

アドホックネットワークにおける経路情報を利用した TCP 性能向上手法の提案

幸 太一[†] 山本 貴之[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†] 宮原 秀夫[†]
畠内 孝明^{†††}

[†] 大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻 〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Tel: 06-6850-6588, Fax: 06-6850-6589

^{††} 大阪府立看護大学 医療技術短期大学部 〒 583-8555 大阪府羽曳野市はびきの 3-7-30
Tel: 0729-50-2111, Fax: 0729-50-2131

^{†††} 富士電機 (株) 電機システムカンパニー 技術開発室 通信応用技術開発部
〒 191-8502 東京都日野市富士町 1

E-mail: †{t-yuki,tak-yymt,murata,miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††sugano@osaka-hsu.ac.jp,
†††hatauchi-takaaki@fujielectric.co.jp

あらまし アドホックネットワークを実現している製品であるフレキシブル無線ネットワークにおいて、雑音や障害物の通過などといった短期間のエラーに対して、経路情報を利用することによって TCP の性能を向上させる手法を提案し、その評価をシミュレーションにより行い、その有効性を示す。

キーワード アドホック無線ネットワーク、騒音、障害物、経路情報、TCP

An Approach to Improve the Performance of TCP over Ad Hoc Wireless Network by Utilizing the Route Information

Taichi YUKI[†], Takayuki YAMAMOTO[†], Masashi SUGANO^{††}, Masayuki MURATA[†], Hideo MIYAHARA[†], and Takaaki HATAUCHI^{†††}

[†] Department of Informatics and Mathematical Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Tel: 06-6850-6588, Fax: 06-6850-6589

^{††} Osaka Prefectural College of Health Sciences 3-7-30 Habikino, Habikino, Osaka 583-8555, Japan
Tel: 0729-50-2111, Fax: 0729-50-2131

^{†††} Multimedia and Wireless Dept., Tchnology Development Office, Energy and Electrical Systems Company, Fuji Electric Co.,Ltd 1 Fuji, Hino, Tokyo 191-8502, Japan

E-mail: †{t-yuki,tak-yymt,murata,miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††sugano@osaka-hsu.ac.jp,
†††hatauchi-takaaki@fujielectric.co.jp

Abstract On a Flexible Radio Network, one of the ad hoc wireless network systems, we show an approach that improves TCP performance by corresponding to link failure of a short period by the noise or obstacle with the route information, and show the validity by simulation.

Key words Ad Hoc Wireless Networks, noise, obstacle, route information, TCP

1. はじめに

アドホック無線ネットワークは、端末同士が無線回線によって直接通信を行ない、他の端末へのパケットの中継機能を有することで、自律分散的にネットワークを構築することができるシステムである。アドホック無線ネットワークは、基地局や有線回線を必要としないため、端末の配置やネットワーク拡張時に配線を行う必要がなく、端末の故障や移動などによるネットワーク形態の動的な変化にも各端末の自律的動作によって対応できるという特徴がある。そのため、アドホック無線ネットワークの特性の解析や、ルーティング等に関する研究が現在さかに行われている [1] ~ [3]。

フレキシブル無線ネットワーク (FRN: Flexible Radio Network) は、アドホック無線ネットワークを構築するための製品であり、固定端末を配置することによって、容易に大規模なネッ

トワークを構築できるシステムである [4], [5]。ネットワークを構成する各端末の通信範囲は約 500 m で、1 つのネットワークにつき最大 200 台まで設置することができる。現在、FRN は、自動販売機の売上・故障情報や、工場内の消費電力情報などの収集などに用いられている。

近年、アドホック無線ネットワークの適用範囲が拡大するに伴って、有線ネットワークとの相互接続や、有線ネットワークと同様のサービス提供についての要求が高まっている。有線ネットワークでは、トランスポート層プロトコルとして TCP (Transmission Control Protocol) [6] が一般的に用いられているため、アドホック無線ネットワークでも TCP を用いた通信が行われることが求められている。一般に、無線回線は有線回線よりも伝送品質が不安定で、パケット損失が頻繁に発生する。そのため、アドホック無線ネットワークは無線回線の多段構成になり、端末の移動なども発生するため、接続の切断

表 1 構成情報管理テーブル

ID:0	ID:1
隣接ノード情報	隣接ノード情報
隣接ノード情報	隣接ノード情報
:	:

や経路の変更が起こりやすく、TCP の性能が著しく劣化してしまう。したがって、アドホック無線ネットワークにおいても、TCP を効率良く伝送するための手法を確立することが重要である。

