

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

山本 高至[†] 楠田 厚史[†] 中野 剛[†] 吉田 進[†]

Theoretical Evaluation of Spectral Efficiency and Outage Probability of TDMA Multihop Cellular Systems

Koji YAMAMOTO[†], Atsushi KUSUDA[†], Tsuyoshi NAKANO[†],
and Susumu YOSHIDA[†]

あらまし マルチホップ伝送を導入した TDMA セルラシステムについて、雑音制限下のシングルセル環境における周波数利用効率と劣化率を定式化し、数値評価を行った。また、近似の利用により、干渉制限下のマルチセル環境においても数値評価を行い、シミュレーション結果と比較検討した。定式化においては、マルチホップ伝送とシンボルレート制御の共通点に着目し、適応シンボルレート制御を行う TDMA セルラシステムの評価法と同様の手法を用いた。評価にあたっては、特にマルチホップ伝送の導入に伴う周波数利用効率の低下を考慮した。その結果、シングルセル環境においては、マルチホップ伝送の導入により若干の周波数利用効率の低下と引換えに、許容劣化率を満たすセルカバレッジの拡大が可能であることを明らかにした。また、マルチセル環境においては、マルチホップ伝送の導入により許容劣化率をより小さいセル繰返し数で実現でき、結果として周波数利用効率の向上が見込めることを明らかにした。

キーワード マルチホップ、セルラシステム、周波数利用効率、劣化率

1. ま え が き

近年、マルチホップ伝送を利用した無線通信システムが注目を集めている。この理由としてまず挙げられることは、移動局と基地局がシングルホップ伝送を行う既存のセルラシステムと比較した場合、セルカバレッジを一定とした場合の送信電力の低減や、送信電力を一定とした場合のセルカバレッジの拡大が見込めることである。年々、高速伝送の要求が高まっているが、伝送速度の増大に伴い一般に高い受信電力が必要となる。一方で、移動局の送信電力には上限がある。マルチホップ伝送の導入はこの制約を根本的に緩和し、基地局から離れた移動局でも高速伝送を実現する可能性が期待されている。

このようなマルチホップ伝送の導入は GSM (Global System for Mobile Communications) [1], TDMA (Time Division Multiple Access) セルラシステム [2],

HiperLAN/2 [3] など様々なシステムで検討が行われてきた。中でも、CDMA (Code Division Multiple Access) セルラシステムは第 3 世代移動通信で用いられるため、マルチホップ伝送導入に関する検討は広く行われてきた [4]~[8]。この CDMA セルラシステムの上り回線では主に非完全直交チャネルを用いるため高精度な送信電力制御が必要になるなど、TDMA に代表される他の直交チャネルを用いるアクセス方式とは異なる特徴が多い。

一方で TDMA を用いる IEEE 802.16 [9] 方式の無線通信システムが注目を集めており、マルチホップ伝送機能も提供されている。したがって、第 4 世代移動通信に適したシステムを議論する前提として、TDMA セルラシステムへのマルチホップ伝送導入効果を綿密に評価しておくことが有用と考えられる。このため、本論文ではアクセス方式として TDMA を想定する。

シングルホップ伝送時と送信電力を等しくする場合に、マルチホップ伝送の導入がカバレッジ拡大効果をもたらす理由は、ホップ当りの受信信号電力の増加に伴う受信 CINR (Carrier-to-Interference plus Noise

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

Ratio) の増大, 及びシャドウイングの大きい経路を回避し得ることが考えられる. この一方で受信 CINR を変えなくても, 低シンボルレート伝送のような所要 CINR を下げる伝送技術によっても, カバレッジ拡大は実現可能である.

このため, 我々はこれまでに適応レート制御の想定下でマルチホップ伝送の特性を評価し, 直線上等間隔モデルの雑音制限下のスループット, 並びにシステム内のマルチホップ伝送がほぼ同じ条件で行われる, 干渉制限下におけるマルチホップ無線ネットワークの面の周波数利用効率を求めた [10].

本論文の第一の目的は, 基地局からの距離など条件が異なる端末が存在するマルチホップセルラシステムにおける, 特性の理論的評価にある. そこで, 適応シンボルレート制御とマルチホップ伝送の共通点に着目し, 適応シンボルレート制御を用いるセルラシステムの評価式 [11] を参考に, マルチホップセルラシステムの評価式を導出する. 本評価式では適応シンボルレート制御やマルチホップ伝送の導入に伴う帯域利用率の変化も考慮されている. ただし, 本論文ではシステムの周波数利用効率と区別するため, 個々の通信に関する単位帯域当りの最大エンドツーエンドビットレートを帯域利用率と定義する. 第二の目的は, 同様の効果が期待される適応シンボルレート制御とマルチホップ伝送の導入効果の比較である. 評価尺度としては, セル当りの帯域利用率の平均値として定義される周波数利用効率と, セル内において所要通信品質を満たさない確率として定義される劣化率を用いる.

