



Title	マイクロセル・スロット付きアロハ方式におけるマクロダイバーシチ効果
Author(s)	外山, 昌之; 岡田, 実; 小牧, 省三
Citation	電子情報通信学会論文誌. B-I, 通信I-情報通信システム・理論. 1996, J79-B-I(5), p. 271-277
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/3382">https://hdl.handle.net/11094/3382</a>
rights	copyright©1996 IEICE
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# マイクロセル・スロット付きアロハ方式における マクロダイバーシチ効果

外山 昌之<sup>†</sup>      岡田 実<sup>†</sup>      小牧 省三<sup>†</sup>

Maximal Ratio Combining Macro Diversity for Micro-Cellular Slotted ALOHA

Masayuki TOYAMA<sup>†</sup>, Minoru OKADA<sup>†</sup>, and Shozo KOMAKI<sup>†</sup>

あらまし 本論文では、光ファイバマイクロセル方式においてスロット付きアロハ方式に最大比合成マクロダイバーシチを適用することにより、伝送特性を改善する新しいマイクロセルパケット伝送システムを提案し、その伝送特性の解析を行っている。提案システムでは、制御局において受信信号をすべて用いるのではなく、受信電力の高い信号を選択した後最大比合成を行う。このため、ハードウェア規模を増大させることなくダイバーシチを構成することが可能である。端末の分布がサービスゾーン内で一様な場合および分布に偏りがある場合について、スループット特性およびパケット送信成功確率を計算機シミュレーションにより解析する。その結果、提案ダイバーシチ受信方式により高いスループットが得られることを示す。また、端末分布が集中する領域においても高い送信成功確率が得られることを示す。

キーワード スロット付きアロハ方式, マクロダイバーシチ, 光ファイバマイクロセル方式, 最大比合成, スループット, パケット送信成功確率

## 1. まえがき

近年、移動通信においては、フレキシブルにマルチメディア情報を伝送できるパケット通信ならびに同じ周波数帯域を小ゾーンで繰り返し使用するマイクロセル方式が検討されている [1]~[5]。しかし、これまでのマイクロセル方式において、サービスゾーン内で同一周波数帯域を用いる方式の検討はあまりなされていない。これに対し筆者らは、マイクロセル方式においてスロット付きアロハパケット伝送方式を適用し、サービスゾーン内で同一周波数帯域を用いるシステムを対象に、そのスループット特性の解析を行っている [6],[7]。この解析において、サービスゾーン内で同一周波数帯域を用いるシステムを対象としており、端末のセル間移動に伴うハンドオフ制御は不要となる。また、隣接セルで同じ周波数帯域を使用する場合、同一チャネル干渉が増加するが、各端末の使用できる帯域は広くなり、移動通信においては捕捉効果 [1] が存在するため特性が改善される [6],[7]。更に、近年検討

が行われている光ファイバマイクロセル方式 [8] では、制御局において柔軟かつ複雑な制御が可能であるため、光ファイバマイクロセル方式にスロット付きアロハ方式を適用し、制御局においてダイバーシチ受信を行うことで伝送特性を改善できる可能性がある。光ファイバマイクロセル方式では信号処理は制御局で一括して行われるため、無線基地局間でダイバーシチを構成することが可能である。

そこで本論文では、マイクロセルにおけるスロット付きアロハ方式にマクロダイバーシチを適用し、スループット特性の解析を行う新しいシステムを提案する。提案システムにおいて各移動端末は全サービスゾーン内で同一周波数帯域を用いてパケット伝送を行う。マイクロセル無線基地局は光ファイバ無線リンクにより制御局と接続されており、受信した無線信号を復調することなくその形態のまま制御局へ伝送する。制御局においては、集められた基地局からの信号を用いて最大比合成ダイバーシチを行う。ここで、基地局より伝送された信号をすべて用いて最大比合成を行うとハードウェア規模が増大する。そこで、提案システムでは基地局より伝送された信号をすべて用いるのではなく、その中から希望信号について高い受信電力の得

<sup>†</sup> 大阪大学工学部電気工学科, 吹田市  
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita-shi, 565 Japan

