

不安定な無線環境における大規模アドホックネットワークの安定化

板谷 聡子[†] 長谷川 淳[†] 長谷川 晃朗[†]
デイビス ピーター[†] 門脇 直人[†] 小花 貞夫[†]

無線アドホックネットワーク上で安定な通信を実現するには、安定な通信経路の確保と、各端末における経路情報の同期が重要である。本論文では、各端末が中継端末候補を選出するための信号強度閾値を受信信号強度の変動幅を考慮して自動的に決定し、端末間での経路情報の更新タイミングを同期することにより、無線アドホックネットワークの安定性を自律的に改善する方式を提案する。また、これらのメカニズムを導入することにより、50 台の端末を含むテストベッドにおいて、通常のルーティングプロトコルを使用した場合に、最大 12% 程度あったパケットエラー率を、1% 未満に抑えることができたことを評価実験結果により示す。

Stabilization of Large Ad-hoc Wireless Networks in Unstable Radio Environments

SATOKO ITAYA,[†] JUN HASEGAWA,[†] AKIO HASEGAWA,[†] PETER DAVIS,[†]
NAOTO KADOWAKI[†] and SADA OOBANA[†]

We have proposed techniques for improving the stability of communications in dynamic ad hoc wireless networks. One technique avoids routing packets via unreliable neighbors with poor radio links and the second technique avoids loops due to mismatch in timing of route updates. The techniques can be implemented as modifications to conventional routing schemes such as OLSR. Experiments in a 50-node testbed demonstrated that the modifications reduce packet losses maximum from 12% to 1%.

1. はじめに

近年、無線 LAN 機能を持つデバイスの急速な普及にとともに、アドホック無線ネットワークの利用に対する関心が高まっている。アドホック無線ネットワークに期待される応用領域には ITS (高度道路交通システム) や、大規模被災地向け無線通信網があり¹⁾、安定したサービスを提供するには、効率的なアドホックルーティングによるマルチホップ通信が不可欠である。

これまでに、いくつかのモバイルアドホックネットワーク (MANET) ルーティングプロトコルが提案され、IETF において標準化が検討されており²⁾、各ルーティングプロトコルの性能について、多くの研究が行われている³⁾⁻¹⁸⁾。また、無線 LAN の MAC プロトコルである IEEE 802.11 では、各デバイスがアクセスポイントを介さず直接通信することができるアドホックモードをサポートしており、IEEE 802.11 デバイス

と MANET ルーティングプロトコルを用いたマルチホップアドホックネットワークへの様々な取組みが行われている。

しかし、実環境における大規模なアドホックネットワーク上での安定したアプリケーション運用は、有線ネットワーク上で実現するほど容易ではない。これは、有線環境では考慮する必要のない通信の不安定性が、無線環境においては潜在的に存在するためである。

無線通信の不安定性の大きな要因は、信号強度の変動であり、端末が静止している場合でさえ無視することはできないほどの変動幅を持つ。特に、設置場所などに厳しい制約があるアドホック無線ネットワークでは、この不安定性を完全に排除することができない。さらに、MANET ルーティングでは、中央集中型の制御機能を持たず、各端末がそれぞれ自律的に情報収集を行い、それに基づいて経路を作成し、ルータの機能を果たす。しかし、各端末での処理が自律的であるので、環境が絶えず変動している場合、それぞれの端末で保持している経路情報に不一致が生じやすく、これが通信の不安定性をさらに悪化させる要因となって

[†] ATR 適応コミュニケーション研究所
ATR Adaptive Communication Research Laboratories

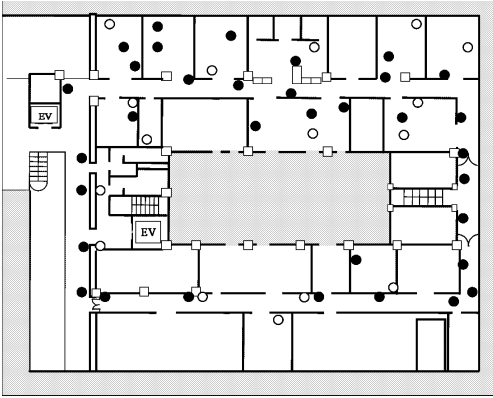


図 1 オフィスにおける端末配置図

Fig. 1 Layout of office.

いる。

本論文では、アドホックネットワークでのこれらの問題を解決するために、信号強度の変動幅を考慮した自律的な中継端末候補選出方式と、各端末の経路情報更新のタイミングを同期させることにより通信の性能を改善する方式を示す。また、これらの方式の効果を確認するため、50 台の PC と PDA からなる屋内テストベッドを構築し、通信特性の評価を行った。

2. アドホック無線ネットワークテストベッド

本研究では、実用的なテスト環境として、研究所内のオフィスを利用した。図 1 にオフィスのレイアウトと端末の配置を示す。オフィスは口の字型の建物で、35m × 20m 程度の広さであり、金属パーティションで区切られた部屋が通路の両側に並んでいる。灰色の部分は屋外を表しており、34 台のモバイル PC (図 1) と 16 台の PDA (図 1) が、地上から 1m 程度の高さに配置されているため、障害物が多く、対角線上にある端末間でのホップ数は 3 ホップ程度になっている。

