

スマートアンテナを用いるアドホックネットワークの さらし端末問題への対処法について

河村 直哉[†] 萬代 雅希^{*} 渡辺 尚^{**}

[†]静岡大学大学院情報学研究所 ^{*}静岡大学情報学部 ^{**}静岡大学創造科学技術大学院

あらまし アドホックネットワークはその場に存在する端末のみで構成され、固定インフラに依存することなく自律分散的にネットワークを構築する。また特定の方位のみ送受信可能なスマートアンテナの登場により、ネットワーク性能が飛躍的に向上した。しかし、MAC 層においては他局宛の不要なパケットを受信するために自身の効率的な通信が妨げられる指向性さらし端末問題が発生する。そこで本稿では MAC 層に干渉波抑制方式を採用した場合の考察をし、指向性さらし端末問題を解決するためのオンデマンド型ルーティングプロトコルである LORA (Lower interference Routing protocol for Ad hoc networks using smart antennas) を提案し、性能評価を行う。LORA は MAC 層に干渉波抑制方式を採用し、さらにネットワーク層で独自に定義したルートコストをメトリックに干渉避けるルート構築を行う。計算機シミュレーションによる性能評価により既存方式の比較し、提案方式はルート間干渉の影響を受けにくいデータ通信が可能であることを示す。

On the Improvement for Exposed Terminal Problem in Ad Hoc Networks using Smart Antennas

Naoya KOHMURA[†] Masaki BANDAI^{*} and Takashi WATANABE^{**}

[†]Graduate school of informatics, Shizuoka University

^{*}Faculty of informatics, Shizuoka University ^{**}Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

Abstract In recent years, ad hoc networks have attracted a significant amount of attention. Smart antennas have great potential such as higher spatial reuse and range extension and can improve the network capacity in wireless ad hoc network. However new problems occur in MAC protocols with smart antennas. One of the problems is directional exposed terminal problem. Due to the interference from other communication, channel utilization degrades. In this paper, we propose an on-demand routing protocol called LORA (Lower interference Routing protocol for Ad hoc networks using smart antennas). Simulation results show LORA outperforms the conventional method to establish the lower interference routes.

1. はじめに

現在 IEEE 802.11 [1], Bluetooth 等に代表される近距離無線通信技術の進歩に伴い、無線アドホックネットワークが注目されている。無線アドホックネットワークでは、無線移動端末が特定の基地局に依存することなく自律分散的にネットワークを構築し、直接相互通信が可能になる。災害時の復旧活動等の緊急時通信やインフラ構築が困難な域内におけるの簡易なネットワーク構築の手段としての運用が期待されている。近年はアンテナの指向性を電氣的に制御可能なスマートアンテナが提案され、スマートアンテナの利用を仮定したプロトコルの開発が進められている。スマートアンテナを利用することで、同時通信数の増加・通信距離の拡張等により、ネットワーク性能の向上を図れることが報告されている。しかしスマートアンテナを用いたプロトコル開発においては MAC (Medium Access Control) 層において指向性さらし端末問題が生じ、他

通信による干渉によりプロトコルの性能は悪化する。そこで本稿では、指向性さらし端末を回避するルーティングプロトコルを提案し、計算機シミュレータにより既存方式と比較する。

2. 指向性さらし端末問題

図 1 に MAC 層における各通信エラー要因の割合を示す。ここでは、指向性 MAC プロトコルとして代表的な DMAC [2] を考える。図 1 の結果はシミュレーション評価によるもので、1500×1500 の空間に 100 個の端末をランダムに配置し、5 つのフローをランダムに設定する。ルートは DSR [13] によって求める。その他パラメータは 5.1 節の表 1 に示すとおりである。図 1 に示す各通信エラー要因は以下の通り定義する。

MAC 層における各通信エラー要因

- **D-ETP (Directional Exposed Terminal Problem)** : 指向性さらし端末問題

(下記の条件の OR をとる)

- ・ 他局宛パケット受信時, 自局発の通信不可
- ・ 他局宛パケット受信時, 自局宛の受信不可
- **D-HTP (Directional Hidden Terminal Problem)**: 指向性隠れ端末問題 [3,4]
指向性/無指向性利得の差異による隠れ端末問題
- **Deafness** [5-7]
受信者が他局宛と他方向に通信中, 送信者のパケット受信不可
- **RTS Collision, CTS Collision**
RTS/CTS 制御パケットの衝突
- **DNAV blocking**
RTS 受信後, 送信元方向に DNAV 設定による CTS 応答不可

