

マルチホップバーチャルセルラネットワークの スループットとチャネル容量に関する検討

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 超高速無線ネットワークを実現する際に問題となる端末送信電力の増大を克服するために我々はマルチホップバーチャルセルラネットワークを提案している。マルチホップ通信では各リンクで異なる周波数ブロックを割り当てることになるので、各リンクで利用可能な帯域幅が狭くなり、スループットやチャネル容量が低下する。しかしながら、マルチホップ通信では送受信局間の距離が短くなり受信信号対雑音電力比を高くできるので、単純にスループットやチャネル容量が低下するとは言えない。本論文ではこの問題について検討するために、単純な1次元セル配置モデルを用いて、マルチ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、チャネル容量と送信電力の関係を明らかにする。さらに、1ホップの従来のセルラネットワークと比較する。

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、チャネル容量、スループット

Study on throughput and channel capacity of multi-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 In order to realize high speed data transmissions in mobile communication networks, there exists a transmit power problem. To reduce the transmit power while increasing the transmission data rate, authors proposed a wireless multi-hop virtual cellular network (VCN). As the number of hops increases, the bandwidth available for each link is made narrower and the achievable throughput or capacity reduces since each link needs to be allocated a different frequency block. On the other hand, the signal-to-noise plus interference power ratio of each link increases since the communication range of each link is shortened, and thus the achievable throughput or capacity does not necessarily reduce. In this paper, to discuss this problem, relationship among throughput, channel capacity, and transmission power in multi-hop VCN is evaluated and compared to the conventional single hop CN.

Keyword Virtual cellular network, Multi-hop, Channel capacity, Throughput

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超高速伝送可能な無線ネットワーク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。

マルチホップでは、ホップ数分の無線リンクが必要になるので、各無線リンクに割り当てられる周波数ブロックが狭くなり、チャンネル容量、スループットを低下させてしまう。しかしながら、各無線リンクの送受信局間距離が短くなるので、受信信号対雑音電力比 (SNR) が改善され、周波数再利用距離を短くできるので、単純には、チャンネル容量、スループットが低下するとは言えない。筆者らは、これまでに、2 ホップ VCN を対象とし、パケット誤り制御として Selective repeat (SR) [7]~[9] を適用したときのスループットと周波数再利用距離の関係性を求め、2 ホップ VCN が従来のシングルホップ CN に比べ、所要のスループットを得るための周波数再利用距離を短くできることを示した [10]。また、システムを評価する指標として、スループットばかりでなく、チャンネル容量も用いられているので、チャンネル容量の検討も重要である。

ところで、移動無線通信路は周波数選択性フェージング、シャドウイング損失、伝搬損失の影響を受け、複雑に変動している。移動無線ネットワークでは、干渉を許容できる範囲で同一周波数を再利用しているが、複雑に変動する移動通信環境下では、送信電力とチャンネル容量、スループットとの関係を解析的に求めるのは容易ではない。そこで、本論文では、単純な 1 次元セル配置モデルを用いて、マルチホップ VCN における送信電力とスループットおよびチャンネル容量との関係を明らかにする。さらに、従来のシングルホップセルラネットワーク (シングルホップ CN) と比較する。本論文の構成は以下のとおりである。第 2 章で、本論文で検討する 1 次元セル配置モデルを示す。第 3 章でチャンネル容量の数式表現を導出する。第 4 章で、スループットを導出する。第 5 章は数値計算結果を示す。第 6 章はむすびである。

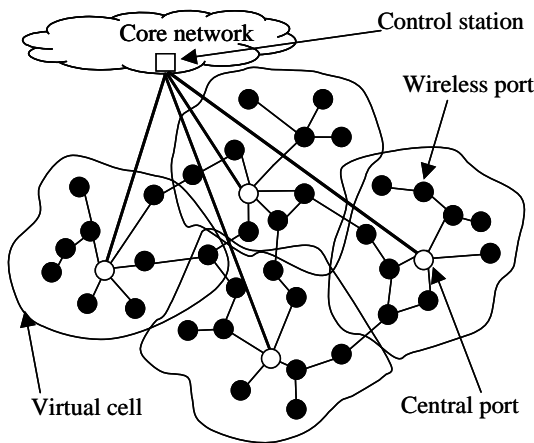


図 1 マルチホップバーチャルセルラネットワーク

ク (マルチホップ VCN)

