

## 2 ホップ OFDMA バーチャルセルラネットワークにおける サブキャリア割当て法

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 次世代移動無線通信システムの実現に向けて、マルチホップバーチャルセルラネットワーク (VCN) が提案されている。筆者らは、直接拡散符号分割多元接続 (DS-CDMA) VCN におけるマルチホップチャネル割当てについて検討してきた。DS-CDMA では、異なる拡散符号を用いることによって VC 内で同一のチャネルを再利用できるものの、隣接の無線ポート (WP) から処理利得で低減しきれないほどの大きな干渉を受ける場合がある。そこで、本論文では、VCN に直交周波数分割多元接続 (OFDMA) を適用する。OFDMA では異なるサブキャリアを割当てることで隣接 WP からの干渉を避けることが可能である。本論文では、下りリンク 2 ホップ OFDMA VCN におけるチャネル構成法について検討している。ブロック型、等間隔型及び適応型チャネル構成法を用いたときのシャノンのチャネル容量を数値計算手法により求め、それぞれのチャネル構成法を比較する。また、2 ホップ VCN とシングルホップ CN との比較を行う。

**キーワード** バーチャルセルラネットワーク, 2 ホップ, サブキャリア割当て, チャネル構成法, チャネル容量, OFDMA

## Subcarrier Allocation for a 2-Hop OFDMA Virtual Cellular Network

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** A multi-hop virtual cellular network (VCN) was proposed for future mobile communication systems. We have studied the multi-hop channel allocation for direct sequence code division multiple access (DS-CDMA) VCN. In DS-CDMA, although the same channel can be reused at different links in a VC by allocating the different spreading codes, a strong interference may be received from the adjacent wireless port. In this paper, we apply orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) to VCN. In OFDMA, if the different subcarriers are allocated, interference from adjacent wireless port can be avoided. We study channel configuration methods for the downlink 2-hop OFDMA VCN. We evaluate, by numerical computation method, the Shannon's channel capacity when the block, equidistance and adaptive channel configuration methods are used. We compare 2-hop VCN and 1-hop CN.

**Keywords** Virtual cellular network, 2-hop, Subcarrier allocation, Channel configuration method, Channel capacity, OFDMA

### 1. まえがき

次世代移動通信では高速なデータ通信の実現が期待されている。しかしながら、所要伝送品質を得るためには伝送速度に比例した送信電力が必要となるため、次世代の高速通信では許容できないほどの大きな送信電力が必要となると考えられる。送信電力を増大することなく、伝送速度を高速化しようとする、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の一つとして、マルチホップ通信が知ら

れている [1], [2]。筆者らは、次世代移動通信ネットワークを実現するために図 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) を提案している [3], [4]。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) で受信され、ネットワークへのゲートウェイとなる中央無線ポート (CP) へ中継される。VCN では、マルチホップ通信を用いることによって、送信電力の増大を避けつつ、通信エリアを拡大することが可能である。現行の CN か

らの移行の第一段階では、MT-WP-CPの2ホップに限定させたVCNを用いることが考えられる。ところで、VCNではWPにおける送受信に同一の周波数（以下、チャンネルと呼ぶ）を用いると干渉を生じてしまうことから、送受信に異なるチャンネルを用いる必要がある。したがって、各マルチホップリンクに割当てるチャンネルを決定するチャンネル割当てが重要な課題となる。

筆者らは、利用可能な周波数帯域を複数の狭帯域チャンネルに分割する、帯域分割直接拡散符号分割多元接続(DS-CDMA)VCNにおけるマルチホップチャンネル割当てについて検討してきた[4], [5], [6]。DS-CDMAでは異なる拡散符号を割当てることで、VC内での同一チャンネルを再利用できるものの、近接のWPから処理利得では低減しきれないほどの大きな干渉を受けてしまう場合がある。そこで、本論文ではVCNに直交周波数分割多元接続(OFDMA)を適用し、各リンクにOFDMの一部の直交サブキャリア群を割当てることを考える。OFDMAでは、異なるサブキャリアを割当てることで隣接WPからの干渉を避けることが可能である。

