

# 高効率・高信頼無線ネットワークのためのネットワーク固有モード伝送法

代表研究者 小野 文枝 横浜国立大学大学院工学研究院 助教

## 1 はじめに

無線通信ネットワークは、単一の無線通信システムによりネットワークを構成する場合や異なる無線通信システムが融合し、一つのネットワークを構成するなど、複雑な無線通信環境がますます拡大している。このような複雑な環境では、すべての無線端末において通信路特性、干渉信号数、割当て可能な周波数などの無線通信資源、トラフィックが均等とはならず、空間的な偏りが存在する。その結果、①無線リンク品質の空間的な偏りによりネットワークスループットの劣化、②無線リンクの経路消失によるパケット到達率の低下、③各ノードの入力パケットと出力パケット量の差による遅延時間の増加、という問題点を有する。特に、空間的に偏りがある複雑な環境でも高効率高信頼な無線通信ネットワークを実現するためには、堅丈な無線リンクによる経路を構築し、各無線リンクのスループットを向上させ、ネットワーク内の伝達パケット量を制御することが必要不可欠である。

そこで、本研究では、高効率高信頼な無線通信ネットワークを実現するために、信号空間ではなく接続空間に着目し、接続空間の特徴量を用いた複数経路選択法を検討した。特に、ノードがメッシュ状に分散配置され相互接続されるメッシュ型ネットワークに着目し、ソースノードと宛先（デスティネーション）ノード間に二つの独立した伝送経路を構築する方法を検討した。メッシュ型ネットワークでは、ソースノードは、その隣接ノードを介して、データパケットを宛先ノードまでマルチホップ伝送する。冗長に相互接続されたメッシュ型ネットワークでは、ソースノードと宛先ノード間に複数の伝送経路を構築することが可能であることから、障害発生時にこれらの経路を代替経路として用いる事により、高信頼な伝送を達成する事ができる[1][2]。しかしながら、メッシュ型ネットワークにおいては、(a) 中継負荷の分散や高信頼な経路の構築を目的とした場合、選択される伝送経路はメッシュ状のネットワーク全体に広がる傾向があり、経路のホップ数が増加するため伝送遅延が増加することにより、スループットが劣化する、一方、(b) 最短ホップ経路の構築を目的とした場合、伝送経路はメッシュ状のネットワークの中心を通過する傾向があり、隣接ノード数が多いノードを通るため送信待機時間が増加し、スループットが劣化する、そして、(c) 最短ホップまたは送信待機時間の小さい経路の構築を目的とした場合には、隣接ノード数の大きいノードまたは小さいノードに中継負荷が集中し、ノードロスが発生する、等の問題点を有している。したがって、高いスループットを維持しつつ中継負荷の分散が実現可能な伝送経路の構築が望まれる。そのため、本研究では、隣接行列の固有ベクトルを用いて二つの独立した経路を構築する経路選択法を提案し、得られた経路の性能を明らかにした。

## 2 ネットワークモデル

図1に本研究に用いる25個のメッシュノードから構成される簡易なメッシュ型ネットワークの例を示す。すべてのメッシュノードは、周期的にHELLOパケットを隣接ノードへブロードキャストする。HELLOパケットには、そのメッシュノードの隣接メッシュノードに関する情報が含まれる。図1(a)は、図中の●のメッシュノードがネットワーク内のすべてメッシュノードの隣接情報を有している場合であり、図1(b)は図中の●のメッシュノードから $n$ ホップ内の隣接情報を有している場合を表している。そして、図1(c)は図中の●のメッシュノードが自らの隣接情報のみを有している場合を表している。メッシュノードは保持している隣接情報から、ネットワークの特徴量を得ることができる。ここで、図1(a)のようにメッシュノード $\#i$ がすべての隣接情報を有している場合、隣接情報からネットワーク全体の隣接行列 $\mathbf{A}$ を生成できる。図1(b)や(c)のようにメッシュノード $\#i$ が $n$ ホップ内の隣接情報のみ有している場合には、隣接情報から部分的なネットワークの隣接行列 $\mathbf{A}_i^{(n)}$ が生成される。一般的に、これらの隣接行列の固有値展開により、行列のランク数 $r$ 個の固有ベクトル $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_r$  ( $1 \leq r \leq N$ )を得る事ができる。固有ベクトルはネットワークの特徴量の一つであり、本研究ではこの固有ベクトルを用いて複数の経路を構築する手法を検討した。