2. ではシステムモデルを, 3. では文献 [11] に基づき, 適応シンボルレート制御と, これを用いるセルラシステムの劣化率と周波数利用効率を示す. 4. では 3. と同様の評価方法に基づき, マルチホップセルラシステムの特性を示す. 5. ではシングルセル環境と, 近似を用いたマルチセル環境の数値評価結果, 並びにマルチセル環境の計算機シミュレーション結果を示し, 近似の有効性を確認する.

2. システムモデル

2.1 伝搬路

伝搬路特性として以下のように, 距離の α 乗に反比例する伝搬損距離変動, 対数正規分布でモデル化されるシャドウイング, 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. 本論文ではシンボルレートを短区間中央値に応じて決定する. このため,

瞬時フェージングは受信 CINR の短区間中央値 γ に対する BER (Bit Error Rate) 特性に影響する. レイリーフェージング下において J ブランチ最大比合成型ダイバーシチ受信を行った場合, 同期検波 QPSK の BER 特性 $\beta_{A-0}(\gamma)$ は次式で与えられる [11].

$$\beta_{A-0}(\gamma) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+2/\gamma}} \sum_{j=0}^{J-1} \frac{(2j-1)!!}{(2j)!!} \frac{1}{(1+\gamma/2)^j} \right] \quad (1)$$

伝搬損距離変動については, 局間距離 d 及び d_0 における, 受信搬送波電力の長区間中央値 $x_m(d)$ 及び $x_m(d_0)$ の関係として次式で与えられる.

$$x_m(d) = x_m(d_0) (d/d_0)^{-\alpha} \quad (2)$$

これにシャドウイングを考慮した場合, 受信搬送波電力の短区間中央値 x の確率密度関数 $f_d(x)$ は次式で与えられる.

$$f_d(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x x} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_x^2} \left(\ln \frac{x}{x_m(d)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここで, $\sigma_x = (\ln 10)\sigma_{dB}/10$ は $\ln x$ の標準偏差であり, σ_{dB} は一般に 6~10 dB の値をとる.

2.2 シングルセル環境

シングルセル環境としては, 図 1 のように他局干渉の存在しない孤立した状況を想定する. 発呼移動局及び m 局の中継候補局はセル内における一様分布を仮定する.

発呼移動局ないし中継局の移動により受信電力の短区間中央値が変化すれば, 決定済みの経路ないしシン

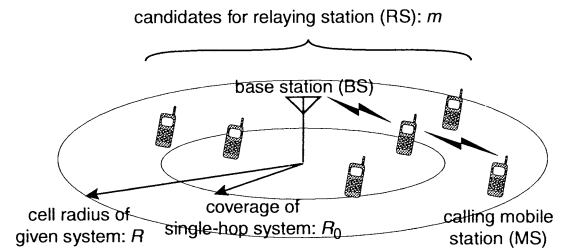


図 1 シングルセルモデル. 半径 R の孤立セル内に発呼移動局と中継候補局が一様分布.

Fig. 1 Model for single-cell environments. Calling MS's and candidates for RS are uniformly distributed in a single isolated cell with radius R .

ボルレートを用い続けた場合に特性が変化し得るが、これは適応制御の追従速度の問題であり本論文の目的から外れる。このため本論文では、発呼移動局ないし中継候補局は、移動したとしても受信信号電力の短区間中央値は変化しない程度と想定し、シンボルレートないし経路の選択は受信 CNR (Carrier-to-Noise Ratio) の短区間中央値に基づくとする。

シングルセル環境では干渉が存在しないため、受信 CNR の短区間中央値 γ は受信搬送波電力の短区間中央値 x に比例する。したがって、 γ の確率密度関数 $g_d(\gamma)$ は式 (3) と同様に次式で与えられる。

$$g_d(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\gamma\gamma} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_\gamma^2} \left(\ln \frac{\gamma}{\gamma_m(d)} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_\gamma = \sigma_x$ 、 $\gamma_m(d)$ は受信 CNR の長区間中央値である。

2.3 マルチセル環境

マルチセル環境としては図 2 のように六角形セルを想定し、六つの隣接繰返しセルによる同一チャネル干渉を考慮する。すべての干渉信号は帯域全体に広がる加法的白色ガウス雑音と等価と仮定する（この仮定に関する議論は文献 [12] を参照）。また、この同一チャネル干渉が熱雑音に対して支配的、すなわち干渉制限とする。発呼移動局及び中継候補局の分布はシングルセル環境と同じく、セル内での一様分布を想定する。

以上の前提のもとでの受信干渉電力、受信 CIR (Carrier-to-Interference Ratio) の分布を求める。六つの隣接繰返しセルによる各干渉電力の短区間中央値は、それぞれ対数正規分布に従う。このような対数正規乱数の和の確率密度関数は、対数正規分布で近似できることが知られている [13]。そこで、各干渉波の伝搬距離 $d_1, \dots, d_6$ に対し、干渉電力の和 y の確率密度関数 $f_{d_1, \dots, d_6}(y)$ を次の対数正規分布で近似する。

$$f_{d_1, \dots, d_6}(y) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(d_1, \dots, d_6)y} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln y - \ln y_m(d_1, \dots, d_6))^2}{2\sigma_y(d_1, \dots, d_6)^2} \right] \quad (5)$$

