

# 並列中継経路を用いる 2 ホップ OFDMA バーチャルセルラネットワークのチャンネル容量

石田 仁志<sup>†</sup> 工藤 栄亮<sup>‡</sup> 安達 文幸<sup>‡</sup>

東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: <sup>†</sup> ishida@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup> {kudoh, adachi}@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 次世代システムでは高速伝送サービスの提供が期待されているが、送信電力が膨大になってしまうことが指摘されている。マルチホップ中継を適用すれば、中継に用いる送信電力の総和をシングルホップ伝送より低減可能である。本論文では、送信電力の低減と伝送特性の改善を同時に達成するために、OFDMA を利用して端末と基地局との間を複数の並列経路（各経路のリンクは 1 サブキャリアを割り当てる）で構成する並列中継伝送を提案している。すべての経路のサブキャリアの組合せを探索し、チャンネル容量を最大とする組合せを割り当てる全探索法では膨大な探索数になる。そこで、探索数を削減した逐次割当て法について検討している。提案した並列中継経路を用いるときのチャンネル容量を求め、協調ダイバーシチ及び従来のシングルホップネットワークと比較している。

**キーワード** バーチャルセルラネットワーク, サブキャリア割当て, 経路割当て, 並列中継, 協調ダイバーシチ, チャンネル容量, OFDMA

## Channel Capacity in 2-hop OFDMA Virtual Cellular Network using Parallel Relay Route

Hitoshi ISHIDA<sup>†</sup> Eisuke KUDOH<sup>‡</sup> and Fumiyuki ADACHI<sup>‡</sup>

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University  
6-6-05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: <sup>†</sup> ishida@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup> {kudoh, adachi}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** In the next generation mobile communication systems, high speed data services are expected. However, unacceptable large transmit power may be required. Multi-hop technique can reduce the total transmit power for relay transmission compared with single hop transmission. In this paper, we propose the parallel relay transmission using orthogonal frequency division multiple access (OFDMA), in which the multiple parallel routes (one subcarrier is allocated to each link) are constructed between mobile terminal and base station in order to reduce the transmit power and improve the transmission performance. Full search allocation, where all combinations of subcarriers and routes are examined and the best combination which gives the maximum channel capacity is searched, requires a prohibitively large number of searching. Therefore, we study a successive allocation to reduce the number of searching. We evaluate the channel capacity of proposed parallel relay transmission and compare it, cooperative diversity and conventional single hop network.

**Keywords** Virtual cellular network, Subcarrier allocation, Route allocation, Parallel relay transmission, Cooperative diversity, Channel capacity, OFDMA

### 1. まえがき

次世代移動無線システムでは、高速データ通信の実現が期待されている。しかしながら、所要伝送品質を確保するには伝送速度に比例した送信電力が必要となるため、次世代システムにおける送信電力は許容できないほどにまで増大してしまう。送信電力を増大することなく、伝送速度を高速化するためには通信可能なエリアを縮小せざるを得ない。

この問題を解決するための技術として、マルチホップ通信が知られている[1, 2]。筆者らは、図 1 に示すようなマルチホップバーチャルセルラネットワーク (VCN) を提案してきた[3, 4]。VCN では、移動局 (MT) から送信された信号はセル内に分散配置した無線ポー

ト (WP) にて中継され、基地局に対応する中央無線ポート (CP) へと転送される。VCN ではこのマルチホップ通信を用いることで、通信エリアの拡大が可能である。現行のシングルホップ CN からの移行の初期段階としては、最大ホップ数を 2 ホップに限定した VCN を用いることが考えられる。

本論文では、送信電力の低減と伝送特性の改善を同時に達成するために、端末と基地局との間を複数の並列経路（各経路のリンクは 1 サブキャリアを割り当てる）で構成する OFDMA 並列中継伝送を提案している。

チャンネル容量を最大にするためには、すべての経路についてサブキャリアの組合せを探索し、最適な組合せを求める全探索を行う必要があるが、それには膨大な組合せの探索が必要となってしまう。そこで、本論

文では、探索数を削減した逐次割当て法を提案している。数値計算によりそのチャンネル容量を求め、並列中継伝送と協調ダイバーシチ[5-7]及び1ホップ通信の比較を行う。また、全探索法と逐次割当て法を比較する。

本論文の構成は以下のようになっている。2章では並列中継伝送を提案し、経路、サブキャリア割当て法として全探索法及び逐次割当て法について述べる。次いで、3章にてチャンネル容量の数式表現について述べる。4章にて数値計算によりチャンネル容量を求め、5章にてまとめる。

