

## 適応レート制御方式による アドホックネットワーク用経路制御プロトコルの特性改善

内藤克浩<sup>†1</sup> 森香津夫<sup>†1</sup> 小林英雄<sup>†1</sup>

本稿の目的はアドホックネットワーク向けの適応レート制御方式について調査を行い、AODV(Ad-hoc On Demand Distance Vector) 及び OLSR(Optimized Link State Routing) を用いた場合の特性を評価することである。フェージング環境では、無線伝送路状態は移動速度に応じて頻りに変化する。そのため、無線伝送路の脆弱な接続性はエンド間のスループット性能の劣化につながるが知られている。特に、TCP(Transmission Control Protocol) は TCP のデータパケットであるセグメントの損失の影響を大きく受け、特性が大きく劣化する。適応レート制御方式は無線伝送路の接続性を改善する手段のひとつであるが、適切な伝送レートの選択基準については十分な議論が行われていない。本稿では、伝送レートの選択基準として TCP の特性を採用する。数値例より、提案方式は TCP の特性を改善可能であることを示す。

## Improvement of routing protocols for ad hoc networks with adaptive rate control

KATSUHIRO NAITO,<sup>†1</sup> KAZUO MORI<sup>†1</sup>  
and HIDEO KOBAYASHI<sup>†1</sup>

The object of this research is to investigate the adaptive rate control scheme for ad-hoc networks, and to evaluate the performance with ad-hoc on demand distance vector (AODV) and optimized link state routing (OLSR) in fading environments. In the fading environment, the wireless link status will change frequently according to fading velocity. Therefore, poor wireless link connectivity deteriorates in end-to-end throughput performance. Especially, transmission control protocol (TCP) is sensitive to segment losses. As a result, TCP suffers from the poor end-to-end connectivity. The adaptive rate control scheme is one of the solutions to improve wireless link connectivity. However, the criteria for selecting an adequate transmission rate are unclear. In this research, we employ TCP performance as the criteria for selecting the transmission rate. From numerical results, we show that our scheme can improve TCP performance.

### 1. はじめに

アドホックネットワークは新たなネットワーク形態であり、各無線端末がマルチホップ通信技術を用いて自律的にネットワークを構成する。マルチホップ通信技術を利用する場合、複数の無線端末を経由してパケットの再転送処理を繰り返す。また、各無線端末間の無線伝送路の状態は独立に変化することから、エンド間で行われる通信はマルチホップ通信に関わる各無線伝送路状態の影響を大きく受ける。

アドホックネットワークで想定される無線伝送路状態は様々な状況が考えられるが、多数の反射波が発生する状況も想定することができる。このような状況では、マルチパスフェージングが発生することが知られており、各無線伝送路の状態は時間にもなって大きく変化する。さらに、アドホックネットワークでは多数の端末が同時に通信を行うことも考えられ、近隣端末の通信が自端末の通信に影響を与えることも想定される。結果として、無線伝送路の品質は雑音、フェージング、干渉、端末の移動などにより大きく影響される。そのため、単一の変復調方式のみを利用する場合、このような無線伝送路状態の変化に十分に適応することが困難となることが予想される。

IEEE 802.11 は無線 LAN などでも利用されている通信システムであり、アドホックネットワークを実現するための通信システムとしての候補である。IEEE 802.11 には IEEE 802.11b, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g などの複数の規格が存在する。また、複数の変復調方式と誤り訂正符号の符号化レートを採用することにより、各規格では複数の伝送レートを利用することが可能である。

IEEE 802.11 を想定した適応レート制御方式は様々なものが検討されている<sup>1)-3)</sup>。ARF(Auto Rate Fallback)<sup>4)</sup> は多数のデバイスで実装されている適応レート制御方式である。ARF は、確認応答フレームの受信の可否に応じて送信端末が伝送レートを制御する方式である。具体的には、10 個の確認応答フレームを連続して受信できた場合又はタイマが時間切れになった場合、伝送レートを 1 段速いものに切り替える。一方、2 個の確認応答フレームが連続して受信できない場合、伝送レートを 1 段遅いものに切り替える。ARF では、複数の確認応答フレームの受信の可否に応じて、伝送レートの切り替えを行う。そのため、無線伝送路状態が高速に変動する場合には、無線伝送路状態の変化に十分に追従することが困難となることが知られている。

<sup>†1</sup> 三重大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻  
Department of Electrical and Electronic Engineering, Mie University

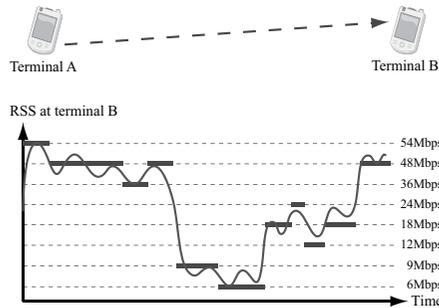


図 1 Adaptive rate control according to RSS.