この平均 $y_m(d_1, \dots, d_6)$ 、標準偏差 $\sigma_y(d_1, \dots, d_6)$ は、文献 [13] に示される方法によりもとの六つの分布から数値解析的に求める。

式 (3)、(5) に示されるように、受信搬送波電力の短区間中央値 x と受信干渉電力の短区間中央値 y の確率

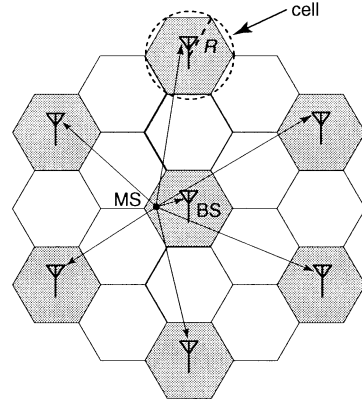


図 2 マルチセルモデル。セル繰返し数 $L = 4$ の場合。
Fig. 2 Model for multi-cell environments. Reuse factor $L = 4$.

密度関数はともに対数正規分布であるため、受信 CIR の短区間中央値 γ の確率密度関数 $h_{d, d_1, \dots, d_6}(\gamma)$ は次の対数正規分布で与えられる。

$$h_{d, d_1, \dots, d_6}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\gamma(d_1, \dots, d_6)\gamma} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln \gamma - \ln \gamma_m(d, d_1, \dots, d_6))^2}{2\sigma_\gamma(d_1, \dots, d_6)^2} \right],$$

$$\gamma_m(d, d_1, \dots, d_6) = x_m(d)/y_m(d_1, \dots, d_6),$$

$$\sigma_\gamma(d_1, \dots, d_6) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y(d_1, \dots, d_6)^2} \quad (6)$$

ただし、 d は希望波の伝搬距離を表す。

隣接繰返しセル i においてそれぞれ基地局を原点とする送信局の極座標を (s_i, ϕ_i) とおくと、送信局の集合は $\mathbb{R}^2$ 上の次の部分集合で表される。

$$U_i = \{(s_i, \phi_i); 0 < s_i \leq R, 0 \leq \phi_i < 2\pi\} \quad (7)$$

隣接繰返しセル内の送信局に関して一様かつ独立な分布を仮定すれば、自セル内の受信局の位置 (r, θ) での受信 CIR の短区間中央値 γ の確率密度関数 $g_d(\gamma)$ は、直積集合 $V = \prod_{i=1}^6 U_i$ 及び $dV = ds_1 d\phi_1 \cdots ds_6 d\phi_6$ を用いて次式で与えられる。

$$g_d(\gamma) = \frac{1}{(\pi R^2)^6} \int_V h_{d, d_1, \dots, d_6}(\gamma) dV \quad (8)$$

シンボルレートないし経路の選択はシングルセル環境と同様に、以上のように分布が定まる受信 CIR の短区間中央値に基づくとする。以降、CNR と CIR を区別する必要がない場合には、CINR と表記する。

3. 適応シンボルレート制御を行うセルラシステム

3.1 シンボルレート制御

雑音や同一チャネル干渉が厳しい場合に所要 CINR を下げる一つの方法として、送信電力を一定とした低シンボルレート伝送の適用が挙げられる。単純にシンボルレートを変えるとそれに応じた送受信フィルタが必要となる。一方で同一シンボルを 2^k 回（ただし k は 0 以上の整数）繰返して送信し、受信側ではシンボルタイミングでサンプリングして同期加算すれば、 2^k シンボルを新たなシンボルとみなせる。この新たなシンボルの利用により、シンボルレートの低減が可能である [14]。これにより、所要 CINR はもとの 2^k 分の 1 となる。したがって、 $1/2^k$ -rate QPSK の受信 CINR γ に対する BER 特性 $\beta_{A-k}(\gamma)$ は、次の関係式を満たす。

$$\beta_{A-k}(\gamma) = \beta_{A-0}(2^k \gamma) \quad (9)$$

下付き文字 “A” は適応シンボルレート制御を表す。

本論文では変調方式は QPSK のみとし、 k の上限を K (≥ 1) とした場合に所要 BER を満たすシンボルレートのうち、最大のものを選択する適応シンボルレート制御を想定する。本章では文献 [11] で示されている、適応シンボルレート制御を導入したセルラシステムの劣化率及び周波数利用効率の評価方法について、式を用いて説明する。スロット割当については文献 [11] と同様に、シンボルレートが異なってもスループットが等しくなるよう、full-rate QPSK と比較して $1/2$ -rate QPSK は 2 倍、 $1/4$ -rate QPSK は 4 倍のスロットを割り当てる。