図 1 から MAC 層における通信失敗の割合が D-HTP と Deafness が全体の 7 割から 8 割を占めており, 2 大要因となっていることがわかる。

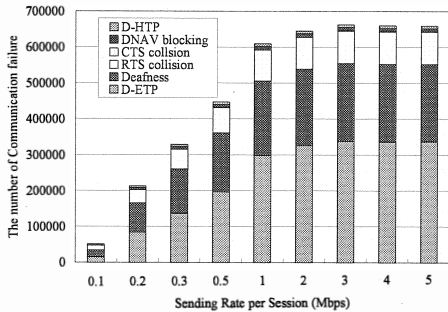


図 1 DMAC における通信エラー要因の割合

IEEE 802.11 等の一般的な無線通信のプロトコルでは, 物理層は受信したすべての信号を復号して上位層へ渡し, 上位層において他局宛の信号は廃棄される。結果として, 端末は不要な信号の復号処理により, 自身の通信が遮られるため, 無線資源が有効活用されない問題がある。

図 2 に指向性さらし端末問題が発生する状況の例を示す。図 2 において, 端末 A が端末 B へ, 端末 C が端末 D へそれぞれデータを送信すると仮定する。既存方式の DMAC のようなすべてのフレームが指向性の送受信が行われるプロトコルを使用した場合, 端末 A が端末 C より先に送信を開始すると, 端末 A の送信範囲内に存在する端末 D はこのパケットを受信する。これは受信待機状態時に無指向性で待機していることに起因する。端末 D は本来不必要な端末 A からの信号にさらされ続けることになり, 端末 C からの信号を正しく受信することができない。また, 端末 A からの信号にさらされている端末 D が端末 C 宛のデータを保持している場合, 端末 A からの信号が終了するまでは端末 D は自身の送信を延期しなければならない。端末 C が最初に送信開始した場合も端末 B がさらされる状態に陥り, 同様の問題が発生する。ゆえにこのケースにおいては 2 つのフローは同時に実行することが不可能である。

DMAC で採用されている DVCS (Directional Virtual Carrier Sensing) [9] は, 制御信号を受信した端末に制御信号送信端末方向への送信開始を延期させる方式で, 隠れ端末対策として効果的な方式であるが, 指向性さらし端末問題を回避する目的で設計されていないため, この問題に対しての解決策にならない。

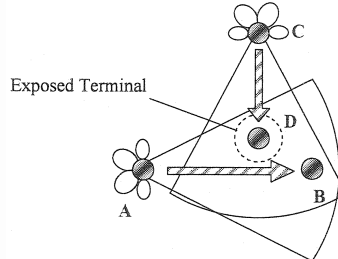


図 2 指向性さらし端末問題の例

3. 関連研究

本章では指向性さらし端末問題を回避する既存研究について述べる。MAC 層における解決策として IS (Interference Suppression) 方式を, MAC 層とルーティング層のクロスレイヤでの解決法として CaDMAC + CaRP について概説する。

3.1. IS (Interference Suppression)

[10] では MAC 層での指向性さらし端末問題の解決法を提案している。指向性さらし端末問題の発生は, 受信待機状態時に無指向性で待機していることに起因する。そこで, 自身宛でない制御信号 (RTS/CTS) を受信後, その信号を干渉波とみなし, 制御信号のヘッダに記載された duration の期間, その信号を受信しないように物理層に指示する方式を提案している。

