

## 2 ホップバーチャルセルラネットワークにおける周波数再利用距離

工藤 栄亮 安達 文幸

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

E-mail: kudoh@ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 筆者らは超高速無線ネットワークを構築するために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。既存のセルラシステムからの移行の第1段階は2ホップ VCN の導入であると考えられる。これまで筆者らは、2ホップ VCN のスループット特性を求め、従来のシングルホップセルラネットワーク (CN) と比較してきた。2ホップ VCN ではマルチホップ通信を適用することにより、送信電力が低減され、周波数再利用距離を短くできることが期待できる。本論文では、Selective repeat (SR)再送制御を適用したときの2ホップバーチャルセルラネットワークの周波数再利用距離とスループットとの関係を求め、従来のシングルホップセルラネットワークの特性と比較する。

**キーワード** バーチャルセルラネットワーク, マルチホップ, 周波数再利用距離, スループット, 再送制御

## Frequency Reuse Distance of A 2 hop Virtual Cellular Network

Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

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: kudoh@ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** There have been strong demands for higher speed data transmissions in mobile communications. To reduce the peak transmit power while increasing the data transmission rates, authors proposed a wireless multi-hop virtual cellular network (VCN). The first step of transition to VCN from the existing cellular network is an introduction of a 2-hop VCN. The authors have evaluated the throughput of 2-hop VCN and compared it to the conventional single-hop CN. The frequency reuse distance may be shortened compared to the conventional single hop cellular network, since the transmit power decreases in the multi hop communication. In this paper, the relationship between the frequency reuse distance and throughput of 2-hop VCN with selective repeat (SR) ARQ is theoretically evaluated and compared to the conventional single hop case.

**Keyword** Virtual cellular network, Multi-hop, Frequency reuse distance, Throughput, ARQ

### 1. まえがき

第3世代の移動通信システム IMT-2000 は十数 Mbit/s の伝送能力を有している。しかしながら、インターネットの普及が進み、リッチなコンテンツが広く流通するようになれば、やがて IMT-2000 の伝送速度でさえ不十分となり、100Mbit/s ~ 1Gbit/s 程度のピーク伝送速度が要求されると見られている。第4世代移動通信システムでは、このような超高速無線サービスの提供が求められている[1]。ところが、超高速無線サービスを実現するには送信電力の増大という課題を克服しなければならない。これを解決する効果的な方法のひとつはマルチホップ通信を適用することである[2]~[4]。

これまでに我々は送信電力の増加を抑えつつ 100 Mbit/s クラスの超高速伝送可能な無線ネット

ワークを構築する方法としてマルチホップバーチャルセルラネットワーク (マルチホップ VCN) を提案してきた[5],[6]。図1にマルチホップ VCN の構成を示す。バーチャルセル (VC) は多数の分散配置された無線ポート (WP) から構成される仮想的なセルであり、複数の WP が協調してあたかも1つのセルのように動作する。移動端末 (MT) から送信された信号は、VC 内の複数の WP で受信できる。したがって、サイトダイバーシチ効果が得られるため、MT の送信電力および WP の送信電力を従来のセルラネットワーク (CN) より大幅に低減できる。ところで、現行セルラネットワークからの移行の第1段階は、WP 間の転送を行わない、MT-WP-基地局 (CP) の2ホップに限定させたネットワークの導入であると考えられる。

マルチホップ通信では、転送によって遅延時間が增大することから、シングルホップ通信を用いる CN に比べ、スループットの低下が懸念される。筆者らは、これまで、2 ホップ VCN を対象とし、再送制御法として、 Selective repeat (SR) [7]~[9] を適用したときのスループット特性を理論的に明らかにし、シングルホップ CN の特性と比較してきた。その結果、送信パケット数が多く、パケット誤り率が小さい場合には、従来のシングルホップ CN とほぼ同等のスループット特性が得られることを明らかにしてきた[10]。

