

片方向リンクを考慮したアドホックネットワーク ルーティングプロトコルの提案と検討

福井 裕介[†] 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 近年アドホックネットワークが注目されており、様々なプロトコルが提案されている。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。本稿では各端末の無線信号到達範囲が不均一な環境下でお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 は早期に双方向リンクのみのルートを構築し、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。これにより片方向リンクが存在する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。

Proposal and Investigation of Ad Hoc Network Routing Protocol Considering Unidirectional Links

Yusuke FUKUI[†] 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. Various protocols are proposed since the nodes can construct ad hoc networks without depending on infrastructures. In this paper, especially we focus on the problems of unidirectional links due to heterogeneity of transmission power of nodes, 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. It solves the hidden terminal problems incurred by unidirectional links and improves the throughput in the power heterogeneous networks. 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、電力消費の低減を計るため送信電力を制御する MAC プロトコルが提案されている。このため各端末の送信電力が不均一な状況が想定される。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、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言う。片方向リンクは、ネットワーク層、MAC 層に大きな影響を及ぼし、

性能が悪化する。ネットワーク層では、ルート上に片方向リンクが存在することでルート探索にかかるオーバーヘッドが増大する。また MAC 層では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隠れ端末問題が生じ、スループットが低下する。

そこで本稿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 では早期に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する。また片方向リンクによる隠れ端末から干渉を多く受ける端末は RREQ を破棄し、データ通信が行われるルートから排除される。これにより、通信干渉の少ない端末のみを経由するルートを構築する。最後に提案した 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-BL [2] 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よる問題の解決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を対処するルーティングプロトコルを述べる. また, 片方向リンクによる隠れ端末問題に対する MAC 層での対処法を示す.

2.1. ネットワーク層での問題に対処するルーティング

従来のオンデマンド型ルーティングプロトコルでは宛先端末までのルート構築をオンデマンドで行うため, RREQ をネットワーク全体にフラッディングする. RREQ を受信した宛先は送信元に対して RREP を返送するが, 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 を再送を繰り返す問題点がある. 片方向リンクによる問題の解決に特化したルーティングプロトコルにはルート上の片方向リンクを利用する方法と双方向リンクのみのルートを構築する方法がある.

Ncsargi らの方式 [4] は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し, 復路は片方向リンク間で復路を作成し通信を行う. 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挙げられる. しかし問題点として, 片方向リンクを利用する方式は, MAC 層の大幅な変更, またネットワーク層と MAC 層の中間にサブレイヤー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挙げられる. 一方, AODV-BL[2]のような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挙げられる. 欠点は, 片方向リンクを利用する方式と比較し長いホップ数でデータ転送を行う必要があることである. 本稿の提案方式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, 双方向リンクのみのルート構築を行う方式である.

以下では, 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-BL を述べる.

● AODV-BL

Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing with Black-List(AODV-BL)[2]が AODV の片方向リンクに対処するオプションとして提案されている. AODV-BL は AODV 同様のルート構築要求を行い (RREQ フラッディング), 宛先端末は送信元に向けて RREP を返送する. しかし RREP 送信元に対して RREP-ACK が返送されない場合は, 送信相手と自身が片方向リンクであると判断し送信相手を Black-List としてテーブル (BL テーブル) に記録する. 以後 BL 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

ヘッドの低減を図っている. しかし AODV-BL は RREP-ACK によって初めて片方向リンクを検出し, 早期 (最初の RREQ でのルート構築) に片方向リンクに対処してルート構築を行うことが不可能であり, ルート構築にかかる遅延が大きい.

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目的のため RTS-CTS 制御メッセージを利用する従来プロトコルは, リンクバイリンクでのユニキャスト通信開始前に RTS/CTS 交換を行うことで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.

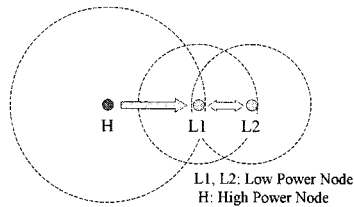


図 1: 片方向リンクによる隠れ端末問題

図 1 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. RTS-CTS 制御メッセージを利用するプロトコルでは, 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ることにより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するため 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を開始すると, L1-L2 の通信を干渉する. この問題の解決を目的とした方式について述べる.