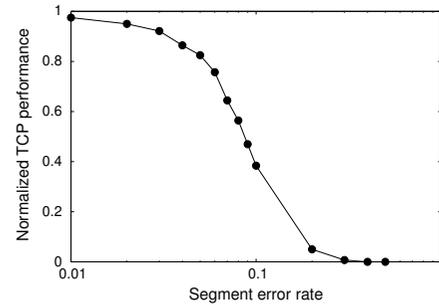


図 2 セグメント誤り率と正規化輻輳ウィンドウサイズの関係

RBAR(Receiver Based Auto Rate)<sup>5)</sup> は受信端末主導の伝送レート制御方式であり、複数の伝送レートをより効率的に利用することが可能である。RBAR では、RTS(Request To Send) フレーム受信後、受信端末は RTS フレームの信号強度を用いて、続いて送信されるデータフレームを送信するのに適した伝送レートの選択を行う。また、選択された伝送レートは CTS(Clear To Send) フレームを用いて、送信端末に通知される。そのため、RBAR ではデータフレーム単位で伝送レートを選択することができ、ARF と比較してより高速な無線伝送路状態の変化にも追従することが可能となる。しかしながら、CTS フレームには選択された伝送レートを通知するための領域は用意されていない。そのため、IEEE 802.11 のフレームフォーマットを修正する必要があり、IEEE 802.11 準拠機器との互換性維持が困難である。また、RBAR ではデータフレームの送信に適した伝送レートの選択基準については、十分な議論が行われていない<sup>6)</sup>。そのため、特性を改善可能な適切なパラメータ設定に関する検討が必要と考えられる。

本稿では、マルチパスフェージング環境において、適応レート制御を提案した場合のアドホックネットワーク用経路制御プロトコルの特性の評価を行う。経路制御プロトコルとしては、オンデマンド型の AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)<sup>7)</sup> とプロアクティブ型の OLSR(Optimized Link State Routing)<sup>8)</sup> について検討を行う。本稿では、適応レート制御方式として、ARF と著者らが既に提案した方式<sup>9)</sup> を採用する。既に提案した適応レート制御方式は、RBAR と同様に RTS フレームと CTS フレームの交換の際に、伝送レートの選択と通知を行うものである。提案方式では、IEEE 802.11 準拠のフレームフォーマットを利用するため、既存の IEEE 802.11 機器との互換性を維持することが可能である。な

お、採用する適応レート制御方式では、データフレームに適した伝送レートを選択する際に、上位プロトコルとして頻繁に利用される TCP(Transmission Control Protocol) の推定輻輳ウィンドウサイズを用いる。これは、TCP はデータフレームの誤り率が一定水準を超えた場合、スループット特性が急激に劣化することが知られているためである<sup>10),11)</sup>。また、選択した伝送レートは CTS フレームに含まれる NAV(Network Allocation Vector) の値を修正することにより通知を行う。シミュレーション結果より、アドホックネットワークにおける適応レート制御の有効性を明らかにする。

## 2. 適応レート制御

IEEE 802.11 では複数の伝送レートを利用することが可能である。図 1 は適応レート制御を利用した場合の、端末 A と端末 B 間の通信例を示す。通信例では、端末 A は受信信号強度に応じて 6M[bps] から 54M[bps] までの伝送レートを用いて送信している。本稿で採用する提案適応レート制御方式では、伝送レートの選択基準は受信信号強度ではなく、上位レイヤーで利用される TCP の輻輳ウィンドウサイズを推定することで行う。そこで、端末は図 2 で示されるセグメント誤り率と輻輳ウィンドウサイズの関係を予め用意するものとする。

図 3 に提案した適応レート制御方式のフローチャートを示す。本適応レート制御方式では、IEEE 802.11 の RTS フレームと CTS フレームの交換の際に伝送レートの選択を行う。そのため、データフレーム単位での伝送レート選択が可能である。また、受信端末が選択した伝送レートを送信端末に通知するために、CTS フレーム内の NAV(Network Allocation Vector) を活用するため、フレームフォーマットの変更は必要としない。NAV は近隣端末に対して自端末が通信に必要とする通信時間を通知するために本来は利用するフィールドであり、近隣端末の通信を抑制することにより、隠れ端末問題を改善するために利用される。一方、NAV で示される通信時間は伝送レートに依存するため、選択された伝送レートに基づいた通信時間を CTS フレーム内の NAV で通知することにより、送信端末は受信端末が選択した伝送レートを推定することが可能である。さらに、本適応レート制御方式では、上位レイヤーで頻繁に利用されると予想される TCP の特性を考慮するために、TCP の輻輳ウィンドウサイズを推定することで伝送レートの選択を行う。なお、TCP のセグメント誤り率と輻輳ウィンドウサイズの関係は、シミュレーション及び解析モデルなどを用いて予め用意するものとする<sup>12),13)</sup>。