アドホック無線ネットワークにおける TCP の性能向上手法に関する研究のひとつとして、ELFN (Explicit Link Failure Notification) が提案されている [7], [8]。ELFN は、端末の移動によって TCP コネクションの切断が発生した場合に、切断中のパケット損失やタイムアウトを最小限に防ぐため、TCP 送信端末に対して経路の切断を通知し、また新たな経路が設定された場合には再接続を通知して送信を制御することで、TCP の性能向上を目指した方式である。ELFN の対象となっているアドホック無線ネットワークでは、端末が頻りに移動することが前提となっており、それによる経路の変更に焦点を当てていた。しかしながら、本報告で対象とする FRN では、基本的に端末は固定されており頻りに移動することはない。そのため、ELFN が対象としているシステムとは経路変更の頻度や時間が異なり、そのまま FRN に適用しても効果が期待できない。また、FRN では、各端末はネットワークの構成を把握しており、経路変更が発生した場合でも、ただちに別の経路を確保することが可能である。すなわち、単に ELFN による送信端末の制御を行なうだけではなく、FRN が持っている経路情報を利用することで、より適した手法で TCP の性能を向上させることが期待できる。

そこで本稿では、端末の移動ではなく、雑音や障害物による短い期間のリンクの切断に着目し、FRN が持っている経路情報を利用した TCP の性能向上手法を提案し、その性能評価を行なう。本システムのように、各端末が自律分散的に動作するシステムの振る舞いを解析的に捉えることは困難である。そこで本報告では、提案方式を ns-2 [9] によるシミュレータ上に実装し、評価の対象となる性能指標を導出し、提案方式の効果を明らかにする。また、リンク切断の発生頻度や切断時間などに対して、提案方式が有効となるような制御パラメータの評価を併せて行なう。

2. FRN の概略

2.1 ネットワークの構成要素とネットワーク構築手法

本システムでは、パケットの送受信及び中継機能を持つ各無線機をノードと呼ぶ。また、あるノードから直接通信可能なノードを隣接ノードと呼び、ノードが互いに通信できる無線通信路をリンクと呼ぶ。また、データの発信・受信を行うノードをホストノードと呼ぶ。各ノードは固有の ID を持っており、それによって識別される。

各ノードは、表 1 に示すような、構成情報管理テーブルと呼ばれるネットワーク情報を管理する。構成情報管理テーブルは、ネットワーク内の全ノードに対する自身からの相対的な位置情報を示すものであり、全ノードまでの中継回数とそのノードへのパケットを送出するための隣接ノード情報を管理している。

各ノードは、構成情報管理テーブルから全ノードへの最短中継回数を求めて構成制御パケットと呼ばれるパケットを生成し、これを一定の周期ごとに全隣接ノードに向けて同報送信をする。構成制御パケットを受信したノードは、その情報をもとに自身の構成情報管理テーブルを見直し、再構成する。

2.2 データリンクプロトコル

無線回線は固定時間のスロットで分割されており、パケット送信要求が生じた場合は、スロットの初めにキャリアセンスを行うことによってパケットの衝突を回避している。キャリアセンスとは、パケットを送信する際にあらかじめ通信路上の搬送

波を調べることで、通信路が空いていればパケットを送信するが、他パケットの搬送波を検知した場合は、時間間隔を置いてから再送を行う。

また、無線通信の特性として、電波の到達する範囲内のすべてのノードは、パケットの送信先に関わらず、その送信を知ることができるということが挙げられる。フレキシブル無線ネットワークではこの特性を用いて、次のノードに中継送信したパケットを前ノードへの ACK の代わりとして用いている。これを特に中継エコー (もしくは単にエコー) と呼ぶ。なお、ここでの ACK とは TCP のものとは異なり、隣接ノード間の通信の成功を確認するものである。パケットの最終到着先であるホストノードだけは中継送信を行わないため、エコーを返さない。その代わりとして、パケットを受信したことを知らせるために前中継ノードに ACK を返す処理を行う必要がある。パケット送信後、エコーもしくは ACK というレスポンスを一定時間内に受信できなかったノードは、パケットの再送を行う。

パケットの中継や ACK の送信は、ともにパケットを受信した次のスロットで行なわれる。このとき中継エコー、もしくは ACK が返ってこなかった場合には、送信が失敗したと判断し再送となる。本来の FRN においては、再送は 3 スロット後に行われるように固定されている。しかしながら、再送が行なわれる場合、再送間隔がすべてのノードで一定であれば、同じタイミングで再送が行なわれるため、再びパケットの衝突が発生してしまう。このような FRN の問題点は [10] で指摘されており、再送間隔を 3~5 スロットでランダムにすることで性能が向上することが明らかとなっている。したがって、本報告で評価の対象とするシステムにおいても、再送間隔を 3~5 スロットでランダムにすることとした。

