

研究速報

無線マルチホップネットワークにおける複数経路 パケット合成法のための経路選択基準

平山 泰弘^{†*} (正員) 岡田 啓^{†**a)} (正員)
山里 敬也^{††} (正員) 片山 正昭^{††} (正員)

A Study on Route Selection Metrics for the Multiple-Route
Packet Combining Scheme in Wireless Multihop Networks

Yasuhiro HIRAYAMA^{†*}, Hiraku OKADA^{†**a)},
Takaya YAMAZATO^{††}, and Masaaki KATAYAMA^{††}, Members

[†] 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,
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-
cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 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

** 現在, 新潟大学超域研究機構

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

あらまし 複数経路パケット合成法はネットワーク上に設定された複数経路を利用する誤り制御, ダイバーシチ合成法である。本論文では, 経路選択基準として経路のビット誤り率, パケット到達確率並びにホップ数を用いた場合の複数経路パケット合成法の性能を比較する。

キーワード 複数経路パケット合成法, 無線マルチホップネットワーク, マルチパスルーチング, 経路選択

1. ま え が き

無線マルチホップネットワーク [1] は無線通信路の品質や伝送遅延時間が異なる複数の無線リンクで接続された無線ノードの集合から構成されるネットワークである。複数経路パケット合成法 [2] はこのような無線マルチホップネットワークにおいてパケット誤り率を低減する手法の一つである。この方法では, 送信元ノードで誤り訂正符号化されたパケットの複数の複製パケットが複数の独立な経路を通じてあて先ノードへ伝送される。あて先ノードでは, 許容される遅延時間が経過した時点で到達しているパケットがダイバーシチ合成された後復号される。複数の独立な経路を伝送された複製パケットが合成されることでダイバーシチ利得を得ることが可能となり, パケット誤りを減少させることができる。

複数経路パケット合成法の性能は複製パケットが伝送される経路の通信路品質とパケットが許容される遅延時間内にあて先ノードに到達する確率 (パケット到達確率) に依存する。そのため, より通信路品質が高

くパケット到達確率の高い経路を用いることでより高い性能を得ることができる。パケット伝送のための経路はマルチパスルーチングプロトコルによって構築される。マルチパスルーチングにおいて複数の経路を構築する過程は, 利用可能な経路の探索と各経路に関する統計値の収集が行われる経路探索と, 利用可能な経路の中からある選択基準に従って実際にパケットが伝送される経路が選択される経路選択の二つに分けられる。これらのうち, より通信路品質が高くパケット到達確率の高い経路を用いてパケット伝送を行うためには経路選択において適切な選択基準を用いることが重要となる。

既存のマルチパスルーチングプロトコル [3]~[5] では, ホップ数が経路選択基準として用いられている。しかしながら, 無線通信路におけるシャドーイング等による受信電力のばらつきにより, ホップ数が小さい経路が必ずしもビット誤り率が低い経路ではない。また, 各無線リンクの入力リンク数の違いによる伝送遅延時間のばらつきにより, ホップ数が小さい経路が必ずしもパケット到達確率が高い経路ではない。このように, 各リンクの無線通信路の品質や伝送遅延時間にばらつきが存在する場合, ホップ数は最適な経路選択基準ではない。シングルパスルーチングプロトコルにおいてはリンクの通信路品質や伝送遅延時間に着目した研究が存在する。例えば, 文献 [6] では経路上の各リンクの通信路品質から算出される実効的なホップ数を選択基準としている。また, 文献 [7] では, 各リンクのラウンドトリップタイムの移動平均値を選択基準としている。しかし, これらの経路選択基準は複数経路パケット合成法の性能に直接関係する統計値ではないという問題がある。

そこで本論文では, 経路の通信路品質並びにパケット到達確率を選択基準とした場合の複数経路パケット合成法の性能を評価する。経路の通信路品質に関する基準として, 本論文では経路全体を二元対称通信路ととらえた場合のビット誤り率の対数ゆー度比を用いる。これら二つの基準を用いた場合の性能をホップ数を基準として用いた場合の性能と比較する。