本論文では、下りリンク伝送を対象としている。複数のサブキャリアで一つのチャンネルを構成し、各リンクに受信信号対干渉+雑音電力比(SINR)に基づくチャンネル割当てを行う、下りリンク2ホップOFDMAVCNについて検討する。ブロック型[7]、等間隔型[7]、適応型チャンネル構成法を用いたときのシャノンのチャンネル容量を数値計算手法により求めている。

本論文の構成は以下のようにになっている。2章では、下りリンク2ホップOFDMAVCNについて述べる。まず、本論文で用いるチャンネル構成法について述べ、次いでサブキャリア割当て法とルーティングアルゴリズムについて述べる。3章では、数値計算手法によりチャンネル容量を求める。まず、ブロック型、等間隔型、適応型チャンネル構成法のチャンネル容量を比較し、次いで、2ホップVCNと1ホップCNの比較を行う。

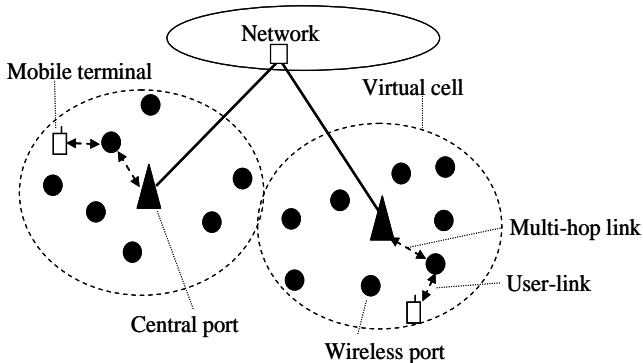


図1 2ホップVCNの構成

## 2. 2ホップ OFDMA VCN

### 2.1. チャンネル構成法

複数サブキャリアで一つのチャンネルを構成する。本論文では図2に示すようなブロック型、等間隔型、適応型チャンネル構成法について検討している。まず、ブロック型では、隣接する複数のサブキャリアでチャンネルを構成する。次に、等間隔型では、等間隔サブキャリアでチャンネルを構成する。そして、適応型では、各チャンネルを構成するサブキャリアは固定せず、伝搬路状態に応じて適応的にサブキャリアを割当てる。

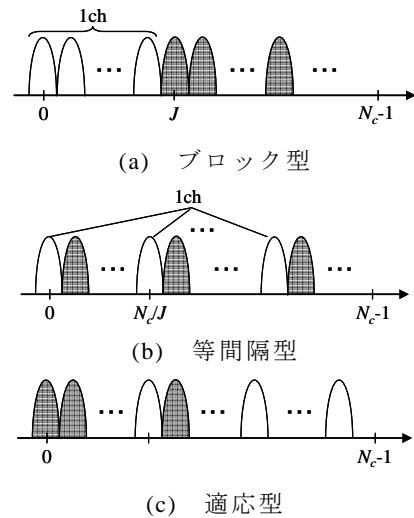


図2 チャンネル構成法

### 2.2. サブキャリア割当て法

#### 2.2.1. ブロック型、等間隔型におけるチャンネル割当て

ブロック型、等間隔型ではチャンネル単位の割当てを行う。パイロット信号を用いてサブキャリアごとの受信SINRを測定し、図1に示すWP-MT間のユーザリンク、CP-WP間のマルチホップリンクの各リンクにチャンネル容量が最大となるチャンネルを割当てる。ただし、WPにおける送受信に同一のサブキャリアを用いると大きな干渉を生じるため、図3(a)に示すように送受信において同一のサブキャリアは使用しない。さらに、あるWPから複数MTへの送信に同一のサブキャリアを用いると、互いに大きな干渉となるため、同図(b)のように同一のサブキャリアは割当てないものとする。今、 $N_c$ 個のサブキャリアがあると、 $J$ 個のサブキャリアで一つのチャンネルを構成するものと仮定する。第 $c$ 番目のチャンネルを、構成するサブキャリア番号を要素とする列ベクトル  $\mathbf{c}_c = [c(0), c(1), \dots, c(J-1)]^T$  で表すものとする。ブロック型におけるチャンネルベクトル  $\mathbf{c}_c$  は以下のように表せる。