2. 一次元配置モデル

1 次元に配置された線上で中継を行う K ホップ VCN を考える。中央無線ポート (CP)–移動端末 (MT) 間の距離を R 、線上に配置され、同一周波数帯域を利用している干渉 VC 間の距離を D とする。 $K=2$ の場合に、最も干渉電力が大きくなるマルチホップ VCN の配置を $K=2$ の場合について図 2 に示す。

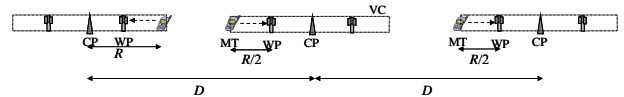


図 2 マルチホップ VCN ($K=2$) の配置

3. チャンネル容量

検討を簡単にするため、シャドウイングおよびフェージングを無視し、指数 α の伝搬損失のみを考える。各無線ポート (WP) および MT の送信電力を P_t とする。雑音電力密度を N_0 とし、利用可能な周波数帯域幅を W とする。マルチホップのときにはこの帯域を K 個のブロックに分割し、各ホップの無線リンクでは帯域幅 W/K で通信を行うものとする。最も干渉電力が大きくなる場合の各無線リンクの受信信号対雑音 + 干渉電力比 (SINR) γ_K は次式で表される。

$$\gamma_K = \frac{K^\alpha}{\frac{1}{K} \left(\frac{P_t r_0^\alpha}{W N_0} \right)^{-1} + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{iD}{R} + \frac{1}{K} - 2 \right)^{-\alpha} + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{iD}{R} - \frac{1}{K} \right)^{-\alpha}} \quad (1)$$

エリア全体のチャンネル容量は干渉局がない場合の $D/R (>1)$ 分の 1 になる。従って、 K ホップの場合のチャンネル容量 C (bps/Hz) [11] は次式で表される。

$$C = \frac{1}{K} \left(\frac{D}{R} \right)^{-1} \log_2 \left[1 + \frac{K^\alpha}{\left(\frac{P_t R^\alpha}{W N_0} \right)^{-1} + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{iD}{R} + \frac{1}{K} - 2 \right)^{-\alpha} + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{iD}{R} - \frac{1}{K} \right)^{-\alpha}} \right] \quad (2)$$

4. スループット

パケット長が M ビットの packets を合計で J 個送信することを考える。ユーザスループットを (MJ ビット) / (パケット送信開始してから、全ての packets を正しく受信するまでに要する平均通信時間) で定義する。パケット通信では誤り制御が不可欠である。本論文では理想 Selective repeat (SR) ARQ を用いるものとする。SR-ARQ では、誤った packets のみを選択的に再送要求する。図 3 にリンク毎に SR-ARQ を適用したときのマルチホップ VCN における packets 通信の例 ($K=2$) を示す。図 3 において、 T_K はデータ packets 時間長、 T_a は Nack packets 時間長、 τ_g はデータ packets

の送信時間間隔, τ_{rd} は無線ポート (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要する時間である. K ホップでは, 利用可能な帯域を K 個のブロックに分割して, 各リンクに割り当てるので, データパケット時間長は, 1 ホップの場合に比べ K 倍になる.

$$T_K = KT_1 \quad (3)$$

もし, $T_K \gg \tau_g, \tau_{rd}$ であれば, K ホップ VCN のユーザスループット s は次式で表される.

$$s = \frac{MJ}{KT_1} \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} (J+K-1+i)P(i)} \quad (4)$$

ここで, $P(i)$ は通信時間が $(J+K-1+i)KT_1$ となる確率である.

ところで, 同一搬送波周波数は距離 D で繰り返して利用されるので, エリア全体のシステムスループット S はユーザスループット s の R/D 倍になる. したがって, S は次式で表される.

$$S = \left(\frac{D}{R}\right)^{-1} \frac{MJ}{KT_1} \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} (J+K-1+i)P(i)} \quad (5)$$

1 パケット長内で受信 SINR の変動がないものと仮定すると, 平均パケット誤り率 p は次式で与えられる.

$$p = 1 - [1 - p_b]^M \quad (6)$$

ここで, p_b は平均ビット誤り率 (BER), M はパケット長 (bit) である. QPSK (quadrature phase shift keying) 同期検波を仮定する. 干渉をガウス変数として近似すると, p_b は次式で与えられる [11].

$$p_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\gamma_K}{2}} \quad (7)$$

ここで, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$ は誤差補関数である.

