

ノードの Free Degree に基づいた MANET のための適応的 ルーティングプロトコルの評価

XiaoRan Wang 田頭 茂明 藤田 聡

広島大学大学院工学研究科

本稿では、リアクティブ型のプロトコルである Dynamic Source Routing (DSR) に着目し、ノードの "Free Degree" (FD) の概念に基づいた Free Degree Adaptive Routing (FDAR) プロトコルを提案する。FDAR は、ネットワークの負荷を分散させて、パケットを低遅延で転送するために、ルーティングメトリックとして FD を採用し、混雑している経路を迂回するようにパケットをルーティングする。また、ネットワークトポロジの変更時に必要な経路変更フェーズの過剰な実行を避けるために、寛容な経路変更ポリシーを確立した。FDAR の有効性をシミュレーションにより評価した。評価の結果、FDAR はパケットの転送遅延およびスループットにおいて、DSR より良い性能を示すことを確認した。

Evaluation of an Adaptive Routing Protocol for MANETs based on the Notion of Free Degree of Nodes

XIAORAN WANG SHIGEAKI TAGASHIRA SATOSHI FUJITA

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

In this paper, we propose an efficient and practical ad hoc routing protocol, based on the notion of free degree of node, namely, the Free Degree Adaptive Routing (FDAR) protocol. The proposed scheme is intended to route data packets circumventing congested paths so as to balance traffic load over the network and lower end-to-end delay. Additionally, we also establish a tolerance policy to avoid excessive overhead in order to improve the data delivery reliability and stability of network. Simulation results indicate that FDAR outperforms DSR in terms of average end-to-end delay and average end-to-end throughput.

1 はじめに

近年の無線通信では、ノードが最も近い基地局を介して通信を行うインフラストラクチャ型の通信形態が主流である。基地局がカバーする通信範囲を超えた場所にノードが移動した場合でも、移動先の基地局に接続を切り替えて通信を継続することができる。このことから様々な場所により多くの基地局を

設置することで、ネットワークへの高い接続性を確保することができる。しかし、基地局を設置するためには非常に多くの金銭的なコストが必要であり、さらに地理的な設置条件を満たす必要があることから、利用者が少ない場所などでは基地局の設置は困難である。そこで、無線通信における次世代の通信形態として、アドホックネットワークが注目を集めている。

アドホックネットワークは、基地局のようなインフラストラクチャは不要で、無線通信とルーティング機能を備えた端末(ノード)によって構成される。通信範囲外の目的ノードとは、他のノードがパケッ

広島大学大学院工学研究科情報工学専攻
〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1
Graduate School of Engineering, Hiroshima University
Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima, 739-8527 Japan

トを中継することで、目的ノードとの通信（マルチホップ通信）を可能にしている。アドホックネットワークでは、ノードの移動によりネットワークの構造が動的に変化するために、効率が良くかつ正確な経路の発見手法が必要となる。アドホックネットワークでのルーティングプロトコルは、大きく分けてプロアクティブ型とリアクティブ型との2種類に分類することができる [6, 5, 1, 3, 2]。プロアクティブ型は、ネットワークを構成する各ノードが定期的に近接ノードと経路情報を交換して、各ノードが経路表を作成しネットワークの経路を管理する方式である。通信要求があると、目的ノードに対する次ホップを自身の経路表から獲得するので、即座に通信を開始できる。通信要求を持たないノードにおいても経路情報を交換する必要があるために、プロトコルオーバーヘッドが大きいという問題がある。リアクティブ型は、データを送りたいノードが経路情報を必要としたときに、目的ノードまでの経路を探索する方式である。したがって、通信要求がないノードは経路表の交換を行わないので、プロアクティブ型のプロトコルと比べて、オーバーヘッドが少ない。しかし、データを送る直前に経路を発見するために、データを送るまでに時間が必要となる。このため、リアクティブ型は、プロアクティブ型に比べて、比較的大規模なネットワークにおいてある限定したノード間での通信が多いような場合に適していると言える。