2. ネットワークモデル

複数の無線ノードの集合を考える。集合内の任意の二つの無線ノード間の平均受信信号電力対雑音電力比がある要求値 γ_{req} 以上である場合, それらのノードは無線リンクで接続され, パケットの伝送が可能であるとす。任意のノードへの他ノードからのパケット

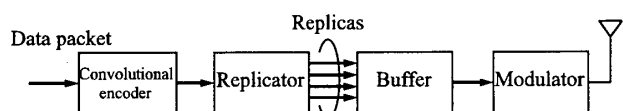


図1 送信機
Fig. 1 Transmitter structure.

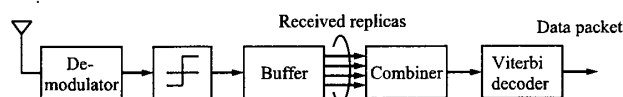


図2 受信機
Fig. 2 Receiver structure.

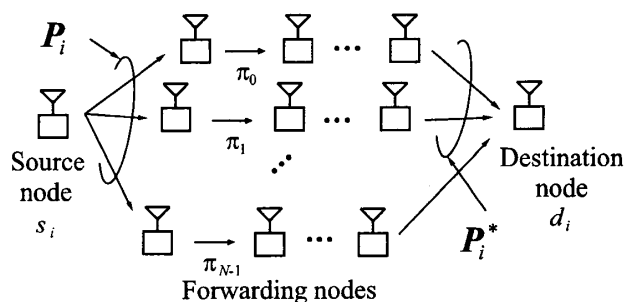


図3 ネットワークモデル
Fig. 3 Network model.

の送信はアクセス制御プロトコルによって制御される。ネットワーク内の各無線リンクは相互に独立な無線通信路であり、伝搬損、リンクごとに独立な対数正規シャドーイング並びにパケットごとに独立なレイリーフェージングが存在すると仮定する。

3. 複数経路パケット合成法

複数経路パケット合成法について概説する。その詳細や性能評価は文献 [2], [8] で述べられている。

送信元ノードにおける送信機構成を図1に示す。送信元ノード内で発生したパケットは、畳込み符号化された後、複製されあらかじめ設定された複数の経路に送信される。中継ノードでは再生中継が行われる。ただし、受信されたパケットの送信要求が送信元ノードから発生してからの経過時間が許容遅延時間 T_{max} を超えていた場合、パケットは破棄される。あて先ノードにおける受信機構成を図2に示す。あて先ノードに受信された複製パケットは復調され、ビットごとに硬判定された後、復号が開始されるまでバッファに蓄えられる。パケットの復号は許容遅延時間経過後に開始される。復号開始時までには受信されバッファに蓄えられていたパケットの硬判定値は合成器に入力される。合成器では硬判定値がビットごとに平均されることで各ビットに対応したゆがみ度が出力される。合成器の出力はビタビ復号器に入力され、復号が行われる。

4. 経路選択

本論文では、経路が設定されるまでに必要な処理の中で経路選択にのみ着目する。そのため、経路探索は終了しており、ある送信元ノード s_i とそれに対応するあて先ノード d_i の間で利用可能なノードの共有がない経路の集合 P_i は送信元ノードで既知である状況を考える(図3)。そのために、経路の集合 P_i はあらかじめ経路探索プロトコルによって探索されているものと仮定する。この集合の中から実際にパケットの送信

に用いる経路の集合 $P_i^* \subseteq P_i$ を選択することを考える。送信元ノードは利用可能な経路の集合 P_i の各要素 $\pi_n \in P_i$ に対して、基準値 \mathcal{M}_n を算出する。次に、得られた \mathcal{M}_n の値が大きい経路、または小さい経路から順に最大経路数 N_{max} を超えない数だけ経路を選択する。経路の選択基準として以下に述べる二つの基準を提案する。