### 2.1 セグメント誤り率の推定

IEEE 802.11 では、TCP セグメントが 1 個のデータフレームにカプセル化されて送信さ

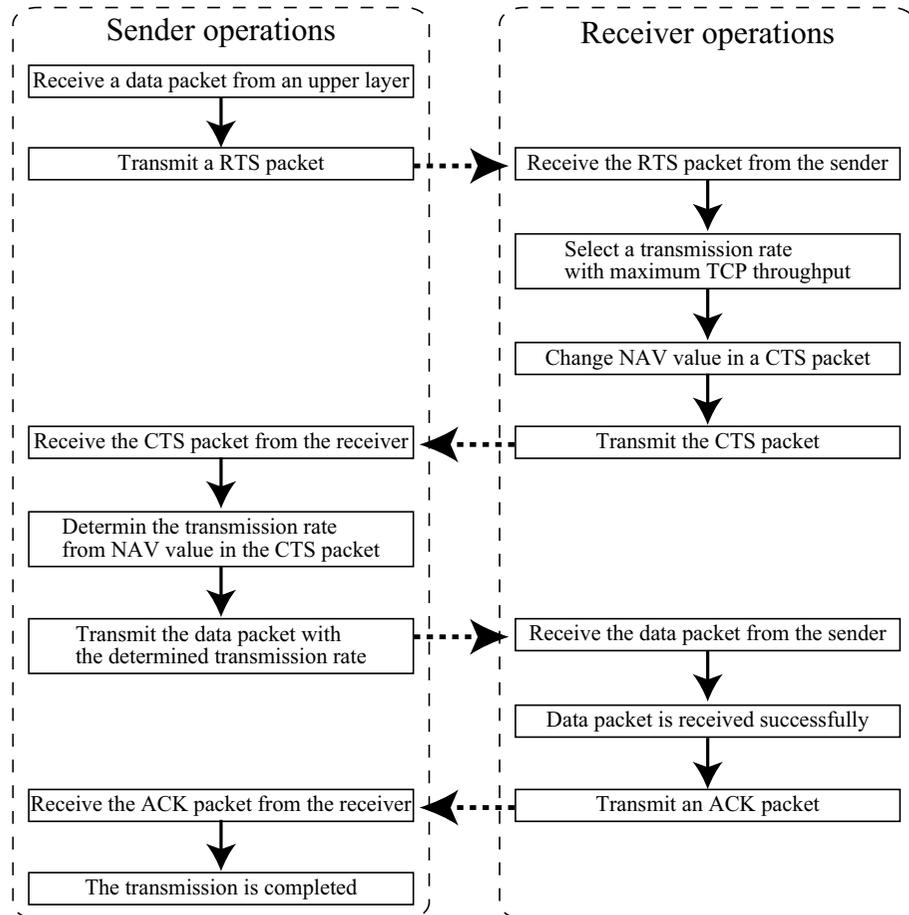


図3 適応レート制御のフローチャート

れる．そのため，TCP のセグメント誤り率を求めることと，データフレームの誤り率を求めることは同一である．一般にデータフレームの誤り率はビット誤り率とフレーム長から求められる．また，ビット誤り率は変調方式，誤り訂正符号の符号化レート，SNR(Signal to Noise Ratio) から推定可能である．そのため，受信端末は RTS フレームの SNR を推定することにより，利用可能な各伝送レートをを用いた場合のビット誤り率  $P_b(R)$  の推定を行う

ことができる．ここで， $R$  は伝送レートを示す．一般に RTS フレームにはデータフレームのフレーム長の情報は含まれていない．そこで，本適応レート制御方式では，通信時間を示す NAV の値と想定している初期伝送レートより，RTS フレームの後に送信されるデータフレームのフレーム長の推定を行う．ここで，RTS フレームに含まれる NAV の値  $NAV_i$  は CTS フレームの送信時間，データフレームの送信時間，確認応答 (ACK) フレームの送信時間となるため，以下の式で表現できる．

$$NAV_i = 3D_{SIFS} + D_{DATA(R_i)} + D_{CTS(R_i)} + D_{ACK(R_i)} \quad (1)$$

ここで， $R_i$  は送信側が想定する初期伝送レート， $D_{SIFS}$  は SIFS(Short InterFrame Space)， $D_{DATA(R_i)}$  は初期伝送レート  $R_i$  でデータフレームを送信した際の送信時間， $D_{CTS(R_i)}$  は初期伝送レート  $R_i$  で CTS フレームを送信した際の送信時間， $D_{ACK(R_i)}$  は初期伝送レート  $R_i$  で確認応答フレームの送信時間である．RTS フレームの NAV 値より，受信端末はデータフレーム長を以下の式から推定することが可能である．

$$L = R_i(NAV_i - 3D_{SIFS} - D_{CTS(R_i)} - D_{ACK(R_i)}) \quad (2)$$

## 2.2 伝送レートの選択

TCP は信頼性トランスポートプロトコルとしてインターネットで頻りに利用されている．しかしながら，TCP は有線ネットワークの特性に合わせて設計されてきた経緯から，無線ネットワークでは特性が大きく劣化することも知られている．