● Handling Asymmetry in Power Heterogeneous Ad-Hoc Networks: A cross Layer Approach [3] (以下 Krishnamurthy らの方式)

関連研究[5]を改良した方式である Krishnamurthy らの方式では, 高送信電力端末からの通信干渉を抑制するため, 近隣数ホップ以内で干渉する可能性のある端末に制御メッセージをマルチキャストする. 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ため, MAC 層のみでなくネットワーク層の大幅な変更が必要となる. 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うが, 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, 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 UAMAC[6]は、より小規模なネットワークを考慮した方式であり、Krishnamurthy らと同様に制御メッセージをマルチキャストし、片方向リンクによる隠れ端末からの干渉を防ぐ方式である。しかし UAMAC は、片方向リンクの検出を送受信電力、送受信利得から判断するスキームを持ち、MAC 層のみで片方向リンクによる隠れ端末問題に対処する点で、Krishnamurthy らの方式と異なる。

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。

I. AODV-BL

利点：ルート探索にかかるオーバーヘッド削減

問題点：ルート構築遅延

II. Krishnamurthy らの方式

利点：隠れ端末による影響低減

問題点 1：制御メッセージによるオーバーヘッド増大

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

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進めることで、AODV-BL と比較しルート探索にかかるオーバーヘッドを低減する。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
2. ルート発見フェーズ
3. ルートメンテナンスフェーズ

これら 3 つのフェーズを詳細に説明する。

3.1. 片方向リンク検出フェーズ

LEX-R では各端末は定期的に Hello パケット交換を行うことで、近隣端末とのリンク状態（片方向リンク、双方向リンク）を認識する。

各端末は一定期間内に受信した Hello パケットの送信元 ID を自身の Hello パケット内に記載し送信を行う。Hello パケットを受信した端末は、自身の ID が Hello パケットに記載されている場合には、送信元端末と双方向リンクが確率できると判断する。反対に、自身の ID が記載されていない場合、双方向リンクが確立できない（自身へのリンクのみ）と判断する。このリンク状態を近隣端末テーブルに記録し、ルート発見、ルートメンテナンスフェーズにて利用する。

3.2. ルート発見フェーズ

LEX-R では一般的なオンデマンドルーティングプ

ロトコルと同様に、宛先へのルート発見のための 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。宛先端末は RREQ を送信元に対して RREQ が辿ってきたルート経由で返送する。送信元が RREQ を受信すると実際のデータ通信を行う。LEX-R では“双方向リンクのみのルート構築”と“片方向リンクによる隠れ端末問題を防ぐルート構築”の二つの RREQ 転送アルゴリズムを同時に用いる。

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 つの条件を全て満たすと、本稿 3.2.2 節「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 転送を行う。(1)~(3)の条件の一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 以下である。
(2) 同シーケンス番号を持つ RREQ を未転送である。
(3) 1 ホップ上流端末と双方向リンクを確立できる。

(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 転送によるブロードキャストストームを防ぐためである。(3)は双方向リンクのみのルート構築を行う条件である。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、(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、全て双方向リンクのみのルートに沿った RREQ が宛先に到着することになる。構築されるルートは早期、つまり最初の RREQ の段階で、双方向リンクのみのルート構築を行い、AODV-BL と比較しルート探索にかかるオーバーヘッドを低減する。

3.2.2. 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

ルート発見フェーズで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ために、RREQ を破棄する基準（判断メトリック）を考える必要がある。各端末は片方向リンクを持つ端末から受信する制御メッセージ数を常にカウントし、近隣端末テーブルを更新する。制御メッセージは MAC 層における RTS と CTS を意味する。また本稿では簡単のためデータパケットサイズは全て同一とし、データ通信にかかる時間は判断メトリックに反映しないものとする。

一定期間内に片方向リンクを持つ端末から受信する制御メッセージ数が多いということは、干渉を受ける確率が高いことを意味する。この一定期間内に各端末が片方向リンクを持つ端末から受信する制御メッセージ数を干渉量とし、“Historical Exposed Index”, $HEI(r,i)$ と定義する。

