

無線マルチホップネットワークにおける複数経路符号化のための経路の特性推定

岡田 啓<sup>†a)</sup> (正員) 馬越 元晶<sup>††\*</sup>  
 山里 敬也<sup>†††</sup> (正員) 片山 正昭<sup>†††</sup> (正員)

Route Characteristic Estimation for Multi-Route Coding in Wireless Multihop Networks

Hiraku OKADA<sup>†a)</sup>, Member,  
 Motoaki UMAKOSHI<sup>††\*</sup>, Nonmember,  
 Takaya YAMAZATO<sup>†††</sup>, and  
 Masaaki KATAYAMA<sup>†††</sup>, Members

<sup>†</sup> 新潟大学超域研究機構, 新潟市  
 Center for Transdisciplinary Research, Niigata University,  
 Niigata-shi, 950-2181 Japan.

<sup>††</sup> 名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市  
 Department of Electrical Engineering and Computer Science,  
 Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-  
 8603 Japan

<sup>†††</sup> 名古屋大学エコトピア科学研究所, 名古屋市  
 EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho,  
 Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

\* 現在, (株) デンソー

a) E-mail: hiraku@m.ieice.org

あらまし 複数経路符号化では, 符号化, 分割されたパケットを複数の経路で伝送することで経路ダイバーシチによる特性向上を得ることができる。この手法では各経路の特性に応じて重み付け復号することが重要であり, このために必要な各経路の特性を推定する手法を提案する。

キーワード 無線マルチホップネットワーク, 複数経路符号化, 経路の特性推定

1. まえがき

無線マルチホップネットワークでは, 送信元ノードからあて先ノードまで中継ノードを経由してパケットが伝送される。このとき, 中継ノードの選択方法により, 柔軟な経路構築が可能である。更に, この柔軟性により送信元-あて先ノード間に複数の経路を構築することもできる [1]。これら複数の経路は予備経路, 負荷分散等, 様々な目的に利用されている。

無線通信路でのパケット誤りを減らすため, 筆者らは複数経路符号化を提案している [2], [3]。本手法において, 送信元ノードはパケットを符号化, 分割して複数のサブパケットを作成し, これらを複数の経路に対して送出する。これらのサブパケットはそれぞれ独立な経路で伝送され, あて先ノードまで届けられる。あて先ノードでは, 受信したサブパケットを合成, 復号することで, 経路ダイバーシチによる特性改善を図ることができる。

この手法では, 各サブパケットはそれぞれ異なった経路によって伝送される。一般に, 各経路における無線リンク全体の通信路状態 (経路の特性) は異なっており, 伝送されるサブパケットも各々の経路の特性に応じて誤りが発生する。あて先ノードにて各経路の特性に応じて重みを付けて合成・復号することで, ダイバーシチ利得をより効果的に得ることができる [2], [3]。そこで, あて先ノードにおいて各経路の特性を推定する手法が重要となる。

本研究で想定している無線マルチホップネットワークでは, 中継ノードにおいて再生中継を行っている。このとき, 中継ノードでの受信信号はいったんバイナリーの値に判定される。そして, 判定されたバイナリー値は再変調され, 次ノードに送信される。このため, 中継ノードにおけるダイバーシチ合成時にしばしば用いられる受信信号強度などの情報を, あて先ノードの受信信号から推定することはできない。しかし, バイナリー (硬判定) 値に中継ノードでの判定誤りも含んだ経路全体の特性が反映されている。そこで, 各経路は一つの二元対象通信路としてみなし, 経路の特性は送信元ノードとあて先ノード間のビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) として特徴づけることができる [3]。

本論文では, あて先ノードにおいて各経路の特性 (BER) を推定する手法を提案する。提案手法では, ビタビ復号時のパスメトリックの値を用いて BER を推定する。一般に通信路の特性推定にはパイロットシンボルや冗長ビットを付加することで行われるが [4], 本提案手法ではこれらを必要としない。推定誤差及び推定結果を用いて重み付け復号したときのパケット誤り率を評価することで, 提案手法の有効性を示す。

2. 複数経路符号化

本章では, 複数経路符号化 [2] を簡単に紹介する。

複数経路符号化のためのネットワークモデルを図 1 に示す。適切なルーチングプロトコル (例えば [5] 等) を用いることで, 送信元ノードからあて先ノードまで  $N$  本の独立な経路が構築されているものとする。

