

片方向リンクが存在するアドホックネットワークにおけるルーティング方式の提案と検討

福井 裕介[†] 萬代 雅希^{††} 渡辺 尚^{†††}

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るため、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。これまでのプロトコルは、全端末同様の送信電力で送信を行うことが前提となっているものが多い。しかし実際の環境では、各端末の送信電力つまり送信範囲が不均一な場合が多い。そのため全端末の性能が同一であるという前提のもと考案されたプロトコルは、送信範囲が不均一な端末が混在する環境下において性能が悪化するという問題がある。本研究では、送信範囲が不均一な環境下で起こる片方向リンクによる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 LEX-R (Least EXposed Routing to avoid unidirectional links) の提案を行う。LEX-R では片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を避けるルート構築を行い、双方向リンクのみのルート構築を行う。これにより、片方向リンクによる隠れ端末問題をルーティングレベルで解決する。その結果、送信範囲が多様なネットワークにおいて高スループットを実現する。計算機シミュレーションによってエンドツーエンドのスループットを評価し、典型的なルーティングプロトコルである AODV-BL と比較し片方向リンク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。

A Routing Algorithm in Wireless Ad Hoc Networks with Unidirectional Links

YUSUKE FUKUI,[†] MASAKI BANDAI^{††} and TAKASHI WATANABE^{†††}

In recent years, ad hoc networks have attracted a significant amount of attention, and various protocols are proposed. Although extensive studies have been provided in ad hoc networks, most of the studies assume that the nodes are homogeneous about transmission power. However, in a real situation, transmission range are heterogeneous due to remaining amount of battery. In this reason, performances of many previous protocols that are proposed based on the homogeneous assumption deteriorate in power heterogeneous ad hoc networks. This paper, especially we focus on the problems due to unidirectional links in this environment, and we propose an on-demand protocol called LEX-R (Least EXposed Routing to avoid unidirectional links). LEX-R avoids the interference from unidirectional links to establish routes with bidirectional links only. It solves the hidden terminal problems occurred by unidirectional links and improves the throughput in power heterogeneous network. We show via simulations that, especially, LEX-R outperforms AODV-BL with regard to end-to-end throughput.

1. はじめに

現在固定インフラに依存することなく、端末が自律分散的にネットワークを構築するアドホックネットワークが各所で研究されている。これまで提案されてきたプロトコルは、全端末同様の送信電力で送信を行うこ

とが前提となっているものが多い。しかしながら実際の環境では各端末の電力消費量は一定ではなく、各端末のバッテリー容量が異なる。また Medium Access Control 層 (MAC 層) では、電力消費の低減を図るため送信電力を制御する MAC プロトコルが存在する。このことから、各端末の送信電力が不均一な環境が想定される。送信電力の不均一化は送信範囲の相違を引き起こし、これによって片方向リンクが生じる。片方向リンクとは送信電力の大きい端末 (以下高送信電力端末) からの信号は到達可能であるが、一方で送信電力が小さい端末 (以下低送信電力端末) からの信号は到達不可能であるリンクのことをいう (図 1)。図中

[†] 静岡大学大学院情報学研究科

Graduate School of Information, Shizuoka University

^{††} 静岡大学情報学部

Faculty of Information, Shizuoka University

^{†††} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

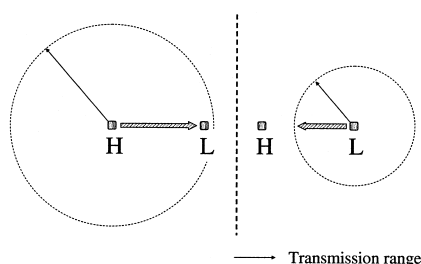


図 1 片方向リンク

Fig. 1 Unidirectional link.

の破線の円は各端末の送信範囲を表す。H を高送信電力端末、L を低送信電力端末とする。この例では H から L への信号は到達可能であるが、逆は不可能である。この片方向リンクがネットワーク上に多く発生することで、ネットワーク層、MAC 層に及ぼす影響が大きくスループットが低下する。

アドホックネットワークにおけるオンデマンド型ルーティングプロトコルは、送信元でデータが発生すると、宛先までの経路発見をするために Route Request (RREQ) をネットワーク全体にフラッディングする。RREQ を受信した端末は、自身が宛先でない場合同様に RREQ をフォワーディングする。一方で宛先が RREQ を受信すると、RREQ がたどってきたルート経由で Route Reply (RREP) を送信元へ返送する。しかし RREQ がたどってきた経路上に片方向リンクが存在することで、送信元に対して RREP が返送されない。そこで送信元は再度 RREQ をフラッディングし、ルート探索を行う必要があり、ルート探索にかかるオーバーヘッドが増大する。また MAC 層においてユニキャスト通信を行う場合においても片方向リンクによる問題が生じる。チャネルの競合を防ぐ目的で RTS-CTS (RTS: Request To Send, CTS: Clear To Send) 制御メッセージを利用する MAC プロトコルは、データ通信開始前に宛先と制御メッセージ (RTS, CTS) 交換を行う。制御メッセージ交換により近隣端末からの通信干渉を抑制し、隠れ端末による干渉を抑制する。しかし、片方向リンクが存在することで、低送信電力端末からの制御メッセージを受信できない高送信電力端末が隠れ端末となり、低送信電力端末が行っている通信を干渉する可能性があり、これによりネットワーク全体のスループットが低下する。

つまり送信範囲が異なる端末が混在する環境においては片方向リンクが存在し、ネットワーク層でルートが容易に構築されないことによる、ルート再構築にかかるオーバーヘッドの増加、また MAC 層において片方向リンクによって生じる隠れ端末問題によるスルー

プットの低下が問題となる。

そこで本論文では上記の問題点を解決する、オンデマンドルーティングプロトコル LEX-R (Least EXposed Routing to avoid unidirectional links) の提案を行う。LEX-R では片方向リンクによる隠れ端末から通信干渉を受けやすい端末が RREQ を破棄し、データ通信が行われるルートから排除され、通信干渉の少ない端末のみを経由するルート構築を行う。また双方向リンクのみのルート構築を行い、ルート探索にかかるオーバーヘッドを低減させる。本論文では提案した LEX-R を計算機シミュレーションを用いて性能評価を行いその有効性を典型的なオンデマンドルーティングプロトコルである AODV-BL²⁾ と比較し検討する。

2. 関連研究

現在までに片方向リンクに特化したプロトコルがいくつか提案されている^{2)~7)}。ここではネットワーク層でのルート再構築にかかるオーバーヘッドの増加に対処するルーティングプロトコルと、片方向リンクによる隠れ端末問題に対する MAC プロトコルを述べる。

2.1 ネットワーク層での問題に対処するルーティングプロトコル

アドホックネットワークオンデマンド型ルーティングプロトコルでは、アクティブなルートが存在しない場合、宛先発見フェーズを実行する。このフェーズにおいて、宛先までのルート発見に RREQ フラッディングを行い、宛先端末は RREQ を受信すると RREQ がたどってきたルートで RREP を返送する。送信元でこの RREP を受信するとルートが構築される。しかし片方向リンクがルート上に発生することで RREP が送信元に返送されず、送信元でタイムアウトとなり、送信元は RREQ 再送を余儀なくされる。これを防ぐ方法として、ルート上の片方向リンクを利用する方法と利用せず双方向リンクのみのルートを構築する方法がある。Nesargi らの方式⁴⁾ は前者の片方向リンクを利用するルーティングプロトコルである。この方式では往路は片方向リンクを利用するが、復路は片方向リンク間で復路を作成し通信を行う方式である。片方向リンクを利用する方式の利点としてデータを片方向リンク上で宛先に届けることが可能であり、短いホップ数でデータを宛先端末に届けることが可能であることがあげられる。しかし問題点として、片方向リンクを利用する方式は、MAC 層の大幅変更、またネットワーク層と MAC 層の間にサブレイヤを設けて片方向リンク間の復路構築を行う必要があり、実装が容易ではない点があげられる。一方双方向リンクのみを利