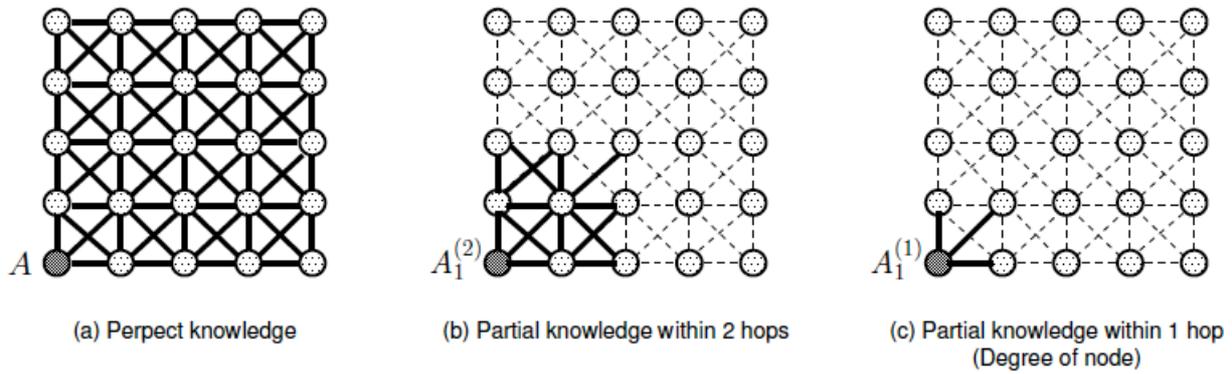


図1 ネットワークモデル ( $N=25$ )

### 3 固有ベクトルを用いた経路選択法

本研究では、ネットワークの特徴量の一つである隣接行列の固有ベクトルを用いて、三つの複数経路選択法を検討した。三つの複数経路選択法のうち、一つはソースノードがネットワーク全体の隣接行列を生成し経路選択を行うソースルーティング法、残りの二つはネットワーク内のそれぞれのノードが部分的なネットワークの隣接行列を生成し経路選択を行うオンデマンドルーティング法とホップ毎ルーティング法である。ネットワーク全体の隣接行列を生成するソースルーティングは、隣接情報を収集するための処理が多くなる傾向があるのに対し、オンデマンドルーティングやホップ毎ルーティングはその処理を軽減することができるが、限定された情報のみを用いた経路の性能はソースルーティングに比べ劣化する。

図2に従来法の一つである Split Multipath Routing (SMR) [3]と提案法の固有ベクトルを用いた三つのルーティングにより得られた経路例を示す。赤太線と青太線がそれぞれの経路選択法により選択された経路を表す。以下にそれぞれの複数経路選択法の概略を述べる（詳細は発表資料を参考にされたい。）

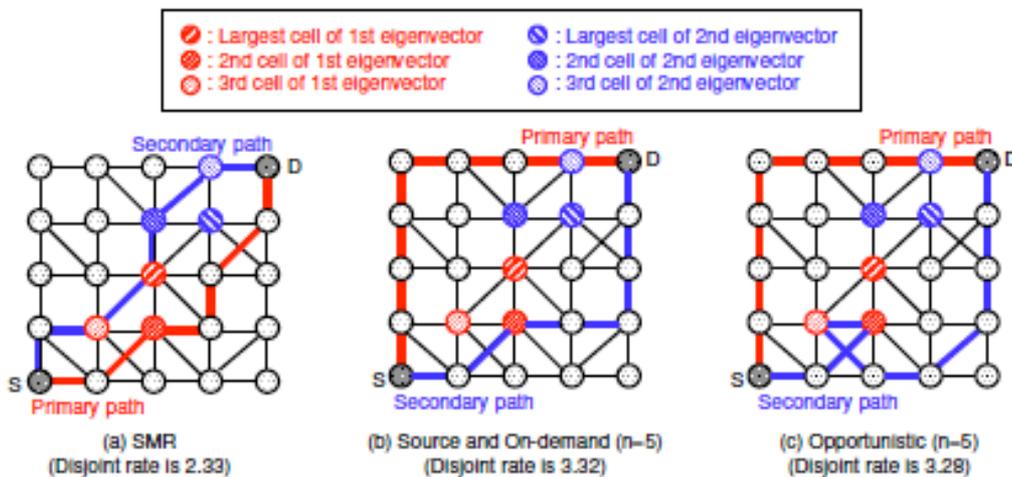


図2 従来法と提案法による二つの経路例

#### 1) ソースルーティング (Source routing)

ソースルーティングでは、ソースノードがネットワーク内のすべての接続情報を収集し、二つの経路を選択する。そのため、ソースノードは得られた隣接情報から隣接行列を生成し、その固有値展開により二つの

