

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

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容易に移行するために2ホップに限定することが考えられる。ところで、従来のセルラネットワークで用いられているシングルホップ通信に比べ、マルチホップ通信では転送によって遅延時間が増大することから、スループット特性の劣化が懸念される。また、パケット通信では再送制御が不可欠であるので、再送制御を考慮したスループット特性の評価が不可欠である。本論文では、Stop-and-wait (SW) または 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, スループット, 再送制御

Throughput performance 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). In order to shift from an existing cellular system easily, the number of hops may be limited to 2. The throughput performance may be degraded compared to the conventional single hop cellular network, since the delay time increases in the multi hop communication. ARQ is indispensable in packet transmission. In this paper, the throughput performance of 2-hop VCN with stop-and-wait (SW) or selective repeat (SR) ARQ is theoretically evaluated and compared to the conventional single hop case.

Keyword Virtual cellular network, Multi-hop, 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、現状のセルラネットワークから容易に移行するためには、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が考えられる。

マルチホップ通信では、転送によって遅延時間が増大することから、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。また、パケット通信では、再送制御が必須である。そこで、本論文では、2ホップ VCN を対象とし、再送制御法として、Stop-and-wait (SW) または 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とシングルホップCNのスループット特性の理論式を導出する．第3章で，数値計算結果を示す．第4章はむすびである．

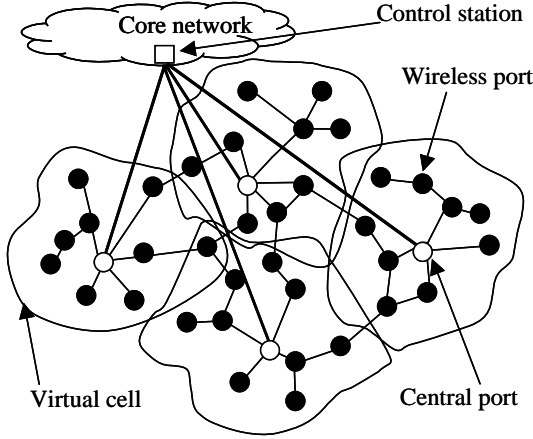


図1 バーチャルセルラネットワーク (VCN)

2. スループット特性

2.1. シングルホップ CN

(1) SW型再送制御

パケット通信では再送制御が不可欠である．今，SW型再送制御を行なっていると仮定する (図2参照)．SW型再送制御ではAckを受信しない間は次のパケットを送信しない．1パケットあたり $M(\text{bit})$ のパケットを N 個送信することを考える．このとき， (MN) ビット / (パケットを送信してから，受信側で全てのパケットが受信され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．1パケット長の時間長を T とする．パケット誤り率は p であるとする．

CP から MT へパケットを送信する下りリンクについて考える．パケットを送信し終わってからAckが返ってくるまでにかかる時間を τ_d ，Ackが返ってきてから次のパケットを送信するまでにかかる時間を τ_t とする．全てのパケット送信で誤りなくパケット受信に成功したとき，パケット送信を開始してから，受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたときまでにかかる時間は， $N(T + \tau_d + \tau_t) - \tau_t$ である (図2参照)．

今，パケット送信が完了するまでに i 回のパケット誤りが生じたとする．このとき，パケット総送信回数は $(N+i)$ 回である． N 個のパケット送信が完了するまでに i 回のパケット誤りが生じる確率を $P_r(i)$ とすると，

$$P_r(i) = (1-p)^N p^i \binom{N+i-1}{i} \quad (1)$$

1回再送が増えるごとに，パケット送信が完了するまでにかかる時間は $(T + \tau_d + \tau_t)$ だけ増える．したがって，パケット送信が完了するまでに i 回のパケット誤りが生じたとき，パケット送信を開始してから，受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたとき

きまでにかかる時間は， $T_{SW-1hop}(i) = (N+i)(T + \tau_d + \tau_t) - \tau_t$ である．したがって，パケット送信が完了するまでにかかる平均時間 $\bar{T}_{SW-1hop}$ は

$$\begin{aligned} \bar{T}_{SW-1hop} &= \sum_{i=0}^{\infty} T_{SW-1hop}(i) P_r(i) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \{(N+i)(T + \tau_d + \tau_t) - \tau_t\} (1-p)^N p^i \binom{N+i-1}{i} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで， $T \gg \tau_t, \tau_d, \tau_r$ のとき

$$\begin{aligned} \bar{T}_{SW-1hop} &= N \cdot T \cdot (1-p)^N \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(N+i)!}{i!N!} p^i \\ &= N \cdot T \cdot (1-p)^N \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(N+1+i)}{\Gamma(N+1)} \frac{p^i}{N!} \\ &= N \cdot T \cdot (1-p)^N {}_2F_1(N+1, 1; 1; p) \quad (3) \\ &= N \cdot T \cdot (1-p)^N \cdot (1-p)^{-N-1} \\ &= N \cdot T \cdot (1-p)^{-1} \end{aligned}$$

ここで ${}_2F_1(\alpha, \beta, \gamma; z) = \frac{\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+n)\Gamma(\beta+n)}{\Gamma(\gamma+n)} \frac{z^n}{n!}$ はガウスの超幾何関数 [10] であり， ${}_2F_1(n, 1, 1; z) = (1-z)^{-n}$ という関係を用いた．したがって

$$S_{SW-1hop} = \frac{MN}{\bar{T}_{SW-1hop}} = (1-p) \frac{M}{T} \quad (4)$$

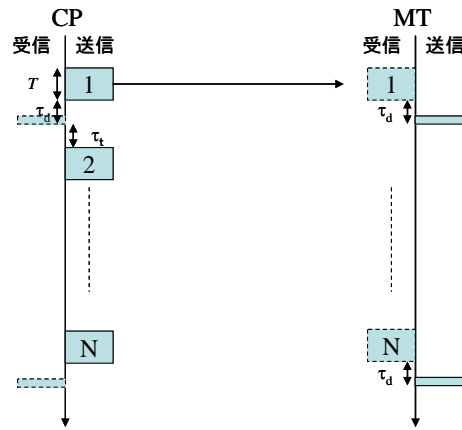


図2 Stop and Wait 1hop

(2) SR型再送制御

SR型再送制御ではAckを受信せずともパケットを送信しつづけ，Nakが返ってきたときに再送パケットを送信する．パケットを送信してから次のパケットを送信するまでにかかる時間を τ_t とする．全てのパケット送信で誤りなくパケット受信に成功したとき，パケット送信を開始してから，受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたときまでにかかる時間は， $N(T + \tau_t) + \tau_d - \tau_t$ である (図3参照)．1回再送が増えるごとに，パケット送信が完了するまでにかかる時間は $(T + \tau_t)$ だけ増える．パケット送信が完了するまでに i 回のパケット誤りが生じたとき，パケット送信

を開始してから、受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたときまでにかかる時間は、 $T_{SR-1hop}(i)=(N+i)(T+\tau_t)+\tau_d-\tau_t$ である。したがって、パケット送信が完了するまでにかかる平均時間 $\bar{T}_{SR-1hop}$ は

$$\begin{aligned}\bar{T}_{SR-1hop} &= \sum_{i=0}^{\infty} T_{SR-1hop}(i)P_r(i) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \{(N+i)(T+\tau_t)+\tau_d-\tau_t\}(1-p)^N p^i \binom{N+i-1}{i}\end{aligned}\quad (5)$$

ここで、 $T \gg \tau_t, \tau_d, \tau_r$ のとき

$$\bar{T}_{SR-1hop} \cong \bar{T}_{SW-1hop}$$

となる。したがって、 $T \gg \tau_t, \tau_d, \tau_r$ のときにはStop-and-wait型の再送制御の場合とスループット特性は等しくなる。