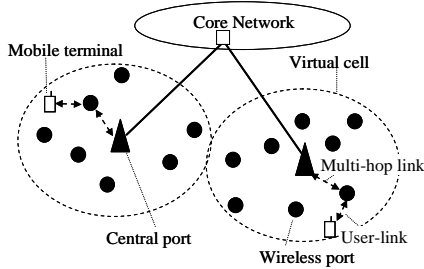


図1 2ホップバーチャルセルネットワーク

## 2. OFDMA 並列中継伝送

本論文では、下りリンク伝送を対象としたシングルユーザ環境（つまり他ユーザ干渉なし）を仮定している。並列中継伝送では、周波数分割複信（FDD）中継を用いる。WP 数を  $M$  個、OFDMA サブキャリア数を  $N_c$  とし、その中からユーザ当り  $N_d$  個のサブキャリアを用いて並列中継伝送を行うものとする。図2にその概念図を示す。

WP 数を2個とし、OFDMA サブキャリア数が  $N_c=8$  で並列中継伝送に用いるサブキャリア数を  $N_d=4$  とする（つまり物理的経路数は2個であるが、4個の経路を用いる並列中継伝送）。このような並列中継伝送では、協調ダイバーシチと違って、同一データを複数の経路を用いて送信、合成することはない。すべての物理経路のすべてのサブキャリアの伝搬路状態を比較し、その中から  $N_d$  個のサブキャリアを選択し各経路に割り当てる。

例えば、図2に示すように、データ  $d_0$  を中継する第0経路の第1リンクおよび第2リンクサブキャリアの組み合わせは（#0, #1）である。第0経路は WP#1 を経由する。また、データ  $d_2$  を中継する第2経路のサブキャリアの組み合わせは（#4, #7）である。この経路は WP#2 を経由する。このようなサブキャリア割当てのためにはすべての物理経路の OFDMA チャンネル情報を CP へ集める必要がある。本論文では、サブキャリア割当て法として全探索法と逐次割当て法を提案する。

### 2.1. 全探索法

$M$  個の物理経路 ( $R_1 \sim R_M$ ) の第1及び第2リンクにはそれぞれ合計で  $N_c M$  個のサブキャリアの候補がある。また直接経路  $R_0$  にも  $N_c$  個のサブキャリアの候補がある。これらの中から  $N_d$  個の並列経路のサブキャリアを割り当てることが必要である。厄介なことは、直接経路では1個のサブキャリアでよいこと、2ホップ経路で

は2個のサブキャリアを割当てなければならないことであり、サブキャリア組合せの数が膨大になる。

全探索法では  $N_d$  個の並列経路のすべてのサブキャリア組合せについてチャンネル容量を計算し、チャンネル容量の和が最大となる組合せを探索する。サブキャリア割当て結果の例を表1に示す。2行目の  $R_i$  は  $i$  番目の物理経路（WP 番号）を表し、3行目の # $k$  はそれぞれ第1ホップ（CP-WP リンク）、第2ホップ（WP-MT リンク）に割当てられたサブキャリア番号を表す。ただし、 $R_0$  は1ホップ（直接）通信の経路を表し、割当てサブキャリアは1個である。

以上のように、1ホップの経路では1つのサブキャリアのみ必要となること（例：表1中の経路  $d_0$ ）や、ホップ数が同じ場合、データを入れ替えて（例：表1中の経路  $d_1 \sim d_3$  を入れ替えた場合）も同一のチャンネル容量となることを考慮すると、WP が  $M$  個のとき、 $N_d$  個の並列経路を用いる中継通信に対して取りうる経路とサブキャリアの組合せ（探索数）は次式で表せる。

$$\sum_{i=0}^{N_d} M^{N_d-i} N_c P_{2N_d-i} / (N_d - i)! / i! \quad (1)$$

図3に OFDMA サブキャリア数  $N_c$  と探索数との関係を示す。ここで、 $N_d/N_c=0.5$  としている。全探索法はチャンネル容量を最大化できるものの、サブキャリア数が多くなると最適な組合せを見つけるために膨大な数の探索が必要となってしまうことが図3よりわかる。