本稿では、リアクティブ型のプロトコルである Dynamic Source Routing (DSR) に着目し、ノードの“Free Degree (FD)” の概念に基づいた Free Degree Adaptive Routing (FDAR) プロトコルを提案する。FDAR は、ネットワークの負荷を分散させて、パケットを低遅延で転送するために、ルーティングメトリックとして FD を採用し、混雑している経路を迂回するようにパケットをルーティングする。また、ネットワークポロジの変更時に必要な経路変更フェーズの過剰な実行を避けるために、寛容な経路変更ポリシーを確立した。FDAR の有効性をシミュレーションにより評価した。評価の結果、FDAR はパケットの転送遅延およびスループットにおいて、DSR より良い性能を示すことを確認した。

2 DSR

DSR [6, 5] は、リアクティブ型のルーティングプロトコルのひとつである。DSR は、ソースルーティングをベースにしており、送信ノードから目的ノードま

での経路を送信ノードが決定し、パケットにその経路情報を記述して送信する。ノードは自身が知っている経路を経路キャッシュとして蓄える。経路キャッシュのエントリは新しい経路を学習する度に常に更新される。DSR は、経路発見と経路維持の2つフェーズから構成される。

経路発見は、そのパケットの送信ノードと目的ノードとの間の経路を発見するために用いられる。具体的には、送信ノードがパケットを送信する際に、自身が持つ経路キャッシュを確認し、目的ノードに関する経路情報がキャッシュに存在する場合は、キャッシュ上の経路を利用して、パケットを送信する。もし、キャッシュ上になければ、経路を探索するために、経路発見要求パケットをフラッディングを用いてネットワークに送信する。その要求パケットを受け取った（中継）ノードは、自身のキャッシュ上に要求パケットに記述された目的ノードの経路情報を持っているかを確認する。もし持っている場合には、その経路情報を送信ノードに返答する。そうでなければ、さらに要求パケットを転送することになる。この操作を、中継ノードのキャッシュ上に経路が存在するか、又は、要求パケットが目的ノードに到着するまで繰り返す。要求パケットには、Time To Live (TTL) が設定されており、その値を超えた場合は破棄されることに注意されたい。この操作を実行すると、送信ノードには、目的ノードに対する幾つかの経路情報が返答されてくる。これら経路の中で、最も適切な経路を選択して、パケットを送信することになる。

経路維持は、ノードの移動などによりネットワークポロジが変化し、利用している経路上のリンクが利用できなくなった場合に、新たな経路を発見するために用いられる。具体的には、各ノードは隣接ノードのリンク状態を監視しており、リンクが途切れた場合に、そのノードは送信ノードに通知する。送信ノードは、その通知を受け取ると、キャッシュ内にある代替経路を使うか、又は、経路発見を行い新しい経路を発見することになる。

3 FDAR プロトコル

3.1 概要

本稿では、アドホックネットワークにおける新しいルーティングプロトコルである、Free Degree Adaptive Routing (FDAR) プロトコルを提案する。FDAR プロトコルは、DSR をベースにしており、そのルー

ティングメトリックとして、経験的な尺度である“Free Degree (FD)”を採用している。具体的には、FDAR プロトコルでは、DSR で発見された複数の経路の中から、FD を用いて最適な経路を決定する。FD は、ネットワークの統計情報を動的に獲得することにより算出されることから、ネットワークの負荷を分散化しつつ、質の高い経路を選択することができる。以下では、FDAR の詳細について説明する。

3.2 ルーティングメトリック

FDAR におけるルーティングメトリックの算出において、FD を導入している。具体的には、経路を構成する各ノードのメトリックとして FD を算出し、それらのメトリックからパスメトリックを獲得する。