マルチホップ通信を適用すると送受信局間距離を短くできるので、送信電力を低減できる。送信電力を低減できれば、他の通信への干渉も低減できるので、周波数再利用距離を短くできることが期待される。そこで、本論文では、2 ホップ VCN における周波数再利用距離とスループットの関係性を明らかにする。本論文の構成は以下のようになっている。第 2 章で、2 ホップ VCN のスループット特性の理論式を示す。第 3 章で、2 ホップ VCN とシングルホップ CN の周波数再利用距離を導出する。第 4 章は数値計算結果を示す。第 5 章はむすびである。

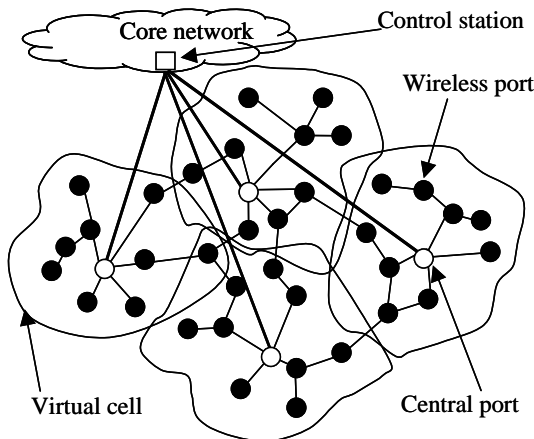


図 1 マルチホップバーチャルセルラネットワーク (マルチホップ VCN)

## 2. スループット

パケット長が  $M$  ビットの  $J$  個のパケットを送信することを考える。 ( $MJ$  ビット)/(パケットを送信開始してから、受信側で全てのパケットを受信したことを送信側で確認できたときまでにかかる平均時間)をスループットと定義する。パケット通信では再送制御が不可欠である。End-to-end (MT-CP 間) で SR 型の再送制御を用いるものとする。SR 型再送制御では、誤りのあったパケットのみを選択的に再送要求する[8]。図 2 に SR 型 ARQ を適用したときの 2 ホップ VCN におけるパケット通信の例を示す。図 2 において、

$T$  はデータパケット長、 $T_a$  は Nak パケット長、 $\tau_g$  はデータパケットの送信時間間隔、 $\tau_{rd}$  は WP において、MT からパケットを受信し終わってから CP へパケットを送信開始するまでにかかる時間、 $\tau_{ra}$  は WP において、CP からの Nak パケットを受信終わってから MT へ Nak パケットを送信開始するまでに要する時間である。もしも、 $T \gg \tau_{rd}, \tau_{ra}, \tau_d, \tau_g$  であれば、2 ホップ VCN のスループット  $S_{2hop}$  は次式で表される[10]。

$$S_{2hop} = \frac{M}{T} \cdot \frac{(1-p)^2}{1 + \frac{(1-p)^2}{J} \left(1 + \frac{T_a}{T}\right)} \quad (1)$$

ここで、 $p$  は各リンクの平均パケット誤り率である。一方、シングルホップ CN の場合のスループット  $S_{1hop}$  は次式で表される。

$$S_{1hop} = \frac{M}{T} \cdot \frac{1-p}{1 + \frac{T_a}{T} \cdot \frac{1-p}{J}} \quad (2)$$

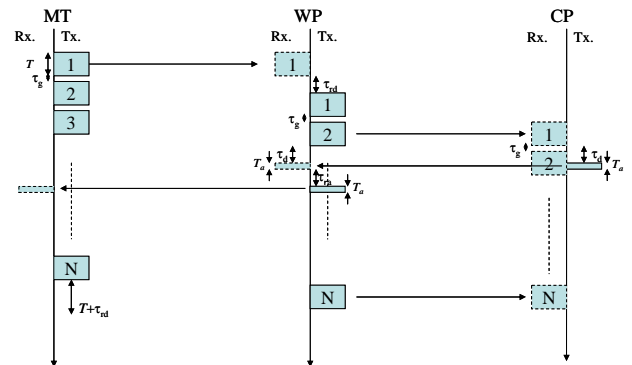


図 2 SR-ARQ を適用した 2 ホップ VCN におけるパケット通信例。

## 3. 周波数再利用距離

1 パケット長内で受信信号対雑音 + 干渉電力比 (SINR) の変動がないものと仮定し、各ビットのビット誤り率 (BER) は 1 パケット長内で変わらないものとする。平均パケット誤り率  $p$  は次式で与えられる。

