

即時転送を行うマルチホップ無線ネットワークの面的周波数利用効率

柴田 直剛[†] 山本 高至^{††,†a)} 村田 英一[†] 吉田 進[†]

Area Spectral Efficiency of Multi-Hop Radio Networks with Immediate Forwarding

Naotaka SHIBATA[†], Koji YAMAMOTO^{††,†a)}, Hidekazu MURATA[†],
and Susumu YOSHIDA[†]

あらまし 本論文では、エンドツーエンドスループットが経路内の瞬時伝送速度の最も低いリンクに制限される想定のもと、マルチホップ無線ネットワークの面的周波数利用効率が評価されている。これは、エンドツーエンドで許容される伝送遅延が小さいため各中継局が受信したデータを即座に次の受信局へ送信する状況に相当する。この想定のもとでは、マルチホップ経路内の1リンクでも瞬時受信電力がフェージングにより落ち込むとエンドツーエンドスループットが低下する。更に、マルチホップ経路においていずれかのリンクの瞬時受信電力が落ち込む確率は、ホップ数の増加に伴い増加する。したがって許容される伝送遅延が小さい場合、マルチホップ伝送導入による特性向上効果が著しく小さいと考えられる。このような想定のもと理論解析が行われ、マルチホップ経路及びマルチホップ無線ネットワークの周波数利用効率が導出されている。数値評価の結果、即時転送を行う場合にはフェージングによりマルチホップ経路の特性が低下するものの、マルチホップ伝送導入により平均受信電力が大きく増加する伝搬環境においては面的周波数利用効率の最大値が向上し得ると示されている。

キーワード マルチホップ無線ネットワーク、即時転送、面的周波数利用効率、フェージング

1. ま え が き

近年無線通信システムにおいて、発呼局からあて先局への情報を他局の中継により伝送するマルチホップ伝送の導入が検討されている[1]~[4]。シングルホップ伝送をマルチホップ伝送へ切り換えることで、所要の送信電力低減が見込める。またシングルホップ伝送を送信電力を変えずにマルチホップ伝送へ切り換えることで、リンク当りの伝送距離を短くして受信信号電力を増加することも期待されている。

マルチホップ伝送の様々な導入効果が確認されているが、特筆すべきは無線通信システムの面的周波数利用効率向上効果である[5],[6]。ここで、面的周波数利用効率の定義は単位面積・単位帯域当りのエンドツーエンドスループットである。マルチホップ伝送の導入により各受信局の受信信号電力が増加し、より密な同時通信が行われても各経路が所要の受信電力を満たす

ことができるため、面的周波数利用効率が向上する。近年周波数資源が不足しているため周波数の有効利用が重要視されており、マルチホップ伝送はこの点でも有効な技術である。

更に無線通信システムにおいては遅延が重要な要素である。ストリーミングビデオやオンラインゲームのような様々なアプリケーションに対して低遅延が求められる[7],[8]。マルチホップ伝送においても、各中継局が受信したデータを短い時間内に次の受信局へ送ることで低遅延通信が実現できる。しかし既存研究では、低遅延が要求される状況においてもマルチホップ伝送の導入が面的周波数利用効率を向上するかを確認するには不十分である。文献[5],[6]では、送信局は受信局における平均受信 CINR (carrier-to-interference plus noise ratio) の変化に追従して適応的に伝送速度を決定すると想定されている。更に各リンクの伝送距離が等しいためマルチホップ経路中の各リンクの平均伝送速度が常に等しいと想定されている。伝送速度はフェージングにより瞬時的に落ち込む場合があるが、フェージング変動に対して十分長い時間のデータ伝送を各リンクで行える状況であれば、各リンクの平均伝送速度に大きな差は生じない。したがって文献[5],[6]

[†] 京都大学大学院情報学研究所, 京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

^{††} 王立工科大学, スウェーデン
Royal Institute of Technology, Stockholm, 16440 Sweden

a) E-mail: contact-h20@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

は、エンドツーエンドで許容される伝送遅延が大きい状況を想定しているといえる。

しかし各リンクでのデータ伝送時間が短い場合、エンドツーエンドの伝送遅延は小さいが、各リンクでフェージングの影響を軽減できない。各中継局は前ホップから受信したデータのみを転送するため、マルチホップ経路内では各リンクの平均スループットに大きな差が生じる。このためボトルネックとなるリンクが生じ、エンドツーエンドスループットが伝送速度の最も低いリンクに制限される場合[9]、マルチホップ伝送の特性は低下すると考えられる。またマルチホップ経路におけるいずれかのリンクの瞬時受信電力が落ち込む確率は、ホップ数の増加に伴い増加する。したがって各中継局が受信したデータを比較的短い時間内に次ホップへ送信する状況においては、マルチホップ伝送導入による特性向上効果が小さい可能性がある。

そこで本論文では、各中継局が短い時間内に次ホップへデータを転送することで伝送遅延を短縮する場合においても、マルチホップ伝送の導入が各通信や無線通信システムの特性を向上可能か検討する。基本的なアイデアは、文献[5]の距離減衰のみ想定した評価に加えて、レイリーフェージングがマルチホップ経路に与える影響を評価することである。評価の際には、各中継局が即座に次の受信局へデータを転送する状況を検討するため、エンドツーエンドスループットが伝送速度の瞬時値の最も低いリンクに制限されると想定する。今回は基礎的検討として、ダイバーシチ効果によるマルチホップ経路の特性改善については議論しない。

2. ではシステムモデルを示す。3. と 4. では孤立した一つのマルチホップ経路に着目し、雑音制限下での平均周波数利用効率及びアウテージ周波数利用効率をそれぞれ導出する。これらの式を用いて 5. では、干渉制限下での無線通信システムの周波数利用効率を評価する。