用する方式の利点は、ネットワーク層のみでルート構築を行うことができる点であり、実装が容易であることがあげられる。欠点としては片方向リンクを利用する方式と比較し多いホップ数でデータ転送を行う必要がある点があげられる。本論文では主にネットワーク層に重点を置き、MAC 層は既存の IEEE802.11DCF の利用を考えるため、今回は双方向リンクのみのルート構築を行う方式をとることとする。したがって同じく双方向リンクのみのルート構築を行う代表的なルーティングプロトコルである AODV-BL²⁾ を述べる。

● AODV-BL²⁾

AODV-BL が AODV¹⁾ の片方向リンクに対処するオプションとして存在する。AODV-BL は AODV 同様のルート構築要求を行い、宛先端末は送信元に向けて RREP を返送する。しかし RREP 送信後、リンクパイリンクの宛先端末（以下、下流端末）から制御メッセージ RREP-ACK を受信しなかった場合、下流端末とは自身が片方向リンクであると判断し、下流端末を Black List としてテーブルに記録する。以後テーブルに記録されている端末からの RREQ を破棄することで双方向リンクのみのルート構築を行い、ルート探索にかかるオーバーヘッド低減を行っている。しかし AODV-BL では RREP を返送し RREP-ACK が返信されないことにより片方向リンクを検出するため、ルート構築を行う遅延が生じる。図 2 は AODV-BL におけるルート構築例を示す。端末は S, A, B, D の 4 端末とし、B, D は低送信電力端末であり A は高送信電力端末であるとする。A-B 間は片方向リンクでありそれ以外の端末間は双方向リンクを持つものとして例をあげる。初めに S でデータが発生すると S は D 宛ての RREQ をフラッディングする。A に対する Black List は存在しないため A は RREQ を転送する。B もこの時点では同様に B に対する Black List が存在しないため RREQ を転送する。RREQ を宛先

端末である D が受信すると RREP を送信元 S に返送する。このとき返送するルートは RREQ がたどってきたルートである。D からの RREP を B が受信すると D に対して双方向リンクであることを通知するための RREP-ACK を返送する。その後 B は A に対して RREP を送信するが、端末 B-A 間は片方向リンクであるため A は B からの RREP を受信することができない。そのため RREP-ACK が返送されず B はこの時点で B-A 間が片方向リンクであることを認識し、A を Black List table に格納する（図 2(a)）。こうすることで B は A を Black List と見なし今後端末 A から届いた RREQ を破棄し無駄な RREQ フラッディングを抑止しオーバーヘッド低減を図っている（図 2(b)）。

2.2 MAC 層での問題に対処する MAC プロトコル

まず初めに、従来の片方向リンクを考慮に入れない MAC プロトコルにおける、片方向リンクによる問題点を説明する。チャンネルの競合を防ぐため、RTS-CTS 制御メッセージを利用するプロトコルは、リンクパイリンクでのユニキャスト通信開始前に RTS/CTS 交換を行い、近隣に存在する隠れ端末からの通信干渉を抑制する。しかし片方向リンクによる隠れ端末からの通信干渉を抑制することは不可能である。図 3 は片方向リンクによる隠れ端末が起こる例である。H を高送信電力端末、L1, L2 を低送信電力端末とする。

制御メッセージを利用するプロトコルにおいて、L1 と L2 は通信開始前に RTS/CTS 交換を行う。L1, L2 の送信範囲内の端末は L1-L2 間の通信終了後まで自身の送信を控え、通信干渉を抑制する。一方で、H は L1-L2 間の RTS/CTS 交換を受信不可能な位置に存在し、L1-L2 の通信中に自身の送信を開始可能である。また H は高送信電力端末であるため送信開始することで L1-L2 の通信を干渉する。この問題に対処した方式として以下の方式について述べる。

- Handling Asymmetry in Power Heterogeneous Ad-Hoc Networks: A cross Layer Approach³⁾
(以下、Shah らの方式と呼ぶ)

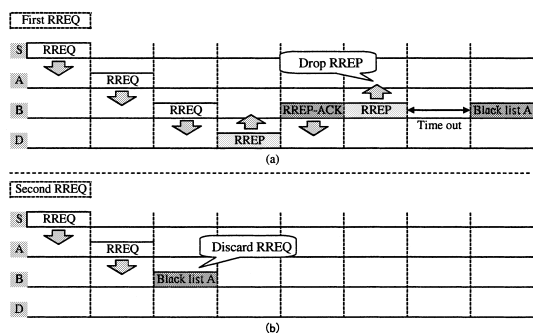


図 2 AODV-BL におけるルート構築

Fig. 2 Route establishment of AODV-BL.

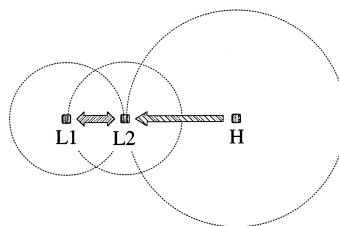


図 3 片方向リンクによる隠れ端末問題

Fig. 3 Unidirectional hidden terminal problem.

関連研究⁵⁾を改良した方式である Shah らの方式³⁾では、図 3 であげた端末 H 同様、高送信電力端末からの通信干渉を抑制するために、制御メッセージを近隣数ホップ以内で干渉する可能性のある端末にマルチキャストする方式をとる。この方式はネットワーク層、MAC 層のクロスレイヤ方式である。すなわち MAC 層のみでなくネットワーク層でもともに大幅な変更を行う必要がある。ネットワーク層は、定期的に Hello パケット交換を行い、自身の近隣 N ホップ内端末のアドレスと各端末とのリンク状態（片方向リンク or 双方向リンク）をテーブルに保持する。テーブル情報からマルチキャストツリーを作成し、制御メッセージのマルチキャストを行う。制御メッセージのマルチキャストはフラッディングと比較しパケット数低減を行っているが、近隣の干渉端末数が多い場合には制御メッセージ数が増加しネットワークトラフィックの増加につながる。また制御メッセージ伝播範囲を広げることにより、さらされ端末が増加し、スループットが低下する。また UAMAC⁶⁾はより小規模なネットワークを考慮した方式で Shah らと同様の方式を考察している。

2.3 関連研究の特徴

関連研究の特徴は以下のようにまとめられる。

- AODV-BL²⁾
利点：オーバーヘッド削減
問題点：ルート構築遅延
- Shah らの方式
利点：隠れ端末による影響低減
問題点 1：制御メッセージ増加によるオーバーヘッド増加
問題点 2：さらされ端末増加によるスループット低下
問題点 3：ルーティング層、MAC 層の大幅な変更

3. 提案方式

本章では、双方向リンクのみを利用し、片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を低減させるルート構築を行う、オンデマンドルーティングプロトコル LEX-R (Least EXposed Routing to avoid unidirectional links) を提案する。LEX-R では早期に片方向リンクを検出し、RREQ が双方向リンクのみのルートをたどることで、AODV-BL と比較し再探索にかかるオーバーヘッドを低減させる。また、MAC 層の既存プロトコルを大幅に変更することなく、片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を低減させるため、干渉を避けるルート構築を行う。以下に LEX-R の詳細を述べる。

LEX-R はオンデマンドルーティングプロトコルであり、以下のフェーズからなる。

(1) 片方向リンク検出フェーズ

LEX-R では Hello パケットを近隣端末と定期的に交換することにより、近隣端末とのリンク状態、片方向リンクの検出を行う。Hello パケット交換によって得た近隣端末とのリンク状態を近隣端末テーブルに格納し保持することで、ルート発見フェーズ、ルートメンテナンスフェーズにおいて利用する。