本稿では，伝送レートを選択する基準として，TCP の推定輻輳ウィンドウサイズを採用する．一般に無線ネットワークにおける TCP のスループットは，輻輳ウィンドウサイズの影響を大きく受ける．また，輻輳ウィンドウサイズは TCP のセグメント誤り率に応じて大きく変化する．そのため，本稿では TCP のセグメント誤り率と正規化輻輳ウィンドウサイズの関係を示す図 2 を，予め解析モデル又はシミュレーションを用いて用意するものとする．そして，受信端末は図 2 で示される関数とセグメント誤り率から，次式のように輻輳ウィンドウサイズの推定を行う．

$$CW_R = Func(P_f(R)) \quad (3)$$

また，推定した輻輳ウィンドウサイズが同一だとしても，選択する伝送レートに応じて実際に通信に必要とする伝送時間は異なる．そこで，選択する伝送レートに応じた伝送時間と推定した輻輳ウィンドウの特性を考慮するために次式を用いる．

$$C\hat{W}_R = CW_R \frac{R}{R_{MAX}} \quad (4)$$

ここで， $R_{MAX}$  は最大伝送レートを示す．

$$R_S = \max_R(C\hat{W}_R) \quad (5)$$

また、 $C\hat{W}_R$  が最大となる  $R_S$  を選択することにより、単位時間当たりのスループットが最大となる伝送レートを選択できる。

### 2.3 選択伝送レートの通知と推定

提案した適応レート制御方式は IEEE 802.11 との互換性を維持するために、IEEE 802.11 で規定されているフレームフォーマットを活用する。しかしながら、本フレームフォーマットには、受信端末が選択した伝送レートを送信端末に伝えるためのフィールドは用意されていない。そこで、本方式では受信端末が選択した伝送レートを送信端末に伝えるために、NAV 値を選択された伝送レートに応じて変化させる。次に選択された伝送レートが  $R_S$  の場合のデータフレームの伝送時間を示す。

$$D_{DATA(R_S)} = L/R_S \quad (6)$$

このデータフレームの伝送時間は CTS フレーム内の新たな NAV 値として保存される。また、新たな NAV 値  $NAV_{new}$  は次式から得られる。

$$NAV_{new} = 2D_{SIFS} + D_{DATA(R_S)} + D_{ACK(R_S)} \quad (7)$$

送信端末は CTS フレーム内の新たな NAV 値から選択された伝送レートの推定を行う。推定された選択された伝送レート  $\hat{R}_S$  は次式より推定する。

$$\hat{R}_S = L/(NAV_{new} - 2D_{SIFS} - D_{ACK(\hat{R}_S)}) \quad (8)$$

## 3. 数 値 例

本稿では、既に提案した適応レート制御方式がアドホックネットワークにおいてどのような有効性を持つのかを明らかにする。そこで、リアクティブ形のルーチングプロトコルの代表である AODV とプロアクティブ形のルーチングプロトコルの代表である OLSR を用いた場合について、ネットワークシミュレータ QualNet<sup>14)</sup> を用いて評価を行う。なお、比較対象として、伝送レートを IEEE 802.11g で利用可能な 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54M[bps] で固定した場合と、IEEE 802.11 機器の多くが実装している ARF を用いた場合も評価を行う。

シミュレーションでは、50 端末を 1000[m] 四方の領域にランダムに配置した。無線伝送路は移動速度を 0.1 - 1 [m/s] を想定したレイリーフェージング環境とした。なお、適応レート制御と経路制御プロトコルの基礎的な検討を行うため、端末は静止している状況とした。

表 1 シミュレーション諸元

Simulator	QualNet 4.01
Communication period	600 [s]
Simulation trials	100 times
Simulation area	1000 x 1000 [m]
Number of nodes	50
Node placement	Random
Node mobility	None
Communication system	IEEE 802.11g
Transmission rates	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 and 54 M[bps]
Adaptive rate control	ARF, Proposed
Propagation pathloss model	Free space
Wireless environment	Rayleigh fading
Fading velocity	0.1 - 1 [m/s]
Routing protocol	AODV, OLSR
Application	FTP
Data packet size	1 K[Byte]
Number of connections	1 - 5

アプリケーションとして 1K[Byte] のデータセグメントを 600[s] 間伝送する FTP を想定した。また、通信を行う端末はランダムに選択し、結果は 100 回の試行結果の平均を示した。シミュレーション諸元を表 1 に示す。

図 4, 5 にコネクション数を変化させた際の AODV と OLSR を利用した場合の TCP スループット特性を示す。図 4 より、AODV の TCP スループット特性は固定伝送レートであっても、適切な伝送レートを選択することにより、高い特性を得られることが確認できる。しかしながら、適切な固定伝送レートは状況により異なると考えられ、適切な伝送レートを選択することは現実的には困難と思われる。さらに、適応レート制御方式を利用することにより、TCP スループット特性をより向上させることが可能であることが確認できる。特に提案方式を利用した場合、最も高い特性を実現できており、AODV などのリアクティブ型プロトコルへの特性改善に有効と考えられる。なお、コネクション数の増加にともない、ARF と提案方式の TCP スループット特性は若干差が大きくなっている。これは、コネクション数が増加した場合、コネクション間の干渉も増加すると考えられ、伝送路状態が近隣の通信からの干渉に応じて頻繁に変化したためと考えられる。そのため、各データフレーム毎に伝送レート選択を行える提案方式の特性が高くなっていると思われる。図 5 より、OLSR の TCP スループット特性は AODV と同様に適切な伝送レートを選択すること