2. システムモデル

伝搬路特性として、距離の α 乗に反比例する伝搬損距離変動、及び瞬時フェージングとしてレイリーフェージングを想定する。ただし、 α は距離減衰係数を表す。各無線局のアンテナは無指向性アンテナとし、送信電力はすべて等しいとする。干渉信号は帯域全体に広がる加法的ガウス雑音に等価とする（この仮定に関する議論は文献[10]を参照）。各リンクの瞬時受信電力はフェージングにより変動し、送信局は受信局に

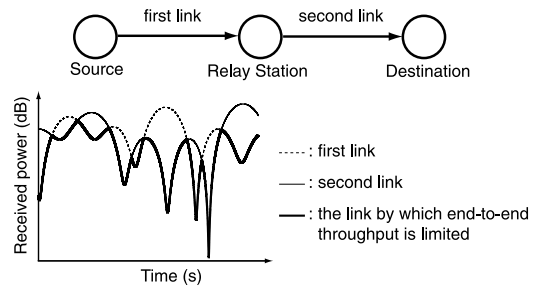


図 1 エンドツーエンドスループットを制限するリンク

Fig. 1 Link by which end-to-end throughput is limited.

おける瞬時受信 CINR の変化に追従して適応的に伝送速度を決定すると想定する。本論文の目的は、フェージングによる瞬時受信電力の落ち込みがマルチホップ伝送の特性に与える影響の評価である。このため、中継局は発呼-あて先局間の線分を等分する点での存在を仮定し、各リンクの平均受信電力は等しいとする。同様の仮定は文献[11]などでなされている。シングルホップ伝送時には、IEEE802.11n 規格への導入が検討されているチャネル結合[12]のような技術により、1 リンクでシステム内の全帯域を使用可能と想定する。 n ホップ伝送時には、時分割、周波数分割、直交符号分割などの直交分割[13]によりシステム内の全帯域を n 分割して各リンクに等しく割り当てると想定し、マルチホップ経路内でのチャネル再利用は考慮しない。

マルチホップ経路内の中継局は、前ホップから受信したデータを復調後、即座に次ホップへ転送すると想定する。このときエンドツーエンドスループットが、伝送速度の瞬時値の最も低いリンクに制限されると想定する。例として、中継局が発呼-あて先局間の中点に存在する場合の 2 ホップ伝送を図 1 に示す。この図からも分かるように、この想定の下では 1 リンクでも瞬時受信電力が落ち込むとエンドツーエンドスループットが低下する。ダイバーシチ効果によりマルチホップ経路の特性改善は可能であるが、今回は基礎的検討として、この想定のもとでマルチホップ伝送の導入効果を評価する。

2.1 受信 CINR

n ホップ伝送時の受信 CINR を考える。送信信号を x とするとき受信信号 y は、

$$y = \sqrt{E_n} h_{n,k} x + n_{n,k} \quad (1)$$

となる。ただし、 E_n は n ホップ伝送時のリンク当り

の平均受信信号電力, $h_{n,k}$ は n ホップ伝送の k 番目のリンクにおける平均電力 1 の複素チャネル利得である. $n_{n,k}$ は n ホップ伝送の k 番目のあて先局における雑音及び加法的ガウス雑音として扱われる干渉であり, 平均雑音及び干渉信号電力の和が $I_{n,k}$ である場合, $n_{n,k} \sim \mathcal{CN}(0, I_{n,k})$ である. ここで $\mathcal{CN}$ は複素正規分布を表し, $n_{n,k} \sim \mathcal{CN}(0, I_{n,k})$ は $n_{n,k}$ の実部, 虚部がそれぞれ独立な正規分布 $\mathcal{N}(0, I_{n,k}/2)$ に従うことを表す. このとき, 各リンクの平均受信 CINR は $E_n/I_{n,k}$, 瞬時受信 CINR は $E_n|h_{n,k}|^2/I_{n,k}$ である.

3. 平均帯域利用率

本章では, マルチホップ経路の特性として帯域利用率の平均値を評価する. 帯域利用率の定義は, 単位帯域当たりのエンドツーエンドスループットとする. この結果を距離減衰のみ考慮する場合の平均帯域利用率と比較し, フェージングがマルチホップ経路の特性に与える影響を評価する.

3.1 雑音制限

本章では, シングルホップ伝送をマルチホップ伝送へ切り換えた際の効果を検討するため, 他無線局からの干渉が存在しない孤立した発呼-あて先局組を想定する. シングルホップ伝送をマルチホップ伝送へ切り換えた例を図 2 に示す. この想定のもとでは, これまで扱ってきた受信 CINR が受信 CNR (carrier-to-noise ratio) に置き換えられる. 以下, シングルホップ伝送時の受信 CNR をエンドツーエンド CNR (ECNR) [5] と呼び, これをパラメータとして用いる. 本論文のように単純なシステムモデルでは送信電力や伝送距離などの絶対値は特に意味をもたず, それらにより決定される受信 CNR が重要となるため, ECNR がパラメータとして適切と考えられる.

中継局が発呼-あて先局間の線分を等分する点に存在すると想定するため, n ホップ伝送導入により各リンクの伝送距離は $1/n$ に減少する. また帯域当りの送信電力が等しいとすると, 送信電力対雑音電力比がシングルホップ伝送時と変わらない. したがって, 2.1 と同様に平均 ECNR を $E_1/I_{1,1} = \bar{\gamma}$ と表すと, n ホップ伝送時の各リンクの平均受信 CNR は $E_n/I_{n,k} = n^\alpha \bar{\gamma}$, 瞬時受信 CNR は $n^\alpha \bar{\gamma}|h_{n,k}|^2$ と表される.