$$p = 1 - [1 - p_b]^M \quad (3)$$

ここで、 $p_b$  は BER、 $M$  はパケット長である。QPSK (quadrature phase shift keying) 同期検波を仮定する。干渉をガウス雑音近似できるものと仮定

すると、 $p_b$  は次式で与えられる[11].

$$p_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \quad (4)$$

ここで、 $\gamma$  は受信 SINR、 $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$  は誤差補関数である。受信信号対雑音電力比(SNR)が一定となる理想的な送信電力制御を仮定する。シャドウィング損失とフェージング損失を無視すると、シングルホップCNのときのMTの送信電力 $P_{1hop}$  は次式で与えられる。

$$\frac{P_{1hop}}{N} = r_0^\alpha \cdot \left( \frac{P}{N} \right)_{target,1hop} \quad (5)$$

ここで、 $N$  は雑音電力、 $r_0$  はMTとCP間の距離、 $(P/N)_{target,1hop}$  はシングルホップCNにおけるターゲット受信SNR、 $\alpha$  はパスロス指数である。

図3に示すように同一周波数チャネルを用いて送信している6局のMTから干渉を受けるモデルを考える。干渉VCのCPと希望VCのCPとの距離を $D$ とする。シングルホップCNの場合、最も干渉電力が大きくなるのは、干渉MTがセル端に配置され(セル半径が $r_0$ に等しく)、干渉MTと希望局であるCPとの距離が $D-r_0$ となるときである。今、干渉電力が雑音電力よりも十分大きいものとする。このときのCPにおける受信SINRは以下の式で表される。

$$\gamma_{1hop} = \frac{1}{6} \left( \frac{D-r_0}{r_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

$D$ が $r_0$ よりも十分大きい場合、式(6)は次式のように近似できる。

$$\gamma_{1hop} \cong \frac{1}{6} \left( \frac{D}{r_0} \right)^\alpha \quad (7)$$

ここで、 $D/r_0$ は正規化周波数再利用距離である。

次に2ホップVCNの場合について考える。簡単のため、中継WPはMTとCPの midpoint に配置すると仮定する。2ホップVCNのときのMTの送信電力 $P_{2hop}$  は次式で与えられる。

$$\frac{P_{2hop}}{N} = \left( \frac{r_0}{2} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{P}{N} \right)_{target,2hop} \quad (8)$$

ここで、 $(P/N)_{target,2hop}$  は2ホップVCNにおけるターゲット受信SNRである。2ホップVCNの場合、

CPにおける干渉電力が最も大きくなるのは、各MTがセル端に配置され(セル半径が $r_0$ に等しく)、干渉WPと希望局であるCPとの距離が $D-r_0/2$ となるときである。このときCPにおける受信SINR $\gamma_{CP,2hop}$  は次式で与えられる。

$$\gamma_{CP,2hop} = \frac{2^\alpha \left( \frac{D-r_0}{2} \right)^\alpha}{6 r_0^\alpha} \quad (9)$$

$D$ が $r_0$ よりも十分大きい場合、式(9)は次式のように近似できる。

$$\gamma_{CP,2hop} \cong \frac{2^\alpha}{6} \left( \frac{D}{r_0} \right)^\alpha \quad (10)$$

$i$ 番の干渉MTと希望VCのWPとの距離を $d_i$ とする。WPにおける受信SINR $\gamma_{WP,2hop}$  は次式で与えられる。

$$\gamma_{WP,2hop} = \frac{\left( \frac{r_0}{2} \right)^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^6 d_i^{-\alpha}} \quad (11)$$