$HEI(r,i)$ は RREQ 受信端末 r が近隣に存在する片方向リンクを持つ端末 i から受ける制御メッセージ数を意味する。また、近隣に存在する片方向リンク数で割った平均 $HEI(r,i)$ を次式と定義する。

$$\overline{HEI}(r,i) = \frac{\sum HEI(r,i)}{U} \quad (1)$$

U は近隣の片方向リンクを持つ端末数を表す。

上記の双方向リンクのみのルート構築条件を全て満たした RREQ 受信端末は $\overline{HEI}(r,i)$ を参照し、以下の RREQ 転送関数に従って RREQ 転送か破棄かを決定する。

■ RREQ 転送関数

RREQ を受信した端末は双方向リンクのみのルート構築条件を全て満たした場合このフェーズに移る。転送確率をどのように指定すべきかについては様々な方法が考えられるが、本稿では以下の3つの基礎的な方法を検討する。

A) Simple threshold function

Simple threshold function は RREQ の転送か破棄かをある閾値によって判断する方式である。端末は $\overline{HEI}(r,i)$ を参照し、もし $\overline{HEI}(r,i)$ が閾値よりも低い場合は RREQ 転送、一方で高い場合は RREQ 破棄を行う。図 2 は 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。

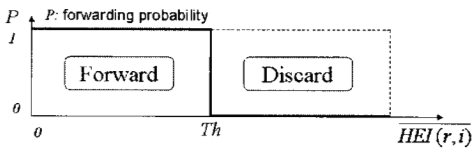


図 2 : Simple threshold function

- If $Th \leq \overline{HEI}(r,i)$ then 端末は RREQ 転送可能
- else if $Th > \overline{HEI}(r,i)$ then 端末は RREQ 破棄

B) Exponential threshold 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。 P は $P = e^{-\alpha \overline{HEI}(r,i)}$ に従って減少する。 α は減衰係数を示す。転送確率 P に従って RREQ 転送、RREQ 破棄を行う。図 3 は Exponential function を示す。

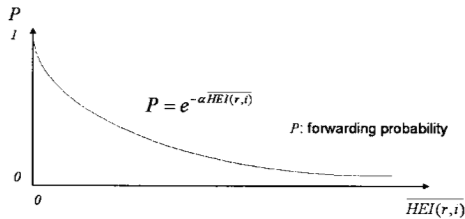


図 3: Exponential function

C) Step up function

Simple threshold function, Exponential function は $\overline{HEI}(r,i)$ と固定された閾値との比較によって RREQ を破棄するため、多くの端末が RREQ を破棄しルートがほとんど構築されない場合が存在する。そこでこれら二つの RREQ 転送確率関数の問題点を考慮した Step up function を提案する。Step up function は Simple

threshold function と同様に、 $\overline{HEI}(r,i)$ と比較する閾値を設定し、閾値より低い場合は RREQ を転送する。一方、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(図 4)。転送確率は送信元からの 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 となる様に変動する(図 4 では、RREQ 最大再送回数は 3)。式 2 に RREQ 再送が発生した場合の転送確率を示す。

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

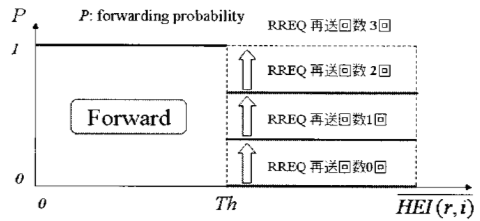


図 4 : Step up function

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その都度 RERR を送信元に送りルート再構築要求を行う。すなわち AODV-BL では、MAC 層での通信失敗が干渉によって生じたものであったとしても、宛先端末が通信範囲外にあることによるリンク切断だと判断する。しかし様々な送信電力が混在する環境においては、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て、送信失敗する傾向が強い。その都度 RERR を送信する AODV-BL ではルート再構築が頻発し、スループットが低下する。

これに対し LEX-R では、送信失敗した宛先端末が、Hello パケット交換によって構築された近隣端末テーブルに存在する場合(通信範囲内にある場合)は RERR を返送せず、反対に、テーブルに存在しない場合(通信範囲外にある場合)は RERR を送信元へ返送する。また $\overline{HEI}(r,i)$ が先述した RREQ 破棄閾値より高い端末は、RERR を送信元に返送する。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。モビリティに関しては AODV-BL と同様の性能となる。

4. 性能評価

本章では Qualnet Network Simulator 3.9[8]によって、MAC 層での基礎評価及び LEX-R の性能評価を行う。

4.1. 基礎評価

先述した LEX-R 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。図 5 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。