ネットワークのすべての端末には、同じ無線 LAN カードとソフトウェア環境を持たせ、オペレーティングシステムは Red Hat Linux 9 (カーネルバージョン 2.4.25), PLANEX GW-CF11H 無線 LAN カード, Orinoco_cs0.13d 無線 LAN ドライバを使用し、ルーティングプロトコルは、テーブル駆動型の FSR と OLSR を使用した³⁾⁻⁵⁾。

3. 無線環境の不安定性とその要因

各端末が近くに配置され、すべての端末が安定な無線環境にあるような無線アドホックネットワーク上での通信はさほど難しくはない。しかし、多くの端末が

広く分布するようなアドホックネットワーク上では、安定した通信の実現は困難である。

たとえば、理論的に容易に予測できる問題に、グレーゾーンの存在がある。パケット受信の成功率は、データ送信レートと信号強度の両方に依存し、データ送信レートが遅ければ遅いほど、遠くの端末の電波を受信できる。このため、各端末の周りには、低いレートで送信されたパケットは受信できるが、高いレートで送信されたパケットを受信できないという領域が存在する。IEEE802.11b を使用した場合、ルーティングプロトコルによる HELLO パケットはブロードキャストを使用するので 2 Mbps で送信され、ユニキャストパケットは 11 Mbps で送信されるので、HELLO パケットは受信できるが、データパケットは受信できない端末が存在することになる。この領域はグレーゾーン⁶⁾と呼ばれ、現在ではより広義に“パケットを受信できたりできなかったりする領域”がグレーゾーンと呼ばれている。グレーゾーンは電波の干渉条件に依存した複雑な形をしており、端末からの距離に単純に依存しないのが一般的である。そのため、端末が無作為に配置される場合、グレーゾーン内の端末がネットワークに 1 つも存在しないということは考え難い。また、通常の MANET ルーティングでは最短ホップ数の経路が優先されるため、グレーゾーンに存在する端末が中継端末として使用される確率が高くなる。

不安定な中継端末を使用するのを回避するために、パケットエラー率や信号強度を監視し、経路選択に利用することがいくつかの論文で提案されている⁷⁾⁻¹¹⁾。文献 7) では、端末の移動を考慮し、一定回数の HELLO パケットの連続的な受信を安定なリンクの識別閾値とする方式を提案しており、識別閾値を端末の移動速度と電波伝搬の範囲で見積もっている。しかし、2 つの端末間の距離を延長しながら HELLO パケットの受信状況を確認すると、グレーゾーン付近での HELLO パケットは、たとえ端末が動いていなくても、パースト的に受信できたりできなかったりする場合があり、この閾値を決定するのは困難である。また、文献 8) では、十分に高い信号強度閾値を実験によって決定し、経路選択の条件にすることを提案しているが、実験からどのように信号強度閾値を決定すべきかということは具体的に示されておらず、シミュレーションでは、ある端末からの信号強度は端末間の距離のみに依存すると仮定して議論されている。文献 9) および文献 10) では、固定値の信号強度閾値を組み込んだルーティングを実機ベースで実装しているが、具体的にどのように信号強度閾値を決定したかについては記述されてい

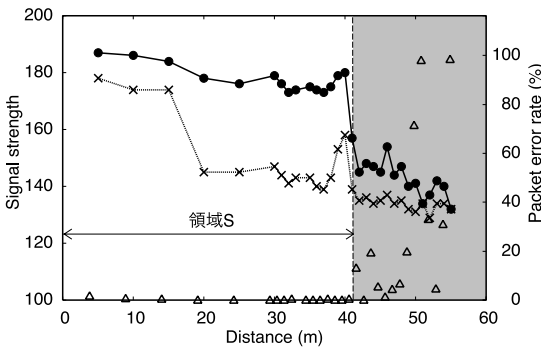


図2 端末間距離と通信品質の例：最大信号強度(●)，最小信号強度(×)とパケットエラー率(△)

Fig. 2 The dependence of signal strength and packet error rate on separation distance.

ない．文献 11) では，オフィスに設置された屋内マルチホップ無線ネットワークの性能評価実験を行い，最短経路が最良の経路ではないことを実験により示した．その中で，最良の経路を選択する際に信号強度は役立つことを示唆しているが，具体的にどのように使用するのは述べられていない．