$$\mathbf{c}_c = [cJ, cJ+1, \dots, cJ+J-1]^T \quad (1)$$

同様に，等間隔型では

$$\mathbf{c}_c = [c, N_c/J+c, \dots, (J-1)N_c/J+c]^T \quad (2)$$

となる．このとき，割当てるチャンネルベクトル  $\mathbf{c}_{\text{assign}}$  は以下のように表せる．

$$\mathbf{c}_{\text{assign}} = \arg \max_{c \in \{0, \dots, N_c/J-1\}} \{C(\mathbf{c}_c)\} \quad (3)$$

ここで， $N_c/J$  は総チャンネル数， $C(\mathbf{c}_c)$  は第  $c$  チャンネルのチャンネル容量であり，次式で与えられる [8]．

$$C(\mathbf{c}_c) = \sum_{k=0}^{J-1} \log_2(1 + \gamma_{c(k)}) \quad (4)$$

ただし， $\gamma_{c(k)}$  は第  $c$  チャンネル第  $k$  サブキャリアの受信 SINR である．

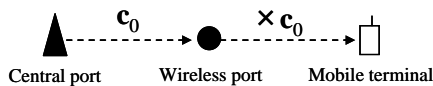
移動無線伝搬路は，距離に依存する伝搬損失，対数正規分布に従うシャドウイング損失及びマルチパスフェージングで特徴付けられる．本論文では，マルチパスフェージングは遅延時間の異なる  $L$  個のパスから構成される周波数選択性フェージングであるとする． $i$  番目の WP から送信された信号の  $j$  番目の MT での受信 SINR は次式で表される．

$$\gamma_{c(k)} = \frac{P_i r_{i-j}^{-\alpha} 10^{-\eta_{i-j}/10} |H_{i-j}(c(k))|^2}{N + \sum_{m \neq i} P_m r_{m-j}^{-\alpha} 10^{-\eta_{m-j}/10} |H_{m-j}(c(k))|^2} \quad (5)$$

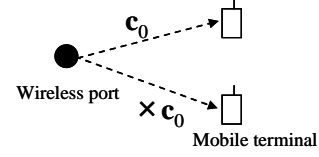
ここで， $P_i$  は送信電力， $\alpha$  は伝搬損失指数， $r_{i-j}$ ， $\eta_{i-j}$  はそれぞれ  $i-j$  間の距離及びシャドウイング損失， $H_{i-j}(c(k))$  は  $i-j$  間の第  $c$  チャンネル第  $k$  サブキャリアにおけるフェージングチャンネル利得， $N$  は雑音電力である．分母第二項は同一サブキャリアを用いる WP からの干渉成分を表している．受信 SINR  $\gamma_{c(k)}$  が  $\gamma_{c(k)} \gg 1$  のとき，(4)式は以下のように近似できる．

$$C(\mathbf{c}_c) \approx J \log_2 \left( \prod_{k=0}^{J-1} \gamma_{c(k)} \right)^{1/J} \quad \text{if } \gamma_{c(k)} \gg 1 \quad (6)$$

したがって，上記の割当て法は  $\gamma_{c(k)} \gg 1$  のときには，チャンネルを構成するサブキャリアの SINR の幾何平均が最大となるチャンネルを割当てることと等価である．



(a) 送受信サブキャリアにおける条件



(b) 複数リンクへの送信における条件

図3 割当てサブキャリアの制限

### 2.2.2. 適応型におけるサブキャリア割当て

適応型ではサブキャリア単位の割当てを行う．割当て可能なサブキャリアの中で，SINR の大きい順に  $J$  個のサブキャリアを割当てて．以下に例を示す． $N_c=8$ ， $J=2$  とし，図4に示す WP と MT のリンクへのサブキャリア割当てを考える．図4のように MT における瞬時受信 SINR が得られたとすると，利用可能なサブキャリア，すなわち WP における受信及び他の MT への送信に割当てられていないサブキャリアの中で，SINR の大きい方から順に  $J=2$  個のサブキャリア，#2 と #7 が割当てられる．

