

## 無線マルチホップネットワークにおける 複数経路を用いた誤り訂正手法の経路消失に対する影響

中川 信之<sup>†</sup> 岡田 啓<sup>††</sup> 和田 忠浩<sup>‡</sup> 山里 敬也<sup>††</sup> 片山 正昭<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻

<sup>††</sup> 名古屋大学エコトピア科学研究機構

464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

<sup>‡</sup> 静岡大学工学部電気電子工学科

432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1

E-mail: [†nnakaga@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:†nnakaga@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp)

あらまし 本研究では、無線マルチホップネットワーク上で複数経路を用いて符号化された複数のパケットを送信する手法を提案する。無線マルチホップネットワークは直接通信可能な無線局同士の無線リンクにより構成されるためネットワークポロジの変化や受信機でのパケット検出失敗等による経路の消失が考えられる。そのため、無線マルチホップネットワークにおける通信では経路消失についても考慮する必要がある。本研究では、送信パケットを符号化した後スクランブル器においてデータを複数に分割し、分割されたデータをそれぞれ独立な複数の経路を用いて送信する手法を提案する。さらに提案手法の経路の消失に対する影響を評価する。

キーワード 無線マルチホップネットワーク, マルチパスルーチング, 複数経路, 誤り訂正, ターボ符号

## Influence of Route Loss on Error Correcting Scheme Using Multiple Routes in Wireless Multi-hop Networks

Nobuyuki NAKAGAWA<sup>†</sup>, Hiraku OKADA<sup>††</sup>, Tadahiro WADA<sup>‡</sup>, Takaya YAMAZATO<sup>††</sup>, and

Masaaki KATAYAMA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical Engineering and Computer Science,

Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>††</sup> Ecotopia Science Institute, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603, Japan

<sup>‡</sup> Department of Electrical and Electronics Engineering, Shizuoka University

3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561, Japan

E-mail: [†nnakaga@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:†nnakaga@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp)

**Abstract** In this paper, we propose to transmit the coded packet using multiple routes on wireless multi-hop networks. Wireless multi-hop networks are consisted of wireless station which can communicate directly. Therefore, we should consider the influence of the route loss due to topological change or recognizing failure. In this paper, we propose the scheme that a packet is encoded by turbo code, scrambled, divided into  $N$  sequences and transmitted from the source node to destination node by  $N$  routes. We evaluate that the tolerance over route loss by computer simulation.

**Key words** wireless multihop network, multipath routing, multiple routes, error correcting, turbo code

### 1. はじめに

無線マルチホップネットワーク [1] は互いに直接通信可能な

無線ノード同士の無線リンクで構成されるネットワークである。ネットワーク内の任意の無線ノード間の通信では、互いに直接通信可能な無線ノード同士は直接通信を行い、互いに直接通信

可能不可能な距離にある無線ノード同士は途中で他の無線ノードを中継してマルチホップすることにより通信が行われる。そのため、基地局などのインフラ構造に依存せずに自律的にネットワークを構築することが可能である。このネットワークにおいて、どの無線ノードを中継して通信が行われるかは経路制御プロトコル [2] によって決められる。無線マルチホップネットワークの代表的な例としてアドホックネットワーク [3] やセンサネットワーク [4] がある。

本研究では、無線マルチホップネットワークでのパケット通信におけるパケット誤り率特性の改善について考える。無線マルチホップネットワークではマルチパスルーチング [5], [6] を用いることで送信元ノードと宛先ノードの間に複数の経路を設定することが可能である。この特徴を利用して、我々は送信元ノードにおいてパケットを複製し、これを複数の経路を用いて伝送し、宛先ノードにおいてこれら複数のパケットをダイバシチ合成することでパケット誤り率の向上を図る方式を提案した [7]。しかし、この方式では複数経路に複製した同一のパケットを送っているため、複数経路に対して繰り返し符号化していることになる。

そこで、本研究では複数経路に対して複製された同じパケットを送るのではなく、符号化された異なるパケットを送信する手法を提案する。それにより、経路方向に対する符号化利得を得ることができ、特性向上が期待できる。提案手法ではマルチパスルーチングにより  $N$  個の経路が独立に確保されているものとする。送信されるパケットはターボ符号化し、スクランブル器で  $N$  個のサブパケットに分ける。それらのサブパケットは送信元宛先ノード間を  $N$  個の経路を用いて伝送される。宛先ノードでは受信されたパケットを SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) 復号 [8] する。これにより符号化利得とダイバシチ利得の両方が期待できる。提案手法の特性評価の指標としてパケット誤り率を用いる。また、無線マルチホップネットワークではネットワークトポロジの変化による無線リンクの切断や受信機でのパケット検出失敗などによる経路消失が考えられる。これは複数経路に対して複製パケットを送信する方式ではさほど問題にはならないが、本研究で提案する方式では各経路には符号化された情報の一部分が送られるため、損失による影響は大きくなると考えられる。そこで、この経路損失に対する影響についても検討する。