(2) ルート発見フェーズ

LEX-R はオンデマンドルーティングプロトコルであるため、データが発生した端末は宛先までの経路を持たない場合、ルート発見フェーズを行う。ルート発見フェーズでは、まず初めに送信元がネットワーク全体に RREQ をフラッディングする。RREQ を受信した端末は、片方向リンク検出フェーズで作成した近隣端末テーブルを参照し、1 ホップ上流の RREQ 送信端末と双方向リンクである場合のみ RREQ の転送を行う。このことで双方向リンクのみのルート構築を行う。また、片方向リンクを持ち、隠れ端末となる高送信電力端末から一定期間に受信する制御メッセージ数を干渉量と定義し、この干渉量から片方向リンクによる隠れ端末から影響を受けやすいと判断する端末は RREQ を破棄し、ルートに参加しないアルゴリズムを利用する。このアルゴリズムによって片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を避けるルート構築を行う。

(3) ルートメンテナンスフェーズ

LEX-R では Hello パケット交換によって作成する近隣端末テーブルにより、近隣端末を把握することが可能であるため、自身がリンクバイリンクで通信可能な端末をつねに把握し、通信失敗が起こると、次ホップ端末が通信範囲外にいることによる通信失敗か、もしくはキャリアセンス等で次ホップ端末がビジー状態にあることによる通信失敗かを判断する。次ホップ端末が通信範囲外にいることによる通信失敗であった場合は、RERR を送信元に送信する。一方で次ホップ端末がビジー状態にあることによる通信失敗であった場合は、RERR を送信せず、そのルートを利用する。しかし片方向リンクによる隠れ端末からの干渉量が閾値を超えると RERR を送信元に送信する。このことで干渉を避けるルートが安定して構築される。

3.1 片方向リンク検出フェーズ

初めに、LEX-R は Hello パケット交換を定期的に行い、近隣端末とのリンク状態（片方向、双方向リンク）を認識する。図 4 は Hello パケット交換後の端末 L2 の近隣端末テーブルを示す。近隣端末テーブルは

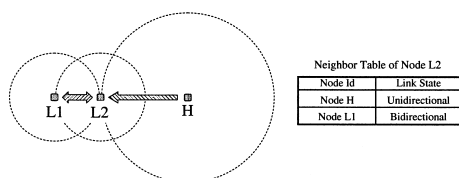


図4 Hello パケット交換後の L2 の近隣端末テーブル
Fig.4 Neighbor table of Node L2.

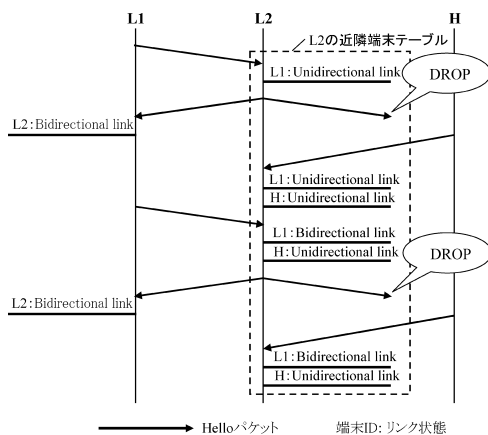


図5 片方向リンク検出フェーズ
Fig.5 Detection unidirectional links.

片方向リンク検出フェーズによって更新される。

図5は片方向リンク検出フェーズである。まず初めに図5において端末L1がHelloパケットを送信し、端末L2はHelloパケットを受信する。端末L1のHelloパケットには近隣端末情報が何も入っていない状態であるため、端末L2はテーブルに端末L1とは片方向リンクであると登録する。次に端末L2は近隣端末テーブルを参照しHelloパケット内に端末L1の情報を書き込み送信する。端末L1は端末L2からのHelloパケットを受信すると、パケット内に自身のIDが書かれているため端末L2とは双方向リンクであると認識する。一方で端末L2からのHelloパケットを端末Hは受信することが不可能であるため端末Hの近隣端末テーブルは更新されない。同様に端末HがHelloパケットを送信し端末L2はこれを受信する。しかし自身のIDがパケット内に書かれていないため端末L2は端末Hとは片方向リンクであると認識し、自身の近隣端末テーブルを更新する。次に端末L1が自身の近隣端末テーブルを参照し、端末L2の情報をHelloパケット内に書き込んで送信する。これを受信した端末L2はHelloパケットに自身のIDが書かれているため端末L1とは双方向リンクであると認識し、近隣端末テーブルを更新する。このようにHelloパケット

交換によってリンク検出を行った結果が図4のテーブルであり、各端末は近隣端末とのリンク状態を把握することが可能となる。この近隣端末テーブルを利用しルート発見、ルートメンテナンスを行う。

3.2 ルート発見フェーズ

LEX-Rでは、一般的なアドホックネットワークオンデマンドルーティングプロトコルで利用されるルート発見メカニズム同様、送信元でデータが発生すると、アクティブなルートが存在しない場合、宛先へのルート発見のためRREQをネットワーク全体にフラッディングする。宛先端末でない端末はRREQを転送し、宛先までRREQを届ける。宛先端末がRREQを受信するとRREPを送信元に対してRREQがたどってきたルートで返送する。送信元が宛先からのRREPを受信すると実際のデータ通信を行う。

LEX-Rでは2つのRREQ転送アルゴリズムを同時に用いる。1つは、双方向リンクのみのルートを構築するためにRREQを破棄する方法。一方はMAC層での片方向リンクによる隠れ端末問題を防ぐため、あるアルゴリズムに従ってネットワーク層で干渉を避けるルート構築を行う方法である。

3.2.1 双方向リンクのみのルート構築

RREQを受信した端末は自身が宛先でない場合、次の(1)~(3)の3つの条件をすべて満たすと「片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を避けるルート構築」の条件に従いRREQ転送が可能である。(1)~(3)の条件を1つでも満たさない端末はRREQを破棄する。
(1) 届いたRREQのホップ数がTTL以下
(2) 同シーケンス番号を持つRREQを未転送
(3) 1ホップ上流端末と双方向リンク

(1)の条件はホップ数が過度に多くなるルート構築を防ぐためである。(2)の条件はRREQ転送によるオーバーヘッド増大(ブロードキャストストーム)を防ぐためである。(3)は片方向リンクを持つルートを構築しないための条件である。各端末は片方向リンク検出フェーズにおいて近隣端末とのリンク状態を把握している。そこで、この(3)の条件に従い片方向リンクを持つ端末からのRREQを事前に破棄することで、宛先に届くRREQはすべて双方向リンクのみのルートをたどるRREQが到着することになる。つまり構築されるルートは片方向リンクを含まないため再探索を行う必要がなく、AODV-BLと比較し片方向リンクによるルート再探索にかかるオーバーヘッドを低減させる。

図6はLEX-Rにおける双方向リンクのみのルート構築を行うためのRREQ破棄例である。端末はS, A, B, Dの4端末とし、S, B, Dは低送信電力端末

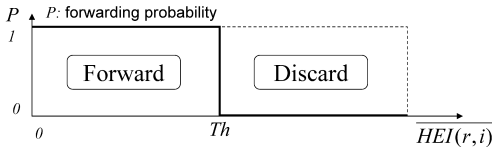


図 8 Simple threshold function
Fig. 8 Simple threshold function.

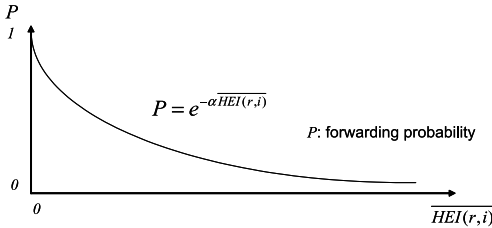


図 9 Exponential function
Fig. 9 Exponential function.