式(1),(6),(7)から得られるパケット誤り率を用いて, 式(4)中の $P(i)$ を求めることができ, システムスループットを算出できる.

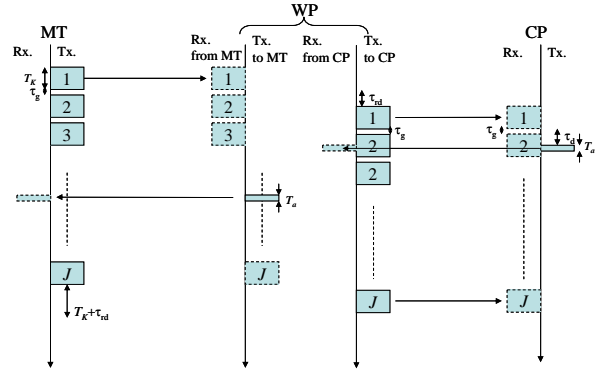


図3 パケット通信例 ($K=2$)

5. 数値計算結果

簡単のため再隣接の干渉局のみを考慮する. 図4に送信電力対チャンネル容量特性を示す. 図4(a)は $D/R=4$, (b)は $D/R=5$ の場合である. 周波数再利用距離が短い場合には, シングルホップよりもマルチホップの方が大きなチャンネル容量が得られることがわかる. また, 周波数再利用距離が長くても, 低送信電力しか許容できないときにはマルチホップの方がシングルホップよりも大きなチャンネル容量が得られることがわかる. これは, マルチホップでは送受信局間の距離が短くなるため, 受信 SINR が改善されるからである. 一方, 高送信電力を許容できるときには, シングルホップでも十分な受信 SINR が得られるので, シングルホップの方が大きなチャンネル容量を得ることができる.

ところで, ホップ数が大きいほど受信 SINR が向上するものの, 各ホップで利用可能な周波数ブロックが狭くなるから, チャンネル容量を最大とする最適なホップ数が存在している. このことについて考察する. 低送信電力のときには, 品質劣化の要因は他局間干渉よりも雑音電力になるから, 式(2)は

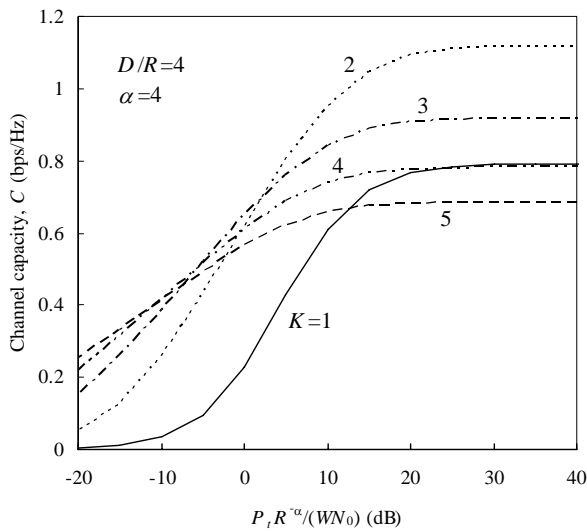
$$C = \frac{1}{K} \left(\frac{D}{R}\right)^{-1} \log_2 \left(1 + \left(\frac{P_t R^{-\alpha}}{WN_0} \right) K^{\alpha+1} \right), \quad (8)$$