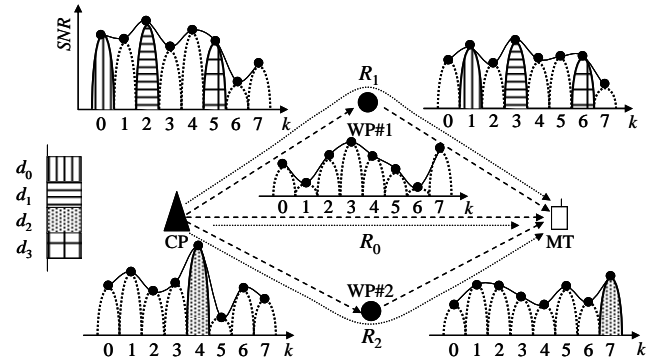


図2 並列中継伝送

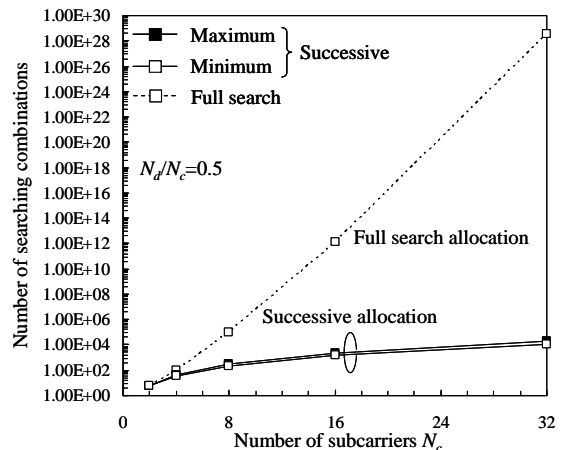


図3 全探索法と逐次割当て法の探索数

表 1 サブキャリア割当ての例

Route		$d_0$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
Physical route		$R_0$	$R_2$	$R_1$	$R_1$
Subcarrier		#4	#2 #4	#3 #5	#1 #6
1 <sup>st</sup> hop link	2 <sup>nd</sup> hop link				

## 2.2. 逐次割当て法

本論文で提案する 2 ステップ逐次割当て法の手順を以下に示す。

(ステップ 1) 物理経路( $R_0 \sim R_M$ )の中でまだ割り当てられずに残っているサブキャリアの組み合わせについてチャンネル容量を計算し、チャンネル容量を最大とするサブキャリアの組を一組求め、新しい経路に割当てる。

(ステップ 2) 割当てられた並列経路数が  $N_d$  より小さい場合、割当てたサブキャリアを探索の候補から除きステップ 1 に戻る。  $N_d$  個のすべての経路が割当てられたときに、割当てが終了する。

図 4 に例を示す。まず、(a)のようにチャンネル容量が最大となる物理経路  $R_1$  のサブキャリア組み合わせ (#2, #3) を経路  $d_0$  に割当てる。次に、このサブキャリア #2 と #3 を除いた中でチャンネル容量が最大となる物理経路  $R_1$  のサブキャリアの組み合わせ (#0, #1) を経路  $d_1$  に割当てる (図 4(b))。以下同様にして、  $N_d$  個の経路にサブキャリアを割当てるまで同様の手順を繰り返す (図 4(c))。

逐次割当て法は全探索法のように  $N_d$  個の経路のサブキャリア組合せを同時に求めるのではなく、1 経路ずつサブキャリアの組み合わせを求める操作を繰り返す。そのため、  $N_d$  個の経路のチャンネル容量の和は必ずしも最大とならないが、全探索法に比べて大幅に探索数を削減できる。逐次割当て法において探索数が最大となるのは、割当てられる経路がすべて 1 ホップであった場合であり、1 つの経路にそれぞれ 1 つのサブキャリアを割当てるため、ステップ 2 において探索の候補から除かれるサブキャリア数は 1 個となる。したがって探索数の最大値は次式のようになる。

$$\sum_{i=0}^{N_d-1} \{(N_c - i) +_{N_c-i} P_2 \cdot M\} \quad (2)$$

第 1 項が 1 ホップの探索数、第 2 項が 2 ホップの探索数である。

一方、探索数が最小となるのはすべて 2 ホップの経路が割当てられる場合であり、1 つの経路にそれぞれ 2 個のサブキャリアを割当てるため、ステップ 2 において探索の候補から除かれるサブキャリア数は 2 個となる。したがって、探索数の最小値は次式のようになる。

$$\sum_{i=0}^{N_d-1} \{(N_c - 2i) +_{N_c-2i} P_2 \cdot M\} \quad (3)$$

式(2)及び(3)より計算した逐次割り当て法の探索数

を図 3 に示す。全探索法と比較すると、サブキャリア数が多い場合、大幅に探索数を低減できることがわかる。また、逐次割当て法の探索数の最大値と最小値の差は 60% 程度である。