3.2.1 ノードメトリック

FDAR において各ノードは、FD を保持する。FD は、MAC 層の情報から算出することができ、各ノードにおける通信状況を表している。FD の値が大きい場合は、そのノードは高負荷な状況であることを表している。具体的には、FD はあるノードの送信レートと受信レートとの比であり、ノード i の FD の値 FD_i を、以下のように定義する。

$$FD_i = \frac{T_x R_i}{R_{cv} R_i^2} \quad (1)$$

ここで、 $T_x R_i$ は、ノード i の送信レートを示し、 $R_{cv} R_i$ は、ノード i の受信レートを示している。 $T_x R_i$ と $R_{cv} R_i$ は、Exponentially Weighted Moving Average method (EWMA) に従って、 T 秒毎にサンプリングした値から以下のように算出する：

$$T_x R_i = \alpha \times T_x R_{old} + (1 - \alpha) \times T_x R_{sample} \quad (2)$$

$$R_{cv} R_i = \alpha \times R_{cv} R_{old} + (1 - \alpha) \times R_{cv} R_{sample} \quad (3)$$

本研究では、 $T_x R_{sample}$ と $R_{cv} R_{sample}$ を重視してネットワークの現在の状況をより反映するために、サンプリング間隔 T として 0.6 秒、 α として 0.3 を採用した。

3.2.2 パスメトリック

前節で述べたノードメトリックを使って、パスメトリックを算出する。パスメトリックは、経路を構

成する各ノードの FD を単純に合計するだけでなく、文献 [4] で提案された traffic interference を考慮する。これは、無線通信において、あるノードのデータ送信が、送信先に関係なく、そのノードの通信範囲内に存在するすべてのノードに影響を与えることを意味している。ここで、ノードの通信範囲内に存在するすべてのノードのことを近隣ノードと呼ぶことにする。例えば、ある経路を構成するすべてのノードに負荷がない状況を考える。これらのノードの近隣ノードの中で、通信負荷が高いノードが存在する場合は、その経路上のノードの負荷に関係なく、その経路の負荷は高くなる。なぜなら、負荷の高い近隣ノードを持つノードは、近隣ノードが通信中は通信できないためである。この traffic interference を考慮することで、より効果的なパスメトリックを求めることができると考えられる。ノード i の traffic interference TI_i は、以下のように定義される。

$$TI_i = \sum_{j \in N_i} FD_j \quad (4)$$

ここで、 N_i をノード i の近隣ノードの集合とする。近隣ノード集合は、各ノードが“hello message”を使って定期的に管理しているものとする。また、近隣ノードの FD は、その hello message の返答パケットに添付されるものとしている。

次に、経路 r のパスメトリック C_r は以下のように定義する。

$$C_r = \sum_{i \in r} (FD_i + TI_i) \quad (5)$$

ここで、経路 r には、送信ノードと目的ノードは含まれないものとする。

3.3 経路維持

DSR では、輻輳によるパケットロスとノードの移動によるパケットロスを区別していない。このために、ネットワークに負荷がかかりパケットロスが発生した場合でも、ネットワークトポロジが変化したと認識し、通信経路のを維持のために、代替経路を利用するように動作する。ネットワークが高負荷な状態では、このような状況は頻繁に発生し、DSR におけるプロトコルのオーバヘッドが無視できないようになる。

そこで、FDAR では、連続してパケットロスが発生した回数を示すカウンタ L を導入し、 L と閾値 β を用いて、以下のように経路維持を実現する。

- A. パケットロスが発生し、 $L < \beta$ なら、 L を1インクリメントする。
- B. パケットロスが発生し、 $L = \beta$ なら、 L に0をセットし、経路維持が実施される。
- C. パケットの転送した場合は、 L に0をセットする。

本研究では、 β を2に設定した。ここで、 β を1に設定した場合では、DSRと同じように振る舞うことに注意されたい。

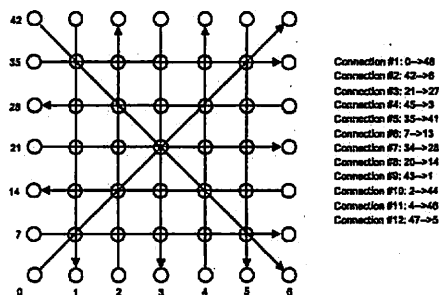


図 1: Stationary network topology.