図 2 に送信元ノードの送信機構成を示す。本論文では経路の特性推定手法に注目するため, 複数経路符号化として単純な畳込み符号を用いている。パケットのデータ系列  $d(i) \in \{1, 0\}^L$  は符号化率  $1/N$  の畳込み符号で符号化される。ここで,  $L$  はパケット長である。符号語の各ビット  $b_n(i) \in \{1, 0\}$ , ( $1 \leq n \leq N$ ) は各サブパケットに分割され, バッファに蓄えられる。サブ

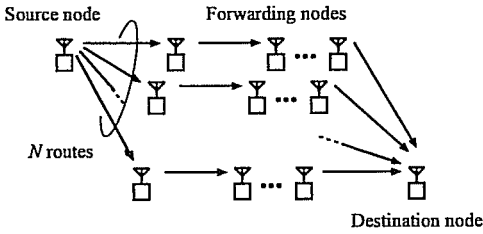


図1 ネットワークモデル  
Fig.1 Network model.

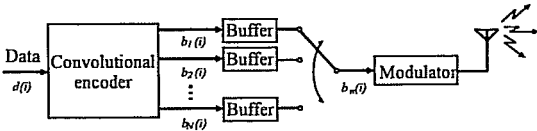


図2 送信元ノードの送信機構成  
Fig.2 Transmitter structure at source node.

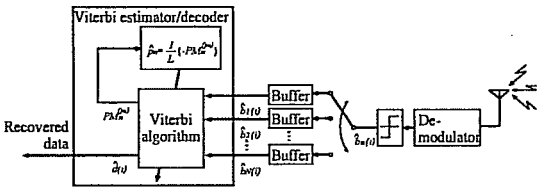


図3 あて先ノードの受信機構成  
Fig.3 Receiver structure at destination node.

パケットは変調された後、各経路に対して送信される。この操作はすべてのサブパケットが次の中継ノードに送信されるまで繰り返される。

中継ノードでは、再生中継が行われる。受信したサブパケットは復調、硬判定していったんバイナリー系列にする。そして、このバイナリー系列を再変調して次のノードに送信される。なお、中継ノードでは復調のみが行われ、誤り訂正復号は行われぬ。

図3にあて先ノードにおける受信機構成を示す。あて先ノードは各経路を経由して伝送された受信サブパケットを復調、硬判定してバイナリー系列  $\hat{b}_n(i)$  にし、バッファにいったん蓄える。この操作は  $N$  個のサブパケットを受信するまで繰り返される。復調された  $N$  個のサブパケットは一つのパケットに合成され、ビタビ推定/復号器において経路の特性推定及び誤り訂正復号が行われる。特性推定及び復号の詳細については次章にて述べる。

### 3. ビタビ推定/復号器

提案推定手法は  $N$  個のサブパケットのみを使って二元対称通信路とみなすことのできる各経路全体の

BERを推定しており、パイロット系列や冗長ビットといった付加的情報を必要としない。各経路のBER推定はビタビ復号におけるパスメトリックを使って行われる。そのため、ビタビ復号を2回実行する。1回目の復号で各経路のBERを推定し、2回目の復号で推定されたBERを用いて重み付け誤り訂正復号が行われる。

#### 3.1 1回目の復号：BER推定

ビタビ推定/復号器への入力は2.で述べたように、硬判定されたバイナリー系列  $\hat{b}_n(i)$  である。バイナリー入力ビタビ復号では、硬判定バイナリー系列に対する各符号語とのハミング距離がパスメトリックとして用いられる。ハミング距離は両者の異なるビットの数であり、符号語が正しく選択されているのなら、これは誤っているビットの数に相当することになる。

ここで、 $H_{in}^{(j)}$  をパス  $j$  における経路  $n$  で伝送された、 $i$  ビット目の硬判定バイナリー系列と符号語とのハミング距離、 $PM_n^{(j)}$  をパス  $j$  における経路  $n$  で伝送されたビット系列のパスメトリックとする。このとき、パス  $j$  のパスメトリックは、

$$PM^{(j)} = \sum_{n=1}^N PM_n^{(j)} = \sum_{n=1}^N \left\{ - \sum_{i=1}^L H_{in}^{(j)} \right\} \quad (1)$$