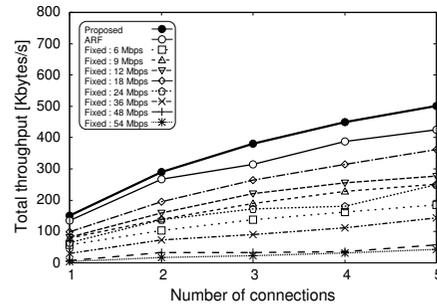


図 4 総合スループット (AODV, Fading velocity = 0.1).

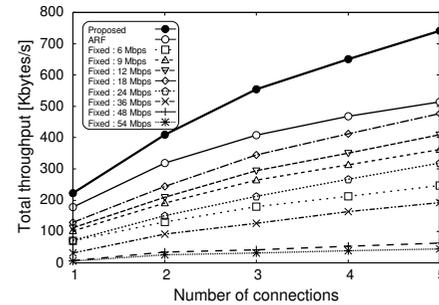


図 5 総合スループット (OLSR, Fading velocity = 0.1).

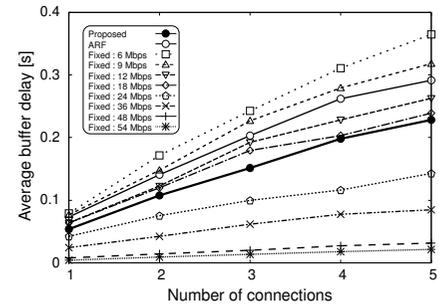


図 8 平均バッファ遅延 (AODV, Fading velocity = 0.1).

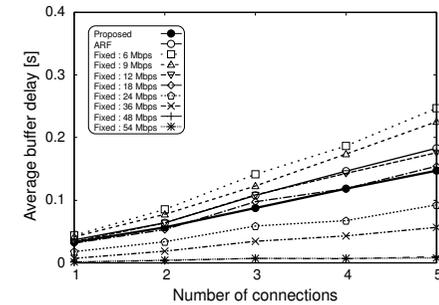


図 9 平均バッファ遅延 (OLSR, Fading velocity = 0.1).

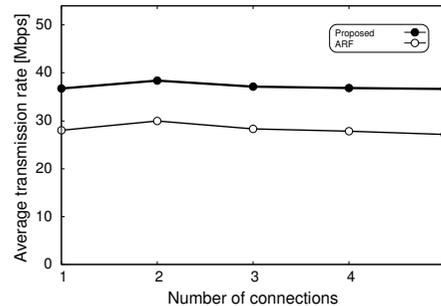


図 6 平均伝送レート (AODV, Fading velocity = 0.1).

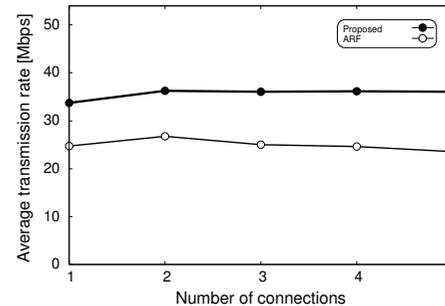


図 7 平均伝送レート (OLSR, Fading velocity = 0.1).

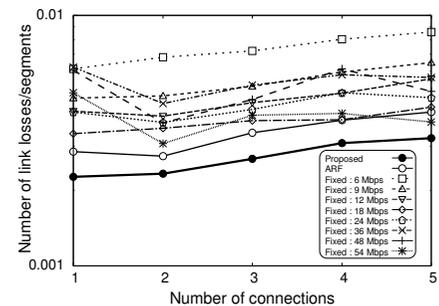


図 10 リンク損失率 (AODV, Fading velocity = 0.1).

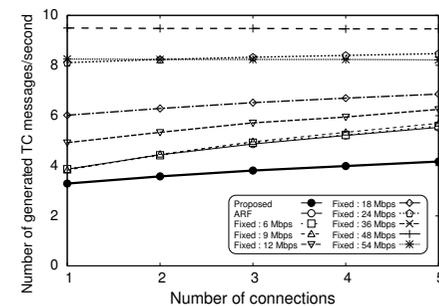


図 11 TC メッセージ送信数 (OLSR, Fading velocity = 0.1).