また、再送を繰り返す、ネットワーク中にいつまでも存在し続けるパケットがあると、ノードにおけるバッファ容量を圧迫し、負荷の増大にもつながるため、すべてのパケットにはスロット単位の最大生存時間が設定されている。最大生存時間はパケット発生時に初期値が設定され、パケットがネットワーク内に存在する間は、1 スロット経過するごとに減少されていく。そして、その値が 0 になった時点で、そのパケットは最大生存時間オーバーとしてシステムから除去される。最大生存時間は、ホストノード間の距離等を十分に考慮した上で、全発生パケットに対して一定の値が設定されている。

2.3 ルーティングプロトコル

本システムのルーティングプロトコルは、絶えず変化し続ける無線通信路の環境下においても、通信の信頼性を確保することを目的として設計されている。例え最短中継回数を与える経路であっても、何らかの要因で経路が遮断されたり、停電や故障などの障害が生じることが考えられる。そのような場合に、即座に別経路を選択し、場合によっては迂回経路を経由してパケットを送信するという方法で通信信頼性を高めている。各ノードは、第 2.1 節で述べたように構成情報管理テーブルによって、自分自身から各隣接ノードを利用したときのそれぞれの場合について、他のノードへの中継回数を把握している。ある目的ノードに対して管理されている複数の経路上の隣接ノードは、各々の経路の目的ノードへの中継回数によって 3 種類に分類されている。

- (1) 前向き：中継回数が最短となる隣接ノード
- (2) 横向き：中継回数が最短中継回数+1 となるノード
- (3) 後向き：中継回数が最短中継回数+2 以上となるノード

パケット送信先ノードとしての送信優先度は、前向き隣接ノード、横向き隣接ノード、後向き隣接ノードの順になっており、同じ分類に属する隣接ノードは、信頼性値の高い経路ほど高い優先度を持つようになっている。目的ノードまでの中継回数のみから考えると前向き隣接ノードへの送信が最も効率が良いが、隣接ノード自体の障害や遮蔽物の存在といった通信路の障害が発生している可能性が考えられ、送信先隣接ノードを一意に決めてしまわず、前向き隣接ノードへの送信がすべて失敗した場合には、横向き隣接ノードへ送信し、それも失敗した場合は後

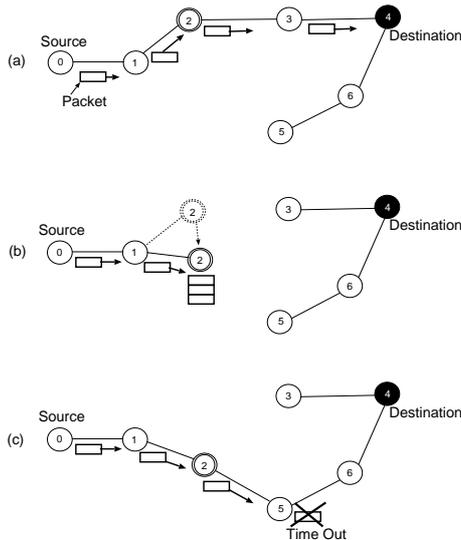


図1 ノードの移動に伴う経路変更のTCPへの影響

向きノードへ送信するという、柔軟なルーティングプロトコルが実現できる。また、このルーティングプロトコルを用いると、複数ノードからの送信パケットがあるノード周辺で衝突している場合にも、送信先を変更することによって衝突を回避することが可能となる。

3. ELFNによるTCP性能向上とFRNにおける問題点

3.1 ELFNによる性能向上手法

アドホック無線ネットワークの適用範囲が広がるにつれて、TCPを用いたデータ転送への要求が生じており、アドホック無線ネットワーク上でのTCPの性能評価や性能劣化を抑える方式に関する研究が行なわれつつある。ELFN (Explicit Link Failure Notification) 手法 [7], [8] はノードの移動による経路変更のために、上述のようなTCPの性能が劣化することに着目した方式である。すなわち、ノードの移動によってリンク切断が発生した際に、送信パケットの流れを制御することによって、ネットワークのスループットを向上させることを目的としている。

まず、図1に、ノードの移動がTCP送信へ及ぼす影響を示す。図1(a)はノード0から送信されたパケットが、ノード1、2、3を経由してノード4まで中継されている状態を示している。ここでノード2が移動することでノード3とのリンクが切断されるとする。その場合でもノード0においてパケットは発生するので、図1(b)に示すように、ノード2のバッファにはパケットが蓄積されることになる。もしバッファサイズを超えるパケットが到着すれば、パケット損失が発生することになる。もちろん、ノード2がノード5、6を経由する新たな経路を発見したとすると、図1(c)に示すように、滞留していたパケットはノード5へと送られることになる。しかしながら、リンク切断中に中間ノードで滞留していたパケットは、第2.2節において説明したパケット生存時間が減少しており途中のノードでタイムアウトになってしまう可能性が高くなる。このように、輻輳に起因しないパケット損失や、パケット生存時間切れによるタイムアウトの発生により、TCPのスループットが低下してしまうことになる。