3.2 評価式

伝送速度は, 受信局における瞬時受信 CNR の変化に追従して適応的に決定されると想定する. 本論文では受信 CNR に応じた伝送速度の例として, 受信

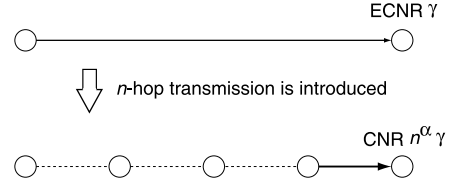


図 2 マルチホップ伝送 ($n = 4$)
Fig. 2 Multi-hop transmission ($n = 4$).

CNR が QPSK の所要 CNR γ_{QPSK} より高い場合に適応変調による M 値 QAM ($4 \leq M \leq 64$) 伝送が使用され, 受信 CNR が γ_{QPSK} より低い場合にシンボルレート制御による $1/K$ ($1 \leq K < 4$) QPSK シンボルレート伝送が使用されると想定する. このときシングルホップ伝送時の帯域利用率 $f(\gamma, p_b)$ は,

$$f(\gamma, p_b) = \begin{cases} 0 & \gamma < 3/4\beta \\ 2\beta\gamma/3 & 3/4\beta \leq \gamma < 3/\beta \\ \log_2(1 + \beta\gamma) & 3/\beta \leq \gamma \leq 63/\beta \\ 6 & 63/\beta < \gamma \end{cases} \quad (2)$$

と表される [14], [15]. ただし, γ は瞬時受信 CNR, p_b はエンドツーエンドの所要 BER (bit error rate), $\beta = -1.5/\ln(5p_b)$ である. 帯域利用率の平均値 $\overline{f(\bar{\gamma}, p_b)}$ は, レイリーフェージングを想定するため $|h_1|^2$ が指数分布に従い, 次式で与えられる.

$$\overline{f(\bar{\gamma}, p_b)} = \int_0^\infty e^{-t} f(\bar{\gamma}t, p_b) dt \quad (3)$$

次に, マルチホップ伝送時の平均帯域利用率を求める. n ホップ伝送時の平均帯域利用率 $\overline{f^{(n)}(\bar{\gamma}, p_b)}$ は, エンドツーエンドスループットが瞬時伝送速度の最も低いリンクに制限されるため, 次式で表される.

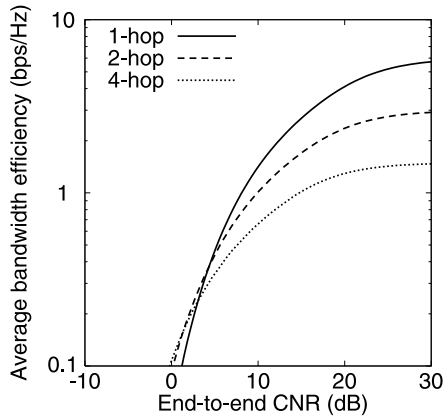
$$\overline{f^{(n)}(\bar{\gamma}, p_b)} = \frac{1}{n} \int_0^\infty \dots \int_0^\infty e^{-(t_1 + \dots + t_n)} \cdot \min_{1 \leq i \leq n} f(n^\alpha \bar{\gamma} t_i, p_b/n) dt_1 \dots dt_n \quad (4)$$

3.3 評価結果

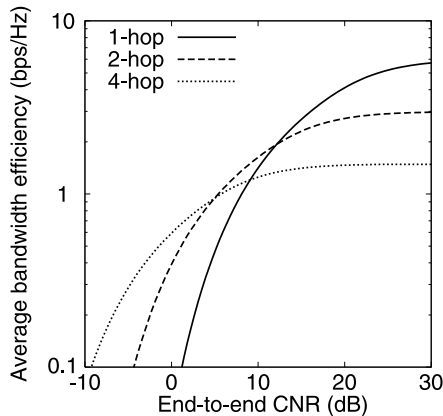
表 1 に示す諸元を用いて, 理論解析を行う. フェージング環境下における平均帯域利用率を図 3 に示す. 図 3(a) では平均 ECNR が 4 dB 以上のとき, また図 3(b) では平均 ECNR が 12 dB 以上のとき, シングルホップ伝送時の平均帯域利用率が最も高い. これは, シングルホップ伝送時には 1 リンクで全帯域を

表 1 諸 元
Table 1 Parameters.

Parameters	Values
Path loss exponent α	2, 3.5
Channel model	Rayleigh fading
Required bit error rate p_b	10^{-3}



(a) $\alpha = 2$

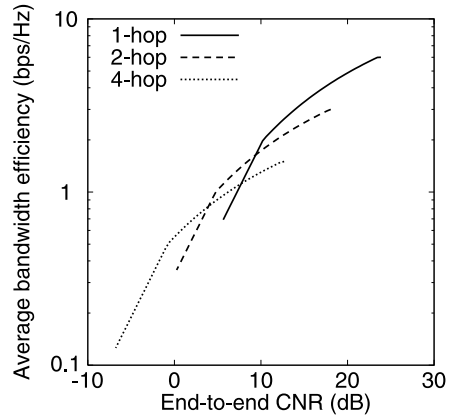


(b) $\alpha = 3.5$

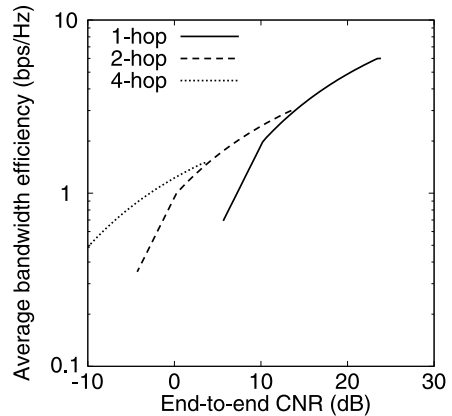
図 3 平均帯域利用率 vs. 平均 ECNR

Fig. 3 Average bandwidth efficiency vs. average ECNR.