られた基地局の信号を複数選択した後、最大比合成により希望信号に対して2乗平均誤差が最小となるよう重み付けを行う。このことにより、ハードウェア規模を増大させることなく最大比合成ダイバーシチを構成することができ、スループット特性の改善が期待できる。本論文では、計算機シミュレーションにより提案受信方式の伝送特性を解析する。まず、端末分布がサービスゾーン内で一様な場合のスループット特性の解析を行い、提案したダイバーシチ受信を行うことで高いスループットが得られることを示す。つぎに、端末分布に偏りがある場合について、パケットの送信成功確率の解析を行い、提案受信方式により端末分布が集中する領域においても高い送信成功確率が得られることを示す。

まず、2.では解析に用いるモデルおよび提案するダイバーシチ受信方式を説明する。3.で提案方式の解析を計算機シミュレーションにより行い検討を行う。そして、4.では本論文についてまとめる。

## 2. 提案システム

### 2.1 システムモデル

本稿において解析に用いるモデルを図1に示す。解析モデルでは各セルの中央に無線基地局があり、それぞれの基地局は制御局と光ファイバ無線リンク (FREx Link; Fiber and Radio Extension Link) により接続されている。各端末と基地局はタイムスロットに同期しており、各端末はスロット付きアロハ方式によりランダムにパケットの送信を行う。また、システムに与えられた周波数帯域を分割して隣接セルに異なる周波数帯域を割り当てるのではなく、帯域を分割することなく全サービスゾーン内で同一周波数帯域を用いる。

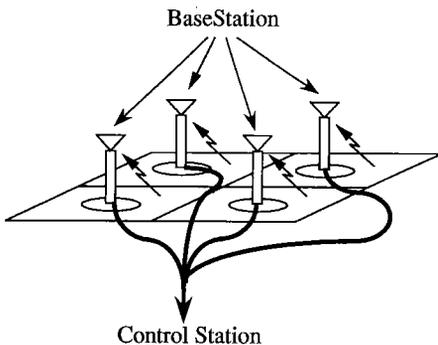


図1 システムモデル  
Fig.1 System model.

### 2.2 セル間ダイバーシチ受信方式

解析に用いるモデルでは全サービスゾーン内で同一周波数帯域を用いるため、同じ信号パケットがサービスゾーン内のすべての無線基地局で受信される。そこで、各セル内の基地局アンテナによりダイバーシチを構成する受信方式を提案する。以下、提案ダイバーシチ受信方式について述べる。端末から送信されたパケットはサービスゾーン内のすべての基地局で受信される。受信されたパケットは光ファイバを通して制御局に集められる。制御局ではダイバーシチを構成する基地局で得られた希望信号をすべて用いるのではなく、その中から希望信号について高い受信信号電力の得られた基地局の信号を  $N$  個選択する。そして、それぞれについて適切な重み付けを行ったのち合成することで干渉の除去を行う。このときの重み付けとして、提案受信方式では信号とその推定値との誤差の2乗平均が最小となるような最適な重み付けを行う。提案受信方式の概略を図2に示す。

以下、信号を等価低域系の複素信号として検討を行う。いま、希望送信信号を  $x$ 、 $M$  個の干渉信号を  $v_i, i = 1, \dots, M$ 、ダイバーシチを構成する基地局での受信信号ベクトルを  $N \times 1$  ベクトル  $y$  とする。このとき  $y$  は

$$y = \{y_k\}, \quad k = 1, \dots, N \tag{1}$$

$$y_k = D_k x + \sum_{i=1}^M U_{ik} v_i + N_k \tag{2}$$

となる。ここで、 $N$  はダイバーシチを構成する基地局の数、 $D_k, U_{ik}$  はそれぞれ  $k$  番目の基地局での希望信号、干渉信号の受信包絡線であり、 $N_k$  は  $k$  番目の

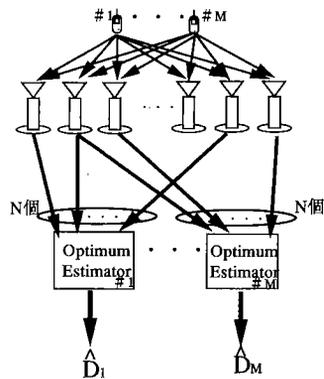


図2 ダイバーシチの構成  
Fig.2 N-branch diversity.