4.1 経路選択基準

(a) 経路のビット誤り率の対数ゆがみ度比

あるパケットがある経路を伝送される際、経路上の各ノードでは硬判定が行われる。その場合、その経路全体を一つの二元対称通信路とみなすことができる。ここで、経路のビット誤り率をその経路の一端に存在する送信元ノードから送信されたある複製パケットが他端に存在するあて先ノードに受信された後に、パケット内のビットが誤って判定される確率と定義する。すると、ある経路 π_n が M_n ホップの無線リンクで構成される場合、その経路のビット誤り率 BER_n は各無線リンクのビット誤り率 $BER_{n,m}$ を用いて

$$BER_n = 1 - \prod_{m=0}^{M_n-1} (1 - BER_{n,m}) \quad (1)$$

となる。無線リンクにおいてレイリーフェージングの存在を仮定すると、 $BER_{n,m}$ は以下のように表される。

$$BER_{n,m} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{SNR_{n,m}}{2 + SNR_{n,m}}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\overline{SNR}_{n,m}$ は第 n 番目の経路の第 m 番目の無線リンクの平均受信信号電力対雑音電力比である。

経路のビット誤り率の対数ゆがみ度比を基準として用いた場合、基準値は $\mathcal{M}_n = \ln \frac{1 - BER_n}{BER_n}$ となる。経路のビット誤り率の対数ゆがみ度比はその経路の通信路品

質を示す指標である。ビット誤り率は、経路上の各無線ノードにおける平均受信信号電力対雑音電力比を観測することやビット誤りの数を直接数えることで推定することが可能である。選択された経路のビット誤り率の対数ゆう度比が大きいほど、復号後のパケット誤り率は減少する。そのため、送信元ノードは M_n の値が大きい順に経路を選択する。

(b) 経路のパケット到達確率

ある経路 π_n のパケット到達確率 $p_n(T_{max})$ は、その経路に送信されたパケットがある許容遅延時間 T_{max} 内にあて先ノードに受信される確率と定義される。これを基準として用いた場合、 $M_n = p_n(T_{max}) = \Pr\{\mathbf{w}_n < T_{max}\}$ となる。ここで、 \mathbf{w}_n は経路 π_n の伝送遅延時間である。この値は用いられる MAC プロトコルに依存する。本論文では、無線リンクのビット誤り率にかかわらず、平均受信信号電力対雑音電力比が γ_{req} 以上であればパケットの検出及び受信が可能であると仮定する。そのため、経路の伝送遅延時間は無線リンクのビット誤り率とは無関係な値となり、パケット到達確率は経路のビット誤り率には依存しない。選択された経路のパケット到達確率が大きいほど、合成複製パケット数が大きくなりパケット誤り率は減少する。そのため、送信元ノードは M_n の値が大きい順に経路を選択する。

5. 性能比較

経路選択基準として経路のビット誤り率の対数ゆう度比並びにパケット到達確率を用いた場合の複数経路パケット合成法の性能を評価する。ここでは、比較対象として各経路のホップ数を基準に経路を選択した場合の性能も示す。また、利用可能な各経路のビット誤り率並びにパケット到達確率は完全に推定可能であると仮定する。

計算機シミュレーションに用いたパラメータを表 1 に示す。ここで、 ρ は送信元ノードにおける平均パケット継続時間当りの送信要求数であり各経路のトラヒック密度に相当する。更に、平均パケット継続時間 \bar{T}_c は $\bar{T}_c = 1024/R$ と表される。ここで、 R は伝送レートである。また、ネットワーク内のすべてのノードのうち、半数が送信元ノードとして無作為に選択され、残りの半数が各送信元ノードに対応するあて先ノードとして無作為に選択されるものとする。これらの送信元ノードとあて先ノードの組が同時に通信を行っている状況を考える。要求平均受信信号電力対雑音電力比 γ_{req} は 10 dB とした。そのため、ノード間の平均受信