固有ベクトルを得る。第一固有ベクトルの要素値はプライマリパス、第二固有ベクトルの要素値はセカンダリパスの経路を選択するためのメトリックとして利用する。ソースノードは、宛先ノードまでのすべての経路の集合から、 $m$  ホップ以内で到達可能な経路の集合を選択する。さらに、固有ベクトルの直交性の性質を利用し、プライマリパスとセカンダリパスが独立となる条件を満たす二つの経路を選択し、決定する。

## 2) オンデマンドルーティング (On-demand routing)

オンデマンドルーティングでは、ソースルーティングとは異なり、宛先ノードがネットワーク内の固有ベクトルの要素の値を収集し、最終的に二つの経路を選択する。そのため、ソースノードは、ルートリクエスト (RREQ) パケットをブロードキャストする。RREQ パケットは、ソースノード ID、宛先ノード ID、RREQ パケットを受信したノード ID とその第一と第二固有ベクトルの要素から構成される。RREQ パケットを受信した中継ノードは RREQ パケットに自らの ID が含まれていないことを確認し、自ノード ID とその第一と第二固有ベクトルの要素値を RREQ パケットに追加し、ブロードキャストする。ネットワーク内のすべてのノードは、 $n-1$  ホップ以内の接続情報を有しており、そこから生成される部分隣接行列から固有ベクトルを得て自ノードの要素値を求める。ここで、 $n-1$  のホップ数が増加すればするほど、固有ベクトルの要素の値はソースルーティングに用いられる要素値に近づく。宛先ノードは任意の期間に渡り RREQ パケットを受信し、パケット内の固有ベクトルの要素値から条件を満たす経路を選択し、二つの経路を決定する。そして、決定した経路情報をルートリプライ (RREP) パケットに含めてソースノードへ送信することにより、経路が構築される。

## 3) ホップ毎ルーティング (Opportunistic routing)

ホップ毎ルーティングでは、オンデマンドルーティングと同様にネットワーク内のすべてのノードは、 $n-1$  ホップ以内の接続情報を有しており、そこから生成される部分隣接行列から自ノードの第一、第二固有ベクトルの要素値を得る。得られた要素の値は、隣接ノードと相互に交換し、パケットの転送先の選択メトリックとして活用する。オンデマンドルーティングと異なり、ホップ毎ルーティングではソースノードは RREQ パケットを隣接ノードの集合のなかから、第一、第二固有ベクトルの要素の値に相当するメトリックが最も小さい二つのノードを選択し、送信する。中継ノードは、RREQ パケットに自らの ID が含まれていないことを確認し、自ノード ID とその第一と第二固有ベクトルの要素を RREQ パケットに追加し、ソースノードと同様に隣接ノードの集合のなかから二つのノードを選択し、RREQ パケットを転送する。そして、宛先ノードは二つの経路から RREQ パケットを受信し、経路情報を RREP パケットに含めてソースノードへ送信することにより、経路が構築される。

## 4 性能評価

提案法の妥当性を検討するために、ノードあたりの中継率を負荷率、単位時間あたりのパケット到達率をスループットとして評価する。表 1 に性能評価のためのパラメータを示す。

表 1 性能評価のための緒元

MAC protocol	CSMA/CA
Max. number of re-transmissions for a packet	9 [times]
Minimum window size	16
Transmission rate	250 [kbps]
Length of data frame	46 [byte]
Length of RTS/CTS frame	21 [byte]
Length of ACK frame	11 [byte]

図 3 にネットワークが 9, 16, 25, 36 メッシュノードから構成される場合の平均スループット対負荷率の分散特性を示す。ネットワーク全体のノード数を  $N$  とすると、オンデマンドルーティングとホップ毎ルーティングではそれぞれのノードは  $N^{1/2}-1$  ホップ内の情報を基にメトリックを計算するものとしている。従来法と提案法のソースルーティング及びオンデマンドルーティングの特性は同様の傾向を示すものの、ホップ毎ルーティングは次ホップの選択法が異なることから特性もソースルーティング及びオンデマンドルーティングと