基地局での雑音成分である。このとき、基地局での全受信信号電力  $P_T$  は

$$P_T = P_0 + P_i + N \tag{3}$$

と表すことができる。ここで、 $P_0$ ,  $P_i$ ,  $N$  はそれぞれ、希望信号電力、干渉信号電力、雑音電力である。 $P_0$ ,  $P_i$ ,  $N$  は更に

$$P_0 = \alpha_0^2 e^{x_0} d_0^{-\gamma} P \tag{4}$$

$$P_i = \sum_k \alpha_k^2 e^{x_k} d_k^{-\gamma} P \tag{5}$$

と表される。ここで、 $\alpha_0$ ,  $\alpha_k$  はレイリー分布に従うランダム変数である。 $e^{x_0}$ ,  $e^{x_k}$  は対数正規シャドウイングによる電力変動を表し、 $x_0$ ,  $x_k$  は確率密度関数が

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_s^2}\right] \tag{6}$$

の正規分布に従うランダム変数である。 $\sigma_s$  は通信環境により 6 から 10 dB の値をとることが知られている [12]。  $d^{-\gamma}$  は距離変動による電力減衰を表し、 $d$  は端末と基地局との距離、 $\gamma$  は通信環境により 2 から 7 の値をとることが知られている [10]。  $\sigma_s$ ,  $\gamma$  はともに送受信間距離や使用する周波数帯域により異なるが、本論文では解析を簡単にするために、いずれも一定値 ( $\sigma_s = 6$  dB,  $\gamma = 4$ ) であるとする。これは市街地のように建築物による反射波が支配的な環境を考慮した場合適当な値である。また、 $P$  は端末の送信電力である。ここでは  $P$  はすべての端末で等しいものとする。

このとき、最適な重み付けである  $1 \times N$  ベクトル  $H_{opt}$  は次式で与えられる [11]。

$$H_{opt} = R_{xy} R_{yy}^{-1} \tag{7}$$

ここで、 $R_{xy}$ ,  $R_{yy}$  はそれぞれ  $1 \times N$  の  $x$  と  $y$  の相互相関行列、 $N \times N$  の  $y$  の自己相関行列であり、

$$R_{xy} = \frac{1}{2} E[xy^*] \tag{8}$$

$$R_{yy} = \frac{1}{2} E[yy^*] \tag{9}$$

である。 $E, *$  はそれぞれ集合平均、共役転置を表している。このとき、2乗平均誤差  $R_{ee}$  および平均 CINR (Carrier to Interference plus Noise Ratio; 信号対干渉および雑音電力比) は次式で与えられる。

$$R_{ee} = \frac{1}{2} E[ee^*] \tag{10}$$

$$= \frac{1}{2} E[(x - H_{opt}y)(x - H_{opt}y)^*] \tag{11}$$

$$= R_{xx} - R_{xy} R_{yy}^{-1} R_{yx} \tag{12}$$

$$\text{CINR} = \frac{R_{xx}}{R_{ee}} \tag{13}$$

このときの CINR があるしきい値を超えた場合、捕捉が生じパケットの送信が成功する。提案ダイバーシチ受信方式により干渉除去を行うことで受信 CINR が高くなり、捕捉が生じやすくなる。この結果スループット特性の改善が期待できる。

### 3. 提案方式の特性解析

本章では提案ダイバーシチ受信方式の伝送特性を計算機シミュレーションにより解析する。

#### 3.1 解析モデル

本稿で計算機シミュレーションを行う際のモデルを図3に示す。正方形セルからなる無限に広がる領域で計算を容易にするため、 $5 \times 5$  の 25 セルからなる領域に注目し、各正方形セルの中央に一つの基地局が存在し、各端末はスロット付きアロハ方式によりパケットの伝送を行うモデルを仮定し、検討を行う。マイクロセルではセル径は数百 m から数 km 程度であるが、今回の解析では、基地局とその基地局の存在するセル内の最も離れた点との距離を 1 に正規化し、基地局からの正規化距離が 1 である点において平均 SN 比が 20 dB となるよう送信電力および雑音電力を設定する。このように設定すれば、受信電力は距離の 4 乗に反比例するため、一般性を失うことなく正規化した距離により解析を行うことができる。領域内の端末数は十分多いものとし、各スロットの先頭での送信要求生起数