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

ノード配置範囲	200 m × 200 m
ノード数	80
ノード配置法	一様ランダム
シャドローイング標準偏差	7 dB
伝搬損	距離の 3.5 乗に比例
要求平均受信 SNR γ_{req}	10 dB
経路探索プロトコル	MDSR [3]
MAC プロトコル	1-Persistent CSMA
符号化率	1/2
拘束長	7
変調方式	BPSK
パケット送信要求発生過程	ポアソン過程 (平均 \bar{T}_c/ρ)
パケット長分布	指数分布 (平均 1024 ビット)
パケット継続時間分布	指数分布 (平均 \bar{T}_c)

表 2 シミュレーション条件
Table 2 Simulation scenarios.

	SNR_0 [dB]	T_{max} [$\times \bar{T}_c$]	ρ
条件 1	70	30	0.01
条件 2	70	30	0.07
条件 3	80	10	0.01

信号電力対雑音電力比の値が 10 dB 以上である無線リンクのみを対象に MDSR プロトコルを用いた経路探索が行われる。

性能評価指標として、ネットワーク内のすべての送信元-あて先ノードの組に対するあるパケット誤り率を達成できるノードの組の割合を用いる。ここで、パケット誤りとはあて先ノードにおいてパケットの復号後にパケット内のビットが 1 ビット以上誤っている場合 (パケット復号誤り) と、送信元ノードから送信されたあるパケットの複製パケットが許容遅延時間内に一つも受信できない場合 (パケット未到達) である。また、理想的なアクセス制御によりパケット衝突によるパケット誤りは発生しないと仮定する。各あて先ノードのパケット誤り率は、 10^4 個のパケットを復号した場合の値を異なる 10 通りのノード配置に対して求めた上で平均して算出した。

シミュレーション条件として、表 2 に示す 3 通りのパラメータの組合せを考える。ここで SNR_0 は送信信号電力対受信雑音電力比である。無線リンクの平均受信信号電力対雑音電力比と SNR_0 の関係は以下のように表される。

$$\overline{SNR}_{n,m} = SNR_0 - 10\alpha \log d_{n,m} + X_\sigma \quad (3)$$

ここで、 $d_{n,m}$ は第 n 番目の経路の第 m 番目のノードと第 $m+1$ 番目のノードの間のノード間距離であり、 X_σ は平均 0、標準偏差 7 dB のガウス確率変数であ

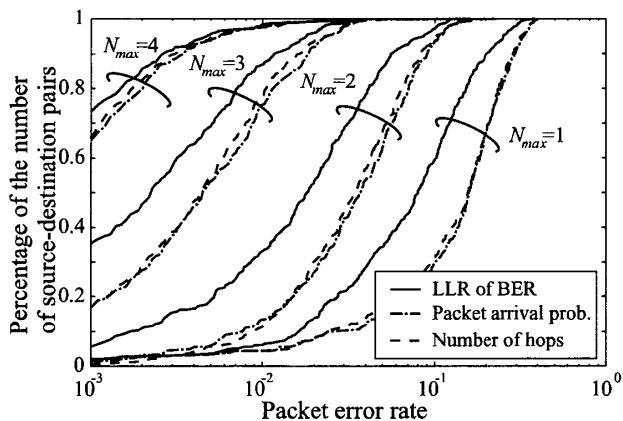


図 4 あるパケット誤り率を達成可能な送信元-あて先ノードの組の割合 (条件 1)

Fig. 4 Percentage of the number of source-destination pairs (scenario 1).