図 5 中(a)において端末 L1-L2 間、端末 H-L3 間で通

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。高送信電力端末 H は端末 L2 と片方向リンクを持つ。すなわち、L2 に対する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 70Kbps と固定し、端末 H の送信レートを 30Kbps から変化させた場合の端末 L1-L2 間のスループット特性を評価する¹。また図 5 中 (b) は全端末が低送信電力端末であり、片方向リンクが存在せず端末 L1-L2 間通信は干渉を受けない状況を示している。図 5 中 (b) も同様に端末 L4-L3 間の送信レートを 30Kbps 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 802.11 b (1Mbps)、MAC 層には IEEE 802.11DCF を用いる。

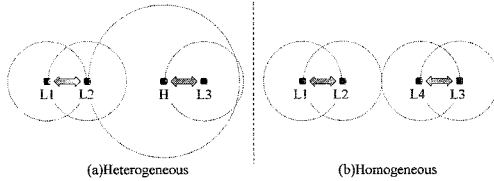


図 5: MAC 層での基礎評価トポロジ

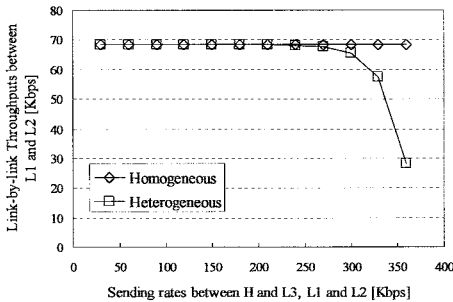


図 6: 片方向リンクによる隠れ端末の影響

図 6 は片方向リンクによる隠れ端末の影響を示す。横軸は端末 H-L3 間、L4-L3 の送信レートを表し、縦軸は端末 L1-L2 間のスループット特性を表している。全端末の送信電力が同一の環境(Homogeneous)で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可能である。一方で送信電力が同一でない環境(Heterogeneous)では、高送信電力端末は隠れ端末となり端末 L1-L2 間の通信に影響を及ぼしていることがわかる。特に 210Kbps 以降はスループットが急激に低下している。このことから MAC 層レベルでは 210Kbps 前後で隠れ端末の影響を受けやすくなる。ルーティング層でのエンドツーエンドの通信を考えた場合 210Kbps 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 3.9[8] 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 7 はシミュレーショントポ

¹ 端末 L1-L2 間の送信レートを 10Kbps から 200Kbps まで変化させて評価を行ったが、以降に述べる結果の傾向はほぼ同様であることを確認した。

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 200m 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。その他のパラメータ等は次の通りである。物理層では IEEE 802.11 b (1Mbps)、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。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。

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することで評価を行う。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、一つは影響を及ぼす高送信電力端末同士のフローであり、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。

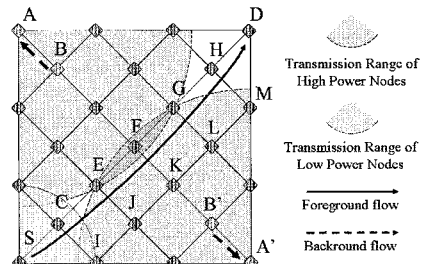


図 7: 評価 1, 2, 3 での評価トポロジ

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 13.5dBm, 低送信電力の送信電力は 4.5dBm とする。IEEE802.11 b (1Mbps:受信閾値-93dBm) 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 400m, 約 200m 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。この時 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最も関連の深い AODV-BL とする。AODV-BL は最短ホップのルートを示す。

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る。これは Background flow からの干渉を受けやすいルートであり、Background flow の送信レートが低い場合影響は小さいが、送信レートが高い場合影響は大きい。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。例えば Background flow の送信レートが低く影響が小さい場合は 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、S-C-I-J-K-L-M-H-D という干渉を避けるルートを構築する。

評価 2 では Foreground flow は送信レート 70Kbps で固定とし、B-A 間 Background flow を送信レート 30Kbps ~ 270Kbps に変化させる。B'-A' は通信を行わない。つまり高送信電力端末間通信が偏って存在した環境を想定した評価である。この時の 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。