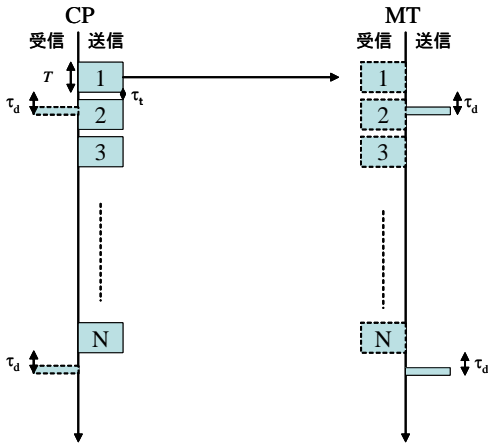


図3 Selective-repeat 1hop

2.2. 2ホップ VCN

2ホップ VCNにおいて、End-to-endで再送制御を行った場合のスループット特性を求める。

(1) SW型再送制御

WPにおいてAckを受け取ってからAckをCPへ送信するまでにかかる時間を τ_r とする。全てのパケット送信で誤りなくパケット受信に成功したとき、パケット送信を開始してから、受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたときまでにかかる時間は、 $N(2T+2\tau_t+\tau_d+\tau_r)-\tau_t$ である(図4参照)。各リンクのパケット誤り率を p とすると、End-to-endのパケット誤り率は $1-(1-p)^2=2p-p^2$ である。今、 N 個のパケットを送信するうち、 i 回パケット再送が生じる確率 $P_r(i)$ は、

$$P_r(i) = (1-p)^{2N} \{2p-p^2\}^i \binom{N+i-1}{i} \quad (6)$$

1回パケット再送が発生するごとに、パケット送信が完了するまでにかかる時間は、 $2T+2\tau_t+\tau_d+\tau_r$ だけ増

える。 N 個のパケットを送信し、 i 回のパケット再送を行ったときに、パケット送信を開始してから、受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたときまでにかかる時間は $T_{SW-2hop}(i)=(N+i)(2T+2\tau_t+\tau_d+\tau_r)-\tau_t$ である。したがって、パケット送信が完了するまでにかかる平均時間 $\bar{T}_{SW-2hop}$ は

$$\begin{aligned}\bar{T}_{SW-2hop} &= \sum_{i=0}^{\infty} T_{SW-2hop}P_r(i) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \{(N+i)(2T+2\tau_t+\tau_d+\tau_r)-\tau_t\} \right. \\ &\quad \left. \times (1-p)^{2N} \{2p-p^2\}^i \binom{N+i-1}{i} \right\}\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $T \gg \tau_t, \tau_d, \tau_r$ のとき

$$\begin{aligned}\bar{T}_{SW-2hop} &= \sum_{i=0}^{\infty} 2T(N+i)(1-p)^{2N} \{2p-p^2\}^i \binom{N+i-1}{i} \\ &= 2NT(1-p)^{2N} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(N+i)!}{i!N!} \{2p-p^2\}^i \\ &= 2NT(1-p)^{2N} (1-p)^{-2N-2} \\ &= 2NT(1-p)^{-2}\end{aligned}\quad (8)$$

したがってスループット $S_{SW-2hop}$ は

$$S_{SW-2hop} = \frac{MN}{\bar{T}_{SW-2hop}} = \frac{(1-p)^2}{2} \frac{M}{T} \quad (9)$$

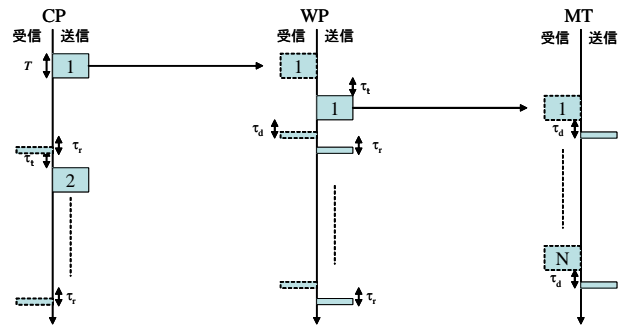


図4 Stop and Wait 2hop

(2) SR型再送制御

WPにおいてNackを受け取ってからNackをCPへ送信するまでにかかる時間を τ_r とする。全てのパケット送信で誤りなくパケット受信に成功したとき、パケット送信を開始してから、受信側でパケット受信が完了したことを送信側で確認できたときまでにかかる時間は、 $(N+1)(T+\tau_t)+\tau_r+\tau_d-\tau_t$ である(図5参照)。また、1回パケット再送が発生するごとに、パケット送信が完了するまでにかかる時間は $T+\tau_t$ だけ増える(正確には最後に送信すべきパケットが誤ったときに

は $2(T + \tau_t)$ だけ増えるが、 N が十分大きいと仮定し、この時間差は無視する.) . i 回のパケット再送を行ったときに、パケット送信を開始してから、受信側でパケット受信が完了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 $\bar{T}_{SR-2hop}$ は

$$\begin{aligned} \bar{T}_{SR-2hop} &= \sum_{i=0}^{\infty} \{ (N+1+i)(T + \tau_t) + \tau_d + \tau_r - \tau_t \} P_r(i) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \frac{ \{ (N+1+i)(T + \tau_t) + \tau_d + \tau_r - \tau_t \} }{ (1-p)^{2N} \sum_{i=0}^{\infty} \binom{N+i-1}{i} (2p-p^2)^i } \right\} \cdot (10) \end{aligned}$$