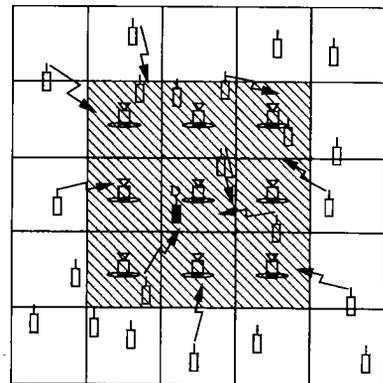


図3 シミュレーションモデル  
Fig.3 Simulation model.

はポアソン分布に従うとする。提案方式ではサービスゾーン内のすべての送信端末が干渉となるが、信号電力の距離変動を考慮し、考える 25セルの外の領域の端末からの干渉は無視できるものとする。解析では上り回線のみ考慮し、各端末、基地局はタイムスロットと同期がとれているものとする。信号パケットの通信路での電力変動は、距離変動、対数正規シャドウイング、レイリーフェージングによるものとし、これに雑音を加わるとする。

3.2 ダイバーシチの構成

図3に示すモデルにおいて、中央のセルで発生した希望信号に対しその周囲の斜線部の9セル内の基地局によりセル間ダイバーシチを構成する。制御局では九つの基地局で得られた受信信号のうち、希望信号について高い受信電力の得られた基地局の信号を複数個用いてダイバーシチ受信を行う。

希望信号パケットの送信成功条件は、ダイバーシチ受信後の CINR があるしきい値を上回ることとする。すなわち、しきい値を  $C$  とすると、

$$CINR = \frac{R_{xx}}{R_{ee}} \geq C \tag{14}$$

このとき、希望信号パケットは誤りなく受信されるものとする。

3.3 解析結果

計算機シミュレーションによる解析の結果を示す。解析におけるパラメータとして、対数正規分布シャドウイングの標準偏差として  $\sigma_s = 6\text{dB}$ 、距離変動のパラメータとして  $\gamma = 4$  とする。いずれも、実際には送受信間距離や使用する周波数帯域により異なるが、解析を簡単にするために一定値とする。また、 $C = 12\text{dB}$  とする。

図4に端末分布が一様な場合のセル当りのトラヒック量に対するスループット特性を示す。セル当りのトラヒック量は各タイムスロットでのセル当りの平均送信要求生起数として定義され、スループットはセル当りのトラヒック量とそのときの送信成功確率との積として定義される。図より、提案するダイバーシチ受信を行う場合、ダイバーシチ受信を行わない場合に比べて高いスループットが得られており、提案方式により特性が改善される。

これはセル当りのトラヒック量が1以下の領域で顕著であり、例えばトラヒック量が0.7の場合、ブランチ数9のダイバーシチ受信を行うことでダイバーシチ受信を行わない場合に比べて3倍近いスループットが

得られている。ブランチ数9の場合を除いて、最大スループットがスロット付きアロハ方式の理論値より低い値となっているが、これは隣接セルからの同一チャネル干渉が生じているためである。セル当りのトラヒック量1で比較した場合、スロット付きアロハ方式のスループットの理論値では  $1/e = 0.37$  であるが、提案方式ではこのとき考慮する 25セル内で平均 25 端末が送信していることになり、これらがすべて干渉局となる。このためスループット値が低下している。また、このときのパケットの送信成功確率を図5に示す。これより、ブランチ数を増やすことでトラヒック量が增大した場合でも、高い送信成功確率が得られることがわかる。つぎに、ダイバーシチを構成するブランチ数に対するスループットの最大値を図6に示す。グラフでは、ダイバーシチ受信を行わない場合を1としてい

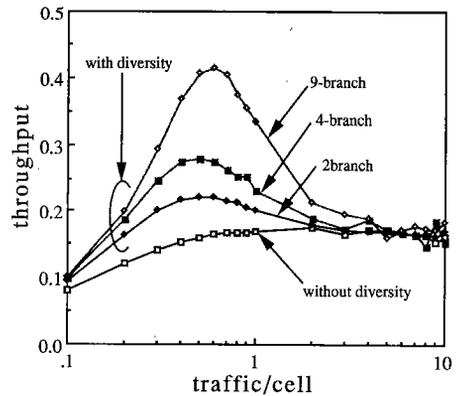


図4 スループット特性  
Fig. 4 Throughput of proposed system.