3.2 劣化率

適応シンボルレート制御を用いるセルラシステムにおける劣化率は、セル内において最小シンボルレートでも所要 BER を満たさない確率として定義される [11]。

基地局を原点とする極座標を考え、 (r, θ) の地点に位置する発呼移動局が $1/2^k$ -rate QPSK を用いた場合に所要 BER β_{req} を満たさない確率 $p_{A-k}(r, \theta)$ は次式で与えられる。

$$p_{A-k}(r, \theta) = \int_{D_{A-k}} g_d(\gamma) d\gamma \quad (10)$$

ただし、 D_{A-k} は次式で与えられる $\mathbb{R}$ 上の部分集合で

ある。

$$D_{A-k} = \{\gamma; \gamma > 0, \beta_{A-k}(\gamma) > \beta_{\text{req}}\} \quad (11)$$

求めるべき、適応シンボルレート制御を用いるセルラシステムの劣化率 P_A は、セル内で $p_{A-K}(r, \theta)$ を積分したものとなる。発呼移動局の一様分布という仮定のもとでは次式で与えられる。

$$P_A = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} r p_{A-K}(r, \theta) d\theta dr \quad (12)$$

3.3 周波数利用効率

シンボルレート制御の導入により、より低い帯域利用率の伝送が行われる。これに伴い低下する可能性のある周波数利用効率を評価する。 $1/2^{K-2}$ -rate で所要 BER を満たさない場合は $1/2^{K-1}$ -rate を用いる。ここで発呼移動局が (r, θ) の地点で基地局と通信を行う際の帯域利用率 $t_A(r, \theta)$ (bps/Hz) は次式で与えられる。

$$t_A(r, \theta) = \frac{2R_{\text{smax}} F_{\text{eff}}}{B_{\text{ch}}} \left[1 - \sum_{k=0}^{K-1} \frac{p_{A-k}(r, \theta)}{2^{k+1}} \right] \quad (13)$$

ここで、 R_{smax} : full-rate QPSK 時のシンボルレート、 F_{eff} : フレーム効率、 B_{ch} : チャネル間隔である。

セル繰返し数が L のマルチセル環境では、一つのセルでは L 分の 1 の帯域を利用する。したがって周波数利用効率は、帯域利用率のセル内の平均をセル繰返し数 L で割ったものとなる。以上より、適応シンボルレート制御を用いた場合の周波数利用効率 η_A (bps/(Hz·cell)) は次式で与えられる。

$$\eta_A = \frac{1}{\pi L R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} r t_A(r, \theta) d\theta dr \quad (14)$$

ただし、シングルセル環境においては $L = 1$ とする。

以上の劣化率 P_A 及び周波数利用効率 η_A は、シングルセル環境においてはセル半径 R の、マルチセル環境においてはセル繰返し数 L の関数である。

4. マルチホップセルラシステム

4.1 マルチホップ伝送

マルチホップ伝送の導入により、1 ホップ当りの局間距離はシングルホップ伝送と比較して短くできる。したがって送信電力一定でマルチホップ伝送に切り換えれば、希望波の受信電力の増加、あるいはシャドウ

イングの影響の低減が可能となる。

本論文の目的はマルチホップ伝送とシンボルレート制御との比較であり、簡単のために変調方式は QPSK、シンボルレートは full-rate 固定、ホップ数は最大 2 ホップ（中継局は一つ）とする。これらの前提のもとで、前章での評価方法と同様にして特性の定式化を行う。ルーチングとしては、エンドツーエンドの BER が所要値を満たす経路のうち、ホップ数最小経路の選択を想定する。また、同じホップ数でエンドツーエンドの BER が所要値を満たす経路が複数ある場合には、エンドツーエンドの BER の最も小さい中継局を選択する。スロット割当についてはスループットが等しくなるように、シングルホップ full-rate QPSK の 2 倍のスロットを割り当て、フレームごとに 1 ホップ目と 2 ホップ目が交互に通信を行う。ルーチング、スロット割当等の制御は、データ伝送にオーバーヘッドなく行えると仮定する。

4.2 劣化率

マルチホップセルラシステムのセル内において、あらゆる経路を用いてもエンドツーエンドの BER が所要値を満たさない確率を、劣化率と定義する。

n ホップ伝送時の i ($1 \leq i \leq n$) ホップ目の送信局の位置を (r_i, θ_i) 、受信 CIR を $\gamma_{n,i}$ 、BER を $\beta_{M-n,i}$ とおく。ここで下付き文字 “M” はマルチホップ伝送を表す。1 ホップ当りの BER が小さい場合は n ホップ伝送のエンドツーエンド BER は各ホップの BER の和で近似される [10]。したがって、 n ホップ伝送時のエンドツーエンド BER を β_{M-n} とおけば次式が成り立つ。

$$\beta_{M-n} = \sum_{i=1}^n \beta_{M-n,i} \quad (15)$$

また、 n ホップ伝送時に所要 BER を満たさない確率 p_{M-n} は $\mathbb{R}^n$ 上の部分集合

$$D_{M-n} = \left\{ (\gamma_{n,1}, \dots, \gamma_{n,n}) ; \gamma_{n,1} > 0, \dots, \gamma_{n,n} > 0, \right. \\ \left. \beta_{M-n} = \sum_{i=1}^n \beta_{A-0}(\gamma_{n,i}) > \beta_{\text{req}} \right\} \quad (16)$$