ここで、 $T \gg \tau_t, \tau_d, \tau_r$ のとき

$$\begin{aligned} \bar{T}_{SR-2hop} &= NT(1-p)^{2N} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(N+i)!}{i!N!} (2p-p^2)^i + T(1-p)^{2N} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(N+i-1)!}{i!(N-1)!} (2p-p^2)^i \\ &= NT(1-p)^{2N} (1-2p-p^2)^{-(N+1)} + T(1-p)^{2N} (1-2p-p^2)^{-N} \\ &= \{ N(1-p)^{-2} + 1 \} T \end{aligned} \cdot (11)$$

したがってスループット $S_{SR-2hop}$ は

$$S_{SR-2hop} = \frac{MN}{\bar{T}_{SR-2hop}} = \frac{1}{(1-p)^{-2} + (1/N)T} \cdot \frac{M}{T} \cdot (12)$$

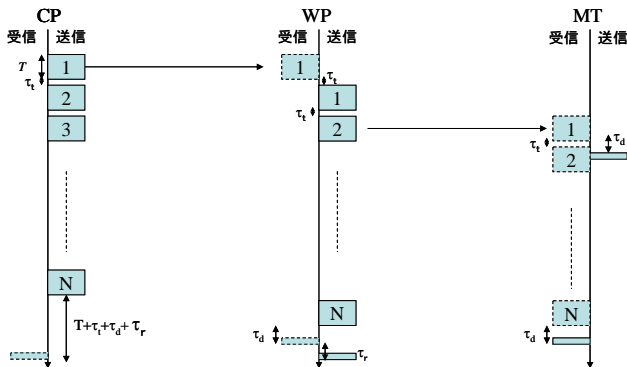


図5 Selective-repeat 2hop

3. 数値計算結果

図6にパケット誤り率対 M/T で正規化したスループット特性を示す. 2ホップVCNの場合, SR型再送制御の方がSW型の再送制御の場合に比べてスループット特性が良くなっている. これは, SR型ではMTからのAckを受信しなくともCPは次のパケットを送信できるのに対し, SW型の再送制御ではMTからのAckを受信しないとCPは次のパケットを送信することができないからである. また, 従来の1ホップの場合に比べ, 2ホップの場合の方がスループット特性は劣化することがわかる. しかしながら, SR型の再送制御を用い, 送信パケット数が多く, パケット誤り率が低ければ, 1ホップの場合とほぼ同等の特性が得られることがわかる. 例えば, パケット誤り率が0.01(0.1)のとき1ホップCNの正規化スループットは0.99(0.9)であるのに対し, $N=\infty$, SR型の再送制御を適用したVCNでは0.98(0.81)である.

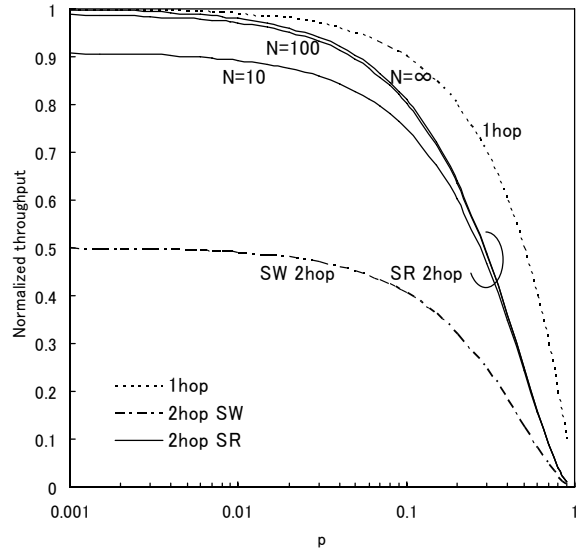


図6 パケット誤り率対正規化スループット特性

4. むすび

本論文では, Stop-and-wait (SW)型と 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, シングルホップセルラネットワークの場合と比較した. SR型の再送制御を適用し, 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セルラネットワーク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] 森口, 宇田川, 一松, 数学公式 III, 岩波全書, 1956.