4 性能評価

本章では、NS-2 シミュレータを用いて、提案プロトコルの性能を評価する。既存の DSR プロトコルと比較して、平均遅延時間、スループット、ネットワークの生存期間の点で評価を行う。また、FDAR プロトコルの安定性についても評価を行う。

4.1 シミュレーション環境

本実験では、49台のノードがアドホックネットワークを構築する。シミュレーション時間は、各試行で300秒であり、パケットサイズを512バイト、トラフィックを発生する送信ノードの数を12台と固定している。送信ノードは、Constant Bit Rate (CBR) を用いて、それぞれが異なる転送レートでデータパケットを送信する。各ノードの通信範囲は、550mであり、MACプロトコルとして、IEEE802.11のDCFを採用した。リンクの通信帯域は、2Mbpsである。

4.2 Static Case

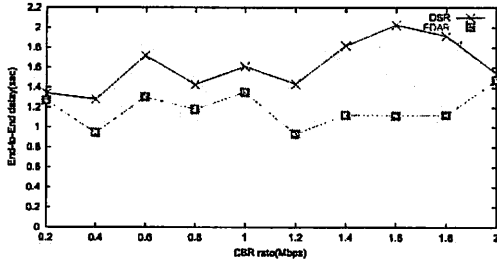
まず最初に、我々はノードが移動しない MANET 上で、提案する FDAR プロトコルの性能を評価した。図1は、その静的に配置されたネットワークポロジを示している。ノードを、540m×540mのエリアに、7×7の格子状に配置した。この実験において、通信フローとして、毎秒50から500パケットの CBR を用いた。

図2(a)は、送信レートを変換させた場合の平均パケット遅延時間の結果を示している。図からFDARはDSRより高い性能を示していることがわかる。特に転送レートが1.6Mbpsの時、DSRよりおよそ25.4%パケットの遅延時間を短縮できた。この主な理由は、FDARでは選ばれる経路が集中することなく、最短

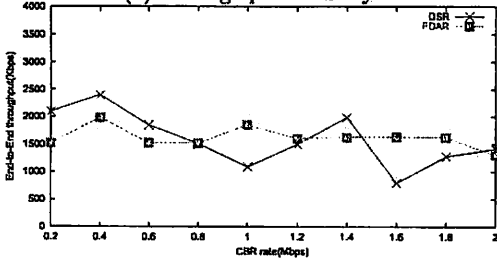
の経路ではないが適度に分散されているためと考えることができる。また、最短経路と比べて迂回経路を選ぶことにより遅延時間が増加するが、この増加と比べて輻輳による遅延時間の増加の方が支配的であることがわかる。送信レートが2Mbpsのとき、DSRの平均遅延時間が明らかに短くなっているが、輻輳がひどくなり、いくつかのフローの送信が停止したためである。

図2(b)は、平均スループットの結果を示している。図から平均スループットにおいても、FDARはDSRと比べてわずかながら良い性能を達成している。この理由についても遅延時間の時と同様で、適度にネットワークの輻輳が分散したためだと考えられる。しかしながら、その効果は最大で3.9%程度と限られたものとなっている。この理由は、プロトコルオーバーヘッドがネットワークの帯域を消費したためだと考えられる。