そこでELFNでは、TCPパケットが流れている経路上において、あるノードがリンクの切断を検出した場合、そのノードはERDN (Explicit Route Disconnection Notification) というメッセージをTCPの送信元へ送り、ERDNを受け取った送信元はパケットの送信を一時停止するという処理を行う。また、リンク切断を検出したノードが、TCPパケットの目標ノードへの新しい経路を発見した場合には、ERSN (Explicit Route

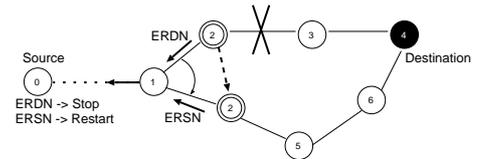


図2 ERDNとERSNによる送信ノードの制御

Successful Notification) を再びTCPの送信元へ送り、ERSNを受け取った送信元は送信を再開する。これにより、中間ノードのバッファにパケットが滞留することを防ぎ、リンクの切断中のパケット損失やタイムアウトの発生を最小限に抑えることができる。

図2は図1のノード2が、ELFNによって送信ノード0を制御する場合の例である。図1(a)の状態から(b)のようにノード2が移動することにより、ノード2とノード3の間の通信が不可能になった場合を考える。ノード2はリンク切断を検知すると、TCP送信元であるノード0にERDNを送信する。ERDNを受け取ったノード0はTCPパケットの送信を停止する。同時に、ノード2は送信先であるノード4への新しい経路を探索し、図1(c)のようにノード5を経由する新たな経路を見つけるとする。そのときノード2は、ERSNをノード0に送信し目標ノードまでのリンクの再接続を通知する。ERSNを受け取ったノード0はTCPパケットの送信を再開する。

3.2 ELFN手法のFRNへの適用に関する考察

ELFNは、ノードの移動によるリンク切断や経路変更に着目した性能改善手法である。一方、本報告で対象としているFRNでは基本的にノードは固定されており、頻りに移動することはない。しかしながら、FRNでも障害物などによる無線回線の遮断に伴うリンク切断は発生する。そのため、ELFNが対象とするような、ある程度短い期間のリンク切断に対して適切な制御を行うことで、FRNにおけるTCP通信の性能を高めることが可能であると考えられる。

また、本報告ではネットワーク層にTCPパケットを流すことを前提としている。FRN自体はネットワーク層の下位層であるデータリンク層プロトコルとして動作するため、ELFNのようにTCPの送信端末を操作することは、FRNのシステムに対してだけではなく、上位層のTCPに対してもELFNの手法に合わせた変更が必要となる。これは本報告の前提と異なっており、ELFNをそのまま適用することは難しい。

その一方で、第2.章で述べたように、FRNでは構成制御情報を周期的に交換することにより、目的先ノードに到達するために送信すべき隣接ノードの情報を、優先順位とともに管理している。そこでリンク切断が発生した場合でも、目的ノードへの経路として他の有用な隣接ノードが存在する場合には、ELFNのように送信ノードがパケットの送信を止める必要はなく、その経路情報を利用して有用な隣接ノードを選択することで、リンク切断による性能劣化を抑えることができるであろう。そこで、本報告では、FRNが保持している経路情報を活用することで、リンク切断が発生した場合でもTCPの性能劣化を抑えるための手法を提案する。次章において、提案方式について説明する。

4. FRNのTCP性能改善手法の提案

FRNは、構成制御周期で構成制御パケットを交換することで経路変更を行なう機能を有しており、長時間にわたるリンク切断やネットワーク構成の変更に対応している。しかしながら、第2.章で述べたように、構成制御周期を短くしすぎると、構成制御パケットの負荷が大きくなり性能劣化を引き起こすおそれがある。そのため、構成制御周期はあまり短くすることができず、実際には60秒程度に設定されている。つまり、雑音や障害物による数秒から数十秒程度のリンク切断は、FRNの構成情報には反映されず、TCPの性能劣化の原因になると考えられる。そこで、提案手法を設計する際に対象とするリンク切断