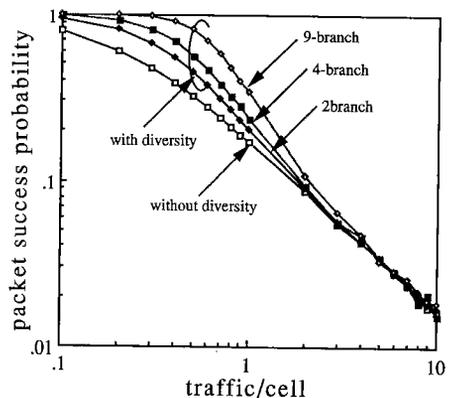


図5 パケット送信成功確率  
Fig. 5 Packet success probability.

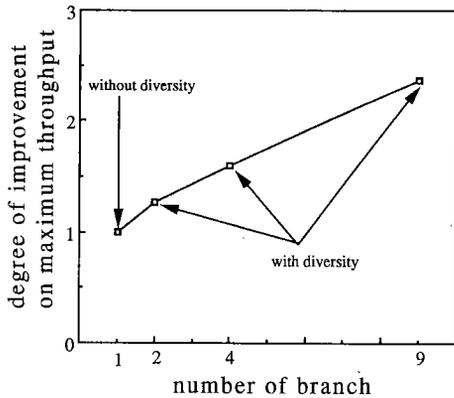


図6 ブランチ数に対する最大スループット  
Fig.6 Number of branch vs. maximum throughput.

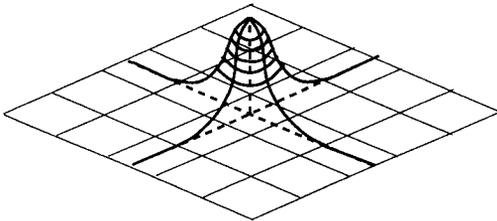


図7 端末分布のモデル  
Fig.7 Non-uniform distribution model of terminals.

る。これより、ダイバーシチ受信による改善効果はダイバーシチを構成するブランチ数が増えるほど大きくなり、その改善度はほぼブランチ数に比例することがわかる。トラヒック量が大きくなるにつれてダイバーシチ受信によるスループットの改善効果は減少する。これはトラヒック量が増加することで干渉量がダイバーシチ受信により除去可能な量を上回ってしまうためである。

つぎに、端末分布に偏りがある場合について解析を行う。図7に示すような、端末分布が2次元正規分布に従う場合を考える。分布の中心は考慮する25セルの中央セルであるとする。このような端末分布について、トラヒック量を固定した場合の、分布の標準偏差に対する信号の送信成功確率を図8、図9に示す。分布の標準偏差はセル幅で正規化した値である。端末分布が一様である場合と異なり、セルごとにトラヒック量に差が生じるため、セル当りのトラヒック量と実際のセルでのトラヒック量は異なっている。このため、セル当りのトラヒック量での比較は適当ではなく、ここではトラヒック量は考慮する25セルの領域にお

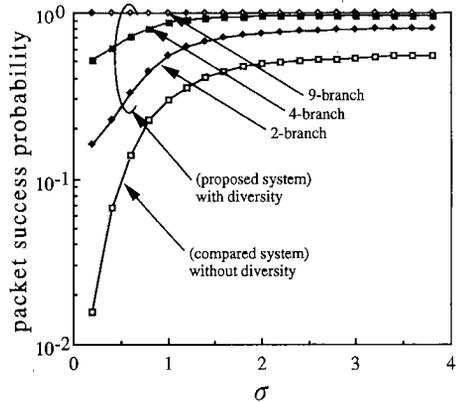


図8 送信成功確率 (25セル当りのトラヒック量 = 5.0)  
Fig.8 Sigma vs. packet success probability: traffic / 25 cell = 5.0.