図2は，実験により得られた典型的なデータで，2つの端末の距離を離していったときのブロードキャストパケットのエラー率と信号強度の最大値と最小値の関係である．図2から明らかなように，端末間の信号強度は距離のみに依存しているわけではなく，パケットエラー率が上がり始める距離より2端末が離れていても，パケットエラー率が0%になることがある．図3は，2端末間の距離が31m(図3上)と46m(図3下)のときの，HELLOパケットの信号強度の時系列を表している．図2を見ると，31mはパケットエラー率が低い領域にあり，46mはパケットエラー率の高い領域にある．図3より，端末がパケットエラー率の低い領域にある場合も，かなりの幅を持ってパケットごとに信号強度が変動していることが分かる．つまり，端末がいる位置のパケットエラー率が低いかどうかを，信号強度の値のみから判断するのは困難である．また，図2において，最初にパケットエラーが観測される地点より右側(図2灰色の部分)を閾値により排除すればよいのだが，信号強度がかなりの幅を持って変動しているため，適切な閾値の値を決めるのが困難である．そこで，検出された信号強度閾値がある値以下の端末を中継端末として採用しないようにFSRを修正¹²⁾，閾値の高さを変えて実験を行った．具体的には，実験フローとして，160 byteのデータパケットを20 msec間隔で送信し，5,000パケットを1試行として，同じ端末のペアについて10回の実験を，異なる3ペアに

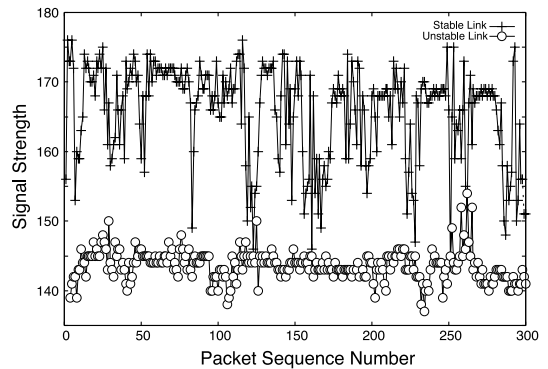


図3 2つ異なる地点での典型的な信号強度の時間変動

Fig. 3 The time series of signal strength at two points.

表1 信号強度閾値の値とパケットエラー率

Table 1 Signal strength threshold and packet error rate.

閾値	min	max	ave
0	0.00%	25.8%	6.53%
140	0.00%	8.44%	0.56%
160	0.00%	44.2%	7.41%

対して行った．表1は，通常のFSR(閾値=0)と，安定な地点(図2領域S)の信号強度の変動を避けただけ高い値を閾値とした場合(140)と，パケットエラー率が高くなる地点の信号強度を十分に上回る値を閾値とした場合(160)の最大(max)，最小(min)，平均(ave)パケットエラー率を示している．通信特性は，通常のFSRに比べて閾値を140とした方が良い．しかし，さらに高い閾値160の場合は通信特性ががえって悪くなる．これは，経路更新のダイナミクスに起因している．テーブル駆動型のルーティングプロトコルでは，周囲の端末からのHELLOパケットなどで収集した情報をもとに，一定の時間間隔ごとにルーティングテーブルを更新する．その際，ルーティングテーブルの更新タイミングが端末によりばらつくと，局所的に正しくないネットワークポロジを持つ端末が出現することがある．このような端末が通信経路上に出現すると，2端末間で同一データパケットを投げ合う現象が発生する．図4は，パケットの投げ合いが発生する簡単な例である．

端末1から端末4へデータが端末2経由で送信されているときに，端末2と端末4間のリンクが切断される場合を考える．端末2は，端末4への直接のリンクが切れたので，データ送信を端末3経由で行おうとする．しかし，端末3は端末2経由でデータ送信を行おうとするため，中継パケットとして受け取ったパケットを端末2に送信する．この端末2-3間のパケットの投げ合いは，古いテーブルを持っている端末のルー

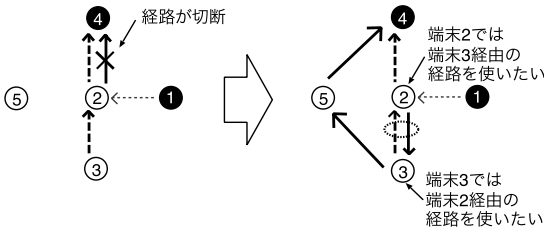


図 4 パケットの投げ合い
Fig. 4 Packet bounce problem.

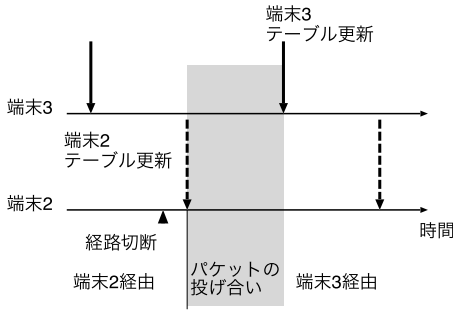


図 5 ルーティングテーブルの更新
Fig. 5 Asynchronous update of routing tables.

ティングテーブルが更新されるまで続き (図 5 灰色部分), データパケット到着に長い時間がかかったり, データパケットの TTL が 0 になり破棄されたり, 投げ合うパケットが原因でロスが発生したりする.