となる。このパスメトリックを用いて1回目の復号を行う。この結果、得られる最ゆうパスと硬判定バイナリー系列を比較することで、BERを推定する。提案手法では、ビタビ復号時に各経路ごとに算出されたパスメトリック  $PM_n^{(j_m)}$  を出力する。ここで、 $j_m$  は1回目復号後の最ゆうパスを示す。経路  $n$  のBERはその経路で伝送されたビットの最ゆうパスにおけるハミング距離の和をサブパケット長で割ることで推定できる。つまり、推定BERは、

$$\hat{p}_n = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L H_{in}^{(j_m)} = \frac{1}{L} \{-PM_n^{(j_m)}\} \quad (2)$$

となる。

#### 3.2 2回目の復号：推定BERを用いた誤り訂正

2回目の復号では、推定BERを用いて受信バイナリー系列  $\hat{b}_n(i)$  に対して重み付け復号による誤り訂正を行う [2]。

重み付け復号は二元対称通信路におけるパスメトリックの算出方法 [6] を修正することで行われる。これは、推定BER  $\hat{p}_n$  の対数ゆう度比を用いて、

$$\begin{aligned}
 PM^{(j)} &= \sum_{n=1}^N \left[ - \sum_{i=1}^L \left\{ H_{in}^{(j)} \ln \left( \frac{1 - \hat{p}_n}{\hat{p}_n} \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - N \ln(1 - \hat{p}_n) \right\} \right] \\
 &= \sum_{n=1}^N PM_n^{(j)} \ln \left( \frac{1 - \hat{p}_n}{\hat{p}_n} \right) + \alpha \quad (3)
 \end{aligned}$$

となる。なお、 $\alpha$  は定数である。

4. 数 値 例

経路数が2の場合において、各経路全体での実際のBERをそれぞれ  $p_1, p_2$  として与えて、提案手法の特性を評価する。パケット長  $L = 1000$  ビットとし、符号化率  $1/2$ 、拘束長7の畳込み符号を用いる。

推定誤差の評価指標として、推定BERと実際のBERとの平方平均二乗誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) を用いる。図4は経路2の実際のBERが  $10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$  であるときの、経路1の実際のBERに対するRMSEを示す。この図より、すべての場合において、経路1の実際のBERが悪くなるにつれてRMSEも大きくなるのが分かる。また、経路2の実際のBERが  $10^{-2}$  と  $10^{-3}$  の場合は同じRMSEを得ており、 $10^{-1}$  の場合のみ他の場合と比べてRMSEが大きくなっている。このことより、提案推定手法では各経路においてある程度の品質が保たれていれば、推定誤差が劣化しないといえる。

推定誤差の要因として、(i) 有限サブパケット長による性能限界、(ii) 1回目復号時の最ゆうパスの選択誤り、が考えられる。(i) であるが、提案手法では推定BERを式(2)のように推定した誤りビット数をサブパケット

長で割ることで求めており、たとえ誤りビット数を正しく得ることができたとしても、推定誤差はサブパケット長に依存して生じる。このときのRMSE (RMSEの下限と呼ぶ) は、経路  $n$  を経由して伝送されたサブパケットの誤りビット数を  $X_n$  とすると、これは2項分布に従うため、 $\sqrt{E[(\frac{X_n}{L} - p_n)^2]} = \sqrt{p_n(1 - p_n)/L}$  となる。なお、 $E[\cdot]$  は平均を示す。図4にはRMSEの下限も示しており、経路2の実際のBERが  $10^{-2}$  と  $10^{-3}$  の場合は下限とほぼ等しく、推定誤差の主な要因は有限サブパケット長による性能限界であるといえる。(ii) は、提案手法では1回目復号時は重み付けなしでの復号を行っており、このときの復号誤りによる影響である。後述する図5において、重み付けなしの場合の特性が1回目の復号誤りに相当する。経路2の実際のBERが  $10^{-1}$  の場合、1回目の復号特性が悪すぎるため、誤っているビットの数を正しく推定できず、推定誤差も大きくなっていると考えられる。ただし、1回目復号時に得られる最ゆうパスが誤ってはいるものの、各経路の誤りビット数がある程度反映したものになっており、推定誤差もさほど大きくなっていない。経路2の実際のBERが  $10^{-2}$  と  $10^{-3}$  の場合については、経路2の実際のBERが良いため、1回目復号時の特性も良く、推定誤差をほぼ劣化させないものと考えられる。

