

# アドホックネットワークにおける 最大通信量提供経路群の探索手法

辰野 友祐紀<sup>†1</sup> 梶 垣 博 章<sup>†1</sup>

通信リンク容量が比較的小さい無線マルチホップネットワークにおいてマルチメディアデータ配送を実現するためには、送信元無線ノード  $N^s$  から送信先無線ノード  $N^d$  への複数のマルチホップ配送経路を検出し、各マルチホップ配送経路に含まれるすべての通信リンクに対して通信量を予約する手法が求められる。アプリケーションが要求する通信量の予約を実現するために、 $N^s$  から  $N^d$  への最大通信量を求める手法を適用することが考えられる。各通信リンクの通信量が他の通信リンクの通信容量には影響を与えない有線ネットワークモデルを対象とした最大通信量提供経路を探索するヒューリスティック手法としてラベリング法がある。しかし、無線ネットワークでは、隣接無線ノードへのデータメッセージ配送がブロードキャスト通信によって実現され、通信容量が隠れ端末や晒し端末の通信量の影響を受けることからラベリング法をそのまま適用することはできない。本論文では、無線マルチホップネットワークを対象としたラベリング法の拡張手法を提案する。

## Extended Labeling Method for Achieving Maximum Data Message Flow in Wireless Multihop Networks

YUKI TATSUNO <sup>†1</sup> and HIROAKI HIGAKI<sup>†1</sup>

For multimedia data message transmissions in wireless multihop networks composed of wireless links with lower throughput, transmission capacity is reserved in wireless links included in one of wireless multihop transmission routes from a source node  $N^s$  to a destination node  $N^d$ . For reservation of transmission capacity required for applications, a method for achieving the maximum data message flow from  $N^s$  to  $N^d$  is required. For wired multihop networks, the labeling method has been proposed. However, in wireless multihop networks, since message transmission between neighbor nodes is realized by broadcast transmission of wireless signal, capacity of a wireless link is effected by data message transmissions by neighbor nodes due to the hidden-terminal and exposed-terminal problems. Thus, this paper proposes an extended labeling method based on a novel wireless network model for the maximum data message flow

in wireless multihop networks and according to novel conditions for a wireless multihop transmission route to increase the amount of data message flow from  $N^s$  to  $N^d$ .

### 1. はじめに

アドホックネットワーク、センサネットワーク、メッシュネットワークでは、送信元無線ノードから送信先無線ノードへのデータメッセージ配送が無線マルチホップ通信で実現される。各無線ノードは、無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードとのみ直接通信が可能であり、送信先無線ノードが送信元無線ノードの無線信号到達範囲に含まれない場合には、無線マルチホップ配送経路を構成する中継無線ノードがデータメッセージを順次転送することで、データメッセージ配送を実現する。このような無線マルチホップネットワークにおいて、多数のデータメッセージの実時間配送が要求されるマルチメディアデータ配送を実現するためには、無線マルチホップ配送経路に含まれる無線通信リンク群においてあらかじめ通信量を予約することが必要である。

送信元ノードから送信先ノードまでの単一のマルチホップ配送経路に含まれる通信リンク群における通信量を予約するプロトコルに RSVP<sup>1)</sup> がある (図 1)。RSVP は、各通信リンクに十分な通信容量があり、マルチホップ配送経路に含まれる各通信リンクの通信量をそれぞれ独立に予約可能な有線ネットワークを適用対象としている。しかし、無線マルチホップネットワークでは、各無線通信リンクの提供する通信容量が有線通信リンクに対して比較的小さい。また、隣接無線ノード間の通信が無線信号到達範囲におけるブロードキャスト通信によって実現されるために隠れ端末問題や晒し端末問題<sup>3)</sup> が発生し、無線信号の衝突回避によって生じる競合が無線ノードの予約可能な通信量を減少させる。このため、単一の無線マルチホップ配送経路によるデータメッセージ配送ではアプリケーションが要求する通信量を提供することが困難である。

RSVMRD<sup>4)</sup> は、送信元ノードから送信先ノードへの複数のマルチホップ配送経路を用いることでアプリケーションが要求する通信量を予約する有線ネットワークを対象した手法である (図 2)。ここでは、ラベリング法<sup>2)</sup> によって、送信元ノードから送信先ノードへの複数

<sup>†1</sup> 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス専攻  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

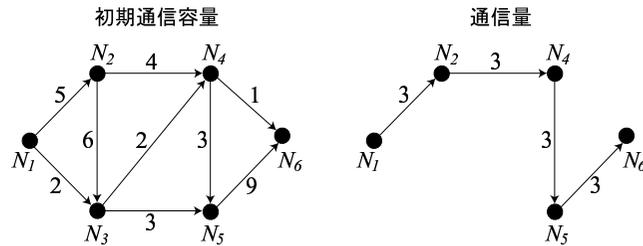


図1 単一経路によるマルチホップ配送

のマルチホップ配送経路を用いたデータメッセージ配送における最大通信量とそれを実現する際の各通信リンクにおける通信量を計算し、これに基づいて各通信リンクにおける予約通信量を決定している。本論文では、アプリケーションが要求する通信量を複数の無線マルチホップ配送経路を用いて提供するための無線通信リンク群に対する通信量予約手法を構成するために、複数の無線マルチホップ配送経路を用いたデータメッセージ配送における最大通信量とそれを実現する際の各無線通信リンクにおける通信量の計算をラベリング法の拡張によって実現する手法を提案する。