評価 3 では、Foreground flow の送信レートは同様に 70Kbps 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送信レートで固定し、B'-A' 間 Background flow の送信レートを 30Kbps ~ 270Kbps に変化させる。つまり高送信電力端末間通信が分散して存在する環境を想定した評価である。この時の 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辿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、ルート構築遅延を評価することで示す。

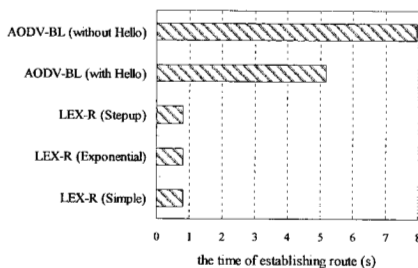


図 8 : ルート構築遅延

図 8 は各プロトコルを用いた時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 パケット交換の有り無しで評価した結果を示す。LEX-R (Simple), (Exponential), (Step up) はそれぞれ LEX-R の各ファンク

ション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 の各ファンクションのルート構築遅延が低減していることがわかる。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 をフォワーディングする。このことで端末 FH 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。つまりルートが最初の 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わかる。

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。そのため最初の 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わかる。

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、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 30Kbps ~ 270Kbps まで変化し、S-D 間通信は 70Kbps で固定とする。

図 9 は Simple threshold function を用いた時の 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 30Kbps ~ 270Kbps まで変化させた時の $HEI(r, i)$ は 0 ~ 120 で変化するため、Simple threshold function での閾値 $Th = 1, 10, 50, 100, 120$ 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 LEX-R (閾値 or 減衰係数) は各閾値、各減衰定数を用いた時の LEX-R のスループットを示す。

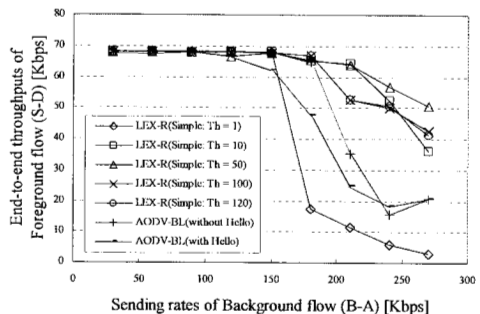


図 9 : Simple threshold function 適用時のスループット特性

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わかる。 $Th = 1$ のスループットが悪化する理由は、図 7 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、端末 C の $\overline{HEI}(r, i)$ が 1 以上となりルートが全く構築されないためであると考えられる。また $Th = 50$ の時がスループット最大となることわかる。 $Th = 100, 120$ 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。

図 10 は Exponential function を用いた時の 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わかる。しかし、 Exponential function の各減衰係数での結果は Simple threshold function の閾値 1 のスループットの様に急激に下がることがないことがわかる。 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。

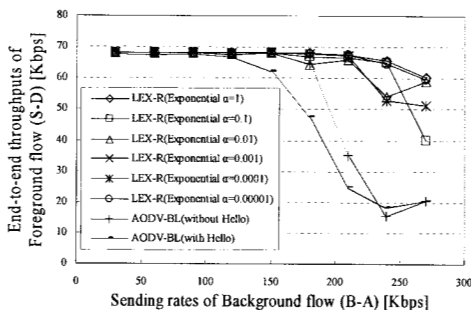


図 10: Exponential function 適用時のスループット特性

図 11 は Step up function を用いた時の Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。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。 Step up 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わかる。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、 Step up 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 $Th = 1$ 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わかる。 Step up function では Th の設定による影響が小さいことがわかる。

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全ての 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わ

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ほとんどルート構築が行われなかった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問題が存在すると思われる。

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。

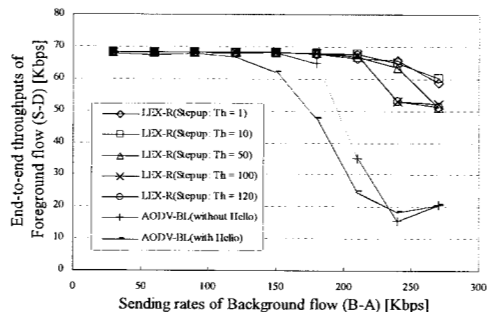


図 11: Step up function 適用時のスループット特性

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 240Kbps とし、新たに加えた B'-A'間送信レートは 30Kbps~270Kbps で変化させる。また S-D 間 Foreground flow は評価 2 同様 70Kbps で固定とする。この時の 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 の閾値及び減衰係数は評価 2 と同じとする。