制御トラフィックの抑制を考慮すると, HELLO パケットの送信が秒単位になるため, ルーティングテーブルの更新周期は一般的には秒単位である. このため, 隣接端末間の経路情報が異なっている時間は最大で秒単位となる. 一方で, マルチメディアアプリケーションでは, パケットの送受信間隔はミリ秒単位であり, 1 つ 1 つのパケットの遅延が問題となるため, このようなパケットの投げ合いはきわめて深刻な問題となる. 同一パケットを端末間で投げ合う現象は, テーブル駆動型のルーティングプロトコル使用時に一般的に見られるが, 経路切替の頻度が少なければ, さほど大きな問題ではない. しかし, 信号強度閾値を高く設定しすぎると, 安定な地点 (領域 S) の端末での受信信号強度が閾値を繰り返し横切り, 局所的な経路変更が頻繁に発生するため, パケットの投げ合い現象の発生頻度が高くなる.

このように, 閾値の導入は単純ではなく, 領域 S での信号強度の変動幅を考慮した信号強閾値の決定と, 端末間の経路情報の不一致を回避するという 2 つの課題の解決が, 安定したアドホックネットワーク運用に重要である.

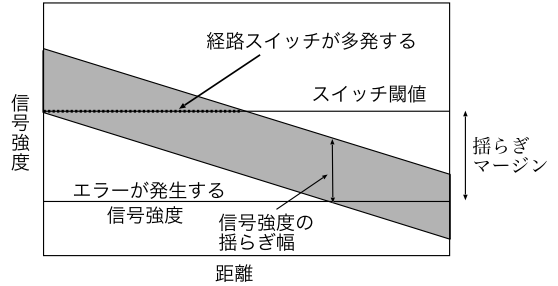


図 6 閾値の導入と経路変更
Fig. 6 Signal strength threshold and route switch.

4. 不安定性改善方式の提案

前章では, 無線アドホックネットワーク上で安定な通信を実現するための重要な課題を述べた. 本章では, それらの課題の具体的な解決策として, 信号強度の変動幅を考慮して中継端末候補を選出する方式と, ネットワークに存在する各端末のルーティングテーブルの更新タイミングを同期させる方式を提案する.

4.1 信号強度変動幅を考慮した中継端末候補選出
3章において, 不要な経路切替えを避けるような信号強度閾値の設定が重要であることを述べたが, そのような信号強度閾値を厳密に設定するのは容易ではない.

図 6 は, パケットエラーが発生する信号強度と隣接端末リストに登録するための閾値の関係の概念図を示している. 図 6 のように, 信号強度閾値を導入するには, 信号強度の変動幅を考慮し, 余裕を持ってパケットエラーが発生する信号強度よりも高い値に信号強度閾値を導入する必要がある (揺らぎマージン). しかし, 3章で述べたように, 閾値を高く設定しすぎると, 経路変更回数の増加により, ネットワークが不安定になる.

このため, 閾値決定には, 図 2 領域 S に存在する端末の信号強度の変動幅を考慮し, 無線環境におけるロスと経路変更によるロスを考慮した複合的なコスト評価の導入が必要であり, このコストが最小になるよう, 閾値を導入することで安定な通信が可能となる. 図 7 は, 図 2 の各地点における信号強度の最大値・最小値・パケットエラー率を一組とし, 最大値の降ベキの順に並べたものである. たとえば, 図 7 のような観測データが得られた端末では, 横線がコストが最小となるような閾値である. このように閾値を決定する 1 つの方法として, 各端末に以下のような手順を実装した.

- 周りの各端末について, HELLO パケットの信号強度の最大値と最小値を監視する.

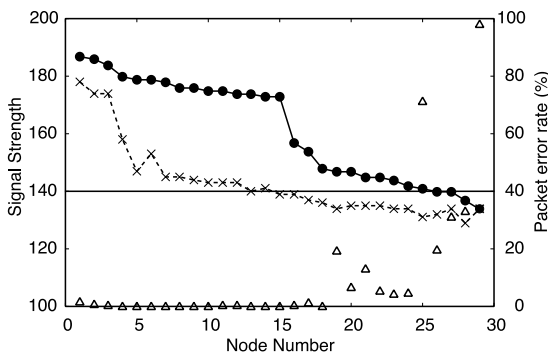


図 7 最大信号強度の降ベキの順に並べかえた中継端末の通信品質情報の例：最大信号強度(●)，最小信号強度(×)，パケットエラー率(△)

Fig. 7 Typical plot of signal strengths of neighbor nodes reordered in order of maximum and minimum values of signal strength measured when receiving HELLO packets.

- それぞれの端末から得た最大値・最小値を一組とし、最大値について降ベキの順に並べ替える。
- 最大値の変化率が最大になる端末の組を見つけ、その最小値の平均値を信号強度閾値として設定する。

この方法は、最大値の降ベキの順に並べ替えた場合、最小値も降ベキの順に並んでいれば、特に有効であると期待でき、図 7 ではその傾向が確認できる。この方法では、最小値の平均値を閾値として設定するため、安定な信号の変動領域を避けて閾値を決定することが可能である。また、周りに非常に弱い信号強度を持つ端末しか存在しない場合は、その最小値以下に閾値が設定されるため、閾値がない場合と等しくなり、ネットワークから排除されることはない。図 8 は、図 1 のように配置された 50 端末のネットワークにおいて、各端末が本アルゴリズムに基づいて自律的に決定した閾値のヒストグラムを示している。各端末は場所によって電波環境が異なるため、すべての端末で同じ値の閾値を設定するのではなく、それぞれ自分の周りの環境に依存した閾値を決定していることが分かる。ここでは、領域 S での信号強度の変動幅を考慮して閾値を決定する方法の一例を示したが、最適なアルゴリズムの開発と適用範囲については今後の重要な課題である。