使用可能と想定しているためであり、平均帯域利用率の最大値は n ホップ伝送時と比べ n 倍である。一方、図 3 (a) では平均 ECNR が 4 dB 以下のとき、図 3 (b) では平均 ECNR が 12 dB 以下のとき、リンク当りの平均受信電力を増加可能なマルチホップ伝送の導入により帯域利用率が向上する。ただしその状況下ではマルチホップ伝送時の平均帯域利用率は低く、図 3 (a) の場合 0.3 bps/Hz 以下であり図 3 (b) の場合 2 bps/Hz 以下である。



(a) $\alpha = 2$



(b) $\alpha = 3.5$

図 4 平均帯域利用率 vs. 平均 ECNR (距離減衰のみ考慮)

Fig. 4 Average bandwidth efficiency vs. average ECNR when only path loss is considered.

比較のため、距離減衰のみ考慮する場合の平均帯域利用率を図 4 に示す。距離減衰のみ考慮する場合は、各リンクの瞬時受信電力が変動しないため、各リンクのフェージング変動を表す変数 t_i を式 (4) から消去した $\frac{1}{n} f(n^{\alpha} \bar{\gamma}, p_b/n)$ が帯域利用率の評価式である。フェージングの影響により、平均 ECNR が同じとき図 4 と比べ図 3 の平均帯域利用率は低い。例えば平均 ECNR が 10 dB のときのシングルホップ伝送を比較すると、平均帯域利用率が図 4 (b) では 2 bps/Hz であるのに対し図 3 (b) では 1.5 bps/Hz と、0.5 bps/Hz 低い。またホップ数の増加に伴い、マルチホップ経路におけるいずれかのリンクの瞬時受信電力が落ち込む確率が増加するため、このフェージングによる特性劣化が大きくなる。例えば平均 ECNR が 10 dB のと

きの 2 ホップ伝送を比較すると、平均帯域利用率が図 4 (b) では 2.5 bps/Hz であるのに対し図 3 (b) では 1.7 bps/Hz と 0.8 bps/Hz 低く、平均帯域利用率の差がシングルホップ伝送時の 0.5 bps/Hz より拡大している。

またマルチホップ経路の特性は中継局密度に大きく依存する [6]。システム内の中継局密度が低い場合、中継局位置が発呼-あて先局間の等分点から大きく離れる。このとき、各リンクに割り当てられる帯域幅が等しい場合には、伝送距離の長いリンクは伝送レートが他のリンクと比較して低くボトルネックとなるため、平均帯域利用率は本論文の結果より低いと考えられる。しかしシステム内の中継局密度が十分高い場合は、発呼-あて先局間の等分点に近い位置で中継局を選択可能なため、本論文の結果に近い平均帯域利用率が期待できる。

4. アウテージ帯域利用率

本章では、マルチホップ経路のアウテージ帯域利用率を評価する。平均帯域利用率と比べアウテージ帯域利用率においては、フェージングにより瞬時受信電力の落ち込む影響が現れやすいと考えられる。マルチホップ伝送の導入が孤立した発呼-あて先局組に与える影響を検討するため、本章でも 3.1 と同じ雑音制限下を想定する。

以下、フェージングによる瞬時受信電力の変動に対して $(100 - p)\%$ の確率で保証される帯域利用率を $p\%$ アウテージ帯域利用率 $C_{\text{out}}(p)$ と定義し、これを評価する。 $C_{\text{out}}(p)$ は、伝送速度 R の累積分布関数 P に対し以下の関係を満たす。

$$P(R < C_{\text{out}}(p)) = p/100 \quad (5)$$

4.1 劣化率

本節では、アウテージ帯域利用率の評価に用いる劣化率を導出する。まず n ホップ伝送時の k ホップ目のリンクにおける劣化率 $P(R_{n,k} < R_{\min})$ を求める。ただし、 $R_{n,k}$ は n ホップ伝送時の k ホップ目の伝送速度を、 $R_{\min}$ は所望の伝送速度を表す。 $R_{\min} \geq 2$ の場合、 $P(R_{n,k} < R_{\min})$ は

$$\begin{aligned} P(R_{n,k} < R_{\min}) &= P(\log_2(1 + \beta n^{\alpha} \bar{\gamma} |h_{n,k}|^2) / n < R_{\min}) \\ &= P(\beta n^{\alpha} \bar{\gamma} |h_{n,k}|^2 < 2^{n R_{\min}} - 1) \end{aligned}$$

$$= P\left(|h_{n,k}|^2 < \frac{2^{n R_{\min}} - 1}{\beta n^{\alpha} \bar{\gamma}}\right)$$

となる。 $|h_{n,k}|^2$ が指数分布であるため劣化率は、

$$P(R_{n,k} < R_{\min}) = 1 - \exp\left[\frac{2^{n R_{\min}} - 1}{-\beta n^{\alpha} \bar{\gamma}}\right] \quad (6)$$