以上のように，SINR に基づくサブキャリア割当てを行うことで，他の WP からの干渉を避けることが出来る．

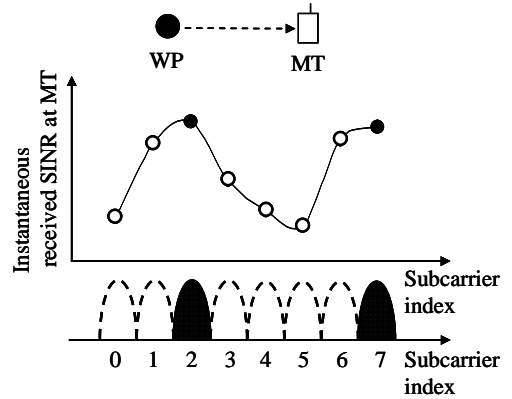


図4 適応型のサブキャリア割当て例

### 2.3. ルーティングアルゴリズム

本論文では，短区間平均総送信電力最小化に基づく WP 選択を用いる [6]．すなわち，各 MT は，WP における受信電力及び MT における短区間平均受信電力をターゲット値とするための，CP の送信電力及び WP の平均送信電力の和（これを短区間平均総送信電力と呼ぶ）を最小とする WP を選択する．CP から送信された信号の WP# $n$  における  $N_c$  個のサブキャリアの受信電力の総和  $P_{r,n}$  は WP，CP が固定されていることから，以下のように表せる．

$$P_{r,n} = P_i r_{CP-n}^{-\alpha} 10^{-\eta_{CP-n}/10} \sum_{k=0}^{N_c-1} |H_{CP-n}(k)|^2 \quad (7)$$

また、MT における WP# $n$  からの信号の短区間平均受信電力  $P_{r,MT}$  は

$$P_{r,MT} = N_c P_i r_{n-MT}^{-\alpha} 10^{-\eta_{n-MT}/10} \quad (8)$$

と表せる．ここで、WP# $n$  及び MT における受信電力をターゲット値  $P_{\text{target}}$  とするときの（すなわち、 $P_{r,n}=P_{r,MT}=P_{\text{target}}$ ）、CP 及び WP# $n$  の送信電力をそれぞれ  $P_i^{CP-n}$ 、 $P_i^{n-MT}$  とする． $P_i^{CP-n}$  と  $P_i^{n-MT}$  の和、すなわち短区間平均総送信電力が最小となる WP を選択する．したがって、選択する WP を WP# $m$  とすると、 $m$  は以下のようになる．

$$m = \arg \min_n \left\{ \frac{P_{\text{target}}}{r_{CP-n}^{-\alpha} 10^{-\eta_{CP-n}/10} \sum_{k=0}^{N_c-1} |H_{CP-n}(k)|^2} + \frac{P_{\text{target}}}{N_c r_{n-MT}^{-\alpha} 10^{-\eta_{n-MT}/10}} \right\} \\ = \arg \min_n \{ P_i^{CP-n} + P_i^{n-MT} \} \quad (9)$$

ただし、これらの送信電力は WP 選択を行うための基準として用いる送信電力であり、実際の送信電力は送信電力制御の方法によって異なる．

### 3. 数値計算

#### 3.1. 数値計算条件

2 章にて述べた 3 種のチャンネル構成法を用い、各リンクにチャンネル割当てを行ったときのシャノンのチャンネル容量を数値計算手法により求めた．ただし、2 ホップ VCN では、ユーザのチャンネル容量は経路上のユーザリンク、マルチホップリンクのうち、最小のチャンネル容量で決定される．すなわち、第  $u$  ユーザのユーザリンク、マルチホップリンクに割当てられたチャンネルベクトルをそれぞれ、 $\mathbf{c}_{u-link}^u$ 、 $\mathbf{c}_{MH-link}^u$  とすると、第  $u$  ユーザのチャンネル容量  $C_u$  は