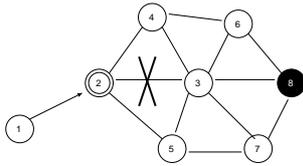


図 3 別経路を試す場合の例

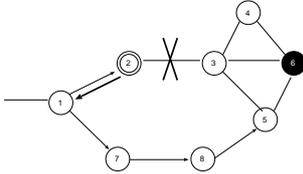


図 4 ERDN を使って前のノードから経路を選び直す例

は、構成制御周期より短かく、TCP の性能を劣化させるような期間のものとする。

4.1 リンク切断の検出方法

あるノードに対してパケット送信が失敗した場合には、リンク切断だけではなく、パケットの衝突による場合も考えられる。そこで、送信に失敗したら直ちにリンク切断と判断するのではなく、何回か連続して送信に失敗した場合にリンク切断とする。そのため提案手法では、各ノードにおいて、パケットを送信した隣接ノードごとに送信失敗回数をカウンタに記憶しておく。ある隣接ノードにパケットを送信し、ACK もしくは中継エコーが返ってこなければ、そのノードのカウンタの値を 1 増やす。そのカウンタが閾値を越えた段階でリンク切断と見なすものとし、対応するノードを利用停止状態とする。また、あるノードから何らかのパケットを受け取った場合には、そのノードとのリンクは接続されていると判断できるので、その時点でカウンタを 0 に戻すものとする。

4.2 リンク切断を検出した場合の動作

4.2.1 他に利用可能な経路がある場合

図 3 のようなネットワーク構成を考える。この場合、ノード 2 の構成情報管理テーブルには、ノード 8 への隣接ノードとしてノード 3、4、5 が登録されている。いまノード 3 の優先順位が高くなっているために、ノード 1 からノード 8 への経路として、1 2 3 8 の順に伝送されているものとする。このときに、ノード 2 においてノード 3 のカウンタが閾値を超え、リンクの切断を検出したものとする。ノード 2 の構成情報管理テーブルには、隣接ノードとしてノード 4 やノード 5 が登録されているので、ノード 3 が利用停止となった場合には、ノード 4 またはノード 5 を経由した経路で伝送が行なわれる。

4.2.2 他に利用可能な経路がない場合

次に、図 4 のようなネットワーク構成において、ノード 1 からノード 6 への経路が、1 2 3 6 であり、ノード 2 とノード 3 の間でリンク切断を検出したとする。この場合、ノード 2 の構成情報管理テーブルには、前向き・横向き隣接ノードとしてノード 3 だけが登録されており、他に利用可能な経路はない。このような場合には、ノード 2 は、ERDN を一つ前のノードであるノード 1 に送信して、リンク切断を通知する。ERDN を受け取ったノード 1 は別の経路を探し、見つかった場合は新たなノードに向けてパケットを送信する。見つからなかった場合は、さらにひとつ後ろ向きのノードに対して ERDN を送信する。このような動作を、前向きや横向きのノードが見つかるまで、ノードをさかのぼって繰り返す。

4.3 利用停止状態からの復帰

リンク切断を検出した後、利用停止しているノードを避けて

表 2 リンク切断を検出するためのテーブル

隣接ノード	3	4	5	...
カウンタ	2	0	1	...

パケットを送信しているノードは、利用停止しているノードに対してプローブパケットとしてデータパケットを、数パケットに 1 つ送る。これはリンク切断からの復帰を素早く検出し、そのノードを再び利用することによって、有効な経路を選択できるようにするために行う。図 3 では、ノード 2 がノード 3 に対してプローブパケットを送信し、図 4 では、ノード 1 がノード 2 に対して送信し、ノード 2 はさらにノード 3 に送信する。リンク切断を検出したノード (図 3、図 4 とともにノード 2) で、リンク切断のノードに対して送信が成功した場合、リンク切断から回復する。4.2.2 節のように ERDN を送信していた場合は、別経路を選択しているノードまで ERSN を送る。ERSN を受け取ったノードは、利用停止を解除する。また、リンク切断のノードから何らかのパケットを受け取った場合、4.1 節でカウンタをクリアしたときの考え方と同様に、そのノードはエラー状態ないと判断し、パケットを受け取ったノードではリンク切断のノードに対して一時利用停止から復活する。

プローブパケットの機能を使うことによって、リンク切断を検出したノードは一時利用停止しているノードがリンク切断から復帰したことを能動的に知ることができ、プローブパケットを使わず受動的になんらかのパケットの到着を待つよりも、素早く利用可能な経路を活用することが可能となる。このことは、ネットワークのスループット向上に影響する。

5. シミュレーションによる提案手法の評価

5.1 シミュレーションモデル

提案手法の効果や適用範囲を明らかにするため、性能評価を行なう。本報告で対象としているシステムのように、複数のノードが自律的に動作している場合には、解析的な手法による評価が困難なため、シミュレーションによって性能指標を求める。