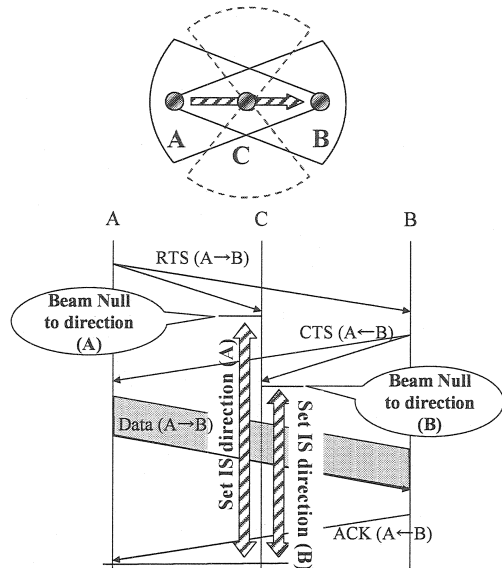


図 3 IS の動作例

図3にISの動作の流れを示す。図3において、端末Aから制御パケット(RTS)を受信した端末Cは端末A方向(direction(A))は干渉波とみなし、物理層にその方向から受信しないように指示をすることで、破線に示すような受信待機状態をとる。端末BからCTSを受信した場合も端末Cは同等の動作をとる。なお、[5]は方式提案のみで評価がなされていないため、本稿では基礎評価としてIS方式の計算機シミュレーションによる評価を5.1節で行う。

3.2. CaDMAC + CaRP

MAC層とルーティング層のクロスレイヤによる解決法として[8]ではCaDMAC(Capture-aware DMAC)、CaRP(Capture-aware Routing Protocol)を提案している。この方式では全端末はクロック同期することを仮定している。CaDMACでは干渉波学習期間と干渉波抑制の期間を設け、干渉波学習期間では全端末が干渉波をモニタリングする。一定期間DMACと同様に振る舞い、干渉状況をトレーニングする。次に干渉波抑制期間で、全端末はトレーニングした情報をもとに一齐に干渉波方向からの受信をしないように物理層に指示をする。

CaRPはDSR[12]をベースとし、以下の3つルートメトリックによりルートを構築する。これら3つのメトリックに重み付けをし、コストが低いルートが選択される。

1. 干渉波学習期間にてトレーニングした干渉度合のルート上の合計値
2. 端末のルートの中継数
3. ホップ数

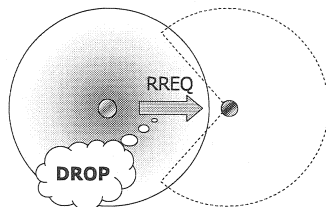


図4 干渉波抑制によるパケットドロップ

CaDMAC + CaRPは無線メッシュネットワークを想定して設計されている。そのため端末が移動するMANET(Mobile Ad hoc Network)にそのままでは適用困難である。また、全ての端末が同期して動作し干渉波抑制期間に一齐に制御する方式は、干渉波抑制期間に必ずしも干渉波が発生するとは限らず、図4に示すように破線のような干渉波抑制制御のために本来受信すべき信号(RREQ)を受信できない場合がある。CaRPのルート構築要求RREQが干渉波抑制期間内に発生した場合、本来到達するはずのRREQが到達せずルートが構築されない可能性がある。仮にルートが構築されても最適ではないルートが構築されMAC層で干渉波抑制がルート構築に影響を及ぼす。ルート構築に失敗した場合、CaRPは干渉波抑制が解除される次の干渉波学習期間まで待機し、再度RREQを送信するため、ルート構築遅延が増大する。このように、適切な干渉波抑制制御をしなければ、ルート構築遅延増大、また

は適したルートであってもみすみす逃してしまう可能性がある。干渉波を抑制しつつ、ルート構築に影響を及ぼさないようなプロトコル設計が必要である。

4. 提案方式：LORA

ルート間干渉による指向性さらし端末問題を解決するため、本稿ではオンデマンドルーティングプロトコルLORA(Lower interference Routing protocol for Ad hoc network using smart antennas)を提案する。LORAは各端末がビーム数Mのスイッチアンテナを搭載していることを前提とする。また、MAC層に3.1節のISの使用を想定し、MAC層における干渉波を最大限抑制する。提案する方式は、DSRをベースとしたルーティング方式である。DDSRと比較し、後述するルートコストをメトリックすることで干渉を避けるルート構築を行い、高スループット、低遅延を実現する。LORAは以下のフェーズから構成される。

I. 近隣端末発見フェーズ

II. ルート構築フェーズ

次の節ではこれら2つのフェーズの詳細を述べる。

4.1. 近隣端末発見フェーズ

LORAでは各端末は定期的にHelloパケット交換を行い、近隣端末の位置情報を認識する。各端末がセクタテーブルを管理し、Helloパケットにより得られた位置情報を元にセクタ毎の端末数を把握する。