は異なっている。また、ネットワークサイズが 25 以上の場合、三つの提案法は従来法よりもノードの負荷を均一化しつつ高いスループットを達成可能であることがわかる。したがって、隣接行列から得られる特徴量により構築される経路は、ネットワークサイズが大きな場合、高スループット特性及び負荷分散が達成可能であり、高効率高信頼な伝送が可能であると考えられる。

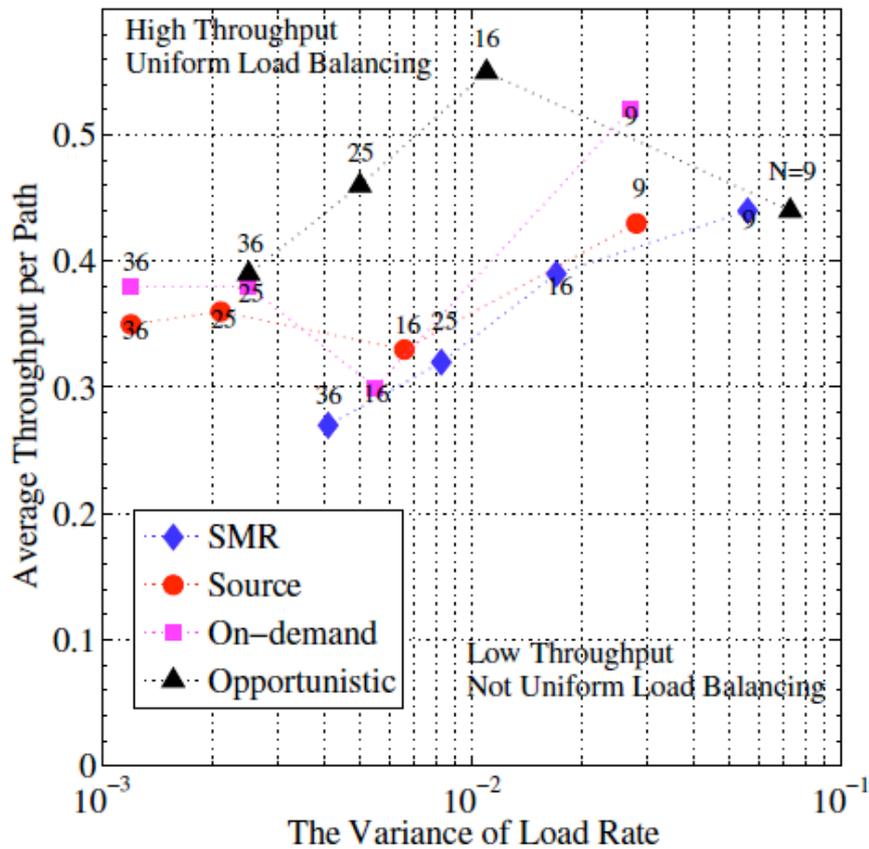


図3 従来法と提案法により得られた経路の平均スループット対負荷率の分散特性

## 5 おわりに

本研究では、高効率高信頼無線通信ネットワークを実現するために、隣接行列の固有ベクトルを用いた複数経路構築法を提案し、その経路により得られる性能を解析した。特に、ネットワーク内のすべてのノードがソースノードとなった場合の中継負荷率及び平均スループット特性を評価した。その結果、従来法に比べ、提案法により構築された経路は、中継負荷率及び平均スループット特性の改善が見込まれることを明らかにした。今後の課題として、オーバーヘッドの軽減やモビリティの考慮、クロスレイヤ最適化などが挙げられる。

【参考文献】

- [1] M. Tarique, K. E. Tepe, S. Adibi, and S. Erfani, "Survey of multipath routing protocols for mobile ad hoc networks", Journal of Network and Computer Applications, no.32, pp.1125–1143, 2009
- [2] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu and P. Havinga, "Trade-off Proposed method between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks", International Conference of Wireless Communications and Networking (WCNC), vol. 3, pp. 1918–1922, 2003
- [3] S. J. Lee, and M. Gerla, "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks", Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), vol. 10, pp.3201–3205, 200

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Node Centrality on Disjoint Multipath Routing	2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)	2011. 5
Disjoint Trajectory in Wireless Sensor Networks with Two Mobile Sinks	2011 PIMRC Workshop on Wireless Distributed Networks	2011. 9