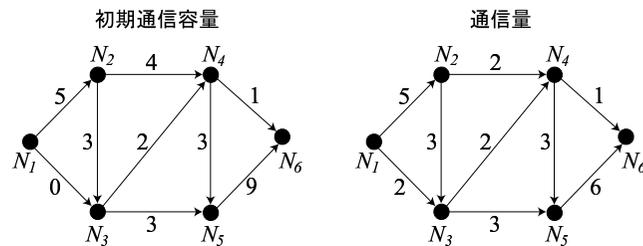


図2 複数経路の組合せによるマルチホップ配送

## 2. 関連研究

### 2.1 無線マルチホップ通信

無線ノード  $N_i$  の集合  $\mathcal{N} := \{N_i\}$  と無線ノード  $N_i$  と  $N_j$  を相互接続する無線通信リンク  $\langle N_i N_j \rangle$  の集合  $\mathcal{L} := \{\langle N_i N_j \rangle\}$  で定められる無線マルチホップネットワーク  $\mathcal{NT} := \langle \mathcal{N}, \mathcal{L} \rangle$

を対象とする。ここで、すべての無線ノードの無線信号到達距離は等しく、無線通信リンクはすべて双方向であると仮定する。各データメッセージは、送信元無線ノード  $N^s (= N_0)$  から送信先無線ノード  $N^d (= N_n)$  まで無線マルチホップ配送経路  $R := \langle N_0 \dots N_n \rangle$  に沿って配送される。ここで、 $N_i$  ( $i = 1, \dots, n-1$ ) は中継無線ノードであり、 $N_{i+1}$  は  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれる<sup>\*1</sup>。無線ノード  $N \in \mathcal{N}$  の無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードの集合を  $Nei(N)$  とすると、 $N_{i+1} \in Nei(N_i)$  である。

ここで、送信無線ノード  $N^t$  から受信無線ノード  $N^r \in Nei(N^t)$  へのデータメッセージ配送を考える。 $N^t$  から  $N^r$  へ送信されるデータメッセージは、 $N^t$  のすべての隣接無線ノード  $N \in Nei(N^t)$  へ到達することから、 $N$  は晒し端末と呼ばれる。多くの無線 LAN プロトコルでは、衝突回避のために、晒し端末によるデータメッセージ送信が禁止されている。衝突を発生しない晒し端末のデータメッセージ送信を禁止することで不要な競合を発生する問題は、晒し端末問題と呼ばれる。また、 $N^t$  から  $N^r$  へのデータメッセージ配送と同時に  $N^l \in Nei(N^r) - Nei(N^t)$  がデータメッセージを送信すると  $N^r$  で衝突が発生し、 $N^r$  は  $N^t$  から送信されたデータメッセージの受信に失敗する。これを隠れ端末問題という。無線マルチホップ配送では、送信無線ノード  $N_i$  から受信無線ノード  $N_{i+1}$  へのデータメッセージ転送がこれらの隣接無線ノードへ影響を与える。すなわち、各無線通信リンクにおけるデータメッセージ配送が独立ではない。

### 2.2 ラベリング法

ネットワーク  $\mathcal{NT}' := \langle \mathcal{N}', \mathcal{L}' \rangle$  がノード  $N_i$  の集合  $\mathcal{N}' := \{N_i\}$  とノード  $N_i$  から  $N_j$  へと接続する通信リンク  $\langle N_i N_j \rangle$  から構成され、各通信リンク  $\langle N_i N_j \rangle$  に通信容量  $c(\langle N_i N_j \rangle)$  が与えられているとき、送信元ノード  $N^s$  から送信先ノード  $N^d$  まで複数のマルチホップ経路によって配送可能な最大通信量を計算するヒューリスティック手法にラベリング法<sup>2)</sup>がある。

最大通信量を求める問題は、各通信リンク  $\langle N_i N_j \rangle$  の通信量を  $r(\langle N_i N_j \rangle)$  とすると、以下のように与えられる。

[最大通信量問題]

すべての  $\langle N_i N_j \rangle \in \mathcal{L}'$  について  $r(\langle N_i N_j \rangle) \leq c(\langle N_i N_j \rangle)$  かつ、すべての  $N_i \in \mathcal{N}' - \{N^s, N^d\}$  について  $\sum_{\langle N_k N_i \rangle \in \mathcal{L}'} r(\langle N_k N_i \rangle) = \sum_{\langle N_i N_j \rangle \in \mathcal{L}'} r(\langle N_i N_j \rangle)$  のもとで、