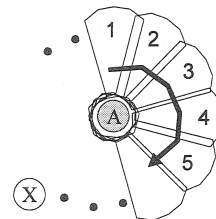
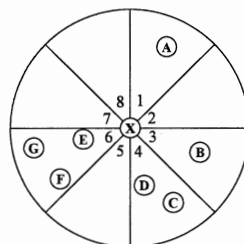


図5 Helloパケット指向性巡回送信



X's sector table	
Sector No.	ID
1	A
3	B
4	C, D
6	E, F, G

図6 セクタテーブルの例

図5において各端末は定期的に指向性巡回によってHelloパケットを送信する。Helloパケットには自身のID、位置情報を記載する。端末AからHelloパケットを受信した端末XはHelloパケット内の位置情報を読み取り、端末Aが存在するセクタを把握し、自身の管理するセクタテーブルを更新する。Helloパケット交換後の端末Xのセクタテーブルの例を図6に示す。定期的にHelloパケット交換することにより、端末のモビリティにも対応する。近隣端末フェーズにより得られたテーブル情報はルート構築に利用する。

4.2. ルート構築フェーズ

LORAは他ルート間の干渉を回避するルート構築をする。DDSRをベースとし、中継端末・宛先にて以下に定義するルート上の $Cost_{[Route]}$ をRREQ転送またはRREP返信の際の条件に用いる。以下にRREQ転送アルゴリズムの詳細について述べる。

4.2.1. RREQ 転送アルゴリズム

RREQを受信した中継端末は自身が宛先でない場合、次の①と②の条件のどちらも満たす場合指向性巡回にてRREQを転送する。条件を満たさない場合、RREQを破棄する。

- ① RREQのホップ数がTTL以下
- ② RREQのコストがキャッシュしたルートコスト以下

①の条件はホップ数が過度になるルート構築を防ぐためである。②の条件におけるルートのコストを以下に定義する。

$$Cost_{[Route]} = \alpha * C + \beta * I + \gamma * H \quad (1)$$

$$C = \sum_{i \in R} C_i \quad (2)$$

$$I = \sum_{i \in R} I_i \quad (3)$$

$$H = \sum_{i \in R} H_i \quad (4)$$

$Cost_{[Route]}$ は(2)から(4)に示す各リンク毎のメトリックを送信元からのルート上の合計値である。(2)式の C は各リンクのさらし端末の数である。各端末は近隣端末発見フェーズにおいて近隣端末の位置情報をセクタごとのテーブルにて管理する。RREQ転送の際、各端末はそのセクタに存在する端末数の合計を計算する。

(i: 各リンク, R: ルート) I はルート中継数で、自身が中継しているルート数をカウントする。最後に H は送信元からのホップ数である。各端末は過去に到着した同宛先のRREQのコストを保持しており、後に到着したRREQのコストを比較し、現在のルートのほうがコストが低いと判断した場合、RREQを転送する。中継端末はRREQを中継する際、これら3つのメトリックをヘッダに記載し転送する。転送する際は指向性巡回送信にて転送するが、過度のRREQ転送とルート構築遅延を防ぐために、近隣端末が存在しないセクタとDNAVが設定されているセクタには転送は行わない。なお、(1)式における各メトリックの重み付けは今後検討するものとする。

RREQを受信した宛先端末は、最初にRREQが到着してから一定期間 T 待機する。期間 T の間に(1)式で示すコスト最も低いものをルートとして採用する。

既存のDSRでは過度のRREQ転送によるブロードキャストストーム問題に対応するため、シーケンス番号の管理により同シーケンス番号のRREQが到着した場合は破棄をし、最も早く宛先に到着したルートを採用する。しかし、指向性ルーティングでは中継端末だけでなく、ルート方向によっては干渉が抑えられるル