を用いて、次式で与えられる。

$$p_{M-n}(r_1, \theta_1, \dots, r_n, \theta_n)$$

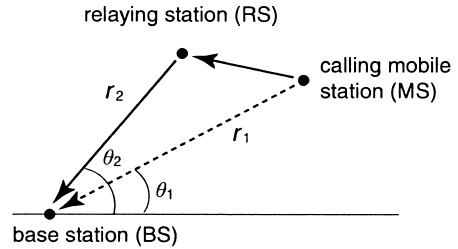


図3 基地局、発呼移動局、中継局の位置関係。破線と直線はシングルホップ及び2ホップ伝送を表す。

Fig. 3 Positions of base station, calling mobile station, and relaying station. Dashed and solid arrows represent single-hop and 2-hop transmissions, respectively.

$$= \int_{D_{M-n}} \left[\prod_{i=1}^n g_{n,i}(\gamma_{n,i}) d\gamma_{n,i} \right] \quad (17)$$

ただし、 $g_{n,i}(\gamma_{n,i})$ は i ホップ目の受信 CINR $\gamma_{n,i}$ の確率密度関数を表す。

仮定のように2ホップに限定して考える。図3のように、発呼移動局の位置は (r_1, θ_1) であり、1ホップ伝送の場合にエンドツーエンドの BER が β_{req} を満たさない確率 $p_{1\text{-hop}}(r_1, \theta_1)$ は、次式となる。

$$p_{1\text{-hop}}(r_1, \theta_1) = p_{M-1}(r_1, \theta_1) \quad (18)$$

また中継局の位置は (r_2, θ_2) であり、 (r_1, θ_1) に位置する発呼移動局が2ホップ伝送を行う場合に、エンドツーエンドの BER が β_{req} を満たさない確率 $p_{2\text{-hop}}(r_1, \theta_1)$ は次式で与えられる。

$$p_{2\text{-hop}}(r_1, \theta_1) \\ = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} r_2 p_{M-2}(r_1, \theta_1, r_2, \theta_2) d\theta_2 dr_2 \quad (19)$$

以上より、発呼移動局の位置 (r_1, θ_1) でエンドツーエンドの BER が β_{req} を満たさない確率 $p_{1,2\text{-hop}}(r_1, \theta_1)$ は、次式で与えられる。

$$p_{1,2\text{-hop}}(r_1, \theta_1) \\ = p_{1\text{-hop}}(r_1, \theta_1) (p_{2\text{-hop}}(r_1, \theta_1))^m \quad (20)$$

ゆえに、マルチホップセルラシステムの劣化率 P_M は次式で表される。

$$P_M = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} r_1 p_{1,2\text{-hop}}(r_1, \theta_1) d\theta_1 dr_1 \quad (21)$$

4.3 周波数利用効率

1 ホップで通信できない場合は2 ホップで通信を行うと仮定する．ここで帯域利用率 $t_M(r_1, \theta_1)$ (bps/Hz) は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} t_M(r_1, \theta_1) &= \frac{2R_{\text{smax}}F_{\text{eff}}}{B_{\text{ch}}} \left[\frac{p_{1\text{-hop}}(r_1, \theta_1)}{2} + (1 - p_{1\text{-hop}}(r_1, \theta_1)) \right] \\ &= \frac{2R_{\text{smax}}F_{\text{eff}}}{B_{\text{ch}}} \left[1 - \frac{p_{1\text{-hop}}(r_1, \theta_1)}{2} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

適応シンボルレート制御の場合と同様にして、マルチホップセルラシステムの周波数利用効率 η_M (bps/(Hz·cell)) は次式で表される．

$$\eta_M = \frac{1}{\pi LR^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} r_1 t_M(r_1, \theta_1) d\theta_1 dr_1 \quad (23)$$

ただし、シングルセル環境においては $L = 1$ とする．

4.4 評価方法

マルチセル環境のマルチホップセルラシステムでは、選択する経路によって他セルに与える干渉電力が変化する．したがって、式 (17) における受信 CIR の分布 $g_{n,i}(\gamma_{n,i})$ が一意に定まらず、数値評価は難しい．そこで、干渉電力を近似した数値評価と、計算機シミュレーションによる評価を行い、結果を比較検討する．

数値評価においては、隣接繰返しセルにおける送信局のようかつ独立な分布を仮定する．これにより、 $g_{n,i}(\gamma_{n,i})$ は、シングルホップ伝送における $g_d(\gamma)$ と同様に定まる．計算機シミュレーションにおいては、2.3 に示す干渉の近似を行わず各セルで順次経路選択を行い、この際他セルで経路が変更されれば干渉を再評価し、再度経路選択を行う．

5. 評価結果

表 1 の諸元を用いて、劣化率及び周波数利用効率を評価した．所要 CINR は図 4 に示す、2 ブランチ最大比合成型ダイバーシチ受信の BER 特性 (式 (1), (9) において $J = 2$) より求めた．全局の送信電力、アンテナゲインは、シンボルレート、ホップ数にかかわらず一定とし、オムニアンテナを仮定した．

以下、シングルセル環境とマルチセル環境の評価方法と結果について説明する．

5.1 シングルセル環境

シングルセル環境においては、セル半径 R に対して劣化率 (12), (21) 及び周波数利用効率 (14), (23) を

表 1 評価諸元

Table 1 Parameters used in evaluations.