4.2 ルーティングテーブル更新タイミングの自律的な同期

テーブル駆動型のルーティングプロトコルにおけるパケットの投げ合い問題を解決するには、各端末の経路情報が一致していればよいので、各端末のルーティングテーブルの更新タイミングを同期させれば解消できる。テーブル更新を同期させることにより、経路切

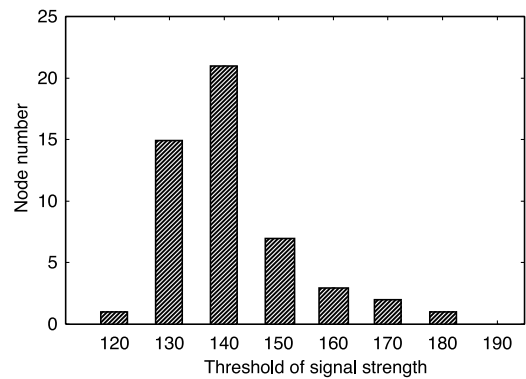
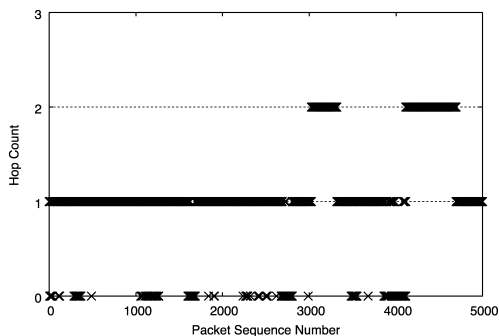


図 8 テストベッドにおいて 50 台の端末がそれぞれ決定した閾値の分布

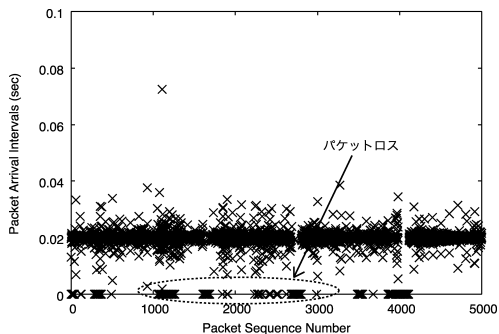
Fig. 8 The distribution of signal strength thresholds which were decided autonomously by the 50 nodes in the network.

断を検知した端末も次の更新タイミングまで古い経路を使うため、その間パケットロスが発生するが、経路の不一致によるパケットの投げ合いが起こる場合に比べて通信特性の劣化が少ない。そこで、各端末のルーティングテーブルの更新タイミングを同期させるメカニズムをルーティングプロトコルに導入することを提案する。

同期をとる手段としては、GPS を使うなど、いくつかの方法が考えられるが、ここでは、テーブル駆動型ルーティングの HELLO パケットを用い、自律分散的に同期をとる例を示す。具体的には、IEEE 802.11 の IBSS (Independent Basic Service Set) における TSF (Time Synchronization Function) と同様の方式で各端末のルーティングテーブルの更新タイミングの同期がとれるよう、HELLO パケットにタイムスタンプを付け加える。まず、それぞれの端末にタイムカウンタを持たせ、HELLO パケットを送信する際、自分のタイムカウンタの値を入れて送信する。ほかの端末から HELLO パケットを受信した際、受信したパケット内のタイムスタンプの値をチェックし、自分のタイムカウンタの値の方が進んでいる場合は何もせず、自分のタイムカウンタの値が遅れている場合は受信した HELLO パケットの値に自分のタイムカウンタの値をセットする。これらの操作を繰り返すことで各端末のカウント値は同期する。実際には、各端末のクロック周波数には誤差があるが、その場合には一番クロック周波数の高い端末に各端末のタイムカウンタが同期する。たとえば、全体を 3 ホップで網羅できるようなネットワークであれば、最大 3 回の HELLO パケットのやりとりで、各端末のタイムカウンタが同期する。タイムカウンタの値がある値になったとき、ルーティ



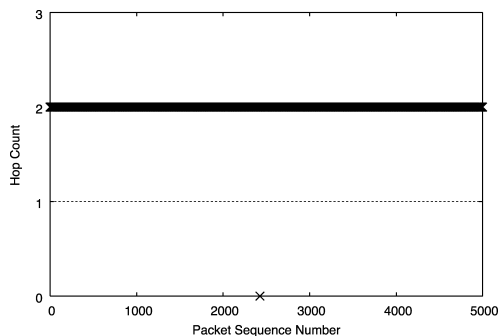
(a) ホップ数の変動



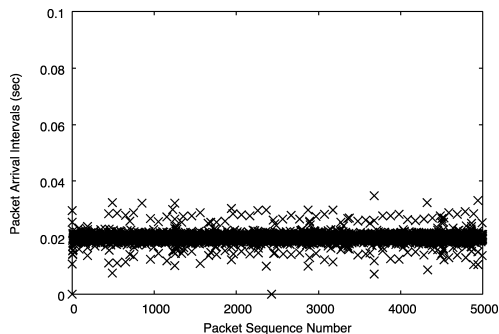
(b) パケット到着時間間隔

図 9 OLSR を用いた場合のホップ数の変動とパケット到着時間間隔

Fig. 9 Typical results of OLSR showing packet loss and jitter due to unreliable radio links.