## 2. 無線マルチホップネットワークモデル

本研究で想定している無線マルチホップネットワークのネットワークモデルを図 1 に示す。ネットワークは直接通信可能な無線ノード間の無線リンクを中継することにより構成される。パケットはこのネットワークを介して送信元ノードから宛先ノードへと伝送される。その間に用いられる中継ノードは再生中継を行うものとし、復調して硬判定した後、変調して次の中継ノードに伝送されるものとする。そのため、誤り検出や誤り訂正復号は行われない。これにより中継ノードの負荷を軽減することができる。

ここでパケットが伝送される経路はマルチパスルーチングを

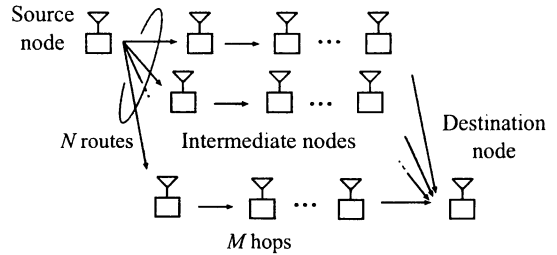


図 1 ネットワークモデル  
Fig. 1 Network model.

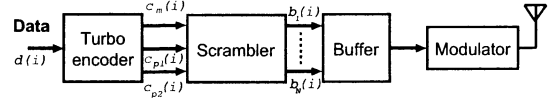


図 2 送信機  
Fig. 2 Transmitter structure.

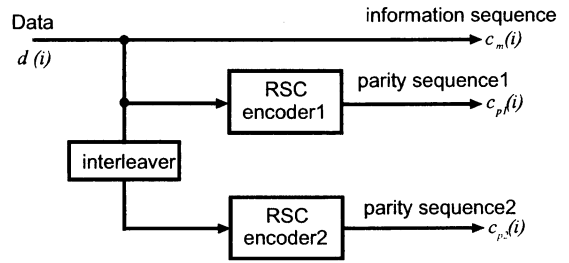


図 3 ターボ符号器  
Fig. 3 Turbo encoder.

用いることにより  $N$  個の経路が設定されているものとする。また、本研究では簡単化のために各経路のホップ数  $M$  は全て等しいものとする。設定された各経路は独立なものとし、任意の経路間に無線リンクや中継ノードの共有はないものとする。

## 3. 提案システム

### 3.1 送信機

送信元ノードにおける送信機の構成を図 2 に示す。送信機はターボ符号器、スクランブル器、バッファ、変調器で構成される。送信されるデータ系列  $d(i)$  は図 3 に示される二つの RSC (Recursive Systematic Convolutional) 符号器を持つ符号化率  $1/3$  のターボ符号器で符号化され、符号化されたデータ系列は組織符号の情報系列  $c_m(i)$ 、パリティ系列  $c_{p1}(i)$ 、 $c_{p2}(i)$  の 3 つの系列に分けられる。それらの系列はスクランブル器に入力され、ビット列がスクランブルされた  $N$  個のサブパケット  $b_n(i)$  が出力される。ここで、データ系列の長さを  $L$  bits とすると、サブパケット長は  $\frac{3-L}{N}$  bits となる。各サブパケット  $b_n(i)$  はそれぞれ変調され、全部で  $N$  個のうちの  $n$  番目の経路を用いて送信される。

### 3.2 受信機

宛先ノードにおける受信機の構成を図 4 に示す。受信機は復

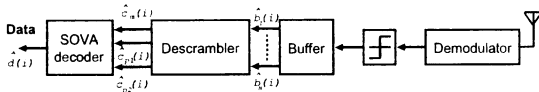


図4 受信機

Fig. 4 Receiver structure.