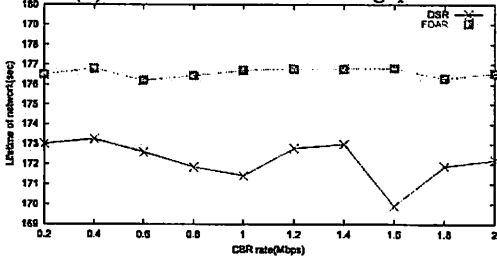
次の実験として、良く利用されるノードは、他のノードと比べて電力をより多く消耗する。このことは、ネットワークの利用できる期間を短くすることになる。我々は、あるノードがバッテリーがなくなるまでの時間をネットワークの生存期間として定義し、この生存期間を利用してプロトコルの性能を評価する。図2(c)は、フローの転送レートを変化させた場合のネットワークの生存期間の結果を示している。図から、FDARの生存期間は、176秒~177秒で安定していることがわかる。しかし、DSRでは、174秒となり生存期間が短くなっている。特に、転送レートが1.6Mbpsでは、DSRの生存期間は170秒となり、経路を分散することによりFDARは2.6%の生存期間の向上を実現できた。



(a) Average packet delays.

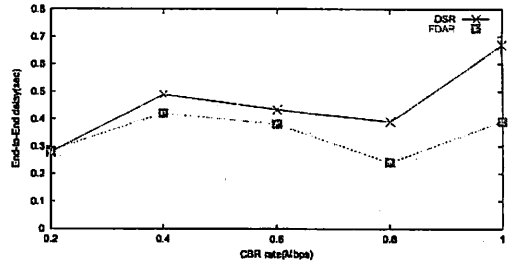


(b) Network end-to-end throughput.

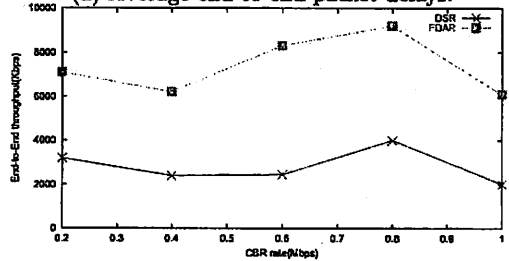


(c) Network lifetime.

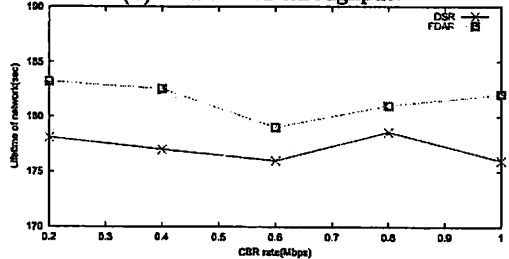
図 2: results in static case.



(a) Average end-to-end packet delays.



(b) End-to-end throughput.



(c) Network lifetime.

図 3: results in dynamic case.

4.3 Dynamic Case

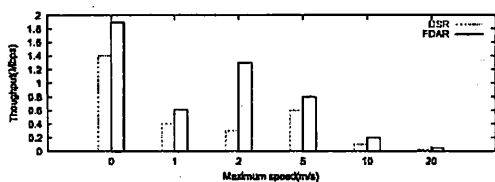
次の実験は、ノードが移動する環境での提案手法の効果を評価する。シミュレーションでは、ノードの移動モデルとして、*random waypoint model* を利用した。各ノードは、 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ のシミュレーション空間の中からランダムにポイントを選択し、そのポイントに向かって最大 20m/s の速度で移動する。また、ノードに停止時間はなく、常に移動しているモデルを採用した。通信フローを 0.2Mbps から 1Mbps に変化させて評価した。

図 3(a) は、ノードが移動する環境での平均遅延時間の結果を示している。結果から、FDAR は DSR より最大で 21.7% 良い性能を示していることがわかる。また、図 3(b) は、平均スループットの結果を示している。FDAR は、DSR と比べて最大で 70% の性能の向上を達成できている。図 3(c) では、ネットワーク生