と導出できる。 $R_{\min} < 2$ の場合も同様に導出できる。

これを用いて、 n ホップ伝送時のエンドツーエンドの劣化率 $P(R^{(n)} < R_{\min})$ を導出する。ただし、 $R^{(n)}$ は n ホップ伝送時の帯域利用率を表す。

$$\begin{aligned} P(R^{(n)} < R_{\min}) &= P((R_{n,1} < R_{\min}) \cup \dots \cup (R_{n,n} < R_{\min})) \\ &= 1 - P((R_{n,1} \geq R_{\min}) \cap \dots \cap (R_{n,n} \geq R_{\min})) \\ &= 1 - P(R_{n,1} \geq R_{\min}) \times \dots \times P(R_{n,n} \geq R_{\min}) \end{aligned}$$

ここで、仮定より各リンクの伝送距離及びフェージングの分布が同一であるため、 $P(R_{n,1} < R_{\min}) = P(R_{n,2} < R_{\min}) = \dots = P(R_{n,n} < R_{\min})$ である。したがってエンドツーエンドの劣化率は、 $R_{\min} \geq 2$ の場合以下で表される。

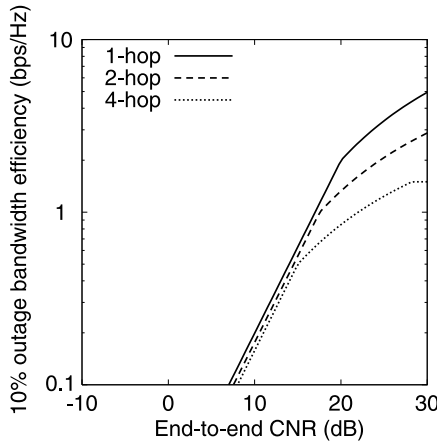
$$\begin{aligned} P(R^{(n)} < R_{\min}) &= 1 - (1 - P(R_{n,1} < R_{\min}))^n \\ &= 1 - \left(\exp\left[\frac{2^{n R_{\min}} - 1}{-\beta n^{\alpha} \bar{\gamma}}\right]\right)^n \end{aligned}$$

4.2 アウテージ帯域利用率の評価結果

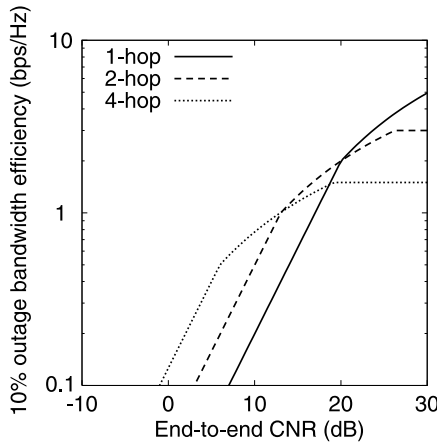
式 (5), (7) より、以下の関係を満たす $C_{\text{out}}(p)$ が $p\%$ アウテージ帯域利用率となる。

$$\begin{aligned} P(R^{(n)} < C_{\text{out}}(p)) &= p/100 \\ \Leftrightarrow 1 - \left(\exp\left[\frac{(2^{n C_{\text{out}}(p)} - 1)}{-\beta n^{\alpha} \bar{\gamma}}\right]\right)^n &= p/100 \quad (7) \end{aligned}$$

例として、図 5 に 10% アウテージ帯域利用率を示す。アウテージ帯域利用率においては、フェージングにより瞬時受信電力の落ち込む影響が現れやすい。また、 $\alpha = 2$ の場合には n ホップ伝送導入によるリンク当りの平均受信電力の増加率 n^{α} が小さい。このため、図 3 と異なり $\alpha = 2$ のときマルチホップ伝送導入による特性向上効果が得られない。しかし $\alpha = 3.5$ の場合であれば、 $\alpha = 2$ の場合と比べて n^{α} が大きいので、マルチホップ伝送導入によりアウテージ帯域利用率が向上する。また、この結果が p によらないことも確認



(a) $\alpha = 2$



(b) $\alpha = 3.5$

図 5 10%アウトエージ帯域利用率 vs. 平均 ECNR
Fig. 5 10% outage bandwidth efficiency vs. average ECNR.

している． p の値により図の縦軸の絶対値は変化するが、アウトエージ帯域利用率においては $\alpha = 2$ の場合にマルチホップ伝送が有効でなく $\alpha = 3.5$ の場合にマルチホップ伝送導入により特性を向上し得る．

ただしこの結果は、エンドツーエンドスループットが瞬時伝送速度の最も低いリンクに制限される想定に依存する．フェージング変動に対して十分長い時間のデータ伝送を各リンクで行える状況であれば、たとえ瞬時的に伝送速度が落ち込んだとしても各リンクの平均スループットに大きな差は生じない．したがってエンドツーエンドで許容される伝送遅延が大きい場合であれば、 $\alpha = 2$ においてもマルチホップ伝送の導入によりアウトエージ帯域利用率が向上し得る．

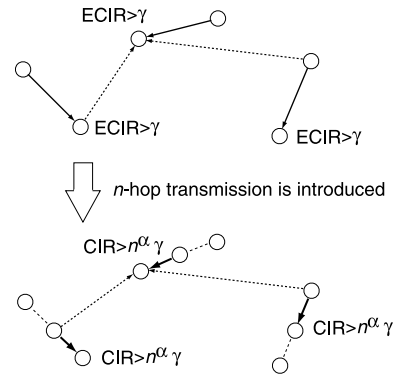


図 6 システムモデル ($n = 2$)
Fig. 6 System model ($n = 2$).