$$C_u = \min\{C(\mathbf{c}_{u-link}^u), C(\mathbf{c}_{MH-link}^u)\} \quad (10)$$

となる [9]．

正六角形の VC を仮定し、第 2 隣接 VC までの干渉（19 個の VC）を考慮した．各 VC に  $K=20$  の WP をランダムに配置する．ただし、CP はセル中心に配置する．サブキャリアの総数  $N_c=64$ 、1 チャンネル当りのサブキャリア数  $J=4$  とした．また、伝搬損失指数  $\alpha=3.5$ 、シャドウイング標準偏差  $\sigma=6\text{dB}$ 、 $L=16$  パス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している．ただし、通話中時間変動しない準静的フェージングを仮定する．また、

セル端におけるユーザの長区間平均受信 SNR を  $\text{SNR}=10\text{dB}$  としている．ただし、2 ホップ VCN では 1 ホップ通信時と総送信電力を等しくするため、各 WP は 1 ホップ CN における基地局の 1/2 の送信電力で送信するものとする．

#### 3.2. 数値計算結果

図 5 に総チャンネル数  $N_c/J$  で正規化したセル当りのユーザ数に対するユーザ当りのエルゴードチャンネル容量を示す．まず、ブロック型、等間隔型、適応型チャンネル構成法のチャンネル容量を比較する．図 5 より、適応型が最もチャンネル容量を大きくでき、次いでブロック型、等間隔型の順になっていることがわかる．ブロック型では、大きな SINR を有する多数のサブキャリアから構成されるチャンネルを割当てることが可能である．しかし、その他のチャンネルの中に、割当てられたサブキャリアよりも大きい SINR を有するサブキャリアが存在する場合がある．等間隔型では、割当てられたチャンネルの中の一部のサブキャリアは SINR が小さい場合がある．一方、適応型では、チャンネルを構成するサブキャリアが固定されておらず、利用可能なサブキャリアの中で SINR が最大となるサブキャリアを常に割当てて．そのため、チャンネル容量を大きくすることが可能である．

次に 2 ホップ VCN と 1 ホップ CN の比較を行う．まず、同一総送信電力において比較する．図 5 より、2 ホップ VCN が 1 ホップ CN に比べチャンネル容量を大きくできることがわかる．図 6 にチャンネル割当ての失敗率を示す．ここで、チャンネル割当ての失敗率は利用可能なサブキャリアがない確率を表す．また、このとき当該ユーザのチャンネル容量は 0 としている．図 6 より、チャンネル割当て失敗率は 2 ホップ VCN と 1 ホップ CN でほとんど差がないことがわかる．以下では、適応型チャンネル構成法を用いたときの結果を示す．図 7 にユーザ当りのチャンネル容量の累積分布を示す．ここで、 $U(N_c/J)=0.25$  である．図 7 にて示されるように、2 ホップ VCN は 1 ホップ CN に比べチャンネル容量が小さくなる確率を低減することが可能である．したがって、図 5 において大きなエルゴードチャンネル容量が得られている．これは、1 ホップ CN では基地局から距離の離れたセル境界付近のユーザは、受信電力が大きく減衰しチャンネル容量が低下してしまうのに対し、2 ホップ VCN ではマルチホップ通信の効果により、セル境界付近のユーザの受信電力を改善できるためである．