まず、シミュレーションのためのモデル化を行うにあたって、以下の仮定を導入する。

(1) ネットワークを構成するノードは移動しないものとする。

(2) シミュレーションの簡単化のために、ノードそのものを停止させることでリンク切断をモデル化する。すなわち、停止状態にあるノードは、パケットの送受信ができないものとする。各ノードにおいて、ノード停止の発生頻度はポアソン分布に従い、停止状態の続く時間は指数分布に従うものとする。

(3) 第 2.2 節で述べたように、パケットの再送を行う際の時間間隔は 3 スロットから 5 スロットの間のランダムな値とする。

FRN のプロトコルおよび提案手法を、ネットワークシミュレータである ns-2 [9] に提供されているアドホック環境上に実装し、シミュレーションにより性能評価を行なった。シミュレーションの対象とするネットワークの構成を図 5 に示す。本ネットワークにおいて、ノード 0 を送信ノード、ノード 9 を受信ノードとして、ftp コネクションを入力トラヒックとして与えた。コネクションの発生は、構成制御によってネットワークの構成情報管理テーブルが十分安定した後に行なった。また、ネットワークの規模より、FRN のデータリンクプロトコルにおけるパケットの最大生存時間は 32 スロットに設定した。

5.2 提案手法における TCP スループットの評価

提案手法の効果の評価する際の性能指標として TCP スループットを考える。ここで TCP スループットとは、送受信ノード間の送信成功パケット数をシミュレーション時間で割った値で、1 スロットあたりの送信成功パケット数を表している。

まず、ノード停止の平均発生率を 1 秒あたり 0.01、ノード停止の平均継続時間を 10.0 秒として、リンク切断判定のための閾値を変化させた場合の、TCP スループットの変化を図 6 に示す。この図において、提案手法を組み込む前のスループットは閾値とは無関係に一定であるため、“original” で示される直線で表されている。提案手法によるスループットは “modified” で示されている。図 6 より、リンク切断判定の閾値を 1 に設定

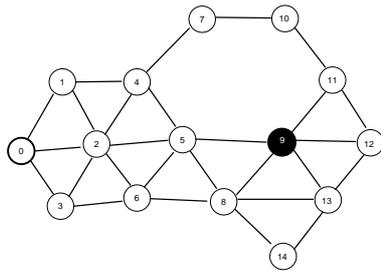


図 5 シミュレーションモデル

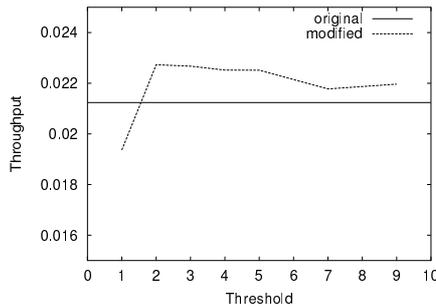


図 6 リンク切断の閾値によるスループットの変化 (ノード停止の発生率 0.01、平均継続時間 10.0 秒)

表 3 ノード停止の平均継続時間によるスループット向上率の変化

平均継続時間 (s)	向上率 (%)
2.5	1.35
5.0	3.44
10.0	7.02
20.0	12.05

すると、本来のスループットよりも悪化していることがわかる。これは、衝突などのために一回だけパケット損失が発生した場合でも、リンク切断と判断してしまうためと考えられる。すなわち、実際には停止状態ではないノードをリンク切断と判断することによって有効な経路を利用できなくなり、スループットが低下している。また、閾値が 2 の場合に最もスループットが向上しており、閾値が高くなるにつれて低下している。これは、閾値を大きくしていくにつれ、リンク切断を検出するのが遅れ、短時間のリンク切断を検出できないために提案手法の効果が小さくなり、元のスループットの値に近づくものと考えられる。

実際の利用環境においては、リンクが切断される時間は、その原因によって大きく変化すると考えられる。そのため、提案方式がリンク切断時間に関してどのような範囲で有効なのかを明らかにすることが必要である。そこで次に、リンク切断の平均継続時間を変化させた場合の影響を評価した。ここでは、ノード停止の発生率を 0.01 に固定し、平均継続時間を変化させた結果より、平均継続時間が異なっても、共通していることは、リンク切断判定のための閾値が 2 または 3 のときに最もスループットが向上していることがわかった。すなわち、本シミュレーションにおいては、送信失敗回数が 2 回、3 回と起こったときは、リンク切断と判断して経路制御を行なうことで、スループットを向上できることが明らかとなった。

そこで、閾値が 2 または 3 のときに、平均継続時間を変化させた場合のスループットを図 7 に示し、提案手法を組み込む前のシステムと比較したスループット最大向上率を表 3 に示す。図 7 より、リンク切断の平均継続時間が長くなるにつれて、スループットが急速に低下していることが示されている。表 3 からは、リンク切断の平均継続時間が長いほど向上率が大きくなっており、提案手法の効果は大きいといえるが、スループット自体は劣化していることが示されている。