\*1 本論文では双方向無線通信リンクのみであることを仮定しているため、 $N_{i-1}$  も  $N_i$  の無線信号到達範囲に含まれる。

$\sum_{|N^s N_j \rangle \in \mathcal{L}'} r(|N^s N_j \rangle) = \sum_{|N_k N^d \rangle \in \mathcal{L}'} r(|N_k N^d \rangle)$  の最大値を求める。□

ラベリング法では、送信元ノード  $N^s$  から送信先ノード  $N^d$  への通信量を増加させるマルチホップ配送経路を探索する。ここで、マルチホップ配送経路の最大通信量は、検出経路に含まれる各通信リンクの最小容量で定められる。この最大通信量が正であるマルチホップ配送経路は、 $N^s$  から  $N^d$  への通信量を増加させる経路であり、通信量増加経路と呼ぶ。ラベリング法では、通信量増加経路を順次検出し、検出経路の最大通信量を各通信リンクの通信容量から減ずることを通信量増加経路が検出不能となるまで繰り返すことによって、 $N^s$  から  $N^d$  への複数のマルチホップ配送経路を用いた最大通信量とそれを実現する各通信リンクの通信量を計算する。

例えば、図3に示す  $\mathcal{N}' := \{N^s, N_1, N_2, N^d\}$ 、 $\mathcal{L}' := \{|N^s N_1 \rangle, |N^s N_2 \rangle, |N_1 N_2 \rangle, |N_1 N^d \rangle, |N_2 N^d \rangle\}$  であるネットワーク  $\mathcal{N}T' := \langle \mathcal{N}', \mathcal{L}' \rangle$  を考える。ここで、各通信リンクの通信容量が  $c(|N^s N_1 \rangle) := 10$ 、 $c(|N^s N_2 \rangle) := 5$ 、 $c(|N_1 N_2 \rangle) := 8$ 、 $c(|N_1 N^d \rangle) := 4$ 、 $c(|N_2 N^d \rangle) := 8$  で与えられているとする。

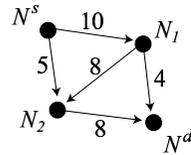


図3 通信リンク容量の定められたネットワーク

図4に示すように、最初に、通信量増加経路として  $||N^s N_1 N^d \rangle\rangle$  を検出すると、その最大通信量が4 ( $= c(|N_1 N^d \rangle)$ ) であることから、通信リンクの容量が  $c(|N^s N_1 \rangle) := 6$ 、 $c(|N_1 N^d \rangle) := 0$  と更新される。次に、通信量増加経路として  $||N^s N_2 N^d \rangle\rangle$  を検出すると、その最大通信量が5 ( $= c(|N^s N_2 \rangle)$ ) であることから、通信リンクの容量が  $c(|N^s N_2 \rangle) := 0$ 、 $c(|N_2 N^d \rangle) := 3$  と更新される。最後に、通信量増加経路として  $||N^s N_1 N_2 N^d \rangle\rangle$  を検出すると、その最大通信量が3 ( $= c(|N_2 N^d \rangle)$ ) であることから、通信リンクの容量が  $c(|N^s N_1 \rangle) := 3$ 、 $c(|N_1 N_2 \rangle) := 5$ 、 $c(|N_2 N^d \rangle) := 0$  と更新される。これによって、 $N^s$  から  $N^d$  への通信量増加経路が存在しなくなることから、最大通信量は12 ( $=4+5+3$ ) であると計算される。

一方、図5に示すように、最初に、通信量増加経路として  $||N^s N_1 N_2 N^d \rangle\rangle$  を検出する

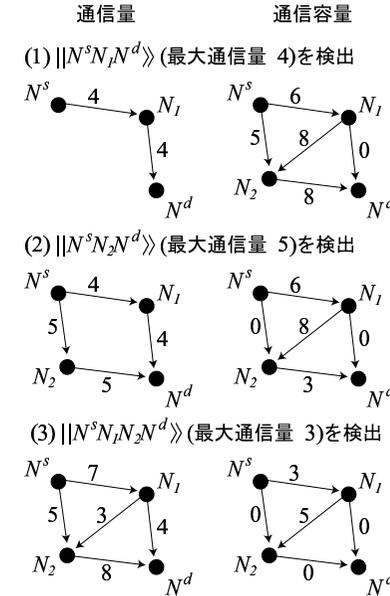


図4 ラベリング法の適用例(1)