となる. $\partial C / \partial K = 0$ より最適ホップ数を求める. $\partial C / \partial K$ は

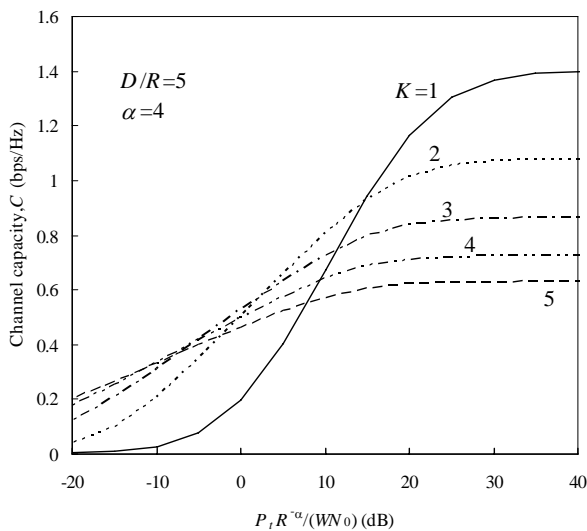
$$\frac{\partial C}{\partial K} = \frac{1}{K} \left(\frac{D}{R}\right)^{-1} \left\{ -\frac{1}{K} \log_2 \left(1 + \left(\frac{P_t R^{-\alpha}}{WN_0} \right) K^{\alpha+1} \right) + \frac{(\alpha+1) \left(\frac{P_t R^{-\alpha}}{WN_0} \right) K^{\alpha}}{1 + \left(\frac{P_t R^{-\alpha}}{WN_0} \right) K^{\alpha+1}} \log_e 2 \right\} \quad (9)$$

であるから, 例えば, $P_t R^{-\alpha} / WN_0 = 5 \text{ dB}$ のときに $\partial C / \partial K = 0$ となるのは, $K \approx 1.2$ である. 実際には, K は自然数しかとり得ないので, $K=2$ ホップのと

きに最大のチャンネル容量が得られることになる。



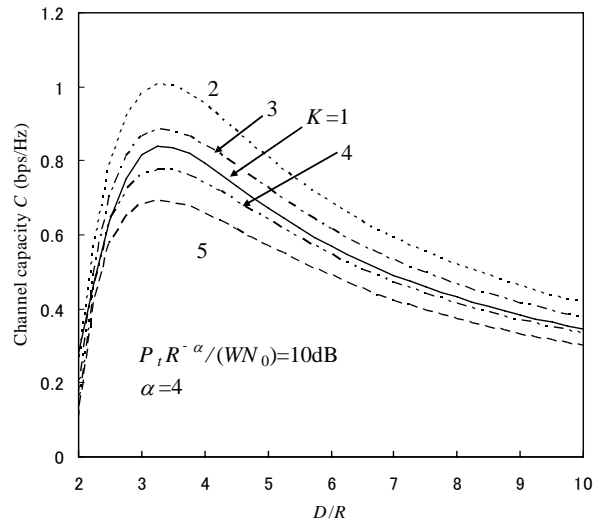
(a) $D/R=4$



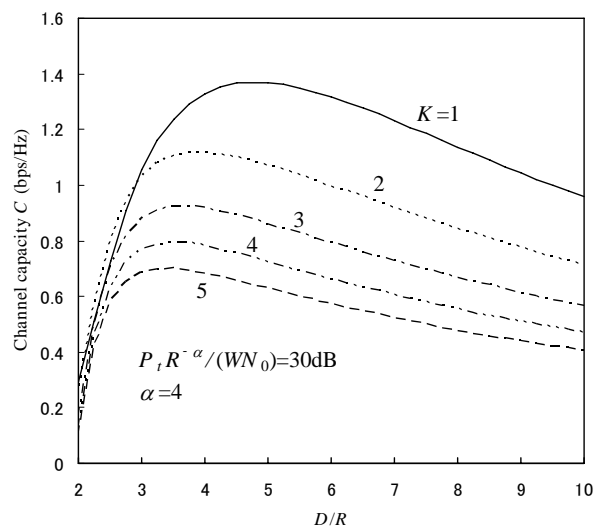
(b) $D/R=5$

図4 送信電力対チャンネル容量特性

図5に周波数再利用距離対チャンネル容量特性を示す。図5(a)および(b)は、それぞれ $P_t R^{-\alpha} / WN_0 = 10\text{dB}$ および 30dB の場合である。図5(a)からチャンネル容量を最も大きくする最適周波数再利用距離はホップ数が多くなるほど短くなることがわかる。これは、ホップ数が多いほど送受信局間の距離を短くでき、受信SINRを高くできるからである。また、図5(a)より、低送信電力のときには、マルチホップの方がシングルホップよりも高いチャンネル容量が得られることがわかる。これは、シングルホップでは送受信局間の距離が長いので、低送信電力では十分な受信SINRが得られなくなるからである。