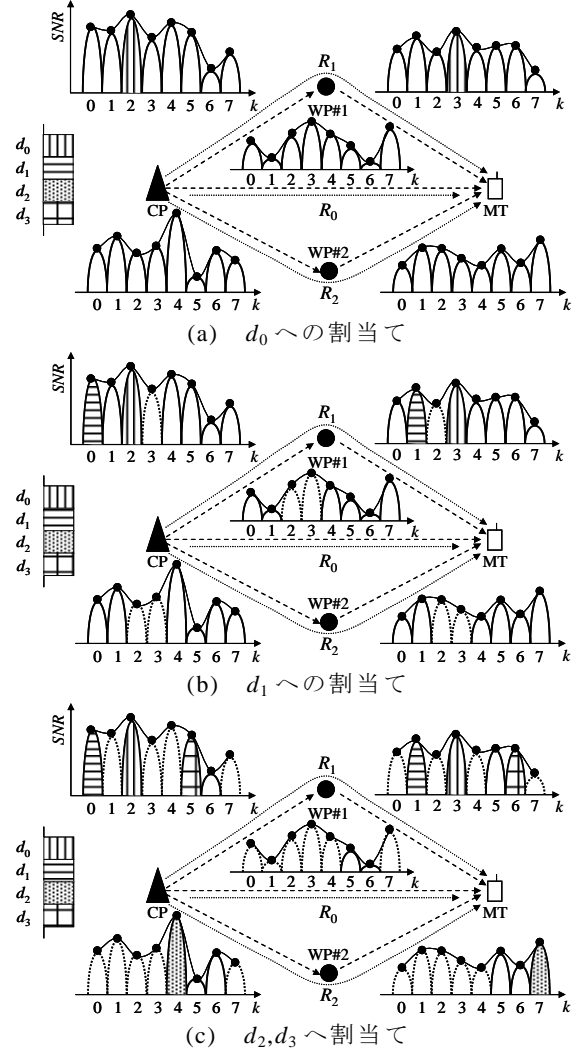


図 4 逐次割当て法の割当て例

## 3. チャンネル容量の数式表現

### 3.1. 並列中継伝送

$N_d$  個の並列経路 (1 サブキャリア/経路) を用いる並列中継伝送では、ユーザ当りのチャンネル容量の総和は次式で表される [8, 9].

$$C = \frac{1}{N_c} \sum_{d=0}^{N_d-1} \log_2 \{1 + SNR(d)\} \quad (4)$$

ここで、  $SNR(d)$  は第  $d$  経路の実効受信 SNR であり次式で与えられる。

$$SNR(d) = \begin{cases} SNR_{0-u}(k_{d,1}) & \text{if } m(d)=0 \\ \min\{SNR_{0-m(d)}(k_{d,1}), SNR_{m(d)-u}(k_{d,2})\} & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、  $m(d)$  は第  $d$  経路に割当てられた WP 番号である。ただし  $m(d)=0$  は CP, すなわち 1 ホップ通信を示

す.  $k_{d,1}$  及び  $k_{d,2}$  はそれぞれ第  $d$  経路の第 1 ホップリンク及び第 2 ホップリンクに割当てられたサブキャリア番号であり,  $SNR_{0-u}(k)$ ,  $SNR_{0-m(d)}(k)$ , 及び  $SNR_{m(d)-u}(k)$  はそれぞれ, CP-MT 間, CP-WP# $m(d)$  間及び WP# $m(d)$ -MT 間の第  $k$  サブキャリアの受信 SNR である.

移動無線伝搬路は距離に依存する伝搬損失, 対数正規分布に従うシャドウイング損失及びマルチパスフェージングで特徴付けられる. 本論文では, フェージングは遅延時間の異なる  $L$  個のパスから構成される周波数選択性フェージングであるものとする. このとき, 各リンクの受信 SNR は次式で与えられる.

$$SNR_{i-j}(k) = \frac{P_t}{N_d H N} r_{i-j}^{-\alpha} 10^{-\eta_{i-j}/10} |H_{i-j}(k)|^2 \quad (6)$$

ここで,  $P_t$  は全経路の総送信電力,  $H$  はホップ数,  $N$  はサブキャリア当りの雑音電力,  $\alpha$  はパスロス指数,  $r_{i-j}$ ,  $\eta_{i-j}$ ,  $H_{i-j}(k)$  はそれぞれ, WP# $i$ -WP# $j$  (又は MT) 間の距離, シャドウイング損失及びチャンネル利得である.