と、その最大通信量が8 ( $= c(|N_1 N_2 \rangle) = c(|N_2 N^d \rangle)$ ) であることから、通信リンクの容量が  $c(|N^s N_1 \rangle) := 2$ 、 $c(|N_1 N_2 \rangle) := 0$ 、 $c(|N_2 N^d \rangle) := 0$  と更新される。次に、通信量増加経路として  $||N^s N_1 N^d \rangle\rangle$  を検出すると、その最大通信量が2 ( $= c(|N^s N_1 \rangle)$ ) であることから、通信リンクの容量が  $c(|N^s N_1 \rangle) := 0$ 、 $c(|N_1 N^d \rangle) := 2$  と更新される。このとき、すべての通信リンクの容量が正である  $N^s$  から  $N^d$  へのマルチホップ配送経路は  $\mathcal{N}T'$  には存在しない。しかし、 $||N^s N_2 N_1 N^d \rangle\rangle$  を通信量増加経路と考えることができる。これは、 $c(|N^s N_2 \rangle) = 5$ 、 $c(|N_1 N^d \rangle) = 2$  であることに加えて、 $r(|N_1 N_2 \rangle) = 8$  を減ずることは、実在しない  $|N_2 N_1 \rangle$  に通信量を与えることと等価であるからである。この減少させる通信量の最大値は  $r(|N_1 N_2 \rangle) = 8$  で与えられることから、 $||N^s N_2 N_1 N^d \rangle\rangle$  の最大通信量は2 ( $= c(|N_1 N^d \rangle)$ ) であり、通信リンクの容量が  $c(|N^s N_2 \rangle) := 3$ 、 $c(|N_1 N_2 \rangle) = 2$ 、 $c(|N_1 N^d \rangle) := 0$  と更新される。これによって、 $N^s$  から  $N^d$  への通信量増加経路が存在しなくなることから、最大通信量は12 ( $=8+2+2$ ) であると計算される。

[ラベリング法における通信量増加経路]

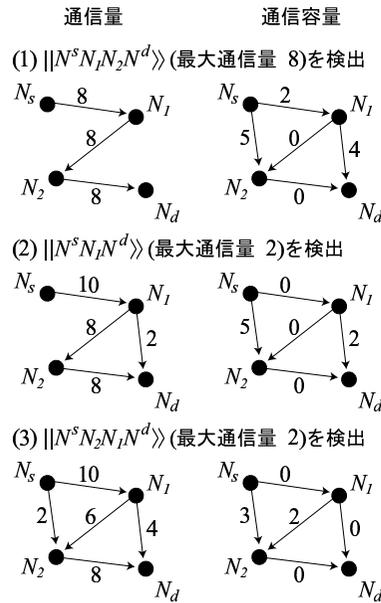


図5 ラベリング法の適用例 (2)

以下のいずれかの条件を満足するマルチホップ配送経路  $R = \{N_0 \dots N_n\}$  は通信量増加経路である。

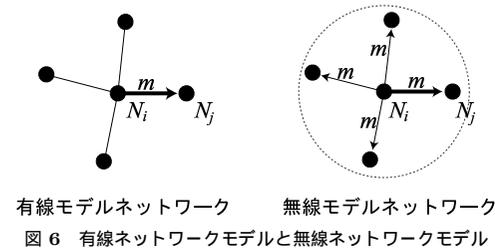
- すべての  $|N_i N_{i+1}| \in R$  について  $c(|N_i N_{i+1}|) > 0$
- すべての  $|N_i N_{i+1}| \in R$  について  $c(|N_i N_{i+1}|) > 0$  または  $r(|N_{i+1} N_i|) > 0$

### 3. 提案手法

#### 3.1 無線ネットワークモデル

ラベリング法では、ノード  $N_i$  からノード  $N_j$  への各通信リンク  $|N_i N_j|$  の通信量が他の通信リンクの通信容量に影響を与えない、すなわち、各通信リンクの容量が他の通信リンクに対して独立であることを前提としている。そのため、最大通信量は各通信リンクの容量によって制約されている。これに対して、本論文で対象とする無線マルチホップネットワークでは、無線ノード  $N_i$  から隣接無線ノード  $N_j$  へのデータメッセージ配送が  $N_i$  の

無線信号到達範囲に含まれるすべての隣接無線ノード  $N \in Nei(N_i)$  へのブロードキャスト通信によって実現される。このため、 $N_i$  から  $N_j$  へのデータメッセージ配送は、無線通信リンク  $\langle N_i N_j \rangle$  の通信量のみではなく、すべての隣接無線ノード  $N$  との間の無線通信リンク  $\langle N_i N \rangle$  の通信量を増加させることとなる (図6)。したがって通信容量は、各無線通信リンクに対して与えられるのではなく、各無線ノードに対して与えられ、最大通信量は各無線ノードの通信容量によって制約される。



有線モデルネットワーク 無線モデルネットワーク  
図6 有線ネットワークモデルと無線ネットワークモデル

$N_i$  から  $N_j$  へのデータメッセージ配送は  $N_i$  の通信容量を削減する。また、 $N_i$  は隣接無線ノードとの送受信を同時に行なうことができないことから、 $N_j$  から隣接無線ノードへのデータメッセージ配送は、 $N_i$  の通信容量を削減する。すなわち、 $N_i$  から  $N$  への通信量を制約する。さらに、図7に示すように  $N$  からその隣接無線ノード  $N^t \in Nei(N)$  へのデータメッセージ配送に対して  $N_i$  が晒し端末となることから、このデータメッセージ配送と同時に  $N_i$  が  $N$  以外の隣接無線ノードからデータメッセージを受信することはできない。同様に、隣接無線ノード  $N^f \in Nei(N)$  から  $N$  へのデータメッセージ配送に対して  $N^f$  と  $N_i$  が隠れ端末となることから、このデータメッセージ配送と同時に  $N_i$  が隣接無線ノードへデータメッセージを送信することはできない。つまり、 $N$  の送受信が  $N_i$  の通信容量を削減する。以上により、各無線ノードの通信容量を  $c(N_i)$ 、無線ノード  $N_i$  から隣接無線ノード  $N_j \in Nei(N_i)$  への無線通信リンクの通信量を  $r(|N_i N_j|)$  とすると、無線マルチホップネットワークにおける  $N^s$  から  $N^d$  への最大通信量を求める問題は、以下のように与えられる。