調器, スレッシュولد判定器, バッファ, デスクランブル器, SOVA 復号器で構成される。受信された  $n$  番目の経路からのサブパケットは復調器, スレッシュولد判定器によって  $\hat{b}_n(i)$  に復調, 硬判定された後, 一旦バッファに保存される。  $N$  個の全てのサブパケットを受信した後, バッファに保存されているサブパケットはデスクランブル器に入力される。デスクランブル器は入力された  $N$  個のサブパケット  $\hat{b}_n(i)$  のスクランブルを元に戻し, 組織符号の3つの系列  $\hat{c}_m(i)$ ,  $\hat{c}_{p1}(i)$ ,  $\hat{c}_{p2}(i)$  を出力する。それらの系列をSOVA復号器で復号し, 受信データ系列  $\hat{d}(i)$  を決定する。

#### 4. 特性評価

本節ではパケット誤り率を用いて提案手法の性能を評価する。ここで用いているパケット誤り率とは受信局で復号して得られたデータ系列  $\hat{d}(i)$  が誤る確率である。

##### 4.1 シミュレーション条件

提案手法の特性をシミュレーションを用いてパケット誤り率によって評価する。本研究のシミュレーション諸元を表1に示す。本研究で用いたターボ符号の符号化率は  $1/3$  とし, 要素符号器である2つのRSC符号器のメモリ数は4で生成多項式は  $37_8$  と  $21_8$  とする。ターボ符号の復号には前述の通りSOVAを用い, 復号繰り返し数は5回とする。送信するデータ系列長  $L$  は1000bitsとし, スクランブル器により  $N$  個のサブパケットに分割される。ここで, スクランブルアルゴリズムは送信経路数  $N = 3$  の時,

$$b_1(i) = [c_m(1), c_{p2}(2), c_{p1}(3), c_m(4), \dots]$$

$$b_2(i) = [c_{p1}(1), c_m(2), c_{p2}(3), c_{p1}(4), \dots]$$

$$b_3(i) = [c_{p2}(1), c_{p1}(2), c_m(3), c_{p2}(4), \dots]$$

とする。このスクランブルにより各サブパケットは等しい数のメッセージ系列  $c_m(i)$ , パリティ系列  $c_{p1}(i)$ ,  $c_{p2}(i)$  を保持することができる。  $N = 6$  の時も同様にスクランブルする。また, 通信距離であるホップ数は  $M = 2$ , 送信経路数  $N$  は1, 3, 6である。

パケットを伝送する無線リンクはレイリーフェージング環境であると仮定する。本研究では, スローフェージングとファーストフェージングという2種類のフェージングを仮定して提案手法の特性を評価する。ファーストフェージングは電波の受信電力の変動周期が短く, 各ビット毎に独立にフェージングの影響を受ける。スローフェージングは電波の受信電力の変動周期が長く, 1サブパケットの間, 受信電力が一定であるフェージングとする。

1. 節で述べた通り, 無線マルチホップネットワークではネッ

表1 シミュレーション諸元

Table 1 System and simulation parameters.

データ長 $L$	1000 bits
変調方式	BPSK
符号化器	ターボ符号
符号化率	$1/3$
拘束長	5
復号器	SOVA, 5 回反復
通信距離 $M$	2hops
送信経路数 $N$	1, 3, 6

トワークトポロジの変化などにより送信されたサブパケットが宛先ノードまで届かないことが考えられる。また, タイムアウトやパケット検出失敗等が発生した場合においても宛先ノードではサブパケットが受信できない。このような場合, 経路消失が発生する。本研究では, 経路消失が発生した時, このパケットの受信値は0とした。

##### 4.2 数値例

図5, 6にファーストレイリーフェージング環境下の  $E_b/N_0$  に対するパケット誤り率を示す。ここで  $E_b$  はビット当たりのエネルギー,  $N_0/2$  は両側電力スペクトル密度である。図5に3経路で送信した時のパケット誤り率を示す。この図には, 経路が消失しない場合と1経路が消失した場合の特性が示してある。さらに, 図中のメッセージ系列消失とパリティ系列消失はそれぞれ図2の送信機においてスクランブル器を加えずに  $c_m(i)$ ,  $c_{p1}(i)$ ,  $c_{p2}(i)$  を1つのサブパケットとして送信した場合に各サブパケットが消失した特性である。また比較のため, 1経路で符号化せずに送信したものも示す。符号化せずに1経路で送信したものと比較すると, 3経路で送信し, 1経路も消失しないものはパケット誤り率特性を大幅に改善することができるがわかる。1経路が消失した場合に着目すると, メッセージ系列  $c_m(i)$  の経路が消失したときは  $E_b/N_0$  が大きくても宛先ノードではほとんど正しく受信できない。さらには符号化せずに送信した特性よりも悪くなってしまっている。パリティ系列  $c_p(i)$  の経路が消失した場合は, メッセージ系列が消失したものと比較すると, パケット誤り率特性をかなり改善させることができる。さらにスクランブル器を用いた場合は, 1経路も消失しない特性により近付くことができる。この理由として, 符号化系列をスクランブルすることにより1経路が消失した場合でもメッセージ系列  $c_m(i)$ , パリティ系列  $c_{p1}(i)$ ,  $c_{p2}(i)$  がバランス良く消失している。そのため, ターボ符号の特徴である繰り返し復号の効果をより発揮できるからであると考えられる。