る。また、 $\alpha = 3.5$ である。

図 4 に条件 1 の場合の特性を示す。この図において、縦軸は対応するパケット誤り率を達成できる送信元ノードとあて先ノードの組の割合を示している。図より、ビット誤り率の対数ゆう度比を基準に経路が選択された場合が最も特性が優れていることが分かる。条件 1 はパケット未到達がほとんど発生しない状況である。この場合、経路のビット誤り率の対数ゆう度比を基準としビット誤り率の低い経路を優先的に選択することでパケット復号誤りが減少し特性が向上する。また、各経路のトラフィック密度が比較的小さいため、入力リンク数のばらつきによる各リンクのトラフィック密度のばらつきが小さくなる。そのため、各無線リンクの伝送遅延時間のばらつきもまた小さくなる。この場合、経路のパケット到達確率はその経路のホップ数に強く依存する。結果として、経路のパケット到達確率を基準とした場合とホップ数を基準とした場合の特性はほぼ等しくなる。

図 5 に条件 2 の場合の特性を示す。図より、 $N_{max} = 1, 2$ の場合はビット誤り率の対数ゆう度比を基準とした場合の特性が最も優れているが、 $N_{max} = 4$ の場合にはパケット到達確率を基準とした場合の特性が最も優れていることが分かる。条件 2 は、各経路のトラフィック密度が条件 1 に比べて増加している。そのため、最大経路数の増加に伴う各リンクの伝送遅延時間増加が顕著になる。この場合、経路のパケット到達確率を基準としパケット到達確率の高い経路を優先的に選択することで、合成される複製パケットの数が増加し特性が向上する。また、トラフィック密度が比較的大きい

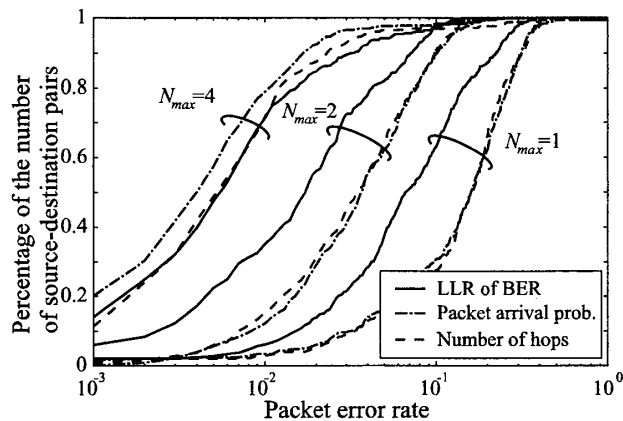


図 5 あるパケット誤り率を達成可能な送信元-あて先ノードの組の割合 (条件 2)

Fig. 5 Percentage of the number of source-destination pairs (scenario 2).

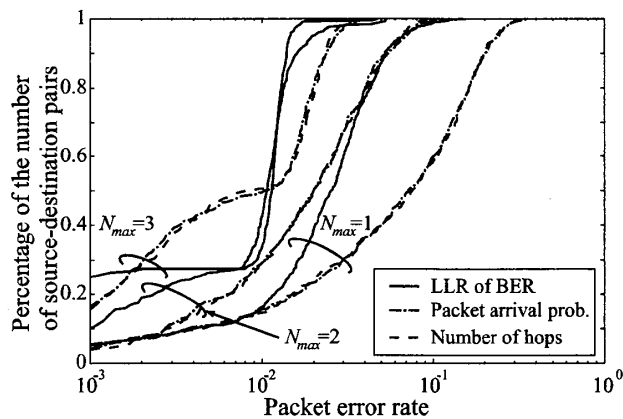


図 6 あるパケット誤り率を達成可能な送信元-あて先ノードの組の割合 (条件 3)

Fig. 6 Percentage of the number of source-destination pairs (scenario 3).