5.3 Delayed ACK オプションの適用

FRN で TCP を送信した場合に、スループットが抑えられ

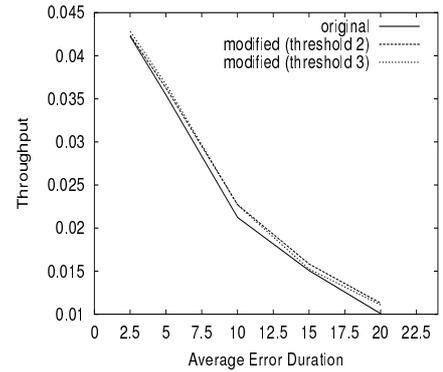


図 7 ノード停止の平均継続時間によるスループットの変化

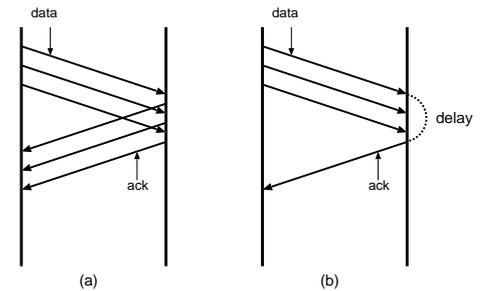


図 8 TCP の Delayed ACK オプション

表 4 ノード停止の平均継続時間によるスループット向上率の変化 (Delayed ACK を適用した場合)

平均継続時間 (s)	向上率 (%)
2.5	0.52
5.0	1.43
10.0	7.30
20.0	5.94

ているのは、データパケットと TCP の ACK パケットの干渉によるものが大きいと考えられる。つまり、FRN のようなアドホック無線ネットワークでは、同一の無線回線を双方向を含めた複数のリンクが共有するため、干渉が避けられない。TCP には Delayed ACK オプション [6] があり、ACK セグメントをまとめて送信することによって、ネットワーク資源の浪費を抑えることを目的としている。これによって ACK のトラヒック量を減らすことができれば、FRN における TCP スループットの向上が期待できる。そこで次に、Delayed ACK オプションを利用した場合の TCP スループットの評価を行なう。

まず、図 8 を用いて、Delayed ACK についての説明をする。図 8(a) は Delayed ACK が使われていないときの図であり、受信したデータパケットすべてに対して ACK を返送する。一方、図 8(b) は Delayed ACK オプションを適用したときの図であり、データパケットを受信した時点で ACK を返送せず、一定時間返送を遅らせる。その間にいくつかのデータパケットの受信に成功していた場合には、それらの分もまとめてひとつの ACK として返送する。この動作により、ACK パケット数を抑えることができる。

結果については、全体的にスループット自体は 2 倍近くの値になり、閾値による変化は Delayed ACK を適用する前の場合と同様の傾向となった。閾値 3 のときスループットは最も向上し、7.30% の向上となった。これは、Delayed ACK を用いることで干渉による送信失敗が減っているときに、送信失敗回数が 2、3 回でリンク切断と判断することは、実際にそのノードでリンク切断が発生している可能性が高く、経路選択の正確さが向上しているためであると思われる。図 9 に平均継続時間を変化させた場合のスループットの変化、表 4 にスループットの向上率を示す。

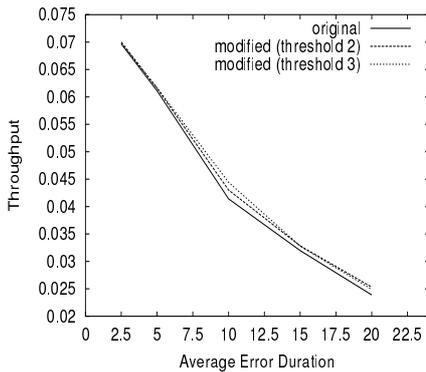


図9 ノード停止の平均継続時間によるスループットの変化 (Delayed ACK を適用した場合)

5.4 プライオリティACKの適用

第5.3節より、データパケットとACKパケットの干渉を抑えることは、TCPスループット向上に非常に有効であることがわかった。そこで最大限干渉を抑えるために、プライオリティACKを用いてその評価を行う。具体的には、ACKを優先的に送信するために、第2.2節で述べた再送間隔が一律3~5スロットであったものを、データパケットを5、6スロット、ACKパケットを3、4スロットとした。

ここからリンク切断判定の閾値を2に固定し、リンク切断の発生率に関して平均継続時間10秒に固定し発生確率を変化させ、プライオリティACKを適用したときの効果について、Delayed ACK オプションの有無それぞれの場合のスループットの評価を行った。その結果図10に示す。