により、固定伝送レートであっても高い TCP スループット特性を得られることが確認できる。さらに、最適な固定伝送レートは AODV と一致しており、伝送レートの最適値は通信が行われる環境に依存する可能性が高いと思われる。また、適応レート制御方式を利用した場合、OLSR の TCP スループット特性は AODV と比較して、より向上していることが確認できる。これは、プロアクティブ型のプロトコルである OLSR はリアクティブ型のプロトコルである AODV よりも、より適切な経路を構築しているためと考えられる。

図 6, 7 にコネクション数を変化させた際の AODV と OLSR を利用した場合の平均伝送レートを示す。AODV を利用した場合の提案方式の平均伝送レートは 37.1M[bps] であり、ARF の平均伝送レートは 28.3M[bps] であった。また、OLSR を利用した場合の提案方式

の平均伝送レートは 35.6M[bps] であり、ARF の平均伝送レートは 24.9M[bps] であった。結果より、提案方式はデータフレーム毎に伝送レートを選択できることから、ARF よりも有効に無線帯域を利用していることが確認できる。また、AODV と比較して OLSR を利用した場合、コネクション数の増加にともなって、提案方式と ARF の平均伝送レートの差は大きくなっている。これは、AODV では経路が分散して生成されるのに対して、OLSR では MPR(Multi Point Relay) を中継経路として選択するため、複数のコネクション間の干渉が発生しやすくなる。また、発生した干渉による無線伝送路状態の変化に ARF は十分に追従できていないためと思われる。

図 8, 9 にコネクション数を変化させた際の AODV と OLSR を利用した場合の平均バッ

ファ遅延を示す。図 8 より、AODV を利用した場合の平均バッファ遅延は、伝送レートが遅くなるほど長くなる傾向にあることが確認できる。これは、伝送レートが遅くなる場合、同一データの転送に必要とする時間が増加するためと考えられる。ただし、図 4 で示されるように、高速な伝送レートを利用する場合、多数の TCP セグメントが損失するため輻輳ウィンドウサイズが小さくなり、データフレームの送信が頻繁に行われない状況も発生していると考えられる。特に、高速な伝送レートの平均バッファ遅延が極めて短いのは、このような理由と考えられる。なお、ARF の平均バッファ遅延は、TCP スループットは改善されているが、延びていることが確認できる。一方、提案方式は固定伝送レートの中で最も TCP スループットが高い 18M[bps] の平均バッファ遅延と同程度であり、TCP スループットの改善と平均バッファ遅延を改善していることがわかる。図 9 より、OLSR を利用した場合の平均バッファ遅延は、AODV と類似した傾向を示していることが確認できる。ただし、OLSR の特性は AODV の 6 割程度と短くなっている。これは、OLSR では AODV と比較して効率的な経路構築を実現しているためと考えられる。

図 10 にコネクション数を変化させた際の AODV の経路再構築を引き起こす TCP セグメントあたりのリンク損失率を示す。結果より、適応レート制御方式を利用することにより、低いリンク損失率を達成していることが確認できる。これは、伝送路状態に応じて適切な伝送レートを選択することができるため、リンク損失の検出要因である、データフレームの転送失敗が発生する可能性を抑えているためと考えられる。また、提案方式は ARF よりも、さらに低いリンク損失率を達成している。これは、提案方式ではデータフレーム毎の伝送レート選択を行えるためと思われる。

図 11 にコネクション数を変化させた際の OLSR の TC(Topology Control) メッセージの発生数を示す。結果より、固定伝送レートの場合、伝送レートが高いほど TC メッセージの発生数も増加していることが確認できる。これは高速な伝送レートを利用している時ほど、無線伝送路状態の悪化の影響を大きく受けるためと考えられる。一方、適応レート制御を利用することにより、TC メッセージの発生数を抑制できていることが確認できる。特に提案方式を利用することにより、コネクション数が増加した場合にも、低い TC メッセージの発生数を維持している。

図 12, 13 にフェージングで想定する移動速度を変化させた際の AODV と OLSR を利用した場合の TCP スループット特性を示す。図 12 より、無線伝送路状態の変化が速くなるのにも関わらず、すべての方式の TCP スループットが劣化しているのが確認できる。これは、データフレームの転送処理中に無線伝送路状態が悪化する可能性が高くなり、データ

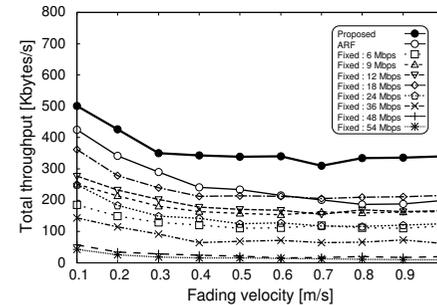


図 12 総合スループット (AODV, 5 connections).

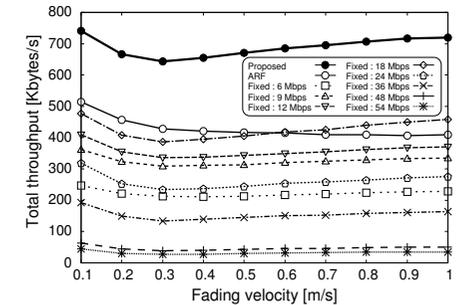


図 13 総合スループット (OLSR, 5 connections).