ートを構築できる可能性がある。必ずしも最短ホップのルートが最良ルートとは限らないため、LORAではシーケンス番号による転送可否の操作は行わない。

4.3. ルート構築例

前節のルート構築フェーズで構築されるルートの例を示す(図7)。送信元(Source)でデータが発生すると、宛先(Destination)に向けてRREQのフラッディングを開始する。RREQを受信した端末はそれぞれ(1)式のコスト計算をし、過去ルートコストと比較しながら転送を行う。転送を繰り返し、宛先に最初のRREQが到着してから期間 T が経過し、ルート1{Source-B-E-Destination}とルート2{Source-H-I-J-Destination}の2ルートがルート候補として挙がったとする。ここで宛先は(1)式のルートメトリックを計算する。なお、ここでは簡単のため、(1)式の重み付けはすべて等しいものとする($\alpha = \beta = \gamma = 1$)。ルート1のコスト $Cost_{[Route1]} = (2+3+1) + (0+0+0) + 3 = 9$ 、一方ルート2のコスト $Cost_{[Route2]} = (1+1+1+1) + (0+0+0+0) + 4 = 8$ となり、ルート2がルート1よりコストが低いと判断され、宛先はルート2を採用する。その後のRREP返答等は既存のDDSRと同等である。

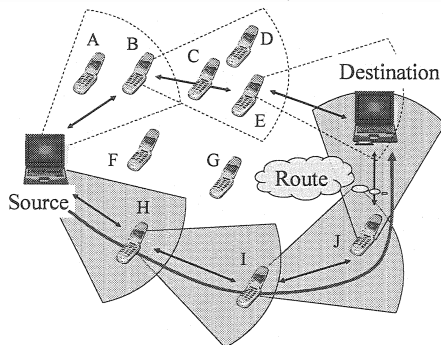


図7 ルート構築例

5. 性能評価

本稿では計算機シミュレータを用いて評価を行う。

5.1節では提案方式で採用するMAC層であるISの基礎評価、5.2節ではグリッドボロジにおいて送信元と宛先を固定で与えルートをDDSRが採用する最短ホップルートとLORAが採用するコストによるルートを固定で与えた場合の評価を行う。

5.1. 評価1

本章ではMAC層での干渉波抑制方式IS方式の基礎評価を行う。[10]では方式の提案のみで性能評価がなされていないため、本章にてMACの干渉波抑制効果を定量的に示す。評価トポロジを図8に示す。図8において通信フローを2フロー仮定する。端末Aは端末Bを経由し端末Cと通信する。もう一方は端末Eが端末Fを経由し端末Gと通信する。ルートは固定で設定しパケットは各端末においてポアソン分布によって発生させる。その他シミュレーションパラメータは表1に示すとおりである。評価対象はDMAC、ISで、スループット特性により両者を比較する。なお、シミュレ

ーションは各点につき 10 回試行し、その平均を計算した。データ負荷に対するスループット特性を図 9 に示す。

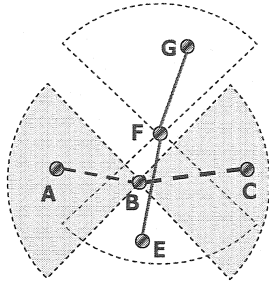


図 8 評価トポロジ(1)

表 1 シミュレーションパラメータ

シミュレーション時間	300 s
送信範囲	500 m
物理層	IEEE 802.11 b (11 Mbps)
MAC 層	DMAC, IS
モビリティ	なし
フロー	CBR フロー
ビーム数	8 (ビーム幅:45 度)

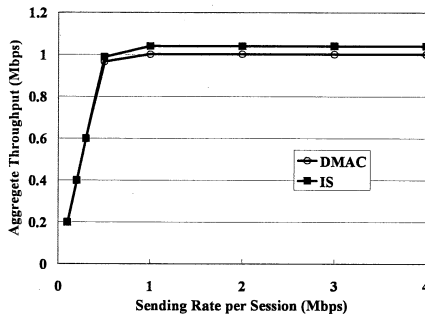


図 9 スループット特性 1

図 9 から負荷が低いときはほぼ同等の性能を示しているが、負荷が 0.5 Mbps のときから IS が高い値を示し、その後は両者とも一定を保っている。IS は DMAC と比較して他ルートからの干渉を MAC 層において適切な期間抑制したことによる効果が得られていると考えられる。本評価は通信フローを 2 フローと仮定し、各フローが直線的になるように設定した。その結果 IS は確かにリンクレベルの 1hop 近隣端末から干渉波を抑制することができるが、2hop 近隣からの通信を遮断してしまうことで、本来受信すべき 1hop 近隣からの通信が受信できない可能性があり、それが影響し IS の効果が結果としてそれほど現れなかったのではないかと考えられる。このように IS はリンクレベルでは干渉波を制御できるが、複数ルートが同一端末を中継する際には受信ができなくなる可能性があるため、同一端末を中継するルート構築を回避する必要がある。