### 3.2. 協調ダイバーシチ

時分割複信 (TDD) 中継を用いる協調ダイバーシチを考える. 第 1 時間スロットにおいて CP から各 WP に信号を送信し, 第 2 時間スロットにおいて各 WP からの信号が MT にて最大比合成となるように送信するものとする. 協調ダイバーシチのチャンネル容量は次式で与えられる [8].

$$C = \frac{1}{2} \min \{ C_{WP}^{\min}, C_u \} \quad (7)$$

ここで,  $C_u$  は MT におけるチャンネル容量,  $C_{WP}^{\min}$  は CP と各 WP 間のチャンネル容量の中で最小のチャンネル容量を示す. すなわち, CP-WP# $m$  間のチャンネル容量を  $C_m$  とすると

$$C_{WP}^{\min} = \min_{m \in \{1, 2, \dots, M\}} (C_m) \quad (8)$$

である.  $C_u$ ,  $C_m$  はそれぞれ次式で与えられる.

$$\begin{cases} C_u = \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \log_2 \left( 1 + \frac{P_t}{N_c N} \sum_{m=1}^M r_{m-u}^{-\alpha} 10^{-\eta_{m-u}/10} |H_{m-u}(k)|^2 \right) \\ C_m = \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \log_2 \left( 1 + \frac{P_t}{N_c N} r_{0-m}^{-\alpha} 10^{-\eta_{0-m}/10} |H_{0-m}(k)|^2 \right) \end{cases} \quad (9)$$

## 4. 数値計算結果

数値計算によりチャンネル容量を求めた. システムモデルを図 5 に示す. シングルユーザ環境 (つまり他ユーザ干渉なし) を仮定し, WP は CP と MT 間の距離を  $r_0$  としたときに, CP からの距離が  $r$  ( $0 < r/r_0 < 1$ ) の位置に  $M$  個存在するものとする. 各 WP 間の距離は CP-MT 間の距離に比べて十分小さいものとし, 各 WP と CP, MT との距離は  $r$ ,  $r_0 - r$  であるものとする. また, それぞれ独立なシャドウイングを受けるものと仮定する. パスロス指数を  $\alpha = 3.5$  とし, 8 個のパス ( $L = 8$ ) から構成される等平均電力遅延プロファイルの周波数

選択性レイリーフェージングを仮定する.

サブキャリア数  $N_c$  が増加すると, 全探索法の探索数が膨大となるため, 本論文では, サブキャリア数  $N_c = 8$ , 並列経路 (1 経路の 1 リンク当り 1 サブキャリア) 数を  $N_d = 4$  とする. ただし, 1 ホップ通信及び協調ダイバーシチではすべてのサブキャリアを用いて伝送するものとする. したがって, 並列中継 (FDD) と協調ダイバーシチ (TDD) の伝送効率は共に 1 ホップ通信の 1/2 となる.

1 ホップ通信時のセル端における平均受信 SNR を 0dB とする CP の総送信電力を  $P_0$  とする. すなわち

$$\frac{P_0 r_0^{-\alpha}}{N_c N} = 1 \quad (10)$$

であり,  $P_0$  との相対値で総送信電力  $P_t$  を表す. 並列中継伝送と協調ダイバーシチ及び 1 ホップ通信の総送信電力  $P_t$  は等しいものとする.

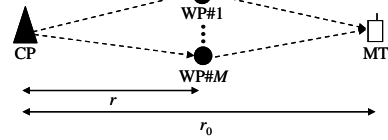


図 5 システムモデル

### 4.1. 平均チャンネル容量

図 6 に正規化総送信電力  $P_t/P_0$  対平均総チャンネル容量を示す. ここで, シャドウイングは無視し (標準偏差  $\sigma = 0$  dB), WP 数  $M = 2$ ,  $r/r_0 = 0.5$  である. 並列中継伝送では, 送信電力が小さいとき 1 ホップ通信に比べチャンネル容量を改善できることがわかる. これは, 送信電力が小さいとき, 中継伝送及びサブキャリア割当てによって SNR を改善できるためである.

しかし, FDD を用いる 2 ホップ通信では, 1 ホップ通信の 2 倍のサブキャリアが必要となるため最大で  $N_d = N_c/2$  サブキャリアの並列伝送しか行うことができない. 一方, 1 ホップ通信では  $N_c$  個すべてのサブキャリアを用いることができる. したがって, 並列中継の伝送効率は 1 ホップ通信の 1/2 になる (式(4)を参照). 送信電力が大きい場合, SNR の改善効果よりも伝送効率が 1/2 になる影響の方が大きいため, 1 ホップ通信の方がチャンネル容量が大きくなる.