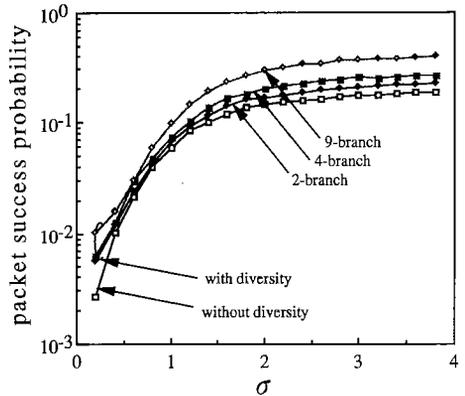


図9 送信成功確率 (25セル当りのトラヒック量 = 20.0)  
Fig.9 Sigma vs. packet success probability: traffic / 25 cell = 20.0.

る全トラヒック量であるとする。例えば、トラヒック量5というのは25セル内での各タイムスロットでの平均の全送信数が5であるという意味である。パケットは式(14)を満たす場合、すなわちダイバーシチ受信後のCINRがしきい値を上回る場合、送信に成功するものとする。この解析は分布の中心のセルでの評価であり最悪値評価となっている。従って、周囲の端末分布が疎な領域ではより良い特性が得られることが期待できる。

図より、端末分布に偏りが存在する場合でも提案ダイバーシチ受信方式により干渉の除去が可能であることがわかる。グラフでは標準偏差の値が小さいほど分布が中央セルに集中していることを示しているが、そのような場合でもブランチ数を増やすことにより高い

送信成功確率を得ることができることがわかる。つぎに、図 10 に分布の標準偏差が 1 の場合におけるトラフィック量に対する送信成功確率を示す。また、図 11 に分布の標準偏差が 1 の場合におけるダイバーシチを構成するブランチ数に対する、ダイバーシチ受信を行った場合の送信成功確率を示す。グラフでは、ダイバーシチ受信を行わない場合を 1 としている。これより、領域内のトラフィック量が小さい場合には、ダイバーシチ受信を行うことにより大きく送信成功確率を改善できることがわかる。特に、ブランチ数を 9 とした場合にはトラフィック量が 15 まではダイバーシチ受信を行わない場合に比べて 2 倍以上の送信成功確率が得られている。逆に、トラフィック量が増えるとブランチ数を増やしてもあまり改善効果が得られず、トラフィック量

が 25 の場合ではブランチ数 9 の場合でもほとんどダイバーシチ受信を行わない場合と変わらない送信成功確率となっている。この場合は干渉の除去が不十分であると言える。

#### 4. む す び

本論文では移動通信におけるマイクロセル方式において、サービスゾーン全域で同一周波数帯域を使用しスロット付きアロハ方式を用いてランダムアクセスを行う方式において特性を改善するためのセル間ダイバーシチ受信方式を提案し、その解析を計算機シミュレーションにより行った。その結果、提案ダイバーシチ受信方式を用いることで端末分布が一様である場合、偏りがある場合のいずれも大幅な特性の改善が得られることを示した。端末分布が一様な場合にはダイバーシチを構成するブランチ数を増やすことで大きくスループット特性が改善されることを示した。また、端末分布が 2 次元正規分布に従う場合にはトラフィック量が小さい領域では送信成功確率が大きく改善されることを示した。提案方式により伝送速度が変化するマルチメディア情報をフレキシブルに伝送することが可能となる。提案方式の実現については、信号レベルの測定あるいは推定が最も困難な部分である。CDMA におけるマルチユーザー一括受信や干渉キャンセラ等の適用が考えられるが、処理速度や推定の精度等についての検討が必要である。また、本論文での解析では  $\gamma$ ,  $\sigma_s$  を一定であるとみなしているが、実際は送受信間距離や使用する周波数帯域により異なるため、これらの点を考慮した解析が必要である。