5.2. 評価 2

本章ではグリッドトポロジでの評価を行う。5×5 の

グリッドトポロジに 250 m 間隔で 25 端末を配置する。通信フローは 4 フローを仮定し、送信元と宛先の組み合わせは図 10 に示すように固定とする (R1[S1,D1], R2[S2, D2], R3[S3,D3], R4[S4,D4])。本評価では送信元と宛先の組み合わせをグリッドの端に配置し、ルート間干渉が発生しやすい環境下における LORA の性能評価を行う。なお、各セッションのルートは比較対象 DDSR が選択するルート、LORA が選択するルートとしてあらかじめ固定で与える。データ負荷を変化させた場合のスループット特性と End to End 遅延を評価項目とし、MAC に DMAC と IS を使用した場合の DDSR と LORA を比較する。

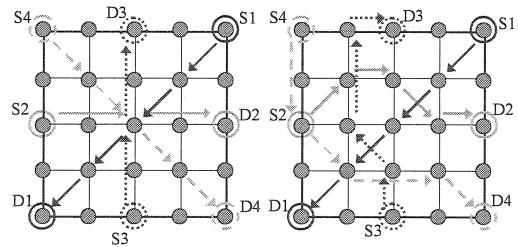


図 10 DDSR(左)と LORA(右)の固定ルート

はじめにスループット特性 (Aggregate Throughput) の評価について述べる。図 11 は DDSR と LORA におけるスループット特性を示す。LORA は各負荷において最短ホップルートである DDSR より高い値を得ることを示している。特に負荷が 1Mbps 以降は 90% の改善を示している。これは DDSR がグリッドの中央の端末ボトルネックとなり負荷が集中しているのに対し、LORA はホップ数が多くなっても干渉を回避するルートを構築することで高スループットを得ることができている。また MAC 層に目を向けると LORA では IS のほうが DMAC よりも高性能である。これは IS が他ルートからの干渉波抑制による効果が得られていると考えられる。

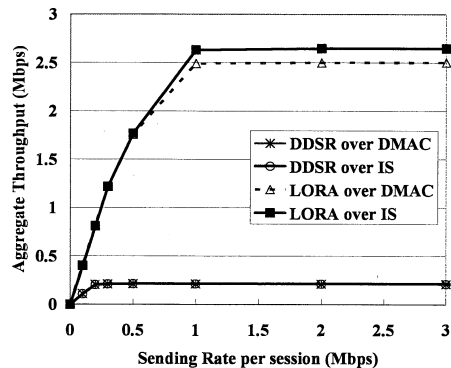


図 11 スループット特性 2

次にエンドツーエンド遅延 (End to End Delay) について述べる。図 12 に全フローの平均のエンドツーエンド遅延の結果を示す。DDSR は DMAC, IS とともに 1

Mbps まで増加し続け高い値を示しているのに対し、LORA は DMAC, IS ともに低遅延であることを示している。DDSR は前述のように特定の端末に負荷が集中することで各フローが待機せざるを得ないのに対し、LORA は DDSR より平均ホップ数が多くなるルートを選択するが、同一中継端末となるさらに端末を回避することにより各フローがスムーズに流れていると考えられる。

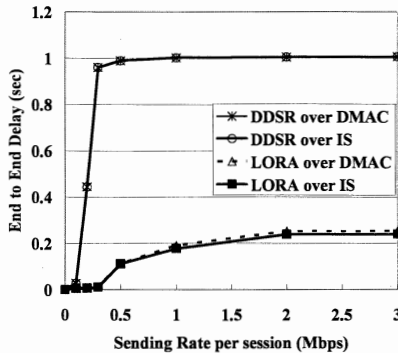


図 12 エンドツーエンド遅延

6. 考察

本章では LORA の今後検討すべき項目について述べる。はじめに LORA では RREQ 転送の際、シーケンス番号管理による転送の可否の判断を行わないことによるブロードキャストストーム問題に対応しなければならない。そのため 4.2.1 節にて定義したルートコストをメトリックにコストが高い RREQ は破棄していたが、転送する RREQ はビーム数だけ増加する。そこで過去に得られたコストを元に次に転送すべき RREQ の方向をテーブルで管理することが必要になるが、いかに制御するかは今後の課題である。