(a) $P_t R^{-\alpha} / (WN_0) = 10\text{dB}$



(b) $P_t R^{-\alpha} / (WN_0) = 30\text{dB}$

図5 周波数再利用距離対チャンネル容量特性

図5から送信電力が与えられたときに最大のチャンネル容量が得られるホップ数と周波数再利用距離の組み合わせが求まる。図6に送信電力対最大チャンネル容量特性を示す。図6の各プロットに添えられている数字の組み合わせは、最大スループットが得られるホップ数と周波数再利用距離の組である。高送信電力を許容できるときには、シングルホップがチャンネル容量を最大にできるが、送信電力が制限されるほど、最大チャンネル容量を得られるホップ数が多くなることがわかる。これは、高送信電力を許容できるときには、各リンクで最も広く周波数ブロックを利用できるシングルホップが最も大きなチャンネル容量が得られるが、送信電力が低くなるほど、ホップ数を多くして送受信局間の距離を短くし高い受信電力を得た方が大きなチャンネル容量を得られるようになるからである。

例えば、 $W=5\text{MHz}$ とすると $P_t R^{-\alpha}/WN_0 = 20\text{dB}$ のときには、 $K=1$ で 1.2bps/Hz の最大チャネル容量が得られる。同じ送信電力を維持したまま $W=150\text{MHz}$ とすれば、 $P_t R^{-\alpha}/WN_0 = 5\text{dB}$ となり、 $K=3$ のときに 0.8bps/Hz の最大チャネル容量が得られる。

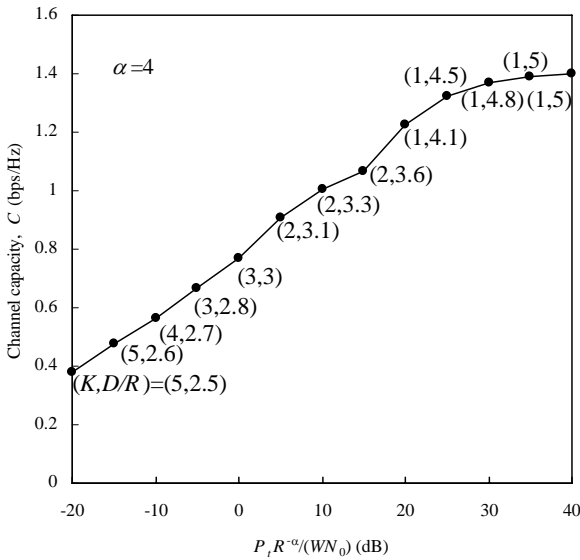
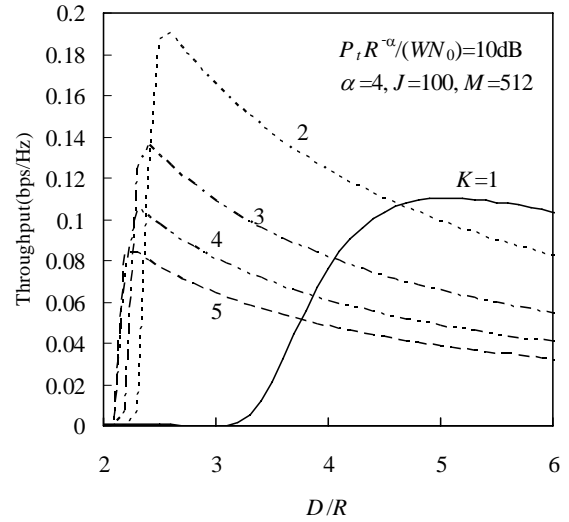
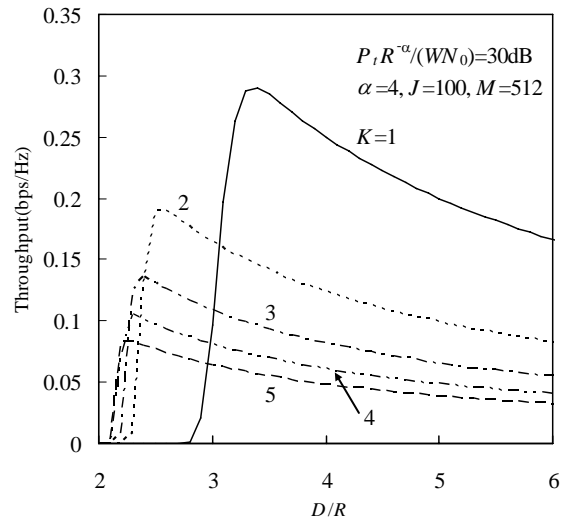