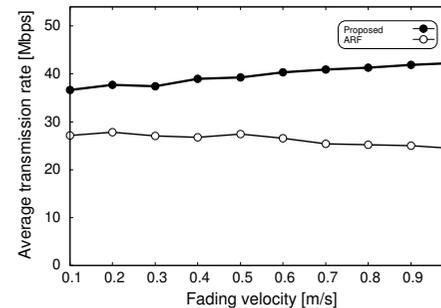


図 14 平均伝送レート (AODV, 5 connections).

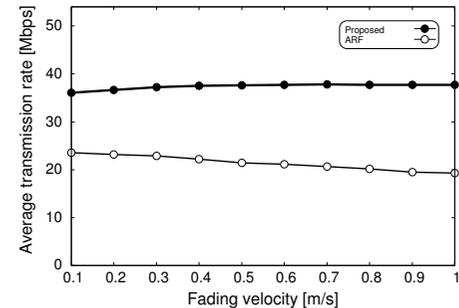


図 15 平均伝送レート (OLSR, 5 connections).

フレームが損失した場合には、経路再構築が必要になるためと考えられる。また、ARF の TCP スループットの劣化量は他方式より大きいことも確認できる。これは、ARF は高速な無線伝送路状態の変化には追従することが困難な方式であるためである。一方、提案方式ではデータフレーム毎の伝送レート選択を行うため、ARF と比較して劣化量を抑えていることも確認できる。図 13 より、OLSR の TCP スループットは AODV と比較して劣化が少ないことが確認できる。これは、AODV ではデータフレームの損失が経路再構築に繋がるが、OLSR はデータフレームの損失が経路再構築には結びつかないためと思われる。また、ARF の TCP スループットの劣化量は無線伝送路状態の変化が速くなるのにも関わらず大きく劣化している。一方、その他の方式の劣化量は比較的小さいことも確認できる。これは、OLSR の経路構築は Hello メッセージと TC メッセージを用いて行われているため、制御メッセージの交換が成功している場合、安定した経路を維持可能なためと思われる。

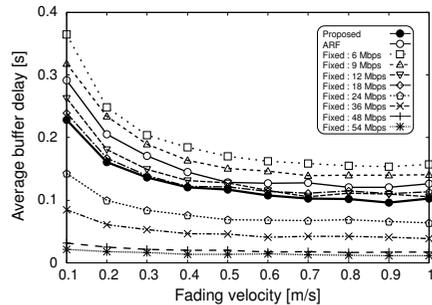


図 16 平均バッファ遅延 (AODV, 5 connections).

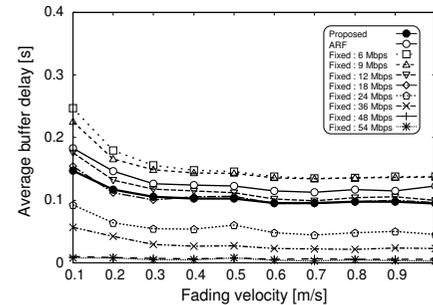


図 17 平均バッファ遅延 (OLSR, 5 connections).

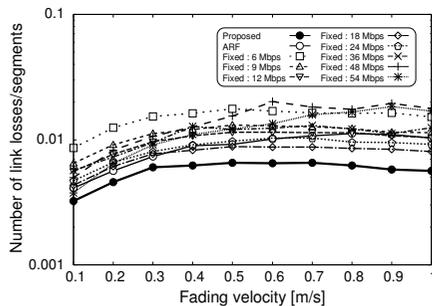


図 18 リンク損失率 (AODV, 5 connections).

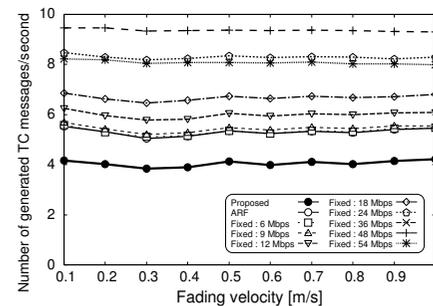


図 19 TC メッセージ送信数 (OLSR, 5 connections).

図 14, 15 にフェージングで想定する移動速度を変化させた際の AODV と OLSR を利用した場合の平均伝送レートを示す。結果より、ARF の伝送レートは無線伝送路状態の変化が速くなるのにもない低速になる傾向が確認できる。これは、ARF はデータフレームの到着状況に応じて伝送レートの制御を行うためと思われる。一方、提案方式の伝送レートは無線伝送路状態の変化が速くなるのにもない、AODV の場合は高速になる傾向があり、OLSR の場合にはほぼ一定している傾向が確認できる。これは、図 12 から確認できるように、AODV では送信されるデータフレーム数が無線伝送路状態の変化が速くなるほど少なくなることが考えられ、コネクション間の干渉が減るため、より高速な伝送レートを利用できたものと考えられる。また、図 13 から確認できるように、OLSR では送信されるデータフレーム数は大きくは削減されていないため、コネクション間の干渉量も大きくは変化していないと思われる。そのため、OLSR を利用した場合の平均伝送レートはほぼ同じ