また、5.2 節の評価において LORA はルート中継が低い端末を選択しルートを構築した。DDSR が採用したルートのように特定の端末に負荷が集中することを避けるため、4.2.1 節のコスト計算における β の重み付けを大きくすることで回避できると考えられる。

7. まとめ

本稿ではスマートアンテナを用いたアドホックネットワークで発生する指向性さらし端末問題を回避するためのルーティングプロトコル LORA を提案し、計算機シミュレーションを用いた基礎評価を行った。LORA は独自に定義したルートコストをメトリックにルート間干渉の影響の少ないルート構築を行う。MAC 層には干渉波を抑制する IS の使用を想定し、ルート間干渉を軽減させる。

本稿では IS の基礎評価及び、グリッドトポロジにおいて各フローの発生レートを変化させたときのスループットとエンドツーエンド遅延について、最短ホップルートを構築する DDSR を比較対象として計算機シミュレーションによる評価を行った。シミュレーション結果から LORA が独自に定義したルートコストを元に低コストのルートを選択することができれば DDSR と比較し、指向性さらし端末問題回避による高スループ

ット、低遅延で実現可能であることを示した。今後の課題は過度な RREQ 転送の抑制、ルートメトリックの重み付け考察、さらにモビリティに対する改良と評価を行う予定である。

参考文献

- [1] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," 1999.
- [2] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan and N.H. Vaidya, "Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks," *ACM Mobile computing and Network (MobiCom)*, Sep. 2002.
- [3] M. Sekido, M. Takata, M. Bandai and T. Watanabe, "A Directional Hidden Terminal Problem in Ad Hoc Network MAC Protocols with Smart Antenna and its Solutions," *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM2005)*, Nov. 2005.
- [4] 小松裕也, 萬代雅希, 渡辺尚, "指向性アンテナを使用したアドホックネットワークルーティングについて," 情報処理学会マルチメディア, 分散, 強調とモバイル (DICO2008) シンポジウム, pp. 876-883, 2008 年 7 月.
- [5] Masanori Takata, Masaki Bandai and Takashi Watanabe, "A Receiver-Initiated Directional MAC Protocol for Handling Deafness in Ad Hoc Networks," *IEEE International Conference on Communications (ICC 2006)*, pp. 4089-4095, June 2006.
- [6] Masanori Takata, Masaki Bandai and Takashi Watanabe, "A MAC Protocol with Directional Antennas for Deafness Avoidance in Ad Hoc Networks," *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2007)*, Nov. 2007.
- [7] 河村直哉, 高田昌忠, 萬代雅希, 渡辺尚, "指向性 MAC プロトコルの Deafness に関する実験について," 情報処理学会研究会報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2007-MBL-40, pp. 61-68, 2007 年 2 月.
- [8] R. R. Choudhury, and N.H. Vaidya, "MAC-Layer Capture: A Problem in Wireless Mesh Networks using Beamforming Antennas," *Proc. IEEE SECON*, June 2007.
- [9] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, and A. Ren, "Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks," *Proc. ACM MobiHoc*, June 2002, pp. 39-46.
- [10] M. Takata, M. Bandai and T. Watanabe, "Performance Analysis of a Directional MAC Protocol for Location Information Staleness in MANETs," *IPSJ (Information Processing Society of Japan) Journal*, Vol. 46, No. 11, pp. 2623-2632, Nov. 2005, also in *IPSJ Digital Courier*, Vol. 1, pp. 518-527, Nov. 2005.
- [11] R. R. Choudhury and N. H. Vaidya, "Impact of Directional Antennas on Ad Hoc Routing," *Proc. IEEE PWC*, pp. 590-600, Sept. 2003.
- [12] D. Johnson, Y. Hu and D. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," *IETF RFC 4728*, Feb. 2007.