図6に経路数を3, 6と変えた場合の特性を示す。全ての経路が消失せずに宛先ノードに到着した場合の3経路と6経路で送信した場合を比較するとパケット誤り率特性はほぼ同じである。これはファーストレイリーフェージング下ではビット毎にフェージングの影響を受けるのでパケット誤り率が送信経路数には依存しないことを意味する。また, 3経路で送信し1経路消失した場合と6経路で送信し2経路が消失した場合もほぼ同じである。これは送信データ系列の消失率が等しいため, 1経

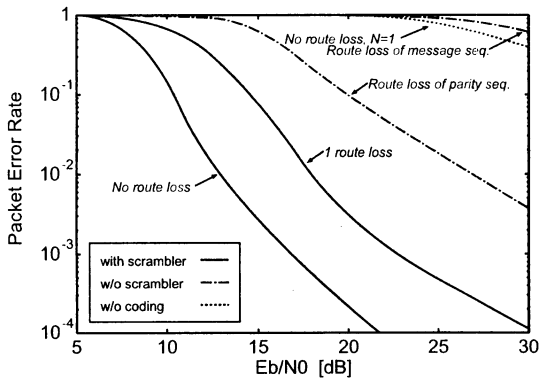


図5 経路数  $N = 3$  のときのパケット誤り率  
(ファーストレイリーフェージング)  
Fig. 5 Packet error rate versus  $E_b/N_0$  for  $N = 3$   
(fast Rayleigh fading).

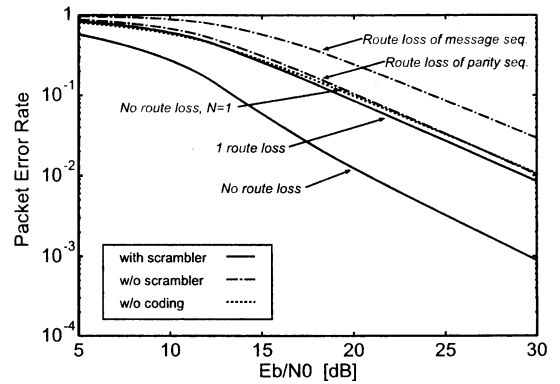


図7 経路数  $N = 3$  のときのパケット誤り率  
(スローレイリーフェージング)  
Fig. 7 Packet error rate versus  $E_b/N_0$  for  $N = 3$   
(slow Rayleigh fading).

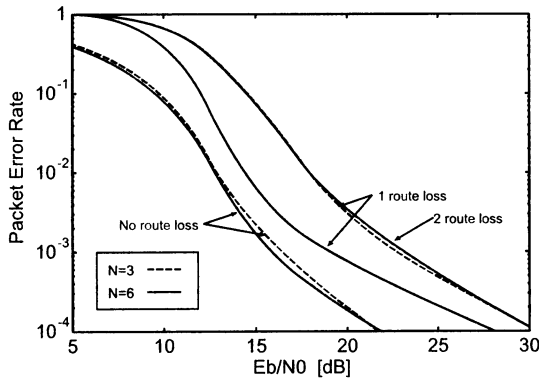


図6 経路数を変えたときのパケット誤り率  
(ファーストレイリーフェージング)  
Fig. 6 Packet error rate versus  $E_b/N_0$  as a parameter of the number of routes (fast Rayleigh fading).

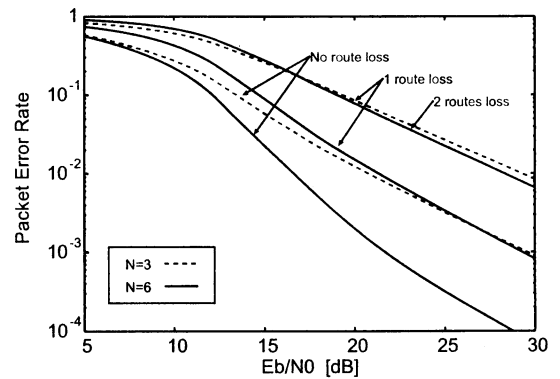


図8 経路数を変えたときのパケット誤り率  
(スローレイリーフェージング)  
Fig. 8 Packet error rate versus  $E_b/N_0$  as a parameter of the number of routes (slow Rayleigh fading).