図 6 より並列中継伝送が協調ダイバーシチに比べチャンネル容量を大きくできることがわかる. この理由を以下に考察する.

図 7 は第 1 ホップリンク, 第 2 ホップリンク (WP, MT におけるチャンネル容量) 及びユーザ当りのチャンネル容量の確率密度関数を示したグラフである. ここで,  $P_t/P_0 = 10$  dB, 並列中継では逐次割当て法を用いている. 協調ダイバーシチでは, 最大比合成を行う第 2 ホップリンクのチャンネル容量は大きくなるが, 合成を行わない第 1 ホップリンクのチャンネル容量がユーザ当りのチャンネル容量の改善に限界を与えていることがわかる.

一方, 並列中継伝送では, 第 1 ホップリンク, 第 2 ホップリンクのチャンネル容量がほぼ同等となっており,

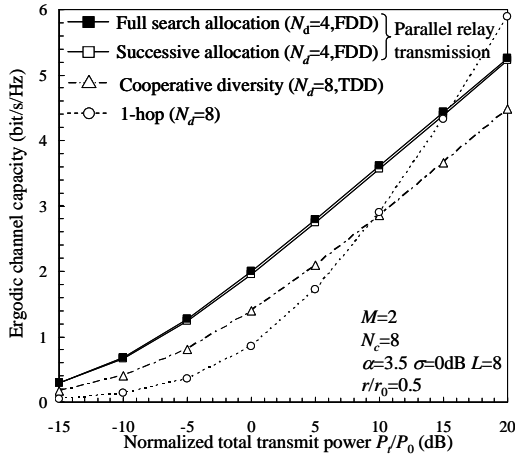


図 6 総送信電力対平均チャンネル容量

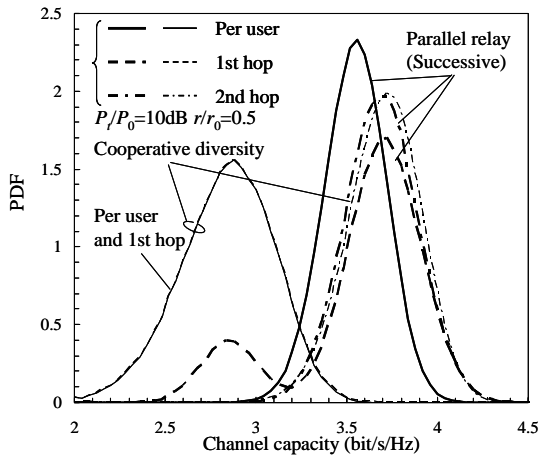


図 7 チャンネル容量の確率密度関数

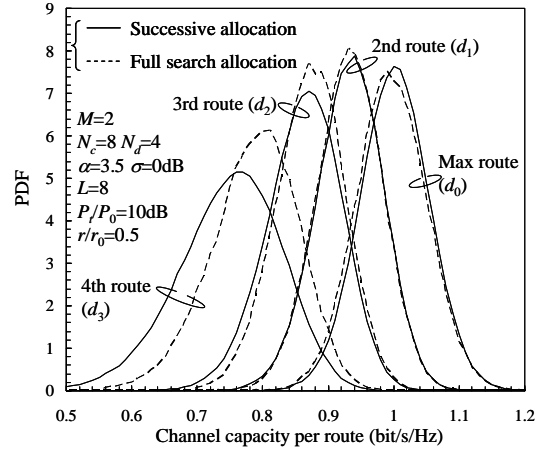


図 8 各経路のチャンネル容量の確率密度関数

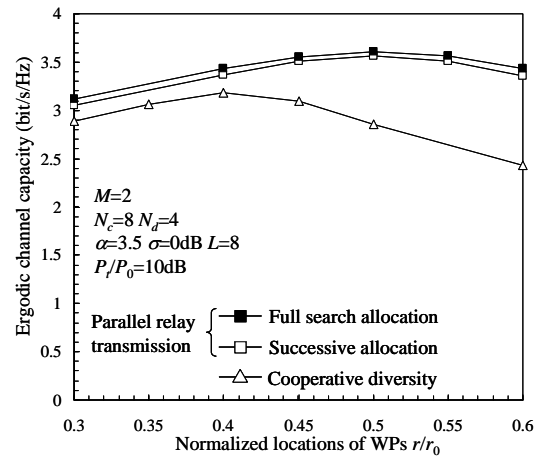


図 9 中継局位置の影響

サブキャリア割当てによる周波数ダイバーシチ効果と中継経路選択によるサイトダイバーシチ効果が第1及び第2ホップリンク共に得られている。その結果、協調ダイバーシチに比べ大きなチャンネル容量が得られる。