(a) ホップ数の変動



(b) パケット到着時間間隔

図 10 OLSR-SS を用いた場合のホップ数の変動とパケット到着時間間隔

Fig. 10 Typical results of OLSR-SS showing improved stability compared to OLSR.

ングテーブルの更新を行えば、すべての端末において同じタイミングでルーティングテーブルの更新を行うことができる。ここでは、HELLO パケットの送信間隔を 2 秒、ルーティングテーブルの更新周期が 5 秒のとき、100 msec 間隔のタイムカウンタを実装すると、100 msec から 300 msec 程度のずれで、各端末の更新タイミングを同期することができた。このタイムカウンタの刻幅を小さくすれば、より厳密に同期をとることが可能である。

5. 通信性能の改善を示す評価実験の結果と考察

これらの提案方式の効果を確認するため、各機能を unik-OLSR version 0.4.7¹⁹⁾ をベースに OLSR-SS、OLSR-SS-SU という 2 つのルーティング方式を実装した²⁰⁾。OLSR-SS は、各端末が信号強度の変動を考慮して、自律的に信号強度閾値を決定する。ただし、通信開始が通常のルーティングプロトコルより遅くならないよう、各端末が自律的に閾値を決定するまで通常の OLSR として動作する。OLSR-SS-SU は、OLSR-SS にルーティングテーブル更新タイミング同期機能を持た

せたものである。これらの 3 方式 (OLSR, OLSR-SS, OLSR-SS-SU) の通信実験を図 1 のテストベッドにおいて行った¹⁸⁾。VoIP は、ほかのリアルタイムアプリケーションに比べ、パケットエラー率 (10%未満) や遅延 (ITU-T クラス 0 の場合 100 msec 未満) について、非常に高い通信性能が要求されるため、ネットワークの安定性の評価に適している。そこで、評価実験でのフローとして、VoIP 通信 (64 Kbps) を想定し、160 byte のデータパケットを、20 msec 間隔で送信し、5,000 パケットを 1 試行として同じ実験を 10 回繰り返した。図 9、図 10 は、OLSR と OLSR-SS を使用し、同じフローを流したときのホップ数の変動とパケット到着時間間隔の変動を表している。ここで、Packet Arrival Interval がゼロになっているときには、パケットロスの発生を示している。図 9 より、OLSR 使用時にロスが起こっているのは、OLSR が 1 ホップ経路を選択している場合であり、このときのパケットロスの発生は一樣ではなく、バースト的であることが分かる。VoIP アプリケーションでは、一樣なエラーについてはある程度対応できるように工夫されているが、このようなバースト的なパケットロスが発生する

表 2 各方式のケットエラー率

Table 2 Packet error with each routing protocol.

	min	max	ave
OLSR	0.04%	11.7%	2.85%
OLSR-SS	0.16%	2.14%	0.64%
OLSR-SS-SU	0.00%	0.24%	0.04%

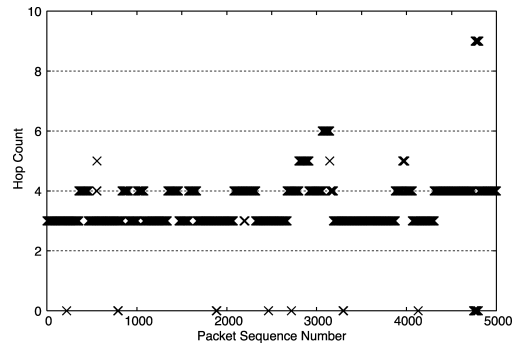
と音声途切れる場合がある。

表 2 は、各方式を使用して上記実験を行った際の、最大(max)、最小(min)、平均(ave)ケットエラー率を示している。もし、経路に使用されている各端末間の信号強度が十分に強く、安定していれば、それぞれの方式間に差が見られず、3つのルーティングプロトコルのケットエラー率の最小値は0%に近い値となる。しかし、不安定な経路が存在する場合、単純に無線環境の影響や衝突からケット損失が起こるだけでなく、端末間でのケットの投げ合いにより、ケットエラー率がさらに増加する。このため、表 2 にある OLSR の最大ケットエラー率が約 12%程度になっている。信号強度の変動を考慮して、各端末が信号強度閾値を導入することにより、通常の OLSR よりケットエラー率を抑えることができるが、ケットの投げ合いによるケットロスが発生する場合があります、表 2 の OLSR-SS の最大ケットエラー率が 3%程度になっている。OLSR-SS-SU ではさらにルーティングテーブル更新タイミング同期機能を追加しており、ケットの投げ合いも抑制され、表 2 に示すように、OLSR-SS に比べてさらなる通信性能の向上が得られた。また、図 11 は OLSR-SS を使用した場合のホップ数と遅延時間の変動の例である。今回の実験では、平均ホップ数は 3, 4 ホップであり、ホップ数が 1 ホップ増加するにつれ、2 msec 程度遅延が増加した。いずれのルーティングプロトコルを使用しても、遅延時間は数 msec ~ 数十 msec であり、VoIP で要求されている条件を十分に満たしている。