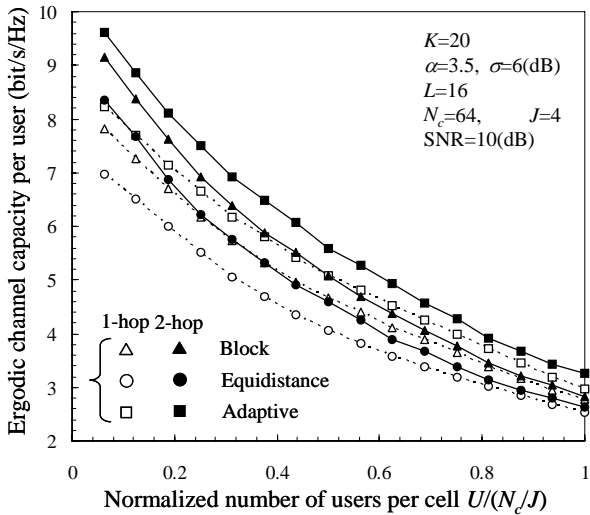


図5 チャンネル容量

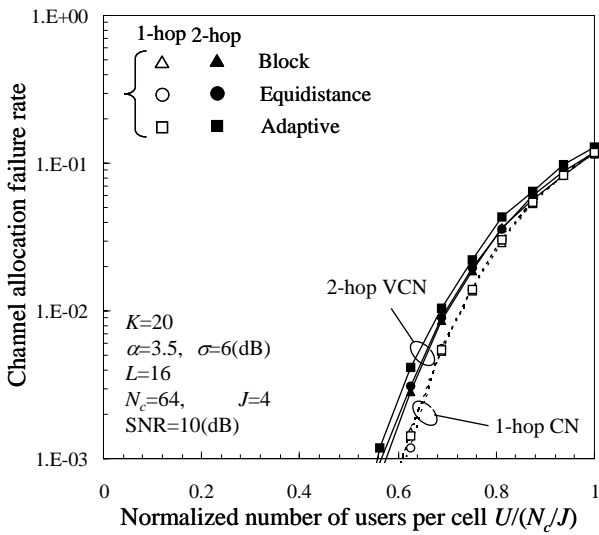


図6 チャンネル割当て失敗率

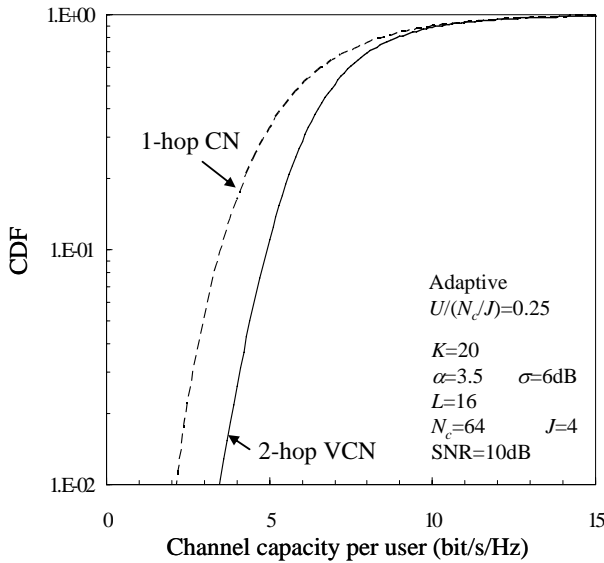


図7 チャンネル容量の累積分布

次に、2ホップ VCN の送信電力低減効果について考察する．図8に、1ホップ通信時の送信電力  $P_{1\text{hop}}$  で正規化した2ホップ VCN の総送信電力  $P_{\text{total}}/P_{1\text{hop}}$  に対するエルゴードチャンネル容量を示す．ここで、 $P_{\text{total}}$  は CP, WP における送信電力の和であり、CP, WP における送信電力をそれぞれ、 $P_{\text{CP}}$ ,  $P_{\text{WP}}$  とすると

$$P_{\text{total}} = P_{\text{CP}} + P_{\text{WP}} \quad (11)$$

となる．ただし、本論文では  $P_{\text{CP}} = P_{\text{WP}}$  としている．ここで、1ホップ時の送信電力  $P_{1\text{hop}}$  は図5～7と同様に、セル端における長区間平均受信 SNR が 10dB となる送信電力である．図8より、1ホップ CN と同等のエルゴードチャンネル容量を得るためには、2ホップ VCN では 6dB から 8dB 程度総送信電力を低減可能であることがわかる．図9に総送信電力を変化させたときのチャンネル容量の累積分布を示す．累積分布 0.1 を満たすチャンネル容量を比較すると、2ホップ VCN は正規化総送信電力が -10dB においても、1ホップ CN とほぼ同等のチャンネル容量を達成できることがわかる．