Simple threshold function を示す。ここで Th は閾値を示し、 P は転送確率を示す。

- if $Th \geq \overline{HEI}(r, i)$
the node can forward RREQ
- else if $Th < \overline{HEI}(r, i)$
the node discard RREQ

ii. Exponential function

Exponential function は $\overline{HEI}(r, i)$ の値に従って RREQ 転送確率 P を指数関数的に減少させる方式である (図 9)。 P は $P = e^{-\alpha \overline{HEI}(r, i)}$ に従い減少する。 α は減衰係数を示す。 確率はランダムに与え、転送確率 P がその確率よりも高い場合は RREQ 転送、低い場合は RREQ 破棄を行う。 図 9 は Exponential function を示す。

- if $P \geq \text{random probability}$
the node can forward RREQ
- else if $P < \text{random probability}$
the node discard RREQ

iii. Stepup function

図 7 において、上記の Simple threshold function, Exponential function は高送信電力端末の送信レートが低い場合は最短ルートを選択し、送信レートが高い場合は高送信電力端末の通信を避けるルートを構築する。しかし図 7 において H1, H2, H3 と反対側に高送信電力端末が存在し、通信を行った場合ルートが構築されない可能性が存在する。これは Simple threshold function, Exponential function は $\overline{HEI}(r, i)$ と閾値との比較によって RREQ を破棄するためである。そこで、これら 2 つの RREQ 転送確率関数

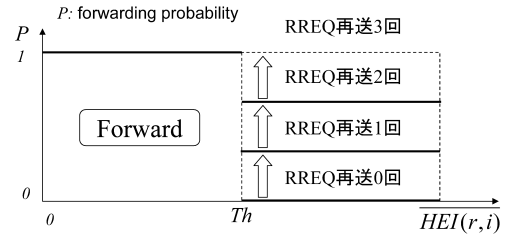


図 10 Stepup function
Fig. 10 Stepup function.

の問題点を考慮した Stepup function を提案する。 Stepup function は Simple threshold function 同様 $\overline{HEI}(r, i)$ と比較する閾値を設定し、閾値より低い場合は RREQ 転送、閾値より高い場合は RREQ の再送回数によって変動する転送確率に従い、転送するか否かを判断を行う。送信元からの RREQ 再送回数が最大再送回数となった場合、RREQ 転送確率が 1 となる様変動する割合で確率を上げる方式である (図 10 例: RREQ 最大再送回数 3)。以下に RREQ 再送が発生した場合の転送確率を示す。

$$P = \frac{\text{現在の RREQ 再送回数}}{\text{RREQ 最大再送回数}} \quad (2)$$

3.3 ルートメンテナンスフェーズ

代表的なオンデマンドルーティングプロトコルである AODV-BL では、MAC 層での送信失敗を受けると逐次 RERR を送信元に送りルート再構築要求を行う。AODV では送信失敗を次ホップ端末と通信範囲外にあると判断するためであり、これは動的なトポロジに対応するための措置である。しかし様々な送信電力が混在する環境では、低送信電力端末は隠れ端末となる高送信電力端末から干渉を受けることが多く、送信電力が一定の環境と比較し送信が失敗する傾向が強い。そのため、一概に次ホップ端末が通信できない距離にあるとは判断できない。つまり逐次 RERR を送信しているルートを安定せずスループットが低下する。

そこで LEX-R ではルート発見フェーズで利用した干渉端末から一定期間内に受信する制御メッセージ数 $\overline{HEI}(r, i)$ が先述した RREQ 破棄閾値より高い端末のみが、RERR を送信元に返すアルゴリズムを持つ。それ以外の端末は Hello パケットで構築された近隣端末テーブルを参照し、送信失敗した端末が近隣端末テーブルに存在する場合は RERR を返送せず、テーブルに存在しない場合のみ RERR を送信元へ返送するアルゴリズムを用いる。Hello パケットが一定期間受信されない場合 (Hello パケット送信端末がビジー状態、もしくは端末が移動した場合) は低モビリティ

表 1 AODV-BL との定性的比較

Table 1 Qualitative evaluation of AODV-BL and LEX-R.

	LEX-R	AODV-BL
Helloパケット交換の有無	必要	不必要
片方向リンクの検出	Helloパケット交換	RREP-ACK
片方向リンク検出までの時間	Helloパケット交換に依存	RREPが返送されるまで
片方向リンクからのRREQ	破棄	破棄
双方向リンクからのRREQ	RREQ破棄functionに従う	転送
ネットワーク全体のRREQ数	少	多
ネットワーク全体のHelloパケット数	多	0 or LEX-Rと同等
ルート要求から構築までの時間	小	大
ルート構築方法	オンデマンドルーティングプロトコル	オンデマンドルーティングプロトコル
ホップ数	大	小

の環境においても近隣端末テーブルから削除されるため、RERR を返送するためネットワーク負荷が高い場合も考慮される。このアルゴリズムを用いることでAODV-BLと比較しRERRによるオーバーヘッドの削減、ルートの安定が期待できる。またモビリティが高い環境においてはAODV-BL同様の動作を行う。

3.4 AODV-BL との定性的比較

LEX-R はルーティングプロトコルでかつ片方向リンクを利用しないプロトコルであるため、最も関係の深いオンデマンドルーティングプロトコルAODV-BLと比較する。両プロトコルの相違点を表1に示す。LEX-Rは片方向リンク検出にHelloパケット交換を利用する。一方、AODV-BLはHelloパケット交換はオプションである。このためLEX-RはHelloパケットによるオーバーヘッドが大きくなることが考えられる。また、LEX-Rでは干渉が多い端末はRREQを破棄するためルーティング制御メッセージ(RREQ, RREP, RERR)はAODV-BLより少なくなると考えられる。片方向リンクを検出するまでの時間については、LEX-RではHelloパケット交換に依存する。AODV-BLでは片方向リンク端末に対してRREPを返送し、RREP-ACKが返ってこなかった場合リンク検出となる。Helloパケット交換がスムーズに行われればLEX-Rのルート要求から構築までの時間はAODV-BLと比較し短いと考えられる。またLEX-Rは干渉から避けて通るルートを構築するため、最短ホップ数のルートを構築するAODV-BLと比較しホップ数が多いルートを構築することとなる。

4. 性能評価

4.1 基礎評価

上記のRREQ転送確率関数はパラメータを要し、シミュレーションを行うために必要なパラメータの決

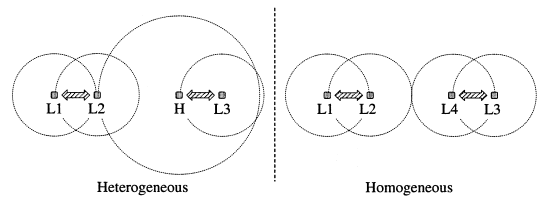


図 11 MAC 層での基礎評価トポロジ

Fig. 11 Basic simulation topology.

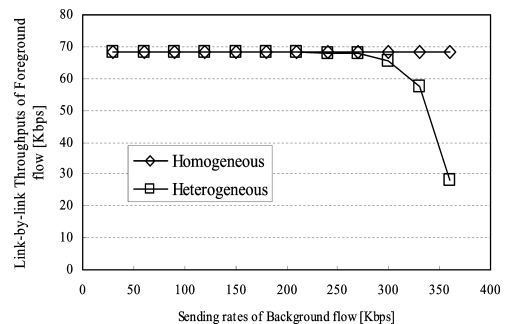


図 12 基礎評価：片方向リンクによる隠れ端末の影響

Fig. 12 Effect of unidirectional hidden terminal problem.