図5に提案手法のパケット誤り率特性を示す。比較のため、推定誤りがない理想的な推定の場合及び重み付けを行わなかった場合も示す。経路1と経路2の実際のBERが等しいとき、パケット誤り率は向上しない。これは、各経路の特性が等しくなり、重み付けによる効果を見込めないためである。この場合を除き、

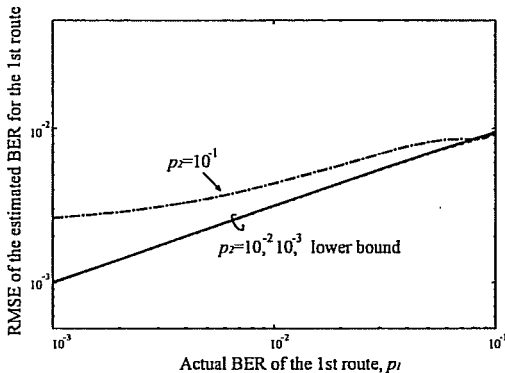


図4 推定BERの平方平均二乗誤差特性  
Fig. 4 RMSE of the estimated BER versus actual BER.

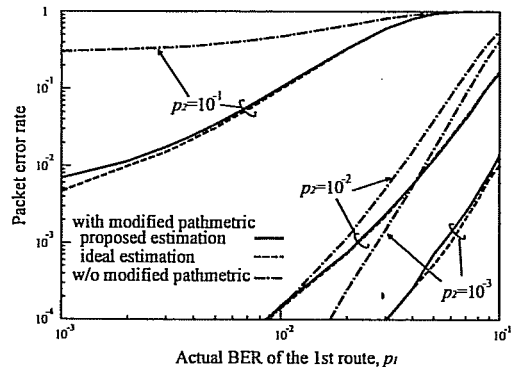


図5 パケット誤り率特性  
Fig. 5 Packet error rate versus actual BER.

重み付け復号を行うことで、特性が向上していることが分かる。また、提案推定手法を用いた場合の PACKET 誤り率は理想的な推定の場合とほぼ同じ特性を得ている。よって、提案手法は PACKET 誤り率を劣化させず、十分な推定精度があるといえる。

## 5. む す び

本論文において、無線マルチホップネットワークにおける複数経路符号化のための経路の特性推定手法を提案した。特性評価の結果、提案手法によって推定された BER を用いて重み付け復号することで、PACKET 誤り率を向上できるのを示した。また、提案手法は理想的な推定の場合と比べて PACKET 誤り率を劣化させることなく、十分な推定精度があることを示した。そのため、本提案手法は簡単な構成であるが、その効果は非常に大きいといえる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金の助成をうけて行われたものである。記して謝意を表する。

## 文 献

[1] A. Tsirigos and Z.J. Hass, "Multipath routing in

the presence of frequent topological changes," *IEEE Commun. Mag.*, vol.39, no.11, pp.132-138, Nov. 2001.

- [2] H. Okada, T. Wada, K. Ohuchi, M. Saito, T. Yamazato, and M. Katayama, "Performance evaluation of route coding scheme in wireless multi-hop networks," *IEEE 61st Semiannual Vehicular Technology Conference*, pp.3092-3096, 2005.
- [3] H. Okada, N. Nakagawa, T. Wada, T. Yamazato, and M. Katayama, "Multi-route coding in wireless multi-hop networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E89-B, no.5, pp.1620-1626, May 2006.
- [4] T. Wada, A. Jamalipour, H. Okada, K. Ohuchi, and M. Saito, "Effect of parity check bits in turbo coded multi-route multi-hop networks," *IEEE Global Communications Conference*, pp.3451-3455, 2005.
- [5] A. Nasipuri and S.R. Das, "On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks," *IEEE International Conference on Computer Communication and Networks*, pp.64-70, Oct. 1999.
- [6] A.J. Viterbi and J.K. Omura, *Principles of Digital Communication and Coding*, McGraw-Hill, 1979.

(平成 18 年 6 月 19 日受付, 8 月 15 日再受付)