路も消失しない場合と同様に特性が等しくなることを意味する。1 経路消失した場合は送信経路数  $N = 3$  の時よりも  $N = 6$  の時の方が、特性がよいことが見て取れる。これは送信経路数が増加することにより同じ 1 経路の消失でも消失するパケットのビット数を少なくできることから明らかである。

図 7, 8 にスローレイリーフェージング環境下の  $E_b/N_0$  に対するパケット誤り率を示す。

図 7 では 3 経路で送信した時のパケット誤り率を示してある。この図ではファーストレイリーフェージング下でのときと同様に 1 経路消失したものとスクランブル器を加えないときにメッセージ系列  $c_m(i)$  またはパリティ系列  $c_p(i)$  が消失したのもも示してある。この図よりメッセージ系列  $c_m(i)$  の経路が消失した時、符号化せずに送信したのものよりも大幅に特性が劣っている。また、パリティ系列  $c_p(i)$  がの経路が消失した場合、符号化せずに送信した場合、さらにスクランブル器を用いて 3 経路で送信したものが 1 経路消失した場合の 3 つはほぼ同

じ程度のパケット誤り率特性であることが見て取れる。これより、複数経路を用いることにより経路消失の影響を提案手法により補完できるものその影響は大きいことが分かる。また、スクランブルによる効果も小さいことが分かる。

図 8 に経路数を変えた場合のパケット誤り率特性を示す。1 経路も消失しないものの特性と比較すると、6 経路で送信したときの方が 3 経路で送信したときより特性がよいことが見て取れる。これは送信経路数が増えることによるダイバシチ効果が大きいためであると推測できる。また、3 経路で送信して 1 経路が消失する場合と 6 経路で送信して 2 経路が消失する場合ではパケット誤り率特性がほぼ同じになっている。これは経路損失率が同じであるためであると考えられる。また、3 経路で送信し 1 経路も消失しない場合と 6 経路で送信し 1 経路消失する場合と比較するとパケット誤り率がほぼ同じになっている。

## 5. むすび

本研究では無線マルチホップネットワークにおいて複数経路

を用いて符号化された異なるパケットを送信することによる誤り訂正手法を提案した。無線マルチホップネットワークではネットワークポロジの変化等により経路が消失することも考えられる。提案方式は各経路に符号化された情報の一部分が送信されるため消失による影響が大きくなると考えられるため、経路が消失した際のパケット損失に対する影響も評価した。

符号化されたパケットを複数経路を用いて送信することにより、符号化せずに1経路で送信したものよりもパケット誤り率特性を大幅に改善できた。ファーストレイリーフェージング環境において経路が消失したとき、スクランブル器を用い、複数経路に送信することによってパケット誤り率を改善することができた。スローレイリーフェージング環境において経路消失が発生しないとき、送信経路数  $N$  を3から6に増やすことで特性が向上することを確認した。またこの環境においては経路消失による影響が大きくなるものの送信経路数が3で1経路消失した場合は符号化しない場合とほぼ同じ特性になった。

**謝辞** 本研究の一部は、「通信・放送機構の創造的情報通信技術開発推進制度の公募課題」、「文部科学省21世紀COEプログラム」および「総務省戦略的情報通信開発推進制度の公募課題」の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

#### 文 献

- [1] M. Frodigh, S. Parkvall, C. Roobol, P. Johansson and P. Larsson, "Future-generation wireless networks," *IEEE Pers. Commun.*, vol.8, no.5, pp. 10-17, Oct. 2001.
- [2] X. Hong, K. Xu, and M. Gerla, "Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks," *IEEE Network*, vol.16, no.4, pp.11-21, July/Aug. 2002.
- [3] P. Mohapatra, J. Li, and C. Gui, "QoS in mobile ad hoc networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol.10, no.3, pp.44-52, June. 2003.
- [4] L.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.40, no.8, pp.102-114, Aug. 2002.
- [5] A. Tsirigos and Z.J. Haas, "Multipath routing in the presence of frequent topological changes," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 132-138, Nov. 2001.
- [6] I. Cidon, R. Rom and Y. Shavitt, "Analysis of multi-path routing," *IEEE Network*, vol.7, no.6, pp. 885-896, Dec. 1999.
- [7] 中川信之, 鯉江尚央, 岡田啓, 山里敬也, 片山正昭, "マルチホップ無線ネットワークにおける複数経路を利用した誤り訂正手法," 2003年信学ソ大(通信), no.B-5-119, pp.496, Sept. 2003.
- [8] J. Hagenauer and P. Hoehner, "A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its application," in *Proc. of IEEE GLOBECOM89*, pp.1680-1686, Nov. 1989.