5. 面的周波数利用効率

3. と 4. の数値評価の結果、中継局が即時転送を行う場合にはマルチホップ伝送導入による特性向上効果が小さいことが確認された．本章では、このような状況においてマルチホップ伝送の導入による面的周波数利用効率向上効果 [5], [6] が得られるかを検討する．

5.1 干渉制限

本章では、同一チャネル干渉が雑音に対して支配的な干渉制限下を想定する．この想定のもとでは、これまで扱ってきた受信 CINR が受信 CIR (carrier-to-interference ratio) に置き換えられる．以下、すべての通信を全帯域を用いるシングルホップ伝送により行う場合の受信 CIR をエンドツーエンド CIR (ECIR) [5] と呼び、これをパラメータとして用いる．本論文の単純なシステムモデルでは通信密度の絶対値は特に意味をもたず、それにより決定される受信 CIR が重要となるため、雑音制限下における ECNR と同様に干渉制限下では ECIR が適切なパラメータと考えられる．

無線局の公平性の問題を分離するため、 n ホップ伝送の導入時には図 6 に示すようにシステムの全帯域が n 分割され全通信が n ホップ伝送を行うと想定する．このとき n ホップ伝送の導入により他経路当りの干渉源の数が n 倍になるが、チャネル分割によりチャネル当りの干渉源の数が $1/n$ になる．ここで他経路から受ける干渉に関して、各経路間の距離が十分離れているためある経路中のどの送信局からの干渉も信号電力がすべて等しいと仮定する．このとき、帯域当りの送信電力が等しいとすると、送信電力対干渉電力比がシングルホップ伝送時と変わらない．また、中継局が発

呼—あて先局間の線分を等分する点に存在すると想定するため、リンク当りの伝送距離が $1/n$ に減少する。したがって、平均 ECIR を $\bar{\gamma}$ とするとき、 n ホップ伝送導入時の各リンクの平均受信 CIR は $n^\alpha \bar{\gamma}$ 、瞬時受信 CIR は $n^\alpha \bar{\gamma} |h_{n,k}|^2$ で表される。マルチホップ伝送時の各リンクの受信 CIR を、3. 及び 4. の受信 CNR と同様に表すことができるため、本章でも各経路の帯域利用率として (4) 及び (8) が適用できる。

システム内の中継局密度が低い場合には、中継局位置が発呼—あて先局間の等分点から離れ、3.3 で述べたように帯域利用率が (4) 及び (8) より低下し得る。一方、他経路に与える干渉電力は、各経路間の距離が十分離れておりある経路中のどの送信局からの干渉も信号電力がすべて等しいと仮定するため、中継局位置が変化しても変化しない。

5.2 同時送信密度 [5]

経路当りの帯域利用率と同時送信密度の積により、面的周波数利用効率を評価する。ここで同時送信密度 $\rho(\bar{\gamma})$ の定義は、全無線局が所要の平均 ECIR $\bar{\gamma}$ を満たす状況における、空間的再利用が可能な密度とする。以下、すべての通信が QPSK 伝送を用いたシングルホップ伝送で行われている状況を評価基準とする。この場合の平均 ECIR は γ_{QPSK} であり、同時送信密度を ρ_{QPSK} とおく。

上記の評価基準に対して、同時通信を行う経路間の距離を z 倍に広げた状況を考える。このとき、各受信局における干渉電力は $1/z^\alpha$ に減少するため、平均受信 ECIR は $\bar{\gamma} = z^\alpha \gamma_{\text{QPSK}}$ と表される。一方同時送信密度は、評価基準の $1/z^2$ に減少するため、 $\rho(\bar{\gamma}) = \rho_{\text{QPSK}}/z^2$ と表される。したがって、同時送信密度 $\rho(\bar{\gamma})$ は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \rho(\bar{\gamma}) &= \left(\frac{\gamma_{\text{QPSK}}}{\bar{\gamma}} \right)^{2/\alpha} \rho_{\text{QPSK}} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_{\text{QPSK}}}{\bar{\gamma}} \right)^{2/\alpha} \eta_{\text{QPSK}} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 η_{QPSK} は各無線局の所要平均受信 ECIR が γ_{QPSK} であるときの面的周波数利用効率を表す。

5.3 平均面的周波数利用効率

マルチホップ経路の特性として平均帯域利用率を用い、面的周波数利用効率の平均値を評価する。図 7 に、フェージング環境下における平均帯域利用率と平均面的周波数利用効率の関係を示す。 $\alpha = 2$ の場合、平均面的周波数利用効率の最大値が低下する。これはホッ

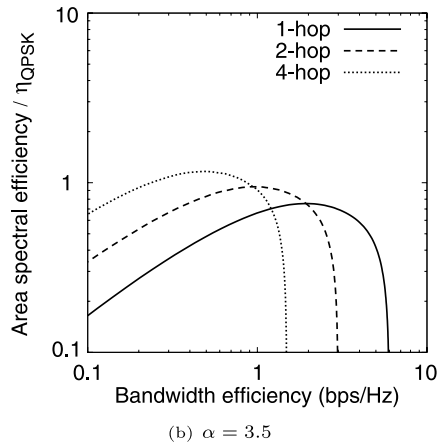
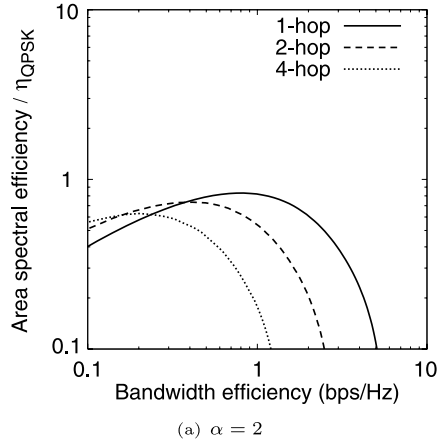


図 7 平均面的周波数利用効率 vs. 平均帯域利用率
Fig. 7 Average area spectral efficiency vs. average bandwidth efficiency.