それぞれの場合において、提案手法はスループットを向上させることが確認できた。特にDelayed ACK オプションを利用した場合は、リンク切断の発生率が高いほどその効果が大きいことがわかった。またDelayed ACK オプションを利用しているときは、Delayed ACK オプションを利用していないときよりもプライオリティACKの効果が低くなった。これは、Delayed ACK オプションを利用したときはすでにデータとACKの干渉が抑えられているためだと思われる。

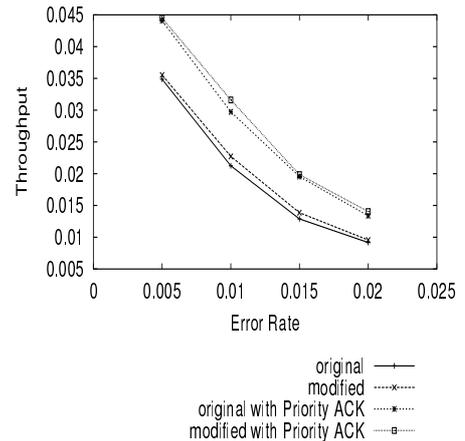
6. まとめと今後の課題

本稿では、アドホック無線ネットワークを構成するFRNに対して、騒音や障害物の通過といった短い時間のリンク切断に着目し、シミュレーションによる性能評価を行った。その結果、システムの動作を定めるパラメータ値が、スループットに与える影響が明らかになった。また、TCPのDelayed ACKオプションを無線回線に用いることは非常に有効であることを示した。さらに、さまざまなリンク切断のモデルでシミュレーションを行うことにより、リンク切断がどのように性能に影響を与えるかを調べ、提案手法がTCPのスループットを向上させることを示した。

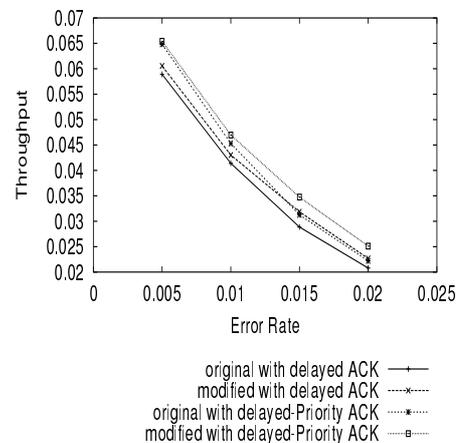
今後の課題としては、リンク切断の判定をより正確なものにするために、送信失敗の回数だけでなく、送信失敗した時間などを考慮することが挙げられる。また、本報告でTCPのDelayed ACKオプションを用いた場合の結果から、アドホック無線ネットワークにおいては、双方向の通信は非常に干渉が多いことがわかった。この干渉を減らすことを考慮に入れたルーティング手法の考察も、今後の課題として挙げられる。

文献

- [1] C. E. Perkins, *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley, 2001.
- [2] K. Nakano, M. Sengoku, and S. Shinoda, "Fundamental Characteristics of Multi-hop Wireless Communication Networks," in *Proceedings of 11th ITC Specialist Seminar*, pp. 293-301, Oct. 1998.
- [3] C. R. Lin and M. Gerla, "Asynchronous Multimedia Multihop Wireless Networks," in *Proceedings of IEEE INFO-*



(a) Delayed ACK オプションなし



(b) Delayed ACK オプションあり

図10 リンク切断発生確率を変化させた場合

COM '97, pp. 118-125, Apr. 1997.

- [4] "Flexible Radio Network, Fuji Electric Co. Ltd." available at http://www.fujielectric.co.jp/denki/p26/ecop_contents2.html.
- [5] M. Sugano, T. Araki, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Hosooka, "Performance Evaluation of a Wireless Ad Hoc Network: Flexible Radio Network (FRN)," in *Proceedings of the IEEE ICPWC 2000*, pp. 350-354, Dec. 2000.
- [6] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. Addison-Wesley, 1994.
- [7] D. Kim, C. K. Toh, and Y. Choi, "TCP-BuS: Improving TCP Performance in Wireless Ad Hoc Networks," in *Proceedings of the ICC 2000*, June 2000.
- [8] T. Goff, J. Moronski, and D. S. Phatak, "Freeze-TCP - A True End-to-End TCP Enhancement Mechanism for Mobile Environments," in *Proceedings of INFOCOM 2000*, Mar. 2000.
- [9] "The Network Simulator - ns-2." available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [10] T. Yamamoto, M. Sugano, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Hosooka, "Performance Evaluation and Improvement of an Ad Hoc Wireless Network," in *Proceedings of ICOIN-16*, Jan.-Feb. 2002.