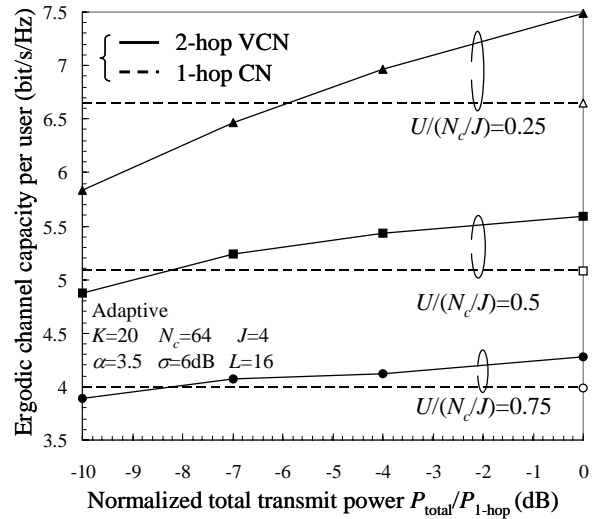


図8 正規化総送信電力に対するチャンネル容量

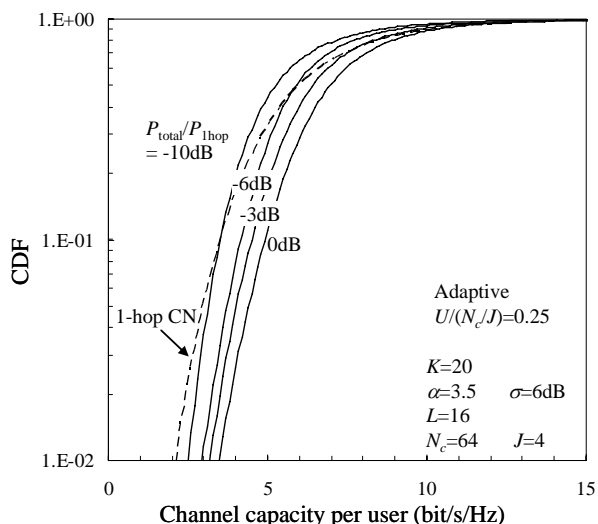


図9 2ホップVCNの総送信電力を減少した場合のチャンネル容量の累積分布

#### 4. まとめ

本論文では、下りリンク2ホップOFDMA VCNにおけるチャンネル構成法について検討した。数値計算手法によりシャノンのチャンネル容量を求め、適応型チャンネル構成法がブロック型、等間隔型に比べ、チャンネル容量を大きく出来ることを示した。また、2ホップVCNと1ホップCNの比較を行い、1ホップCNと同等の平均チャンネル容量を達成するには、2ホップVCNでは1ホップCNに比べ総送信電力を6~8dB程度低減可能であることを示した。

#### 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] L. Soundous, E. Kudoh and F. Adachi, "Blocking probability of a DS-CDMA multi-hop virtual cellular network," IEICE Trans. Commun., vol.E89-A, no.7, pp.1878-1883, July 2006.
- [6] 石田仁志, エル アラミ ラッラ スンドゥス, 工藤栄亮, 安達文幸, "2ホップバーチャルセルラネットワークにおける呼損率特性," 信学技報, RCS2006-266, pp.127-130, 2007年3月
- [7] 馬場崇, 小畑晴香, 三瓶政一, 森永規彦, "OFDMA/TDD システムにおけるグループ制御型周波数領域スケジューリングに関する検討," 信

学技報, RCS2005-212, 2006年3月

- [8] J.G. Proakis, *Digital communications*, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, 1995.
- [9] 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.