プ数の増加に伴い、マルチホップ経路におけるいずれかのリンクの瞬時受信電力がフェージングにより落ち込む確率が増加するためである。しかし $\alpha = 3.5$ の場合、マルチホップ伝送の導入によるリンク当りの平均受信電力の増加率 n^α が $\alpha = 2$ の場合と比べ大きいため、平均面的周波数利用効率の最大値が向上する。全通信のホップ数を 2 倍にすることで、図 7 (b) では平均面的周波数利用効率の最大値が約 1.3 倍向上する。また、面的周波数利用効率が最大となるときの平均帯域利用率は、全通信のホップ数を 2 倍にすることで約 0.5 倍に減少する。したがってマルチホップ伝送は、帯域利用率の低下と引換えに面的周波数利用効率を向上可能な技術といえる。

比較のため、距離減衰のみ考慮する場合の平均帯域

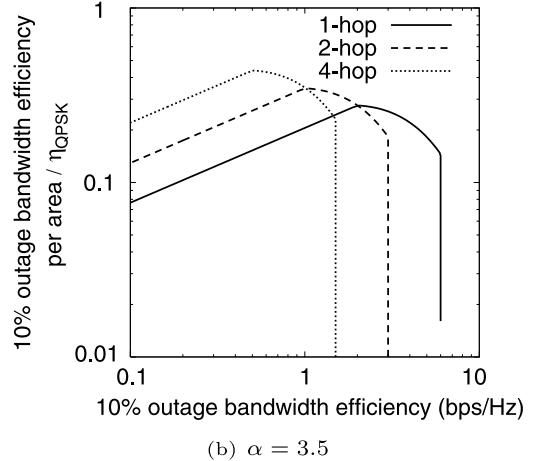
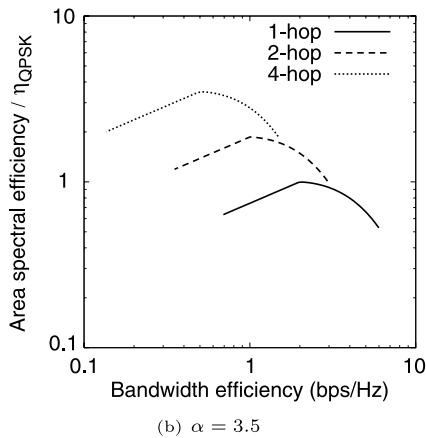
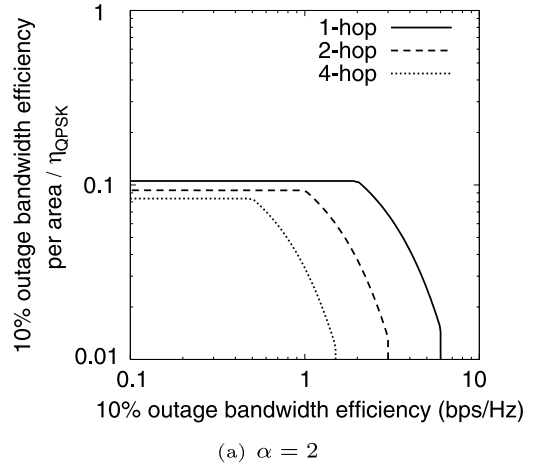
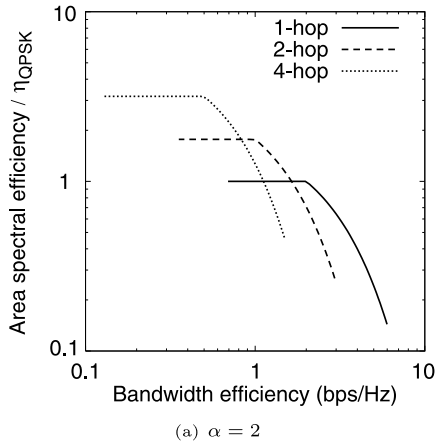


図 8 平均面的周波数利用効率 vs. 平均帯域利用率 (距離減衰のみ考慮)

Fig. 8 Average area spectral efficiency vs. average bandwidth efficiency when only path loss is considered.

図 9 アウテージ面的周波数利用効率 vs. 10%アウテージ帯域利用率

Fig. 9 Outage area spectral efficiency vs. 10% outage bandwidth efficiency.

利用率と平均面的周波数利用効率の関係を図 8 に示す。距離減衰のみ考慮する場合、距離減衰係数によらずマルチホップ伝送の導入により平均面的周波数利用効率の最大値が向上する。全通信のホップ数を 2 倍にする場合、平均面的周波数利用効率の最大値が図 8(b) では約 1.9 倍向上し、この向上率は図 7(b) の約 1.3 倍より大きい。つまり、面的周波数利用効率の向上効果はフェージングの影響により低下する。

5.4 アウテージ面的周波数利用効率

マルチホップ経路の特性として 10%アウテージ帯域利用率を用い、アウテージ面的周波数利用効率を評価する。図 9 に、10%アウテージ帯域利用率とアウテージ面的周波数利用効率の関係を示す。アウテージ

帯域利用率においてはフェージングにより瞬時受信電力が落ち込む影響が現れやすいため、図 5 と同様に $\alpha = 2$ の場合マルチホップ伝送の導入による特性向上効果が得られない。しかし図 7 と同様に、 $\alpha = 3.5$ の場合マルチホップ伝送の導入によりリンク当りの平均受信電力が著しく増加するため、アウテージ面的周波数利用効率の最大値が向上する。

6. む す び

本論文では、マルチホップ経路の帯域利用率及びマルチホップ無線ネットワークの面的周波数利用効率を理論解析により導出した。理論式の導出の際には、各中継局が受信したデータを即座に次の受信局へ送信す