定を行う必要があるため、MAC層において片方向リンクによる隠れ端末問題が及ぼす影響を考察する必要がある。図11は片方向リンクによる隠れ端末問題の影響を計るためのトポロジである。左図において端末L1-L2間(Foreground flowと定義)、端末H-L3間(Background flowと定義)で通信を行うものとし、端末Hは高送信電力端末であり他端末は低送信電力端末であるとする。ここでフロー(flow)とは“送信元と宛先の間のルートに沿ったデータの流れ”と定義する。高送信電力端末は端末L2と片方向リンクであり、隠れ端末となり端末L1-L2間の通信を干渉する。端末L1-L2間は送信レートを70 Kbpsと固定し、端末Hの送信レートを30 Kbpsから変化させた場合のForeground flowのスループット特性を評価する(なお、Foreground flowの送信レートを10 Kbpsから200 Kbpsまで変化させて評価を行ったが、以降に述べる結果にはほとんど影響がないことを確認した)。また右図は全端末が低送信電力端末であり、端末L1-L2間通信は干渉を受けないものとする。右図も左図同様に端末L4-L3間の送信レートを30 Kbpsから変化させた場合のL1-L2間のスループットを評価する。物理層にはIEEE 802.11b (1 Mbps)、MAC層にはIEEE 802.11DCFを用いる。

図12は片方向リンクによる隠れ端末の影響を示す。横軸はBackground flowの送信レートを表し、縦軸はBackground flowの送信レートを変化させたとき

の Foreground flow のリンクバイリンクスループット特性を表している。全端末低送信電力を持つ Homogeneous な環境を表すプロット Homogeneous は片方向リンクが存在しないため、隠れ端末の影響を受けることなく高いスループットを保つことができる。一方で、高送信電力端末が存在する Heterogeneous な環境を示すプロット Heterogeneous は片方向リンクが存在し、高送信電力端末は隠れ端末となり Foreground flow に影響を及ぼしていることが分かる。特に 210 Kbps 以降はスループットが急激に低下していることが分かる。このことから、MAC 層レベルで 210 Kbps 前後で隠れ端末の影響を受けやすいことが分かる。ルーティング層でエンドツーエンドの通信を考えた場合 210 Kbps 未満で隠れ端末による影響を受けると予想できる。

4.2 LEX-R 性能評価

提案した LEX-R を、Qualnet Network Simulator 3.9⁸⁾ を用いてルート構築遅延、エンドツーエンドのスループット特性を評価する。図 13 はシミュレーショントポロジを示す。基本グリッドトポロジ内に端末は全部で 25 端末とし、端末間隔は 200 m とする。またモビリティは考慮しない。評価 1 ではルート構築にかかる時間を評価し、評価 2, 3 ではエンドツーエンドのスループットを評価する。シミュレーションの各パラメータ、トポロジは次のとおりである。物理層では IEEE 802.11b (1 Mbps)、MAC 層では IEEE 802.11DCF を利用する。パケットサイズは 512 バイトで統一し、各データフローは CBR での通信を前提とする。データフローは 1 フロー (評価 1)、2 フロー (評価 2)、3 フロー (評価 3) 存在するものと仮定する。評価 1 では片方向リンクが存在することでルート構築に遅延が生じるネットワーク層での問題を考慮し、データフローの送信元端末が RREQ をフラッディングし、RREP が送信元へ返送されるまでの時間をルート構築遅延と定義し評価を行う。一方、評価 2, 3 で

は MAC 層における片方向リンクによる隠れ端末問題を考慮する評価を行う。評価 2, 3 のデータフローにおいて、1 つは影響を及ぼす高送信電力端末どうしのフローであり、これを Background flow と定義する。また影響を受ける低送信電力端末間のフローである Foreground flow を定義し、シミュレーションでは Foreground flow のエンドツーエンドのスループット特性の評価を行う。

ここで、評価 1 では問題を単純化し、送信元端末 S から宛先端末 D の Foreground flow 上で構築される最短ルート上に片方向リンクが存在する場合のルート構築遅延を評価する。送信元最短経路である S-C-E-F-G-H-D 上の端末 F のみを高送信電力端末とし片方向リンクを意図的に構築することでこれを実現する。一方評価 2, 3 では高送信電力端末は 4 端末とし (端末 A, B, A', B')、それ以外の端末は低送信電力端末と仮定する。高送信電力端末の送信電力は 13.5 dBm、低送信電力の送信電力は 4.5 dBm とする。IEEE802.11b (1 Mbps: 受信閾値 -93 dBm) を利用し、自由空間であると仮定すると送信範囲はそれぞれ約 400 m、約 200 m となる。

Foreground flow は端末 S-D 間の通信であり、Background flow は端末 B-A 間、端末 B'-A' 間の通信であるとする。このとき Background flow (B-A, B'-A') は端末 E-F-G と片方向リンクであるために隠れ端末となり干渉する。LEX-R はオンデマンドルーティングプロトコルであり、比較対象プロトコルは関連の深い AODV-BL とする。また LEX-R はネットワーク層に重点を置き、MAC 層から制御メッセージ数の情報を取得するのみであり MAC 層の大幅変更を行わない。そのため MAC 層を重点的に扱う Shah らの方式とは比較は行わない。AODV-BL は最短ルートを選択するため、Foreground flow のルートは最短ホップである S-C-E-F-G-H-D を利用することとなり、これは Background flow からの干渉を受けやすいルートである。Background flow の送信レートが低い場合は影響は小さいが、送信レートが高い場合の影響は大きい。一方で LEX-R は上述した RREQ 転送確率関数によって送信レートに応じて RREQ を破棄し、干渉から避けるルート構築を行う。たとえば Background flow の送信レートが低い場合は AODV-BL 同様 S-C-E-F-G-H-D を利用し、一方で送信レートが高く影響が大きい場合は、たとえば S-C-I-J-K-L-M-H-D というルートを構築することとなる。評価 2 では Foreground flow は送信レート 70 Kbps で固定とし、B-A 間 Background flow を送信レート 30 Kbps~270 Kbps に変化させる。B'-

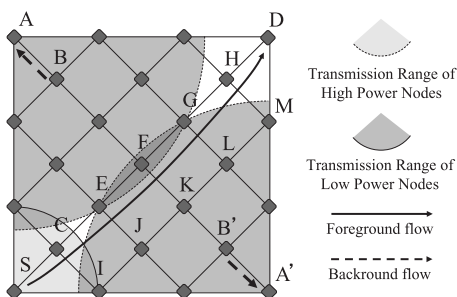


図 13 評価 1, 2, 3 でのシミュレーショントポロジ
Fig. 13 Simulation topology of evaluation 1, 2 and 3.

A'は通信を行わない．つまり高送信電力端末が偏って存在した環境での評価である．このときの Foreground flow のエンドツーエンドのスループット特性を評価する．一方評価3では，Foreground flow の送信レートは同様に 70 Kbps で固定であるが，B-A 間 Background flow の送信レートは評価2において Foreground flow が影響を受け始める Background flow の送信レートで固定し，B'-A' 間 Background flow の送信レートを 30 Kbps～270 Kbps に変化させる．つまり高送信電力端末が分散して存在する環境での評価である．このときの Foreground flow のエンドツーエンドの評価を行う．

4.2.1 評価 1

LEX-R は AODV-BL と比較し，早期に片方向リンクを検出することで，宛先までの RREQ 転送の段階で双方向リンクのみをたどるルート構築を行うため，片方向リンクが最短ルート上に存在する環境において AODV-BL と比較しルート構築遅延が小さいことが考えられる．そのため評価1において，先述したように最短ルート上の端末 E を高送信電力端末とし片方向リンクが最短ルート上に存在する環境において LEX-R が AODV-BL と比較しどれほど有効かをルート構築遅延を評価することで示す．

図14は各プロトコルを用いたときのルート構築遅延である．横軸はルート構築遅延，つまり送信元 S が RREQ をフラッディングしてから RREP が送信元に返送されるまでの時間を表している．AODV-BL(with Hello)，(without Hello) はそれぞれ AODV-BL を Hello パケット交換あり，なしで評価した結果を示す．LEX-R(Simple)，(Exponential)，(Stepup) はそれぞれ LEX-R の各転送関数を用いた結果を示す．結果から AODV-BL(with Hello)，AODV-BL(without Hello) のルート構築遅延に対し LEX-R の各転送関数のルート構築遅延が低減していることが分かる．AODV-BL では端末 F がフォワーディングする RREQ を端末 H が受信し，同様に端末 H も RREQ をフォワーディン

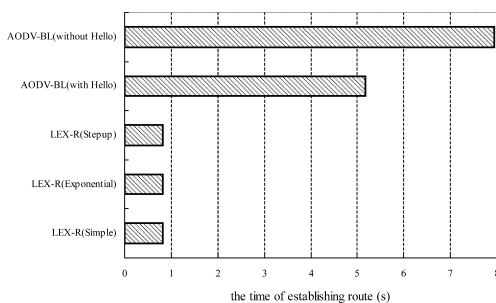


図14 評価1：ルート構築遅延

Fig. 14 Route establishment delay.