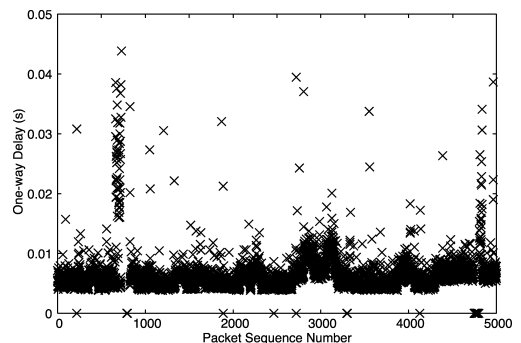
ここでは OLSR への実装のみに触れて記述したが、これらの方式は、その他のルーティングプロトコルに付加機能として導入することが可能である。

6. おわりに

実世界のアドホック無線ネットワーク上では、電波環境が不安定であるため、安定した通信が非常に困難であり、このことがアドホックネットワークの実用化への大きな障害となっている。本論文では、受信信号強度の変動幅と、各端末が保持する経路情報の不一致に着目し、これらを克服する新しい方式を提案した。具体的には、周りの端末から受信される信号強度の幅



(a) ホップ数の変動



(b) 片方向遅延

図 11 ホップ数と遅延時間の変動

Fig. 11 Hop count and delay during VoIP streaming in 50 node network using OLSR-SS.

を考慮して信号強度閾値を決定し、中継端末候補を選出する方式と、ネットワーク内で各端末のルーティングテーブル更新タイミングを同期させ、経路情報の不一致による不安定性を抑える方式を提案した。これらを組み合わせることで、通常のルーティングプロトコルを使用した場合に、最大 12%程度あったケットエラー率を、1%未満に抑えることに成功し、VoIP のように通信の不安定性に敏感なアプリケーションが十分実用的に使用できる無線アドホックネットワークを構築することができた。本論文で提案した方式は、オンデマンド型のルーティングプロトコルやフラディングを含む、他の重要な通信プロトコルに対しても導入することが可能である。また、ネットワーク全体に対して行う制御ではなく、局所的に行う制御であるため、ネットワークサイズに依存せず、数百、数千の端末からなるネットワークにおいても有効である。

謝辞 本研究は情報通信研究機構の研究委託により実施したものである。

参考文献

- 1) 小菅, 板谷, Davis, 梅田: アドホックネットワークが開く新しい世界, 情報処理学会会誌, Vol.44,

- No.11, pp.1160–1163 (2003).
- 2) Macker, J.P. and Corson, M.S.: Mobile Ad Hoc Networking and the IETF, *ACM Mobile Computing and Communications Review*, Vol.3, No.2 (Apr. 1999).
 - 3) Guanyu, P., Gerla, M. and Chen, T.-W.: Fish-eye state routing in mobile ad hoc networks, *ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing*, pp.D71–D78 (2000).
 - 4) Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol, IETF RFC 3626 (2003).
 - 5) Clausen, T.H.: Combining temporal and spatial partial topology for MANET—Merging OLSR and FSR, *The 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications* (2003).
 - 6) Lundgren, H., Nordstroem, E. and Tshudin, C.: Coping with communication gray zones in IEEE 802.11b based ad hoc networks, *Proc. 5th ACM International Workshop On Wireless Mobile Multimedia*, pp.61–66 (2002).
 - 7) Toh, C.K.: Associativity-based routing for ad hoc mobile networks, *Wireless Personal Communications Journal*, Vol.4 (1997).
 - 8) Dube, R., Rais, C., Wang, K. and Tripathi, S.: Signal stability based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks, *IEEE Personal Communications*, pp.36–45 (Feb. 1997).
 - 9) Hu, Y. and Johnson, D.: Design and demonstration of live audio and video over multi-hop wireless ad hoc network, *IEEE Military Communications Conference*, Vol.21, No.1, pp.1211–1216 (2002).
 - 10) Chin, K., Judge, J., Williams, A. and Kermode, R.: Implementation experience with MANET routing protocols, *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, Vol.32, pp.49–59 (2002).
 - 11) Couto, D., Aguayo, D., Chambers, B. and Morris, R.: Performance of multihop wireless networks: Shortest path is not enough, *ACM SIGMOMM Computer Communications Review*, Vol.33, pp.83–88 (2003).
 - 12) FSR implementations by ATR.
<http://www.acr.atr.jp/acr/general/product/gsrfsr>
 - 13) 朴, 大和田, 須田, 照井, 間瀬: アドホックネットワークの通信実験—経路制御方式の性能評価, *信学技報*, *MoMuC/MVE2003-11*, pp.13–18 (2003).
 - 14) 長谷川, 嶋田, 板谷, 小菅, Davis: 屋内環境におけるアドホックルーティングの性能評価, *信学技報*, *MoMuC2004-13*, Vol.104, No.38, pp.1–4 (2004).
 - 15) Itaya, S., Hasegawa, J., Shimada, T., Kosuga, M. and Davis, P.: Improving the stability of ad hoc wireless communications in an office environment with fluctuating radio conditions, *IEICE Society Conference*, pp.S80–81 (2004).
 - 16) 長谷川, 板谷, Davis, 梅田, 田中: 屋内環境におけるアドホックルーティングの性能評価 II 制御トラフィックの影響とルート切替え性能, *信学ソ大*, pp.S96–S97 (2004).
 - 17) Hasegawa, J., Itaya, S., Hasegawa, A., Davis, P., Tanaka, S., Kadowaki, N. and Obana, S.: VoIP Communication over a large ad-hoc network, *1st Ad-hoc Network Workshop*, pp.89–92 (2005).
 - 18) Davis, P., Itaya, S., Hasegawa, J., Hasegawa, A., Kadowaki, N. and Obana, S.: Large scale ad hoc wireless networks, Technical Report of IEICE of Signal Processing Society, SIP2004-148, pp.49–52 (2005).
 - 19) OLSR protocol implementations by Unik-University Graduate Center.
<http://www.olsr.org/>
 - 20) OLSR-SS, OLSR-SS-SU implementations by ATR.
<http://www.acr.atr.jp/acr/general/product/gsrfsr>