$D$ が $r_0$ よりも十分大きい場合、 $d_i \cong D$ であるから、式(11)は次式のように近似できる。

$$\gamma_{WP,2hop} \cong \frac{2^\alpha}{6} \left( \frac{D}{r_0} \right)^\alpha \quad (12)$$

したがって、 $D$ が $r_0$ よりも十分大きい場合、 $\gamma_{WP,2hop} \cong \gamma_{CP,2hop}$  である。

正規化周波数再利用距離から受信SINRを求めることができ、受信SINRからスループットを算出できる。

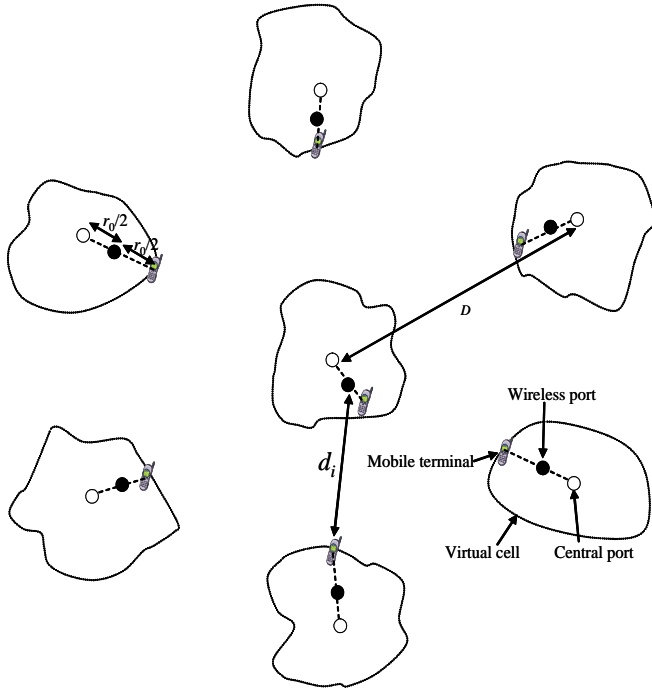


図3 システムモデル

#### 4. 数値計算結果

図4に送信パケット数 $J$ が $M/T$ で正規化されたスループットに与える影響を示す。ここで、パケット長 $M=512$  bits,  $T_a/T=0.1$ , パスロス指数 $\alpha=3$ としている。横軸は正規化周波数再利用距離 $D/r_0$ である。 $J$ が大きくなるほど、総送信ビット数(i.e.,  $MJ$  ビット)が増えるので、2ホップVCNのときに得られる最大スループットは増大する。2ホップVCNはシングルホップCNの場合に比べ、同じスループットを得るために必要な正規化周波数再利用距離を短くすることができる。例えば、正規化スループット0.8を得るためには、シングルホップCNでは正規化周波数再利用距離が4.1であるのに対し、2ホップVCNでは、2.1である。正規化周波数再利用距離が長いほど、クラスターサイズ(異なる周波数を利用しなければならないVCの数)が大きくなる。簡単のため正六角形のVCを仮定すると、 $D/r_0 \leq 3$ ではクラスターサイズは3,  $3 < D/r_0 \leq 2\sqrt{3}$ では4,  $2\sqrt{3} < D/r_0 \leq 4.66\dots$ では7となる[12]。例えば正規化スループット0.8を得るためには、2ホップVCNではクラスターサイズが3, シングルホップCNではクラスターサイズは7となる。所要周波数帯域幅 $B$ は、クラスターサイズ $F$ , 1ユーザあたりの所要周波数帯域幅 $C$ , 1セルあたりのユーザ数 $K$ を用いて、

$$B = KFC \quad (8)$$

と表すことができる。シングルホップCNの場合の所要周波数帯域幅が $7KC$ であるとする、2ホップ

VCNでは1人のMTを収容するために2つのリンクが必要であるので、所要周波数帯域幅が $6KC$ となる。したがって、2ホップVCNの方がシングルホップCNの場合に比べ、所要周波数帯域幅を小さくできる可能性がある。