グする．このことで端末 F-H 間が片方向リンクとなり，RREP が端末 H から F に対して送信することが不可能となるため，RREP が端末 S に対して返送されることがなく端末 S は RREQ を再送する必要がある．つまりルートが1回目の RREQ で構築されないためルート構築にかかる遅延が増大することが分かる．一方で LEX-R においては，端末 H は端末 F と片方向リンクであると認識しているため，端末 F がフォワーディングする RREQ を破棄する．そのことで端末 H は双方向リンクである端末 G 経由で端末 F からの RREQ を受信することとなり双方向リンクのみのルート構築を行うことが可能となる．そのため1回目の RREQ によってルートを構築する可能性が高いことからルート構築にかかる遅延が小さいことが分かる．

4.2.2 評価 2

先述したように評価2は Background flow は B-A 間のみとし，LEX-R の各 RREQ 転送確率関数が高送信電力端末間の通信が偏って存在する環境においてどれほど有効かを示すものである．B-A 間通信は 30 Kbps～270 Kbps まで変化し，S-D 間通信は 70 Kbps で固定とする．

図15は Simple threshold function を用いたときの Foreground flow のエンドツーエンドスループットである．Background flow の送信レートを 30 Kbps～270 Kbps まで変化させたときの $\overline{HEI}(r, i)$ は 0～120 で変化するため，Simple threshold function での閾値を $Th = 1, 10, 50, 100, 120$ と設定する．横軸は B-A 間 Background Flow の送信レート，縦軸は Foreground flow のスループットを示す．また図中の「AODV-BL(without Hello)」は比較対象プロトコル AODV-BL の Hello パケットなし，「AODV-BL(with Hello)」は AODV-BL の Hello パケットありのスループットを示し，LEX-R (閾値 or 減衰係数) は各閾値，

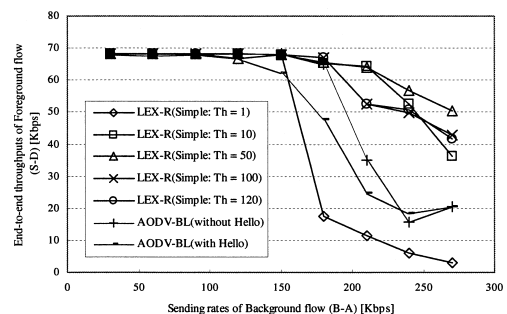


図15 評価2：Simple threshold function 適用時のスループット特性

Fig. 15 Evaluation 2: Throughput of Simple threshold function.

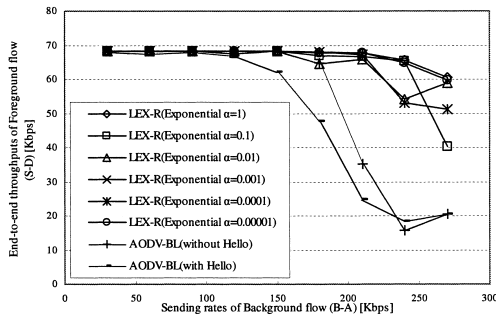


図 16 評価 2 : Exponential function 適用時のスループット特性
Fig. 16 Evaluation 2: Throughput of Exponential function.

各減衰定数を用いたときの LEX-R のスループットを示す。Simple threshold function は AODV-BL と比較し $Th = 1$ 以外の閾値でスループットが大きく向上していることが分かる。基礎評価で示したとおり Background flow の送信レートが 210 Kbps 近辺でスループットが少しずつ下がっていることから、片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を避けるルート構築であっても多少の影響は受けることが分かる。 $Th = 1$ のスループットが悪化する理由は、図 13 中の端末 C が端末 B から制御メッセージを受信する場合があります、端末 C の $\overline{HEI}(r, i)$ が 1 以上となりルートがまったく構築されないためであると考えられる。また $Th = 50$ のときがスループット最大となることが分かる。 $Th = 100, 120$ と比較し、 $Th = 50$ では、LEX-R は最短ホップルートを使い続けることはない。また $Th = 1$ の場合とは異なり、迂回ルート形成を行う RREQ 転送可能端末が存在しているためだと考えられる。また、AODV-BL では 240 Kbps から 270 Kbps にかけてスループットが若干向上している。これは、270 Kbps と高い送信レートでは、ルート構築の時点で、最短ルートを形成する中継端末（端末 E, F, G）が隠れ端末（端末 B）より影響を受け、負荷の低いルート（S-C-I-J-K-L-M-H-D）を構築する場合があるためである。なお、これ以上 Background flow の送信レートを上げても、スループットが向上しないことを確認している。

図 16 は Exponential function を用いたときの Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。Exponential function の減衰係数 $\alpha = 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001$ とし、1 に近づくほど RREQ 受信端末の転送確率は $\overline{HEI}(r, i)$ の影響を受けやすく破棄する確率が高い。また α が 0 の場合は $\overline{HEI}(r, i)$ の影響を受けず転送確率は 1 となる。Exponential function も Simple threshold function 同

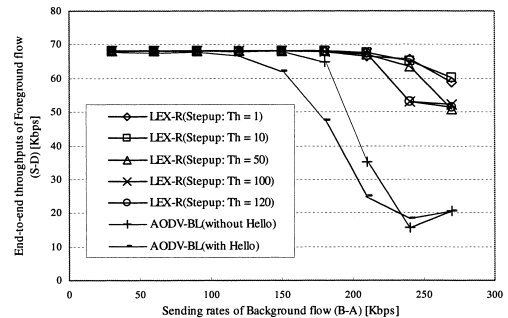


図 17 評価 2 : Stepup function 適用時のスループット特性
Fig. 17 Evaluation 2: Throughput of Stepup function.