(平成 17 年 3 月 31 日受付)

(平成 17 年 10 月 11 日採録)



板谷 聡子

昭和 48 年生・平成 8 年奈良女子大学理学部物理学卒業・平成 10 年同大学院修士課程修了・同年セイコーエプソン株式会社研究開発本部に入社・XML に関する研究に従事・平成 11 年博士課程進学のため同退社・平成 14 年奈良女子大学大学院博士後期課程修了(理学博士)・平成 14 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所研究員・アドホックネットワークに関する研究に従事・電子情報通信学会会員。



長谷川 淳

昭和 52 年生．平成 12 年岡山県立大学情報工学部情報通信工学科卒業．平成 14 年同大学院博士前期課程修了．同年富士通関西中部ネットテック(株)入社．平成 15 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所研究員．アドホックネットワークに関する研究に従事．電子情報通信学会会員．



長谷川晃朗

昭和 46 年生．平成 7 年明治大学理工学部電子通信工学科卒業．平成 9 年同大学院博士前期課程修了．平成 12 年同大学院博士後期課程修了(工学博士)．平成 12 年岐阜大学工学部電気電子工学科助手．平成 14 年独立行政法人通信総合研究所(現独立行政法人情報通信研究機構)専攻研究員．電子回路に発生するカオス現象や同期現象, カオスの応用に関する研究に従事．平成 16 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所研究員．アドホックネットワークに関する研究に従事．電子情報通信学会会員．



デイビス ピーター

昭和 33 年生．昭和 55 年クイーンズランド大学物理学科卒業(First Class Honours)．昭和 56 年京都大学理学部文部省留学研究員, 昭和 62 年クイーンズランド大学大学院博士課程修了(Ph.D.)．同年(株)国際電気通信基礎技術研究所光電波通信研究所研究員．平成 8 年同環境適応研究所研究員, カオス現象を利用した通信に関する研究に従事．平成 13 年同適応コミュニケーション研究所主任研究員, 自律ネットワークシステムに関する研究に従事．AIP, IEEE 各会員．



門脇 直人

昭和 35 年生．昭和 57 年東北大学工学部通信工学科卒業．昭和 59 年同大学院修士課程修了．同年三菱電機入社．昭和 61 年郵政省電波研究所(現独立行政法人情報通信研究機構)入所．移動体衛星通信, 衛星間通信, 超高速衛星通信システム, 衛星通信ネットワークプロトコルの研究開発に従事．平成 16 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所自律システム研究室室長．平成 17 年同スマートネットワーク研究室室長．アドホックネットワークの研究開発に従事．電子情報通信学会, IEEE 各会員, AIAA-TCCS 委員．



小花 貞夫(フェロー)

昭和 28 年生．昭和 51 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業．昭和 53 年同大学院修士課程修了．同年国際電信電話(株)(現 KDDI(株))入社．パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSI プロトコル実装, データベース, ビデオテックス, 分散処理, ネットワーク管理, ITS の研究・開発に従事．平成 16 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所所長, アドホックネットワーク, ITS, センサネットワークの研究開発に従事．工学博士．平成 13 年文部科学大臣章(研究功績者), 本会フェロー, 電子情報通信学会会員．