並列中継において第1ホップリンクのチャンネル容量に2つのピークが見られるのは、1ホップ通信が選択された経路の容量を第2ホップリンクの(MTにおける)容量としているためである。すなわち、4個の並列経路のうちの1つの経路に1ホップ通信が選択された場合、2ホップ通信となるのは3経路であるため、第1ホップリンクの(WPにおける)チャンネル容量は4経路ではなく3経路の和となる。これが2つ目の小さいピークになっている。

また、図6において逐次割当て法では全探索法とほぼ同等のチャンネル容量が得られていることがわかる。図8に $N_d=4$ のときの1経路当りのチャンネル容量の確率密度関数を示す。ただし、全探索法では4つの並列経路をチャンネル容量が大きい順に並べ、それらを経路 $d_0 \sim d_3$ としている。

逐次割当て法では、最初に割当てられる経路 $d_0$ はサブキャリア選択による周波数ダイバーシチ効果が大きいためチャンネル容量が一番大きくなるが、後に割当てられる $d_3$ や $d_4$ は周波数ダイバーシチ効果が小さくなるためにチャンネル容量が小さくなる。

一方、全探索法では、4つの経路のサブキャリアを同時に割当てるため、4つの経路のチャンネル容量の差は逐次割当て法に比べて小さくなる。したがって、逐次割当て法では、第3経路、第4経路のチャンネル容量が全探索法に比べ小さくなっている。しかしながら、第1及び第2経路では全探索法と同等以上のチャンネル容量が得られるため、4経路の総チャンネル容量はほぼ同じになる。一方、探索数は図3にて示したように大幅に低減できる。

#### 4.2. 中継局位置の影響

図9に中継局位置と平均総チャンネル容量の関係を示す。横軸は図5におけるCP-WP間の距離 $r/r_0$ である。図9より、並列中継伝送が最大のチャンネル容量を与えるのは、中継局がCP-MT間の中点に位置する場合であることがわかる。これは先に述べたように、第1ホップリンクと第2ホップリンクがほぼ同じダイバーシチ効果が得られることによる。

一方、協調ダイバーシチでは、第2ホップリンクのチャンネル容量だけが改善するため、最大のチャンネル容量を示すのは、中継局がCP側に近い場合となる。しかし、中継局のいずれの位置においても並列中継伝送の方が大きなチャンネル容量を達成できることがわかる。

### 4.3. シェドウイング損失標準偏差 $\sigma$ の影響

図 10 及び 11 に、それぞれ平均総チャンネル容量及びチャンネル容量の確率密度関数に及ぼすシェドウイング損失標準偏差 $\sigma$ の影響を示す。

シェドウイングの標準偏差が大きくなると受信電力が大きくなる確率が大きくなるため、並列中継伝送及び 1 ホップ通信では平均総チャンネル容量が大きくなる。一方、協調ダイバーシチでは、第 1 ホップのチャンネル容量は各 WP のうち最小のチャンネル容量で決定される(式(8)を参照)ため、シェドウイングの標準偏差 $\sigma$ が大きくなるにつれ、チャンネル容量が小さくなる確率が大きくなるため平均チャンネル容量は小さくなる。

### 4.4. WP 数 $M$ の影響

図 12 に、逐次割当て法の平均総チャンネル容量に及ぼす WP 数  $M$  の影響を示す。WP 数  $M$  を多くするにつれ、経路選択によるサイトダイバーシチ効果が大きくなるためチャンネル容量を改善できる。

### 5. まとめ

本論文では、各データに伝搬路状態の良い経路及びサブキャリアを割当てて、複数の経路を用いて並列に中継伝送する、OFDMA 並列中継伝送を提案した。チャンネル容量を最大化する全探索法では探索数が膨大になる。探索数を大幅に削減できる逐次割当て法を提案した。

数値計算によりチャンネル容量を求め、並列中継伝送が協調ダイバーシチに比べ、チャンネル容量を大きく出来ることを示した。また、送信電力が小さいとき、1 ホップ通信に比べチャンネル容量を改善できることを示した。さらに、逐次割当て法は全探索法とほぼ同等のチャンネル容量を達成できることを示した。