様 AODV-BL と比較しスループットが大きく向上していることが分かる。しかし、Exponential function の各減衰係数での結果は Simple threshold function の閾値 1 のスループットのように急激に下がることがないことが分かる。Exponential function は $\overline{HEI}(r, i)$ に従い送信確率を下げるため、減衰係数が大きい場合であったとしても端末 C の RREQ 転送確率が 0 となることがないためである。

図 17 は Stepup function を用いたときの Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。Stepup function での閾値は Simple threshold function で定義した閾値同様 $Th = 1, 10, 50, 100, 120$ と定義する。また最大再送回数は AODV-BL の RREQ 再送回数のデフォルト値である 2 回とする。Stepup function も他の RREQ 転送確率関数同様 AODV-BL と比較しスループットが大きく向上していることが分かる。また Simple threshold function では $Th = 1$ でスループットが大きく低下したのに対し、Stepup function では、RREQ 再回数によって RREQ を転送する確率を上げているため閾値 1 でも RREQ を転送することが可能であり、同じ $Th = 1$ で最も良いスループットとなっている。また $Th = 1$ でのスループットは $Th = 120$ のスループットより向上していることから、早期に干渉を避けるルート構築を行うことは有効であることが分かる。Stepup function では Th の設定による影響が小さいことが分かる。

以上の結果から高送信電力端末間通信が偏って存在する環境においてすべての RREQ 転送確率関数が AODV-BL と比較しスループットが向上することが分かる。各 function に顕著な差は見られないが、Simple threshold function ではある閾値を超えるとまったく転送を行わないという可能性があり、ルートがまったく構築されないという問題が存在する。また Exponential function でも転送確率がネットワーク全体で

下がることからルート構築が安定しないという問題が存在すると考えられる。そこで性能評価 3 では高送信電力端末間通信が分散して存在する環境における各 function のスループットを考察する。

4.2.3 評価 3

評価 3 は評価 2 のトポロジに B'-A' 間 Background flow を加えたモデルでの評価とする。B-A 間 Background flow の送信レートは評価 2 の結果から、各 function スループットが下がり始めた 240 Kbps とし、新たに加えた B'-A' 間送信レートは 30 Kbps ~ 270 Kbps で変化させる。また S-D 間 Foreground flow は評価 2 同様 70 Kbps で固定とする。このときの Foreground flow のエンドツーエンドスループットの評価を行う。各 function の閾値および減衰係数は評価 2 と同じとする。

図 18 は Simple threshold function を用いたときの Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。評価 2 同様「AODV-BL(without Hello)」は比較対象プロトコル AODV-BL の Hello パケットなし、「AODV-BL(with Hello)」は AODV-BL の Hello パケットありのスループットを示し、LEX-R (閾値 or 減衰係数) は各閾値、各減衰定数を用いたときの LEX-R のスループットを示す。AODV-BL は Hello パケットの有無にかかわらず非常に低いスループットとなる。一方で LEX-R では、閾値 100, 120 は干渉を避けることが少ないルートである最短ホップ数のルートを構築する場合であり、スループットが最大となっていることが分かる。避けて通るルート構築を行った閾値 1 は AODV-BL より低いスループットである。これは評価 2 に増して $\overline{HEI}(r, i)$ が閾値以上となる端末が多く存在し、RREQ を転送可能な端末が少ないことが原因であると考えられる。閾値 10, 50 においても、閾値以下の端末が多く存在する場合のスループットは高いが、閾値以上の端末が増えることで極端にスループットが低下する。このことから閾値を超える $\overline{HEI}(r, i)$ を受信する端末が急増するとスループットが急激に低下することが分かる。また、LEX-R では Background flow が 240 Kbps の時点でスループットが 0 Kbps となる。これは、2 つの Background flow が、送信タイミングが同時の CBR 通信を行うため、Foreground flow がまったく通信を行えない状態になることが理由である。

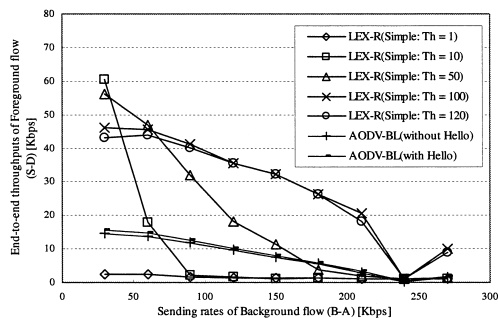


図 18 評価 3 : Simple threshold function 適用時のスループット特性

Fig. 18 Evaluation 3: Throughput of Simple threshold function.

ットは高いが、閾値以上の端末が増えることで極端にスループットが低下する。このことから閾値を超える $\overline{HEI}(r, i)$ を受信する端末が急増するとスループットが急激に低下することが分かる。また、LEX-R では Background flow が 240 Kbps の時点でスループットが 0 Kbps となる。これは、2 つの Background flow が、送信タイミングが同時の CBR 通信を行うため、Foreground flow がまったく通信を行えない状態になることが理由である。

次に図 19 は Exponential function を用いたときの Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。 $\alpha = 0.00001$ ではスループットは AODV-BL よりも低下する。評価 2 において Exponential function ではスループットが急激に低下する減衰係数は存在しなかったが、一方で評価 3 では B'-A' 間 Background flow の影響を受けスループットが急激に低下する減衰係数があることが分かる ($\alpha = 0.001, 0.0001$)。Simple threshold function 同様スループットの急激な低下は問題となり、複数高送信電力端末間通信が存在する場合のスループットはより大幅に低下すると考えられる。

最後に、図 20 は Stepup function を用いたときの Foreground flow のエンドツーエンドスループット

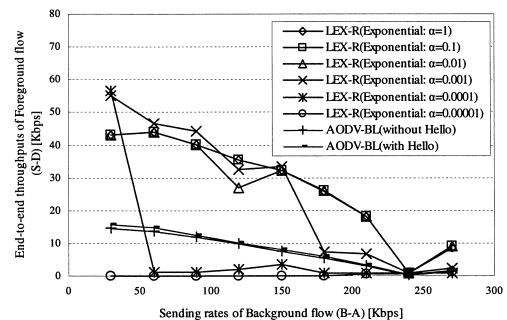


図 19 評価 3 : Exponential function 適用時のスループット特性

Fig. 19 Evaluation 3: Throughput of Exponential function.

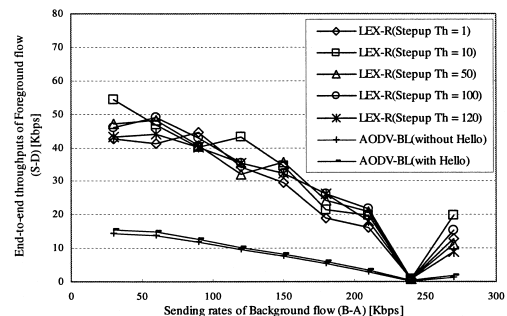


図 20 評価 3 : Stepup function 適用時のスループット特性

Fig. 20 Evaluation 3: Throughput of Stepup function.

トである。Simple threshold function, Exponential function と比較し、どの閾値のスループットもほぼ同程度のスループットとなっていることが分かる。これは RREQ 再送回数によって RREQ 転送確率を上昇させている結果であると考えられる。また閾値によって大きなスループットの変化がない。しかし、追加した B'-A' 間 Background flow による影響が大きく、スループットが送信レートの上昇とともに低下していることが分かる。これは $\overline{HEI}(r, i)$ が閾値以上の端末が RREQ を転送しルートを構築したとしても、RERR を送信する端末が多いことが原因となりルートが安定しないことが影響していると考えられる。

LEX-R では、片方向リンクによる隠れ端末問題からの干渉を避けるため、隠れ端末から影響を受けやすい端末は $\overline{HEI}(r, i)$ から判断し RREQ を破棄することでルートから排除される。この干渉を避けるアルゴリズムによる RREQ 破棄がルート発見率に与える影響を考察する。これはスループットの評価から考察することが可能である。まず評価 3 において、Simple threshold function の閾値が 1, Exponential function の減衰係数の $\alpha = 0.00001$ の場合ほとんどルートが構築されず低スループットという結果となる。一方ここで Stepup function と Simple threshold function の差異は「RREQ 再送回数によって RREQ 転送確率を上げる」ということである。このことから、転送確率を上げることによってルートが構築され RREQ 破棄によるルート発見率の低下を防ぐということが分かる。つまり Simple threshold function, Exponential function は RREQ 破棄による影響を受けルート発見率が低下するが、Stepup function はルート発見率の低下を防ぐアルゴリズムを持つことが分かる。

5. 議 論

本章では LEX-R の送信電力レベルが n 個の場合への拡張についての検討を行う。またデータパケットサイズが異なる場合の $\overline{HEI}(r, i)$ の定義の検討を行う。最後に性能評価の結果を受けてより複雑な方式の検討を行う。