図 12 は Simple threshold function を用いた時の Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。 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わかる。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わかる。

次に図 13 は Exponential function を用いた時の 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

ことがわかる($\alpha=0.001, 0.0001$)。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。

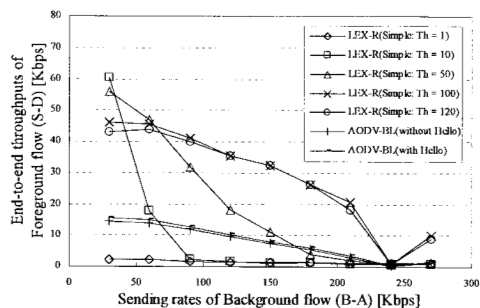


図 12 : Simple threshold function 適用時のスループット特性

最後に、図 14 は Step up function を用いた時の Foreground flow のエンドツーエンドスループットである。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わかる。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共に低下していることがわかる。これは $HEI(r, i)$ 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。

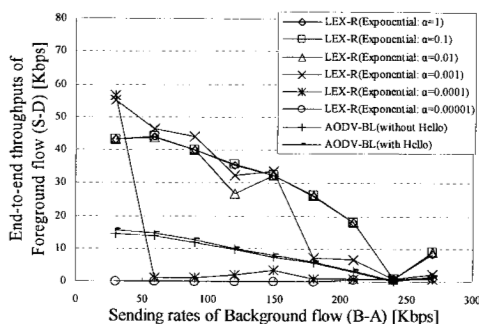


図 13 : Exponential function 適用時のスループット特性

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 $HEI(r, i)$ 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、これまでの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 の減衰係数が 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 Step up function と Simple 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わかる。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、Step up 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わかる。

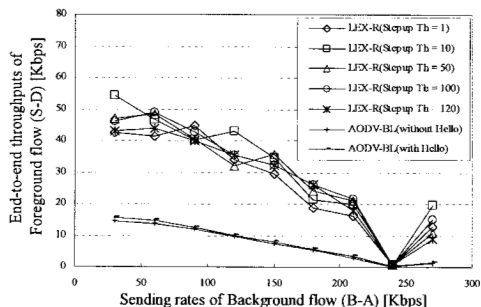


図 14 : Step up function 適用時のスループット特性

5. おわりに

本稿では送信範囲が異なる環境下でお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 は片方向リンク端末から来た RREQ を破棄することで早期に双方向リンクのみのルート構築を行うことを示した。また片方向リンクによる隠れ端末からの干渉量 $HEI(r, i)$ を基に RREQ 転送回数により RREQ 転送可否か判断し、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ことを示した。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、モビリティが無い環境、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ことを示した。性能評価において、ルート構築遅延を AODV-BL と比較し低減した。また高送信電力端末が偏って存在する環境、分散して存在する環境で AODV-BL と比較しスループットが大きく向上した。

参考文献

- [1] C. Perkins and E. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing", in Proc. of IEEE WMCSA, New Orleans, LA, pp. 90-100, Feb 1999
- [2] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "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 of the IEEE ICC2005, Volume 00, June 2005
- [4] S. Nesarji and R. Prakash, "A tunneling Approach to Routing with Unidirectional Links in Mobile Ad Hoc Networks", Proc of the IC3N, pp.522-527, 2000
- [5] N. Poojary, S.V. Krishnamurthy, and S.Dao, "Medium Access Control in a Network of Ad Hoc Mobile Nodes with Heterogeneous Power Capabilities", Proc. of the IEEE ICC2001, Helsinki, Finland, June 2001
- [6] Sung-Hee Lee, Jong-Mu Choi, and Young-Bae-Ko, "UAMAC: Unidirectional-link AwareMAC Protocol for Heterogeneous Ad Hoc Networks", Proc of the LNCS 3158 (ADHOC- NOW'04), July 2004
- [7] Yusuke Fukui, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, "A Routing Algorithm for Avoiding Interference in Power Heterogeneous Wireless Ad Hoc Networks", Proc of WPMC2006, Sep 2006
- [8] QualNet Network Simulator 3.9 <http://www.qualnet.com>