[無線マルチホップネットワークでの最大通信量問題]

$N \in Nei(N_i) \cup \{N_i\}$  または  $N' \in Nei(N_i) \cup \{N_i\}$  を満足するすべての  $|NN'|$  に

ついて  $\sum_{|NN'} r(|NN'}) \leq c(N_i)$  かつ、すべての  $N_i \in \mathcal{N}' - \{N^s, N^d\}$  について  $\sum_{|N_k N_i) \in \mathcal{L}'} r(|N_k N_i)) = \sum_{|N_i N_j) \in \mathcal{L}'} r(|N_i N_j))$  のもとで、 $\sum_{|N^s N_j) \in \mathcal{L}'} r(|N^s N_j)) = \sum_{|N_k N^d) \in \mathcal{L}'} r(|N_k N^d))$  の最大値を求める。□

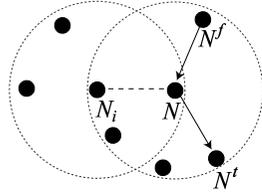


図 7 無線ノードの通信容量制約

### 3.2 通信量増加経路

本節では、ラベリング法に対して無線マルチホップネットワークに適用可能とする拡張を行なうために、前節で述べた無線ネットワークモデルに基づいて、送信元無線ノード  $N^s$  から送信先無線ノード  $N^d$  への通信量増加経路となる無線マルチホップ配送経路  $R$  の満たすべき条件を考察する。

まず、通信量  $r$  の通信量増加経路  $R$  が定められた場合における、無線ノード  $N$  の通信容量  $c(N)$  の更新方法について検討する。ここで、無線ノード  $N_i$  の通信容量  $c(N_i)$  の初期値は、 $N_i$  に搭載された無線 NIC の仕様によって与えられる。また、前節で述べたように、 $c(N)$  は、 $N$  を中継無線ノードとする無線マルチホップ配送経路および  $N$  の隣接無線ノードを中継無線ノードとする無線マルチホップ配送経路の通信容量を制約する。そこで、 $N$  が  $R$  に含まれる 3 つの場合と  $R$  に含まれない場合の 4 つの場合に分類して検討する。

[ $N = N_0 \in R$  または  $N = N_n \in R$  の場合]

図 8(a) に示すように、 $N$  が  $R$  の送信元無線ノード  $N_0$  である場合、 $N_1 \in Nei(N)$  であることから、 $c(N)$  は  $R$  に沿った無線通信リンク  $|NN_1)$  と  $|N_1 N_2)$  の通信量だけ削減される。同様に、図 8(b) に示すように、 $N$  が  $R$  の送信先無線ノード  $N_n$  である場合、 $N_{n-1} \in Nei(N)$  であることから、 $c(N)$  は  $R$  に沿った無線通信リンク  $|N_{n-2} N_{n-1})$  と  $|N_{n-1} N_n)$  の通信量だけ削減される。すなわち、 $c(N) := c(N) - 2r$  である。

[ $N = N_1 \in R$  または  $N = N_{n-1} \in R$  の場合]

図 8(a) に示すように、 $N$  が  $N_0$  の次ホップ中継無線ノード  $N_1$  である場合、 $N_0 \in Nei(N)$  かつ  $N_2 \in Nei(N)$  であることから、 $c(N)$  は  $R$  に沿った無線通信リンク  $|N_0 N_1)$ 、 $|N_1 N_2)$

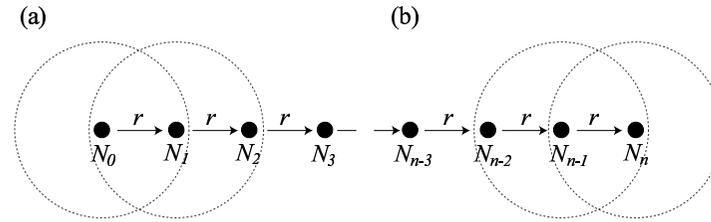


図 8 無線ノード通信容量の更新 ( $N \in R$  の場合 (1))