Parameters	Values
Path loss exponent α	3.5
Shadowing	Log-normal distribution $\sigma_{\text{dB}} = 8$ dB
Channel	Rayleigh fading
Required end-to-end BER β_{req}	10^{-2}

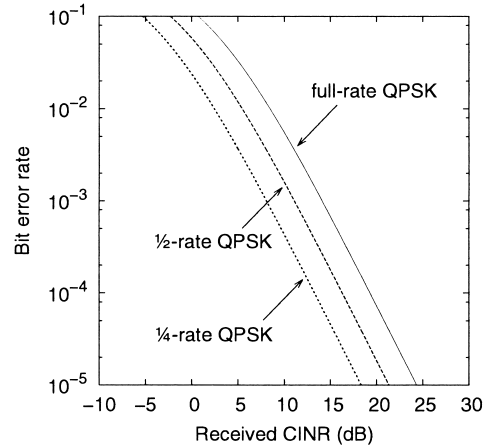


図 4 $1/2^k$ -rate QPSK の BER 特性
Fig. 4 BER for $1/2^k$ -rate QPSK.

数値評価した．評価結果を図 5, 図 6 に示す．適応シンボルレート制御の場合は full-rate に加えて 1/2-rate を用いる場合 ($K = 2$) と、更に 1/4-rate を用いる場合 ($K = 3$) の特性を示した．また、マルチホップ伝送の場合は中継候補局数 m を変えて特性を示した．本論文では、シングルセル環境において、設定された許容劣化率を満たすセル半径をカバレッジと呼ぶ．特に、full-rate QPSK を用いるシングルホップセルラにおいて許容劣化率を 10% とした場合のカバレッジを R_0 とし、この値を用いてセル半径 R を正規化する．

図 5 より、使用可能なシンボルレートの範囲の拡大により、カバレッジが拡大する．また、マルチホップ伝送の導入、更に中継候補局の増加に伴い、同様にカバレッジが拡大する．

このカバレッジ拡大は容易に予想可能であるが、重要なのはカバレッジ拡大に伴う周波数利用効率の変化を評価することである．図 6 から分かるように、カバレッジの拡大に伴い低レートユーザが増加するため、システムの周波数利用効率は低下していく．図 5 より許容劣化率を 1%, 及び 10% と設定した場合の各方式のカバレッジを求め、そのカバレッジに対する周波

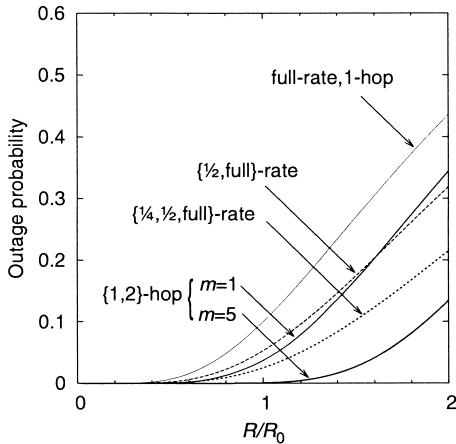


図 5 シングルセル環境における劣化率
Fig. 5 Outage probability in single-cell environments.

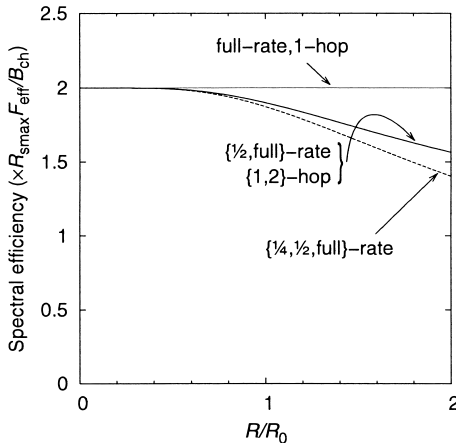


図 6 シングルセル環境における周波数利用効率
Fig. 6 Spectral efficiency in single-cell environments.