#### 文 献

- [1] L.G. Roberts, "Aloha Packet System with and without Slot and Capture," *Comput. Commun. Rev.*, vol.5, pp.28-42, April 1975.
- [2] J.C. Arnbak, et al., "Capacity of Slotted ALOHA in Rayleigh-Fading Channels," *IEEE J.Select. Areas. Commun.*, vol.SAC-5, no.2, Feb. 1987.
- [3] I.M. Habbab, et al., "ALOHA with Capture Over Slow and Fast Fading Radio Channels with Coding and Diversity," *IEEE J.Select. Areas. Commun.*, vol.7, no.1, Jan. 1989.
- [4] 原, 他, "パーソナルパケット通信に向けてのマルチセル構成に関する基礎検討," *信学 '94 秋大*, SB-4-4, pp.474-475, Sept. 1994.
- [5] 榑原, 芹澤, "複数の基地局を備えたスロット付きアロハ方式の捕そく効果を考慮した特性評価," *信学論 (B-II)*, vol.J73-B-II, no.11, pp.612-620, Nov. 1990.
- [6] 外山, 他, "マイクロセル構成に適した無線パケット伝送

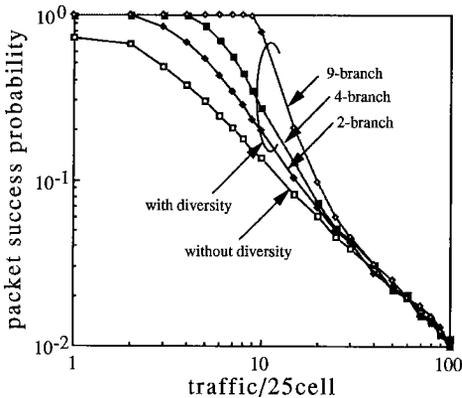


図 10 トラフィック量に対する送信成功確率  
Fig.10 Traffic vs. packet success probability.

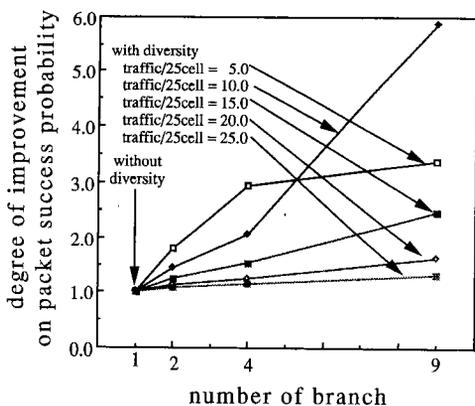


図 11 送信成功確率の比  
Fig.11 Improvement of packet success probability.

- 方式,” 信学総大, B-544, March 1995.
- [7] 外山, 他, “マイクロセルにおけるスロット付きアロハパケットのセル間ダイバーシチ受信方式,” 信学技報, vol.95, no.161, 1995.
- [8] S. Komaki, K. Tsukamoto, S. Hara, and N. Morinaga, “Proposal of Fiber and Radio Extension Link for Future Personal Communications,” Microwave and Optical Technology Letters, vol.6, no.1, Jan. 1993.
- [9] J.H. Winters, “Optimum Combining for Indoor Radio Systems with Multiple Users,” IEEE Trans. Commun., vol.COM-35, no.11, Nov. 1987.
- [10] 加地, 明山, “ビル街における UHF 帯低アンテナ高基地局電波伝搬特性,” 信学論 (B), vol.J70-B, no.5, pp.602-610, May 1987.
- [11] S.J. Orfanidis, “Optimum Signal Processing,” Macmillan Publishing Company, 1988.
- [12] 奥村, 進士, “移動通信の基礎,” 電子情報通信学会, 1986.  
(平成 7 年 9 月 25 日受付, 8 年 1 月 8 日再受付)



外山 昌之 (学生員)

平 7 阪大・工・電気卒。現在、同大学院・工・博士前期課程在学中。移動通信の研究に従事。



岡田 実 (正員)

平 2 電通大・電気通信・通信卒。平 4 阪大大学院・工・博士前期課程了。現在、阪大・工・電気助手。移動通信における信号処理、符号化変調に関する研究に従事。IEEE 会員。



小牧 省三 (正員)

昭 45 阪大・工・通信卒。昭 47 同大学院修士課程了。昭 47 日電公社 (現, NTT) 入社。平 2 阪大・工・通信助教授, 平 4 同電気・教授。デジタル無線通信方式, 主として無線中継方式の研究に従事。工博。昭 50 年度本会論文賞受賞。