値となっていると考えられる。

図 16, 17 にフェージングで想定する移動速度を変化させた際の AODV と OLSR を利用した場合の平均バッファ遅延を示す。図 16 より、AODV を利用した場合の平均バッファ遅延は、無線伝送路状態の変化が速くなるのにもない減少していることが確認できる。これは、送信されるデータフレーム数が削減されているため、送信待ち時間が短縮されたためと思われる。図 17 より、OLSR を利用した場合の平均バッファ遅延は、AODV と類似した傾向を示していることが確認できる。ただし、OLSR の平均バッファ遅延は AODV の平均バッファ遅延と比較して減少量が少ないことも確認できる。これは、OLSR では安定した経路を維持できており、送信されるデータフレーム数も大きくは減少していないためと考えられる。

図 18 にフェージングで想定する移動速度を変化させた際の AODV の経路再構築を引き起こす TCP セグメントあたりのリンク損失率を示す。結果より、無線伝送路状態の変化が速くなるのにもないリンク損失率が高くなることが確認できる。これは、データフレームの通信中に無線伝送路状態が悪化する可能性が高くなるためと思われる。

図 19 にフェージングで想定する移動速度を変化させた際の OLSR の TC (Topology Control) メッセージの発生数を示す。結果より、OLSR の経路構築に関する TC メッセージ数は無線伝送路状態の変化に大きくは影響されていないことが確認できる。これは、OLSR では Hello メッセージの交換が定期的に行われている場合、近隣端末を認識することができるため、経路を大きく変更する動作を行わないためと考えられる。

#### 4. ま と め

本稿では、フェージング環境におけるアドホックネットワークへの伝送レート制御の影響を明らかにするために、固定伝送レートを利用した場合、適応レート制御として ARF 及び著者らが提案した方式を利用した場合について検証を行った。また、経路制御プロトコルとして、リアクティブ型プロトコルの代表である AODV とプロアクティブ型プロトコルの代表である OLSR を用いることにより、両プロトコルへの適応レート制御の効果を明らかにした。結果より、適応レート制御は特性改善に有効であることが確認できたが、特にコネクション数が大きい場合には、コネクション間では発生する干渉が要因となり無線伝送路状態が頻繁に変化するため、データフレーム毎に適切な伝送レートを選択できることが重要であることを明らかにした。さらに、無線伝送路状態が速く変化する状況では、リアクティブ型のプロトコルと比較してプロアクティブ型のプロトコルが適していることも明らかにした。

## 謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 (B)(20700059) 及び財団法人電気通信普及財団研究調査助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) D. Qiao, S. Choi, and K. G. Shin, "Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs," IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 1, no. 4, pp. 278-292, Oct.-Dec. 2002.
- 2) S. Sheu, Y. Wang, H. Yin, and J. Chen, "Adaptive rate controller for mobile ad hoc networks," International Journal of Mobile Communications, vol. 1, no.3 pp. 312-328, 2003.
- 3) Xiao-Hui Lin, Yu-Kwong Kwok and Vincent K.N. Lau, "A Quantitative Comparison Of Ad Hoc Routing Protocols with and without Channel Adaptation," IEEE Trans. Mobile Computing, Vol. 4, No. 2, pp. 111 - 128, March/Apr. 2005.
- 4) A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band," Bell Labs Technical Journal, pp. 118-133, 1997.
- 5) G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks," ACM/IEEE Mobicom'01, Jul. 2001.
- 6) Q. Xia and M. Hamdi, "Smart sender: a practical rate adaptation algorithm for multirate IEEE 802.11 WLANs," IEEE Trans. Wireless Communications, Vol. 7, No. 5, pp. 1764 - 1775, May 2008.
- 7) C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. R. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561, Jul. 2003.
- 8) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC 3626, Oct. 2003.
- 9) S. Uchida, K. Naito, K. Mori, and H. Kobayashi, "A Rate-Adaptive MAC Protocol Based on TCP throughput for Ad Hoc Networks in Fading Channels," in Proc. of the 4th International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA 2007), Jul. 2007.
- 10) E. Amir, H. Balakrishnan, S. Seshan, and R. H. Katz, "Efficient TCP over Networks with wireless links," in Proc. Hot Topics in Operating Systems, pp. 35-40, 1995.
- 11) H. Balakrishnan, V. N. Padmanabhan, S. Seshan, and R. H. Katz, "A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over wireless channels," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, no. 6, pp. 756-769, Dec. 1997.
- 12) K. Naito, H. Okada, M. Saito, T. Yamazato, and M. Katayama, "New Analytical Model for TCP in wireless Environments," IEICE Transactions on Fundamentals Vol.E85-A No.7, pp.1501-1510, Jul. 2002.
- 13) M. Zorzi, A. Chockalingam, and R. R. Rao, "Throughput analysis of TCP on channels with memory," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 18, pp. 1289-1300, Jul., 2000.
- 14) Network Simulator QualNet, <http://www.scalable-networks.com>