るため、エンドツーエンドスループットが瞬時伝送速度の最も低いリンクに制限されると想定した。数値評価の結果、フェージングによりマルチホップ経路の特性が低下するものの、マルチホップ伝送の導入により帯域利用率を向上し得ることが明らかとなった。また、マルチホップ伝送導入により平均受信電力が大きく増加する伝搬環境であれば、アウトージ帯域利用率及び面的周波数利用効率の最大値も向上し得ることが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号 20246067) によるものである。

文 献

- [1] Y.D. Lin and Y.C. Hsu, "Multihop cellular: A new architecture for wireless communications," Proc. IEEE Infocom'00, vol.3, pp.1273–1282, March 2000.
- [2] H. Wu, C. Qiao, S. De, and O. Tonguz, "Integrated cellular and ad hoc relaying systems: iCAR," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.19, no.10, pp.2105–2115, Oct. 2001.
- [3] 山本高至, 楠田厚史, 中野 剛, 吉田 進, "TDMA マルチホップセルラシステムの周波数利用効率と劣化率に関する理論的評価," 信学論 (B), vol.J89-B, no.6, pp.926–934, June 2006.
- [4] C. Hoymann, K. Klagges, and M. Schinnenburg, "Multihop communication in relay enhanced IEEE 802.16 networks," Proc. IEEE PIMRC '06, pp.1–4, Sept. 2006.
- [5] K. Yamamoto and S. Yoshida, "Tradeoff between area spectral efficiency and end-to-end throughput in rate-adaptive multihop radio networks," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.9, pp.3532–3540, Sept. 2005.
- [6] P.T.N. Bao, H. Murata, S. Yoshida, and K. Araki, "Area spectral efficiency of wireless multihop networks in rayleigh fading channel and the impact of terminal density," Proc. IEEE First International Conference on Communications and Electronics (ICCE'06), pp.19–22, Hanoi, Vietnam, Oct. 2006.
- [7] A. Iera, A. Molinaro, G. Ruggeri, and D. Tripodi, "Improving QoS and throughput in single- and multihop WLANs through dynamic traffic prioritization," IEEE Netw., vol.19, pp.35–44, July-Aug. 2005.
- [8] S. Konishi and X. Wang, "A MAC protocol taking account of permissible latency for real-time applications," Proc. IEEE PIMRC '07, pp.1–5, Sept. 2007.
- [9] B. Aoun, R. Boutaba, and G. Kenward, "Analysis of capacity improvements in multi-radio wireless mesh networks," Proc. IEEE VTC 2006-Spring, vol.2, pp.543–547, May 2006.
- [10] M.S. Alouini and A.J. Goldsmith, "Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.48, no.4, pp.1047–1066, July 1999.
- [11] M. Sikora, J.N. Laneman, M. Haenggi, D.J. Costello, and T.E. Fuja, "Bandwidth- and power- efficient routing in linear wireless networks," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.52, no.6, pp.2624–2633, June 2006.
- [12] IEEE 802.11n Working Group, "Draft amendment to standard for information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements- Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Enhancements for higher throughput," IEEE P802.11n/D1.0, Jan. 2006.
- [13] A.J. Goldsmith and S.B. Wicker, "Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks," IEEE Wirel. Commun. Mag., vol.9, no.4, pp.8–27, Aug. 2002.
- [14] A.J. Goldsmith and S.G. Chua, "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," IEEE Trans. Commun., vol.45, no.10, pp.1218–1230, Oct. 1997.
- [15] T. Ue, S. Sampei, and N. Morinaga, "Symbol rate controlled adaptive modulation/TDMA/TDD for wireless personal communication systems," IEICE Trans. Commun., vol.E78-B, no.8, pp.1117–1124, Aug. 1995.

(平成 20 年 5 月 7 日受付, 8 月 21 日再受付)

柴田 直剛 (学生員)



平 19 京大・工・電気電子卒。現在、同大大学院情報学研究科修士課程在学中。マルチホップ無線ネットワークの研究に従事。

山本 高至 (正員)



平 14 京大・工・電気電子卒。平 16 同大大学院修士課程了。同年日本学術振興会特別研究員。平 17 同大学院博士後期課程了。同年同大学院情報学・助手。平 19 同助教、現在に至る。平 20 スウェーデン王立工科大学客員研究員。京都大学博士 (情報学)。マルチホップ無線ネットワーク、協力通信の研究に従事。平 18 エリクソンヤングサイエンティストアワード、平 19 本会通ソ活動功労賞、平 20 本会学術奨励賞受賞。



村田 英一 (正員)

平 3 京大・工・電子卒。平 5 同大大学院修士課程了。平 5~14 同大助手。平 14 より東工大助教授, 平 18 京大大学院情報学・助教授。平 19 同准教授, 現在に至る。工博。ワイヤレスネットワーク, 無線伝送方式の研究に従事。平 9 本会学術奨励賞, 平 12 エリクソンヤングサイエンティストアワード, 平 16 本会功労感謝状, 平 18 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 平 18 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。



吉田 進 (正員:フェロー)

昭 46 京大・工・電子卒。昭 48 同大大学院修士課程了。同年同大・工・助手, 昭 54 同助教授, 平 4 同教授, 平 10 同大大学院情報学・教授, 現在に至る。工博。この間, 伝送符号, デジタル移動通信, アドホックネットワークなどの研究に従事。昭 53 本会学術奨励賞, 昭 63・平 18 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 平 4 本会業績賞, 平 19 エリクソン・テレコミュニケーション・アワード受賞。