および  $|N_2 N_3)$  の通信量だけ削減される。同様に、図 8(b) に示すように、 $N$  が  $N_n$  の前ホップ中継無線ノード  $N_{n-1}$  である場合、 $N_{n-2} \in Nei(N)$  かつ  $N_n \in Nei(N)$  であることから、 $c(N)$  は  $R$  に沿った無線通信リンク  $|N_{n-3} N_{n-2})$ 、 $|N_{n-2} N_{n-1})$  および  $|N_{n-1} N_n)$  の通信量だけ削減される。すなわち、 $c(N) := c(N) - 3r$  である。

[ $N = N_i \in R$  の場合]

図 9 に示すように、 $N$  が  $R$  の中継無線ノード  $N_i$  ( $i \neq 0, 1, n-1, n$ ) である場合、 $N_{i-1} \in Nei(N)$  かつ  $N_{i+1} \in Nei(N)$  であることから、 $c(N)$  は  $R$  に沿った無線通信リンク  $|N_{i-2} N_{i-1})$ 、 $|N_{i-1} N_i)$ 、 $|N_i N_{i+1})$  および  $|N_{i+1} N_{i+2})$  の通信量だけ削減される。すなわち、 $c(N) := c(N) - 4r$  である。

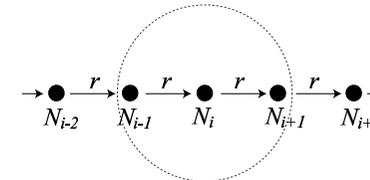


図 9 無線ノード通信容量の更新 ( $N \in R$  の場合 (2))

[ $N \notin R$  かつ  $Nei(N) \cap R \neq \emptyset$  の場合]

図 10 に示すように、 $Nei(N)$  および  $R$  に含まれる無線ノード  $N_i$  に接続する  $R$  に沿った無線通信リンク  $|N_{i-1} N_i)$  および  $|N_i N_{i+1})$  の通信量だけ  $c(N)$  が削減される。すなわち、このような無線通信リンク数を  $l$  とするとき、 $c(N) := c(N) - lr$  である。

このような  $c(N)$  の更新方法から、無線マルチホップ配送経路  $R$  が通信量増加経路となる以下の自明な条件が導かれる。

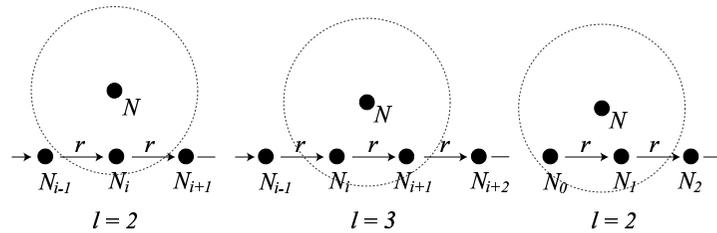


図 10 無線ノード通信容量の更新 ( $N \notin R$  の場合)

[通信量増加経路条件 (1)]

無線マルチホップ配送経路  $R = \{N_0 \dots N_n\}$  において、すべての  $N_i$  について  $c(N_i) > 0$  であり、すべての  $N_i$  のすべての隣接無線ノード  $N \in \text{nei}(N_i)$  について  $c(N) > 0$  であるならば、 $R$  は  $N_0 (= N^s)$  から  $N_n (= N^d)$  への通信量増加経路である。□

次に、既に通信量が与えられている無線通信リンク  $|N_{i+1}N_i|$  の通信量を削減することで通信路増加経路となる無線マルチホップ配送経路  $R := \{N_0 \dots N_n\}$  の条件について考える。図 11 は、通信量  $r'$  の無線マルチホップ配送経路  $R'$  が存在するとき、通信量  $r$  の無線マルチホップ配送経路  $R$  が通信量増加経路となる場合を示している。ここで、無線通信リンク  $|N_iN_{i+1}| \in R$  かつ  $|N_{i+1}N_i| \in R'$ 、 $r(|N_{i+1}N_i|) = r' \geq r$  である。 $R$  を追加することによって、無線通信リンク  $r(|N_jN_{j+1}|)$  ( $j \neq i$ ) は  $r$  増加するが、 $r(|N_{i+1}N_i|)$  は  $r$  減少する。したがって、 $N_j$  ( $j \leq i-2$  または  $j \geq i+3$ ) では  $N_j$  およびその隣接無線ノードに接続する無線通信リンクの通信量の総和は  $4r$  増加する。すなわち、 $c(N_j) := c(N_j) + 4r$  となる。一方、 $N_{i-1}, N_i, N_{i+1}, N_{i+2}$  では、 $|N_{i+1}N_i|$  の通信量の減少により、自身およびその隣接無線ノードに接続する無線通信リンクの通信量の総和は  $2r$  しか増加しない。すなわち、 $c(N) := c(N) + 2r$  ( $N = N_{i-1}, N_i, N_{i+1}, N_{i+2}$ ) である。したがって、 $R$  が通信量増加経路となるためには、 $R$  に含まれるすべての無線ノード  $N_i$  において  $c(N_i) > 0$  でなければならない。いずれかの  $N_i$  において  $c(N_i) = 0$  であるならば、 $R$  は通信量増加経路とはならない。