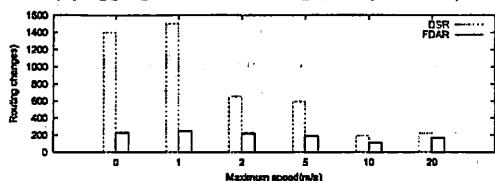
存期間の結果を示している。結果から、DSR と比べて 2.3% の向上が見られた。これらの理由は、FDAR ではノードが移動する環境においても、通信フローが利用する経路を適度に分散して利用しているためと考えることができる。

4.4 経路維持の効果

最後の評価として、3.3 節で述べたパラメータ β の評価を行う。この実験では、ノードの移動モデルとして、現実的な *Manhattan mobility* モデルを使用した。 $500\text{m} \times 500\text{m}$ の空間に 200 台のノードが配置される。この空間には、6 つの道路が等間隔で配置されており、各道路は 2 つのレーンがある。各ノードは、ランダムにこの道路に沿って移動する。移動速度としては、 $0, 1, 2, 5, 10$, および 20m/s を利用し



(a) Aggregate TCP throughput (20 flows)



(b) Total number of routing changes (20 flows)

図 4: Comparison using Manhattan mobility model

た。また本実験では、ノード間の通信に TCP を利用している。シミュレーション時間は 150 秒で、20 個の TCP フローが生成される。

図 4(a) は、ノードの総スループットの結果を示し、図 4(b) は、経路変更が実施された回数を示している。DSR において、移動速度が遅いとき (0 m/s, および 1 m/s), 経路変更が非常に多く発生していることがわかる。経路変更は非常に多くのコストが必要な操作なので、このことが原因で移動速度が遅いときの総スループットが低下していると考えられる。しかし、FDAR では、DSR と比べて総スループットを少なくとも 30% 以上は改善できている。これは経路変更を 65%~85% 少なくできたためである。β を増やすと、経路変更までに時間が必要となり、結果として性能が低下することが考えられるが、その低下は全体の性能と比べて無視できるものとなっている。これは、移動速度が速い場合の結果が、DSR と FDAR がほとんど変わらないことから推測できる。

5 おわりに

本稿では、リアクティブ型のプロトコルである Dynamic Source Routing (DSR) に着目し、ノードの “Free Degree (FD)” の概念に基づいた Free Degree Adaptive Routing (FDAR) プロトコルを提案した。FDAR は、ルーティングメトリックとして FD を用いることにより、混雑している経路を迂回してデータパケットをルーティングすることで、ネットワークの負荷を分散させて、パケットを低遅延で転送で

きるようにしている。また、ネットワークトポロジの変更のための経路変更の過剰な実施を避けるために、寛容な経路変更ポリシーを確立した。FDAR の有効性をシミュレーションにより評価した。評価の結果、経路を分散させることにより、ノードが移動しない環境で、パケットの転送遅延をおよそ 25%、スループットをおよそ 4% 程度改善できた。また、ノードが移動する環境では、パケットの転送遅延をおよそ 22%、スループットをおよそ 70% 程度改善できた。また、寛容な経路変更ポリシーを採用することで、無駄な経路変更を抑えることができ、スループットを少なくとも 30% 以上は改善できた。

今後の課題としては、他のメトリックを採用したプロトコルとの比較や、提案プロトコルの実際の環境での評価などがあげられる。

参考文献

- [1] Charles E. Perkins Elizabeth M. Belding-Royer and Ian Chakeres. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pages 90-100, 1999.
- [2] T.-W. Chen and M. Gerla. Global state routing: a new routing scheme for ad hoc wireless networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1998.
- [3] C.-C. Chiang. Routing in clustered multihop. In *Mobile Wireless Networks with Fading Channel*, 1997.
- [4] H. Hassanein and A. Zhou. Load-aware destination-controlled routing for MANETs. *Computer Communications*, 2003.
- [5] David B. Johnson and Davis A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc networks. *Imielinski, H. Korth (Eds.), Mobile Computing*, pages 152-181, 1996.
- [6] David B. Johnson and Davis A. Maltz. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks. *IETF Draft*, 1999.