5.1 送信電力レベルが n 個の場合への拡張

本論文では性能評価を含め問題の簡略化のため高送信電力端末、低送信電力端末 2 端末が存在する環境を前提とした。しかし実際の環境では複数の異なる送信電力端末が存在することが考えられる。LEX-R は Hello パケット交換によって片方向リンクを検出するため、送信電力の相違にかかわらず、Hello パケットが届くか否かで双方向リンクであるか片方向リンクであ

るかの判断を行っている。そのため複数の異なる送信電力端末が存在する環境においても Hello パケットが届くか否かで判断することが可能である。したがって一般的に n 個の送信レベルが存在しても動作する。実用環境を想定した一般的な場合については今後検討する。

5.2 パケットサイズが異なる場合の干渉量の定義

本論文では全フローのデータパケットサイズは同一と仮定しており、実際のデータ通信にかかる時間は同一である。そのため $\overline{HEI}(r, i)$ は制御メッセージ数のみで定義している。しかしデータパケットサイズが異なる場合は、データ通信にかかる時間は異なる。このことからデータパケット通信にかかる時間を考慮した $\overline{HEI}(r, i)$ を今後検討する必要がある。

5.3 より複雑な転送確率関数の検討

提案した RREQ 転送確率関数はすべてシンプルなものである。これらは比較プロトコル AODV-BL と比較し高いスループットを示した。しかし高送信電力端末間通信が分散して存在する環境においては Simple threshold function, Exponential function とともに急激に下がる閾値、または減衰係数が存在することが分かる。Stepup function については急激にスループットが下がる閾値は存在しないが全体的にスループットが低下する。Simple threshold function, Stepup function では $\overline{HEI}(r, i)$ が閾値以上の場合は、 $\overline{HEI}(r, i)$ が閾値付近に存在する場合、閾値付近に存在しない場合であっても同様の干渉量として判断を行っている。たとえば $\overline{HEI}(r, i)$ の閾値が 50 であると仮定した場合、 $\overline{HEI}(r, i) = 60$ の端末、 $\overline{HEI}(r, i) = 120$ の端末では影響が大きく違うことが分かる。このことから複数の閾値を持たせ、 $\overline{HEI}(r, i)$ によってレベルを付ける方式が考えられる。

また本論文では小規模なネットワークを対象としているため大規模ネットワークについての議論が必要となる。本提案方式は各端末のローカルな情報に基づいて RREQ の破棄、破棄にともなうルート構築を行った。しかし大きなネットワークではルート全体の片方向リンクによる干渉量を考慮に入れるべきである。そこで、前述したように閾値を複数用意し、 $\overline{HEI}(r, i)$ が非常に大きい端末は RREQ を破棄し、閾値付近の端末は RREQ に $\overline{HEI}(r, i)$ を加算し、宛先がルート全体の干渉量から判断し最も干渉量が少ないルートを利用させる方式が考えられる⁷⁾。さらにエンドツーエンドのホップ数が大きくなりすぎるとデータ伝送遅延が大きくなり、またパケット損失率も高くなり、干渉量が少ないルートの中でもよりホップ数が小さいルートを宛先が選択する方式も考えられる。

6. ま と め

本研究では送信範囲が異なる環境下で起こる片方向リンクによる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 LEX-R の提案を行った。LEX-R は Hello パケット交換により近隣に存在する片方向リンクの検出を行う。また近隣端末とのリンク情報を利用し、ルート発見フェーズ、ルートメンテナンスフェーズを行う。ルート発見フェーズでは、片方向リンク端末から来た RREQ を破棄することで双方方向リンクのみのルート構築を行う。また片方向リンクによる隠れ端末からの干渉量 $\overline{HEI}(r, i)$ から RREQ 転送か否か判断し、片方向リンクによる隠れ端末問題からの干渉が少ないルート構築を行う。またルートメンテナンスフェーズでは、端末が低モビリティ、モビリティがない環境、また送信範囲が異なる端末が混在する環境において安定したルートを構築する。性能評価の結果、高送信電力端末が偏って存在する環境で、既存プロトコル AODV-BL と比較し各 RREQ 転送確率関数ともにスループットが大きく向上した。また高送信電力端末間通信が分散して存在する環境においても AODV-BL と比較し各 RREQ 転送確率関数ともにスループットが向上した。

しかし高送信電力端末間通信が分散して存在する環境ではすべての RREQ 転送確率関数で Background flow の送信レートが上がるにつれスループットが低下することが考察できた。また一般的な環境での性能評価、複数の閾値を用いる方式の詳細な評価、今後は端末のモビリティを考慮した評価も行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) Perkins, C. and Royer, E.: Ad-hoc on-demand distance vector routing, *Proc. IEEE WMCSA*, New Orleans, LA, pp.90–100 (Feb. 1999).
- 2) Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, *IETF, RFC 3561* (July 2003).
- 3) Shah, V. and Krishnamurthy, S.: Handling Asymmetry in Power Heterogeneous Ad-Hoc Networks: Across Layer Approach, *Proc. IEEE ICC2005*, Vol.00 (June 2005).
- 4) Nesargi, S. and Prakash, R.: A tunneling Approach to Routing with Unidirectional Links in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. IC3N*, pp.522–527 (2000).
- 5) Poojary, N., Krishnamurthy, S.V. and Dao, S.: Medium Access Control in a Network of Ad Hoc Mobile Nodes with Heterogeneous Power Capabilities, *Proc. IEEE ICC2001*, Helsinki, Finland (June 2001).
- 6) Lee, S.-H., Choi, J.-M. and Ko, Y.-B.: UA-MAC: Unidirectional-link Aware MAC Protocol for Heterogeneous Ad Hoc Networks, *Proc. LNCS 3158 (ADHOC-NOW '04)* (July 2004).
- 7) Fukui, Y., Bandai, M. and Watanabe, T.: A Routing Algorithm for Avoiding Interference in Power Heterogeneous Wireless Ad Hoc Networks, *Proc. WPMC2006* (Sep. 2006).
- 8) QualNet Network Simulator 3.9.
<http://www.qualnet.com>

(平成 18 年 10 月 31 日受付)

(平成 19 年 4 月 6 日採録)



福井 裕介 (学生会員)

1983 年生。2006 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。現在、同大学大学院情報学研究所修士課程在学中。モバイルコンピューティング、アドホックネットワークにおけるルーティングおよびメディアアクセス制御に関する研究に従事。



萬代 雅希 (正会員)

1973 年生。1996 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1998 年同大学大学院修士課程修了。2004 年同大学院後期博士課程修了。2004 年静岡大学情報学部助手。2007 年同大学助教、現在に至る。1998～2000 年ソニー (株) 勤務。2001～2003 年日本学術振興会特別研究員 (DC2)。2006～2007 年ブリティッシュコロンビア大学 (カナダ) 訪問研究員。博士 (工学)。主として、通信ネットワークの研究に従事。IEEE、電子情報通信学会各会員。2006 年度情報処理学会山下記念研究賞受賞。

**渡辺 尚**（正会員）

1959 年生。1982 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1984 年同大大学院博士前期課程修了。1987 年同大学院博士後期課程修了。工学博士。同年徳島大学工学部情報工学科助手。

1990 年静岡大学工学部情報知識工学科助教授。1996 年静岡大学情報学部情報科学科教授。現在、静岡大学創造科学技術大学院教授。静岡大学情報学部情報科学科教授兼任。1995 年文部省在外研究員（カリフォルニア大学アーバイン校）。計算機ネットワーク、分散システムに関する研究に従事。2005 年より情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査。訳書『計算機設計技法』、『802.11 無線ネットワーク管理』等。IEEE、電子情報通信学会各会員。