数利用効率を図 6 より求めたものを組み合わせて図 7 に示す。いずれの許容劣化率の場合でも、周波数利用効率を若干犠牲としてカバレッジの拡大が可能という点で、マルチホップ伝送は適応シンボルレート制御と同じ効果をもつが、中継候補局数 m が多くなるにつれ、シンボルレート制御よりもマルチホップ伝送の方が同じカバレッジに対する周波数利用効率が高くなること分かる。

5.2 マルチセル環境

セル繰返し数 L に対して劣化率と周波数利用効率を求めたものを、適応シンボルレート制御を行うセルラシステムについて図 8 に、マルチホップセルラシステムについて図 9 に示す。ただし、六角形セルに

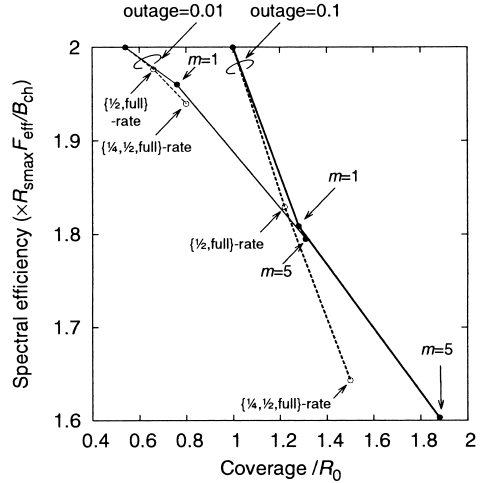


図 7 周波数利用効率とカバレッジの関係
Fig. 7 Spectral efficiency as a function of coverage.

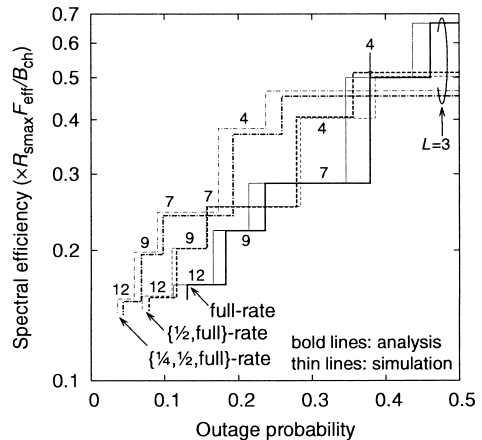


図 8 シンボルレート制御の導入が周波数利用効率と劣化率に与える影響
Fig. 8 Effects of introducing rate adaptation on outage probability and spectral efficiency.

においてセクタ化を行っていないため、セル繰返し数は $L = 3, 4, 7, 9, 12, \dots$ となる。また、セル繰返し数 L は不連続のため、求めた値は図 8、図 9 の階段状特性の左上の点に対応する。なお、干渉制限下で距離のべき乗に反比例する距離変動モデルを使用したため、特性はセル半径 R に依存しない。

図 8、図 9 より、シンボルレート制御やマルチホップ伝送の導入に伴い、劣化率が 0.2 以下であればおおむね周波数利用効率が増大している。一方、劣化率が 0.35 以上では周波数利用効率が低下し得るという、一見矛盾した結果が得られている。この理由は、低シン

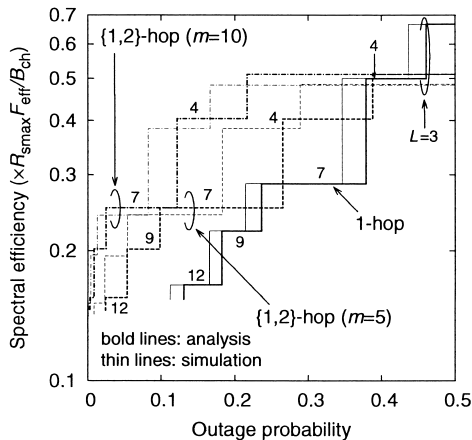


図9 マルチホップ伝送の導入が周波数利用効率と劣化率に与える影響

Fig. 9 Effects of introducing multihop transmission on outage probability and spectral efficiency.

ボルレート伝送やマルチホップ伝送の導入は、帯域利用率の低い発呼移動局の受付と、許容劣化率を満たすセル繰返し数の低減という二つの効果をもつことによる。ここで、前者は周波数利用効率を低下させ、後者は増大させる、相反する効果をもつ。セル繰返し数はセル当りのチャンネル数を決定するため、式 (14), (23) にも表されているようにすべての通信に対して効率を左右する。一方シングルセル環境と同様に、シングルホップ伝送が不可能な発呼移動局が多い、すなわち劣化率が大きい状況ほど、帯域利用率の低い発呼移動局を受け付ける数が多くなり、平均としての周波数利用効率を下げる。これは式 (13), (22) にも表されている。以上の結果として劣化率が 0.35 以上では、セル繰返し数の低減による周波数利用効率の増加よりも、帯域利用率の低い発呼移動局の受付による周波数利用効率の低下が大きくなると考えられる。

これらの図には、4.4 に示した数値評価とシミュレーションによる結果を併記した。ともに、先ほど述べた傾向の特性が得られており、シンボルレート制御やマルチホップ伝送による周波数利用効率の増大は数値評価を用いても確認可能と分かる。シングルホップ伝送時に生じる数値評価とシミュレーション結果の差異は、2.3 で述べた近似の精度が現れていると考えられる。一方、マルチホップ伝送により大きな差異が現れる理由は次のように考えられる。すなわち、マルチホップ伝送の導入は、所望波電力の増加と他セルからの干渉低下をもたらす。この干渉低下の理由は、中