図6 送信電力対最大チャネル容量

図7に周波数再利用距離対スループット特性を示す。図7(a)および(b)は、それぞれ $P_t R^{-\alpha}/WN_0 = 10\text{dB}$ および 30dB の場合である。図7より、スループットが最大となる周波数再利用距離が存在することがわかる。これは、周波数再利用距離が長いほど干渉局との距離が長くなるので、干渉電力が小さくなるものの、同一周波数を利用するには長い距離が必要となるためである。ホップ数が多いほど、スループットが最大となる周波数再利用距離が短くなる。これは、ホップ数が多いほど、送受信局間の距離が短くなるので、受信 SINR が高くなるからである。また、ホップ数が少ないほど達成可能な最大スループットが高くなる。これは、ホップ数が少ないほど、各リンクで利用できる周波数ブロックが広がるからである。また、図7(a)より、低送信電力の場合には、シングルホップでは大きなスループットが得られないことがわかる。これは、シングルホップでは、送受信局間の距離が長いので、十分な受信 SINR が得られないからである。



(a) $P_t R^{-\alpha}/(WN_0)=10\text{dB}$



(b) $P_t R^{-\alpha}/(WN_0)=30\text{dB}$

図7 周波数再利用距離対スループット特性

図7から送信電力が与えられたときに最大のチャネル容量が得られるホップ数と周波数再利用距離の組み合わせが求まる。図8に送信電力対最大スループット特性を示す。図8の各プロットに添えられている数字の組み合わせは、最大スループットが得られるホップ数と周波数再利用距離の組である。チャネル容量の場合と同様に、高送信電力を許容できるときには、シングルホップが最大スループットを得られるが、送信電力が制限されるほど、最大スループットが得られるホップ数が多くなることがわかる。

例えば、 $W=5\text{MHz}$ とすれば、 $P_t R^{-\alpha}/WN_0 = 20\text{dB}$ のときに、 $K=1$ で最大スループット 0.28bps/Hz になるので $W=5\text{MHz}$ では 1.4Mbps となる。同じ送信電力を維持したまま、 $W=150\text{MHz}$ にすれば、

$P_t R^{-\alpha} / WN_0 = 5\text{dB}$ となるので、図8より $K=2$ のときに最大スループット 0.19bps/Hz なので 28.5Mbps となる。一方、同一送信電力でシングルホップ ($K=1$) では十分な受信 SINR が得られないためスループットは0になってしまう。

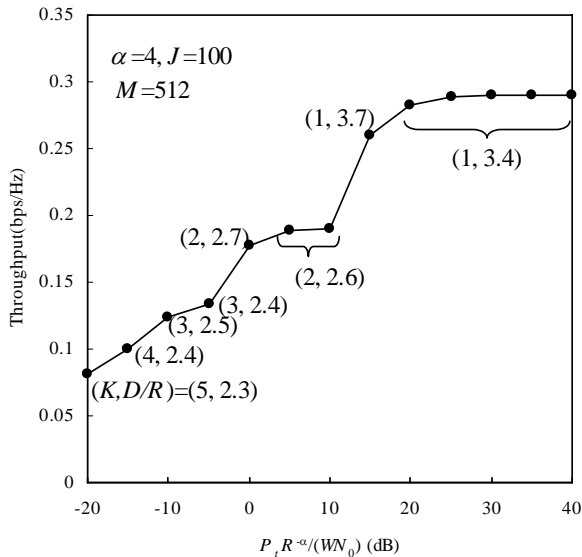


図8 送信電力対最大スループット特性

6. むすび

本論文では、単純な1次元セル配置モデルを用いて、マルチホップバーチャルセルラネットワークにおける送信電力とチャネル容量、スループットとの関係を求めた。高送信電力のときには、従来のシングルホップCNが最大チャネル容量および最大スループットを得られるが、送信電力が制限されるほど、最大チャネル容量および最大スループットを得られるホップ数が多くな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] E. KUDOH and F. ADACHI, "Frequency Reuse Distance of A 2-hop Virtual Cellular Network", The 14th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2008), Akihabara, Japan, 14-16 October 2008.
- [11] J. G. Proakis, Digital communications, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.