### 文 献

- [1] R. Pabst, etc., "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," IEEE Commun. Mag., vol.42, no.9, pp.80-89, Sept. 2004.
- [2] T. Otsu, Y. Aburakawa and Y. Yamao, "Multi-hop wireless link system for new generation mobile radio access networks," IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.8, pp.1542-1551, Aug. 2002.
- [3] E. Kudoh and F. Adachi, "Power and frequency efficient wireless multi-hop virtual cellular concept," IEICE Trans Commun., vol.E88-B, no.4, pp.1613-1621, April 2005.
- [4] E. Kudoh and F. Adachi, "Distributed dynamic channel assignment for multi-hop DS-CDMA virtual cellular network," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.6, pp.2525-2531, June 2005.
- [5] A. Nosratinia, etc., "Cooperative communication in wireless networks," IEEE Commun. Mag., vol.42, no.10, pp.74-80, Oct. 2004.
- [6] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, G.W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," IEEE Trans. Info. Theory, vol.50, pp.3062-3080, Dec. 2004.
- [7] T. Miyano, T. Murata, H. Araki, "Space time coded cooperative relaying technique for multi-hop

communications," Proc. IEEE 60th Veh. Tech. Conf. (VTC) 2004, vol.7, pp.5140-5144, Sept. 2004.

- [8] R. U. Nabar, H. Bolcskei, F. W. Kneubuhler, "Fading relay channels: performance limits and space-time signal design," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.22, no.6, pp.1099-1109, Aug. 2004.
- [9] J.G. Proakis, *Digital communications*, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, 1995.

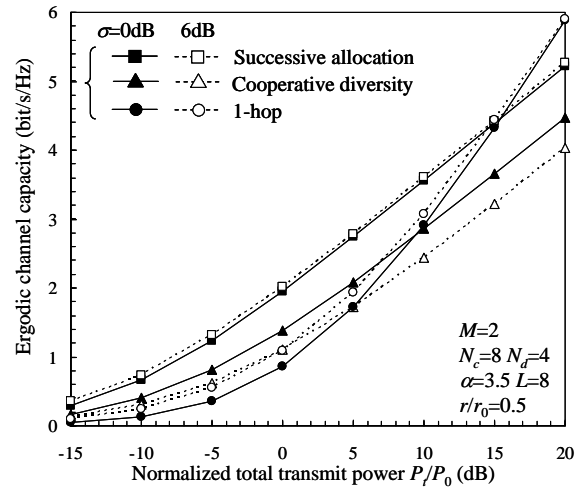


図 10 シェドウイング損失標準偏差 $\sigma$ の影響

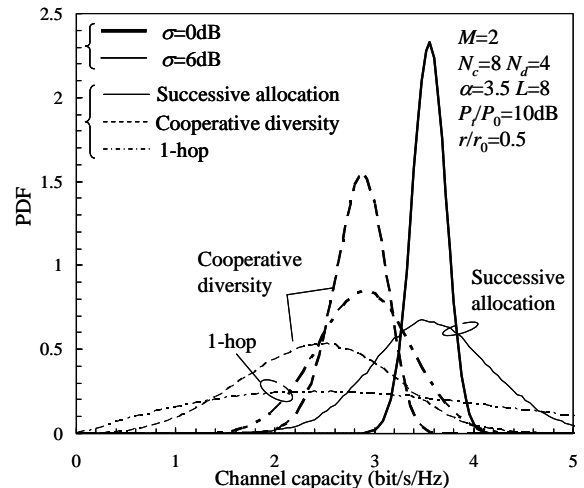


図 11 確率密度関数に対する $\sigma$ の影響

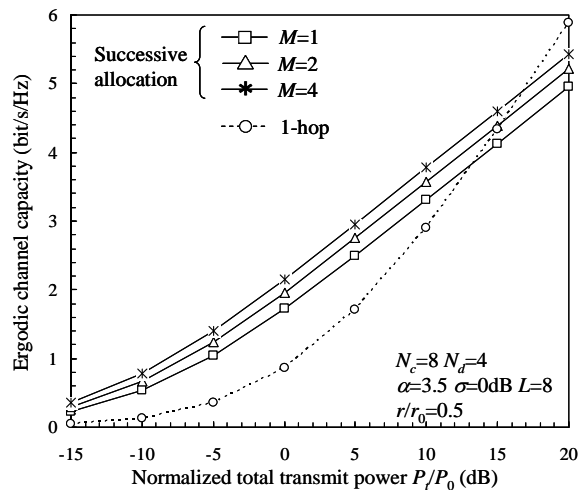


図 12 WP 数  $M$  の影響