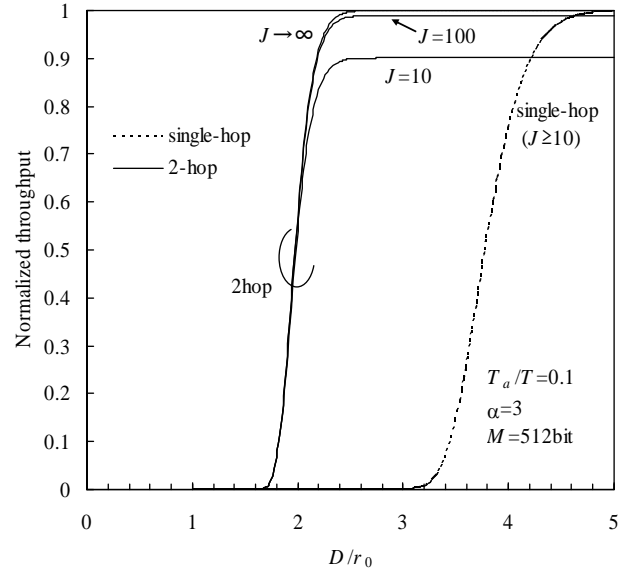


図4  $J$ が正規化スループットに与える影響

図5にパスロス指数 $\alpha$ が正規化スループットに与える影響を示す。ここで、 $M=512$  bits,  $T_a/T=0.1$ ,  $J \rightarrow \infty$ である。 $\alpha$ が大きくなるほど、所要スループットを得るための正規化周波数再利用距離は短くすることができる。例えば、2ホップVCNにおいて、正規化スループット0.8を得るためには、 $\alpha=2$ のときは $D/r_0=4.4$ であるのに対し、 $\alpha=3$ のときは $D/r_0=2.1$ ,  $\alpha=4$ のときは $D/r_0=1.5$ である。これは、理想的な送信電力制御を仮定しているため、受信信号電力は $\alpha$ に依存しないものの、 $\alpha$ が大きいほどパスロスも大きくなり干渉電力が小さくなるからである。また、 $\alpha$ の値にかかわらず、2ホップVCNの方がシングルホップCNに比べ、正規化周波数再利用距離を短くできる。

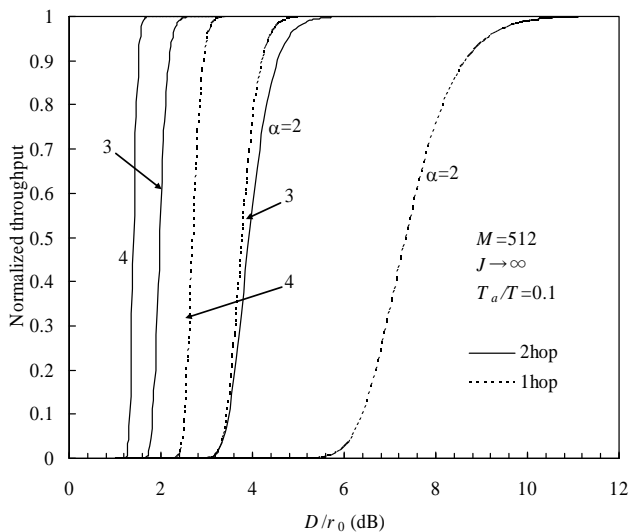


図5  $\alpha$ が正規化スループットに与える影響

図6にパケット長 $M$ が正規化スループットに与える影響を示す。ここで、 $\alpha=3.5$ ,  $T_a/T=0.1$ ,  $J \rightarrow \infty$ である。 $M$ が長くなるほど、正規化周波数再利用距離は長くなる。例えば、2ホップVCNにおいて、正規化スループット0.8を得るためには、 $M=64$ bitsのときは $D/r_0=1.9$ であるのに対し、 $M=512$ bitsのときは $D/r_0=2.1$ 、 $M=4096$ bitsのときは $D/r_0=2.3$ である。これは $M$ が大きくなるほど、パケット誤り率が大きくなり、スループットが減少するからである。また、 $M$ の値にかかわらず、2ホップVCNの方がシングルホップCNに比べ、正規化周波数再利用距離を短くできる。