場合、最大経路数が大きくなることにより入力リンク数のばらつきが増加すると、各リンクの伝送遅延時間のばらつきが顕著になる。この場合、経路のパケット到達確率を基準とした場合とホップ数を基準とした場合の特性は等しくならない。逆に、最大経路数が比較的小さい場合には、入力リンク数のばらつきが小さいため、パケット到達確率を基準とした場合とホップ数を基準とした場合で特性はほぼ等しくなる。

図 6 に条件 3 の場合の特性を示す。図より、ビット誤り率の対数ゆう度比を基準とした場合の特性が特に $N_{max} = 2, 3$ の場合において他の条件とは大きく異なっていることが分かる。条件 3 の場合、条件 1 に比べて SNR_0 が大きくなり T_{max} が小さくなっている。そのため、ビット誤り率の対数ゆう度比を基準に経路が選択された場合、最大経路数の増加に伴いパケット

復号誤り率は低く抑えられ、相対的にパケット未到達の割合が大きくなる。この場合、パケット誤り率は各経路のパケット到達確率に支配される。更に、各経路のトラフィック密度に相当する ρ も比較的小さいため、図 4 の場合と同様の理由により各リンクの伝送遅延時間のばらつきも小さい。この場合、経路のパケット到達確率は、その経路のホップ数と許容遅延時間に依存する。そのため、パケット誤り率は設定された経路のホップ数にのみ依存することになる。実際、2本の2ホップ経路と1本の3ホップ経路が選択された場合並びに3本の2ホップ経路が選択された場合、無線リンクの選び方にかかわらず達成されるパケット誤り率は約 10^{-2} となる。そのため、図 6 においてパケット誤り率 10^{-2} 付近に急激な増加が現れている。また、条件 1 の場合と同様の理由によりパケット到達確率を基準とした場合とホップ数を基準とした場合で特性はほぼ等しくなる。

6. むすび

複数経路パケット合成法の性能はパケットが伝送される経路のビット誤り率並びにパケット到達確率に依存する。そこで、本論文では経路選択基準として各経路の対数ゆう度比並びにパケット到達確率を考え、それらを用いた場合の性能をホップ数を用いた場合の性能と比較した。その結果、各リンクの受信信号電力や伝送遅延時間にばらつきが存在する場合ホップ数は最適な経路選択基準ではないことを示した。また、各基準間の性能の関係は与えられる条件により大きく異なることを明らかにした。これらの結果から、与えられる条件の変化に対して常に最良の性能を得るためには、経路の通信路品質並びにパケット到達確率を統合した経路選択基準を導入することが必要であることが明らかになった。これは今後の検討課題である。

謝辞 本研究の一部は、「総務省戦略的情報通信開発

推進制度の公募課題」及び「文部科学省 21 世紀 COE プログラム」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] 平山泰弘, 中川信之, 岡田 啓, 山里敬也, 片山正昭, "無線マルチホップネットワーク上のリアルタイム通信における複数経路パケット合成法の性能解析," *信学論 (B)*, vol.J88-B, no.1, pp.269-279, Jan. 2005.
- [3] A. Nasipuri, R. Castañeda, and S.R. Das, "Performance of multipath routing for on-demand protocols in mobile ad hoc networks," *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications*, vol.6, no.4, pp.339-349, Aug. 2001.
- [4] S.J. Lee and M. Gerla, "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks," *Proc. 2001 IEEE International Conference on Communications*, vol.10, pp.3201-3205, June 2001.
- [5] M. Marina and S. Das, "On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks," *Proc. 2001 International Conference on Network Protocols*, pp.14-23, Nov. 2001.
- [6] X.-H. Lin, Y.-K. Kwok, and V.K.N. Lau, "A quantitative comparison of ad hoc routing protocols with and without channel adaptation," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol.4, no.2, pp.111-128, March/April 2005.
- [7] A. Adya, P. Bahl, J. Padhye, A. Wolman, and L. Zhou, "A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks," *Proc. 2004 IEEE International Conference on Broadband Networks*, pp.344-354, Oct. 2004.
- [8] 平山泰弘, 岡田 啓, 山里敬也, 片山正昭, "複数経路パケット合成法におけるパケット破棄の効果の解析," *2004 情報理論とその応用シンポジウム*, vol.1, pp.303-306, Dec. 2004.

(平成 17 年 12 月 9 日受付, 18 年 3 月 24 日再受付)