継局の新たな送信により、送信局が一樣でなくセル中央寄りになるためである。数値評価では送信局を一樣と仮定したため、実際より干渉を多く見積もることとなり、結果としてシミュレーションと比較して同じセル繰返し数 L に対し、劣化率が低い評価結果が得られたと考えられる。

図 9 より、中継候補局数 m の増大に伴い、同じ劣化率に対して高い周波数利用効率を得られている。この理由は、同じセル繰返し数の場合に、中継候補数 m の増大に伴い所要 CINR を満たす経路の存在確率が増大し、劣化率を低くできることにある。また、ホップ数は変化していないため、劣化率が高い状況においても周波数利用効率の低下はない。

6. む す び

適応シンボルレート制御を行う TDMA セルラシステムの評価法と同様にして、TDMA マルチホップセルラシステムの劣化率及び周波数利用効率を導出した。数値評価により雑音制限下のシングルセル環境においては、周波数利用効率の低下と引換えにセルカバレッジが拡大可能であることを示した。この結果は、マルチホップ伝送はシンボルレート制御と同様に、単一の通信に関しては帯域利用率の低下と引換えに通信半径を広げることからも容易に推察できる。加えて、数値評価ないし計算機シミュレーションにより、干渉制限下のマルチセル環境においては、許容劣化率をより小さいセル繰返し数で実現可能なことから、周波数利用効率が増大し得ることを示した。また、いずれの効果もマルチホップ伝送はシンボルレート制御と同等だが、その効果は中継候補局数に伴って増加することを示した。

謝辞 貴重なコメントを頂いた (株) NTT ドコモワイヤレス研究所藤原淳氏に感謝する。本研究の一部は 21 世紀 COE 研究拠点形成費補助金 (課題番号 14213201)、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号 16206040) 及び特別研究員奨励費 (課題番号 16001178) によるものである。

文 献

- [1] G.N. Aggélou and R. Tafazolli, "On the relaying capability of next-generation GSM cellular networks," IEEE Pers. Commun. Mag., vol.8, no.1, pp.40-47, Feb. 2001.
- [2] V. Sreng, H. Yanikomeroglu, and D.D. Falconer, "Coverage enhancement through two-hop relaying in cellular radio systems," Proc. IEEE WCNC '02,

vol.2, pp.881-885, March 2002.

- [3] N. Esseling, H.S. Vandra, and B. Walke, "A forwarding concept for hiperlan/2," Proc. European Wireless 2000, pp.13-18, Sept. 2000.
- [4] A.N. Zadeh and B. Jabbari, "Performance analysis of multihop packet CDMA cellular networks," Proc. IEEE GLOBECOM '01, pp.2875-2879, Nov. 2001.
- [5] T. Rouse, I. Band, and S. McLaughlin, "Capacity and power investigation of opportunity driven multiple access (ODMA)," Proc. IEEE ICC '02, vol.5, pp.3202-3206, April 2002.
- [6] 藤原 淳, 竹田真二, 吉野 仁, 大津 徹, 山尾 泰, "ブロードバンド CDMA セルラ方式におけるマルチホップアクセス法のシステム容量増大効果," 信学論 (B), vol.J85-B, no.12, pp.2073-2079, Dec. 2002.
- [7] K. Yamamoto and S. Yoshida, "Analysis of reverse link capacity enhancement for CDMA cellular systems using two-hop relaying," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.7, pp.1712-1719, July 2004.
- [8] J. Cho and Z.J. Haas, "On the throughput enhancement of the downstream channel in cellular radio networks through multihop relaying," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.22, no.7, pp.1206-1219, 2004.
- [9] IEEE Std 802.16-2004, "IEEE standard for local and metropolitan area networks — Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems," Oct. 2004.
- [10] 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.
- [11] 三瓶政一, デジタルワイヤレス伝送技術, ピアソンエデュケーション, 2002.
- [12] 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.
- [13] N.C. Beaulieu and Q. Xi, "An optimal lognormal approximation to lognormal sum distributions," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.53, no.2, pp.479-489, March 2004.
- [14] 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 17 年 10 月 5 日受付, 18 年 1 月 12 日再受付)



山本 高至 (正員)

平 14 京大・工・電気電子卒. 平 16 同大学院修士課程了. 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. 京都大学博士 (情報学). 次世代移動通信システム, 無線アドホックネットワークなどの研究に従事. 平 16 PIMRC ベストスチューデントペーパーワード受賞.



楠田 厚史 (正員)

平 15 京大・工・物理卒. 現在, 同大学院情報学研究科修士課程在学中. 移動通信システムの研究に従事.



中野 剛 (学生員)

平 17 京大・工・電気電子卒. 現在, 同大学院情報学研究科修士課程在学中. 移動通信システムの研究に従事.



吉田 進 (正員:フェロー)

昭 46 京大・工・電子卒. 昭 48 同大学院修士課程了. 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 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 平 4 本会業績賞受賞.