ただし、 $N_i$  を  $R$  に含まれる唯一の隣接無線ノードとする無線ノード  $N$  においては、無線通信リンク  $|N_{i-1}N_i|$  の通信量が  $r$  増加し、 $|N_{i+1}N_i|$  の通信量が  $r$  減少することから、自身およびその隣接無線ノードに接続する無線通信リンクの通信量の総和は変化しない。すなわち、 $c(N) = 0$  であっても  $R$  を通信量増加経路とすることができる。同様に、 $N_{i+1}$  を  $R$  に含まれる唯一の隣接無線ノードとする無線ノード  $N'$  においても、無線通信リンク

$|N_{i+1}N_i|$  の通信量が  $r$  減少し、 $|N_{i+1}N_{i+2}|$  の通信量が  $r$  増加することから、自身およびその隣接無線ノードに接続する無線通信リンクの通信量の総和は変化しない。すなわち、 $c(N') = 0$  であっても  $R$  を通信量増加経路とすることができる。

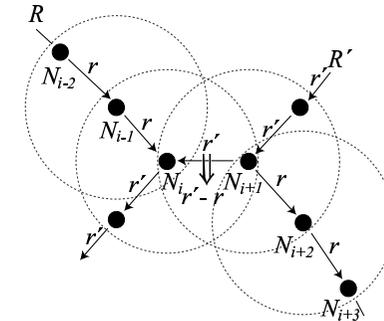


図 11 通信量割当済の通信リンクを逆方向に含む通信量増加経路

そこで、通信量  $r$  の無線マルチホップ配送経路  $R$  に含まれる無線通信リンクのいくつかに逆方向の通信量が割当て済みである場合、 $R$  に含まれる無線ノードおよびその隣接無線ノードの各存在領域における通信容量の減少の様子を図 12 に示す。

無線通信リンク  $|N_{i+1}N_i|$  に通信量  $r(|N_{i+1}N_i|) \geq r$  が割当て済みである場合、 $R$  の追加によって  $r(|N_{i+1}N_i|)$  が  $r$  だけ減少する。したがって、各領域に含まれる無線ノードの通信容量の減少量は図 12(a) のようになる。ここで、 $R$  が通信量増加経路となるためには、通信容量の減少量が正である領域 (網掛けした領域) に含まれる無線通信ノードの通信容量が正であることが求められる。一方、通信容量の減少量が 0 である領域に含まれる無線通信ノードの通信容量は 0 であっても構わない。

無線通信リンク  $|N_iN_{i-1}|$  および  $|N_{i+1}N_i|$  に通信量  $r(|N_iN_{i-1}|) \geq r$  および  $r(|N_{i+1}N_i|) \geq r$  がそれぞれ割当て済みである場合、 $R$  の追加によって  $r(|N_iN_{i-1}|)$  および  $r(|N_{i+1}N_i|)$  がそれぞれ  $r$  だけ減少する。したがって、各領域に含まれる無線ノードの通信容量の減少量は図 12(b) のようになる。ここでも、 $R$  が通信量増加経路となるためには、通信容量の減少量が正である領域 (網掛けした領域) に含まれる無線通信ノードの通信容量が正であることが求められる。一方、通信容量の減少量が 0 および負である領域に含まれる無線通信ノードの通信容量は 0 であっても構わない。特に、通信容量の減少量が負であ

る領域に含まれる無線通信ノードの通信容量は増加し、さらに通信量増加経路を構成することが可能となる場合もある。

図 12(c) は、無線通信リンク  $|N_{i-1}N_{i-2})$  および  $|N_{i+1}N_i)$  に通信量  $r(|N_{i-1}N_{i-2})| \geq r$  および  $r(|N_{i+1}N_i)| \geq r$  がそれぞれ割当て済みである場合を示している。

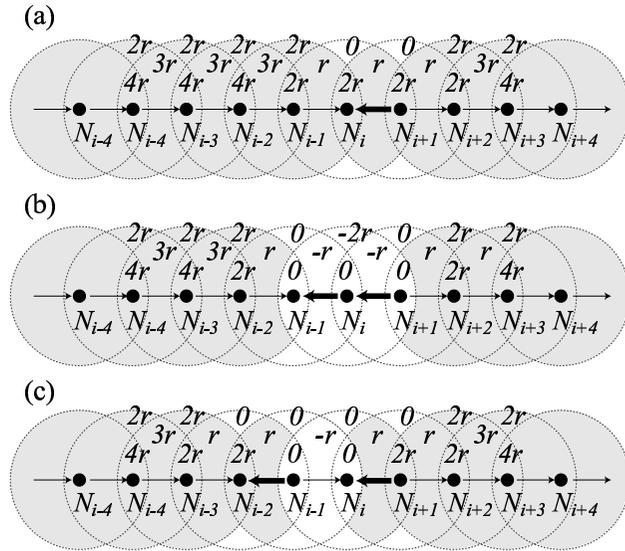


図 12 通信量割当て済みの通信リンクを逆方向に含む経路による無線ノードの通信容量減少量

以上により、通信量割当て済み無線通信リンクを逆方向に含む無線マルチホップ配送経路  $R$  が通信量増加経路となる条件は以下のように導かれる。

[通信量増加経路条件 (2)]

