAR)ルーティングプロトコルで比較評価した。UDPスループットにおける評価結果を示し、その結果から、アドホックネットワーク内に指向性アンテナ端末が多くない状況では、定期的に経路を更新することによりつねに最新の経路を使用できるプロアクティブ型ルーティングプロトコル(STAR)を、指向性アンテナ端末が多い状況ではリアクティブ型ルーティングプロトコル(AODV)を使用することが望ましいことを明らかにした。

## 参考文献

- 1) Toh, C.-K.: *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems, 1st Edition*, Pearson Education (2002).
- 2) Takata, M., Nagashima, K. and Watanabe, T.: A Dual Access Mode MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Smart Antennas, *Proc. IEEE ICC'04*, Paris, France, pp.4182-4186 (June 2004).
- 3) Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, *Proc. ACM MOBI-COM'02*, pp.59-70 (Sep. 2002).
- 4) Takai, M., Martin, J., Ren, A. and Bagrodia, R.: Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. ACM MOBIHOC'02*, pp.183-193 (June 2002).
- 5) Yamamoto, K. and Yamamoto, M.: Performance Improvement of Ad Hoc Networks by Deployment of Directional Antenna, *IPSSJ Journal Special Issue on Selected Papers from ICMU 2006*, Vol.48, No.3, pp.2045-2051 (2007).
- 6) Spohn, M. and Beyer, D.: Soutce Tree Adaptive Routing (STAR) Protocol (1999). draft-ietf-manet-star-00.txt
- 7) Perkins, C.E. Royer, E.B. and Das, S.: Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing (2003). draft-ietf-manet-aodv-13.txt

(平成20年2月27日受付)

(平成20年5月8日採録)



山元 景誠

平成 18 年関西大学工学部卒業．平成 20 年同大学大学院工学研究科修了．現在，NTT コムウェア勤務．関西大学在学中は，アドホックネットワークにおける指向性アンテナの性能改善に関する研究に従事．



山本 幹（正会員）

昭和 58 年大阪大学工学部通信工学専攻卒業．昭和 60 年同大学大学院博士前期課程修了．昭和 63 年同博士後期課程修了．同年大阪大学工学部助手．同大学助教授を経て，平成 17 年関西大学工学部教授．マルチキャスト通信，トラヒック制御，次世代インターネットおよびこれらの性能評価に関する研究に従事．平成 7～8 年マサチューセッツ州立大学 Visiting Professor（文部省在外研究員）．平成 14 年電子情報通信学会ネットワークシステム研究専門委員会ネットワークシステム研究賞受賞，平成 17 年情報処理学会 DICOMO 優秀論文賞受賞．工学博士．IEEE，ACM，電子情報通信学会各会員．