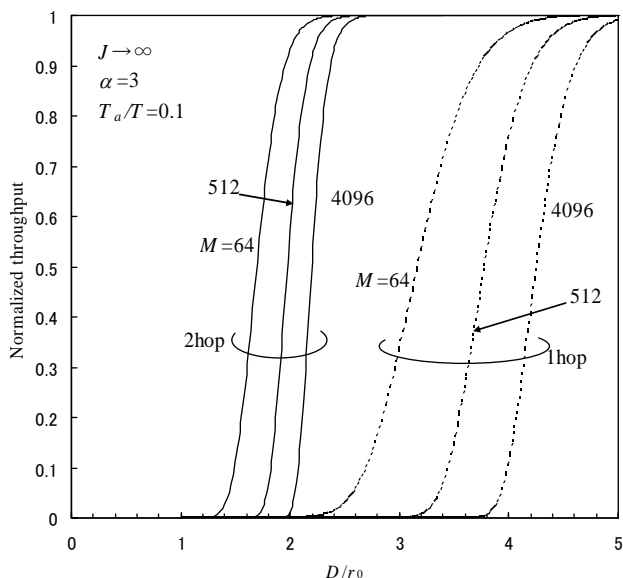


図6  $M$ が正規化スループットに与える影響。

## 5. むすび

本論文では、Selective repeat (SR)型の再送制御を適用したときの2ホップバーチャルセルラネットワークの周波数再利用距離とスループットの関係性を明らかにし、シングルホップセルラネットワークの場合と比較した。送信パケット数、パスロス指数、パケット長が正規化周波数再利用距離に与える影響を求め、いずれの場合も2ホップVCNの方が従来のシングルホップCNに比べ正規化周波数再利用距離を短くできることを明らかにした。

## 謝辞

本研究の一部は財団法人電気通信普及財団からの援助を得て行なわれた。

## 文献

- [1] F. Adachi, "Wireless Past and Future-Evolving Mobile Communication Systems", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, no.1, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] I. F. Akyildiz and X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," IEEE Commun. Mag., vol.43, no.9, pp.523-530, Sept. 2005.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] E. Kudoh and F. Adachi, "Power and frequency efficient multi-hop virtual cellular concept," IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No.4, pp.1613-1621, April 2005.
- [6] E. Kudoh and F. Adachi, "Distributed dynamic channel assignment for a multi-hop DS-CDMA virtual cellular network," IEICE Trans. Commun., Vol. E88-B, No.6, pp.2525-2531, June 2005.
- [7] S. Lin, D. Costello, M. Miller, "Automatic-repeat-request error control schemes," IEEE Commun. Mag., vol. 22, no.12, pp.5-17, 1984.
- [8] Bertsekas and R. Gallager, Data networks, Prentice-Hall, 1987.
- [9] J. G. Kim, M. K. Krunz, "Delay analysis of selective-repeat ARQ for Markovian source over a wireless channel," IEEE Trans. Veh. Tech., vol.49, no.5, pp.1968-1981, Sept.2000.
- [10] 工藤, 安達, "2ホップバーチャルセルラネットワークにおけるスループット特性," 信学技報, RCS2006-265, pp. 123-126, 2007年3月.
- [11] J. G. Proakis, Digital communications, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.
- [12] 奥村, 進士編, 移動通信の基礎, 信学会, 1986.