無線マルチホップ配送経路  $R = ||N_0 \dots N_n\rangle\rangle$  において、その通信量を  $r > 0$  とするとき、 $r(|N_{i+1}N_i)| = 0$  である無線通信リンク  $|N_iN_{i+1})$  の通信量  $r(|N_iN_{i+1})|$  は  $r$  増加し、 $r(|N_{i+1}N_i)| > 0$  である無線通信リンク  $|N_iN_{i+1})$  の通信量  $r(|N_iN_{i+1})|$  は  $r$  減少するとし、 $R$  に含まれる無線ノード  $N_i$  といずれかの  $N_i$  の隣接無線ノード  $N \in Nei(N_i)$  の通信容量減少量を評価する。通信容量減少量が正であるすべての無線ノード  $N'$  の通信容量が正、すなわち、 $c(N') > 0$  ならば、 $R$  は通信量増加経路である。□

なお、 $R$  に  $r(|N_{i+1}N_i)| > 0$  である無線通信リンク  $r(|N_iN_{i+1})|$  を含まない場合、すなわち、すべての  $r(|N_iN_{i+1})|$  に対して  $r(|N_{i+1}N_i)| = 0$  の場合の通信容量減少量は図 13 のようにすべての領域で正となる。すなわち、これらの領域に含まれる無線ノードの通信容量が正であることが必要であり、これは通信量増加経路条件 (1) と等価である。つまり、条件 (1) は条件 (2) に包含されている。

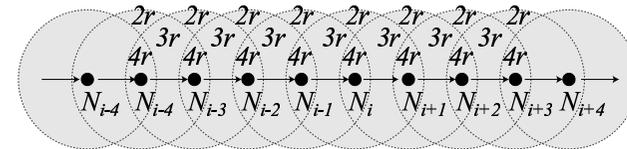


図 13 通信量割当て済みの通信リンクを含まない経路による無線ノードの通信容量減少量

また、条件の判定には  $R$  の通信量  $r$  を用いる必要はなく、自身およびその隣接無線ノードに接続する  $R$  の追加によって通信量が増加する無線通信リンク数と減少する無線通信リンク数から通信容量の増減を評価すれば十分である。以上により、 $R$  が通信量増加経路となる条件は以下のようにまとめられる。

[通信量増加経路条件]

無線マルチホップ配送経路  $R$  に含まれるすべての無線ノード  $N_i$  およびそのすべての隣接無線ノード  $N \in Nei(N_i)$  において、それら自身およびその隣接無線ノードに接続する  $R$  の追加によって通信量が増加する無線通信リンク数が減少する無線通信リンク数よりも多いすべての無線ノード  $N'$  の通信容量  $c(N')$  が正であるならば、 $R$  は通信量増加経路である。

□

#### 4. まとめと今後の課題

本論文では、無線マルチホップネットワークを対象として、送信元無線ノードから送信先無線ノードへの複数の無線マルチホップ配送経路によって得られる最大通信量を計算する手法として、ラベリング法を拡張することを提案した。無線マルチホップネットワークでは、晒し端末問題や隠れ端末問題のために各無線通信リンク容量が近隣無線通信リンクの通信量の影響を受けることから、通信容量を無線ノードに対して定める新しい無線ネットワークモデルを考案し、これに基づいた通信量増加経路が満たすべき条件を明らかにした。

今後は、追加される通信量増加経路  $R$  の最大通信量が  $R$  に含まれる各無線通信リンク

に割当て可能な通信量の最小値となることから、この  $R$  の通信量を計算する方法を検討する。また、通信量増加経路を探索し、順次検出する効率の良いアルゴリズムを検討する。ここでは、論文<sup>5)</sup> で提案した次ホップ無線ノードの選択への制約によって探索空間を縮小する手法、経路に含まれる無線ノードおよびその隣接無線ノードの通信容量から探索の枝刈りを行なう手法を考案する。

### 参 考 文 献

- 1) Braden, R., Zhang, L., Berson, S., Herzog, S. and Jamin, S., "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1, Functional Specification," IETF RFC 2205 (1997).
- 2) Doran, A. and Aldous, J., "Networks and Algorithms: An Introductory Approach," *Wiley* (1993).
- 3) Jayasuriya, A., Perreau, S., Dadej, A. and Gordon, S., "Hidden vs. Exposed Terminal Problem in Ad Hoc Networks," Proceedings of the Australian Telecommunication Networks and Applications Conference, pp.52–59, (2004).
- 4) Morita, K. and Higaki, H., "RSVMRD: Bandwidth Reservation with Multiple-Route Detection," Proceedings of the 3rd International Conference on Communication Systems and Networks, pp.172–177 (2004).
- 5) 辰野, 大下, 桧垣, "無線マルチホップ配送における通信容量予約手法," 情報処理学会第 72 回全国大会論文集, No.3, pp.151–152 (2010).