

逐次型干渉除去法を用いた CDMA パケット通信システムにおける最大スループットの解析

田所 幸浩<sup>†a)</sup> (学生員) 岡田 啓<sup>††</sup> (正員)  
 山里 敬也<sup>††</sup> (正員) 片山 正昭<sup>††</sup> (正員)

An Analysis of the Maximum Throughput on CDMA Packet Communication Systems Employing Successive Interference Cancellation

Yukihiro TADOKORO<sup>†a)</sup>, Student Member, Hiraku OKADA<sup>††</sup>, Takaya YAMAZATO<sup>††</sup>, and Masaaki KATAYAMA<sup>††</sup>, Members

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市  
 Department of Electrical Engineering and Computer Science,  
 Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho,  
 Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

<sup>††</sup> 名古屋大学エコトピア科学研究機構, 名古屋市  
 EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho,  
 Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: tadokoro@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本論文は, 逐次型干渉除去法を用いた CDMA パケット通信システムにおける最大スループットを, 受信信号電力分布の観点から解析的に明らかにする. 更に, 最大スループットを実現する受信信号電力分布は, 平均ビット誤り率に関して最適化した受信信号電力を, 一定数までのパケットに割り当てたものであることを示す.

キーワード 逐次型干渉除去法, 符号分割多元接続パケット通信システム, 受信信号電力分布

1. まえがき

CDMA パケット通信システムは, ランダムにパケットを送出可能であり, 複数パケットを同時に正しく伝送可能であるため, 簡素で高効率な無線パケット通信方式を実現する可能性がある [1], [2]. 特にスロットと呼ばれる時間枠に同期してパケットを送信するシステムは, 任意時刻に送信するシステムに比べて能率が高く, 大きな注目を浴びている [1]~[4]. しかしこれらのシステムでは, CDMA 技術を用いていることからパケット間に多元接続干渉 (Multiple Access Interference: MAI) が発生し, その能率は著しく制限されてしまう [3]~[6].

MAI を抑圧する技術の一つに干渉除去技術がある [4]~[9]. 特に逐次型干渉除去法 (Successive Interference Cancellation: SIC) は, 各ユーザの受信信号電力にばらつきがある環境 (ここでは不均一な受信信号電力分布と呼ぶ) での優れた MAI 抑圧能力, 簡素な構成で実現が可能等の特徴をもつため, 多くの研究がなされている [6]~[9]. そこで文献 [6] において,

CDMA パケット通信システムに SIC を用いた場合の能率が検討されている. そこでは能率としてスループットが取り上げられ, 不均一な受信信号電力分布の場合に優れたスループット実現の可能性が示されている. しかしながら, レイリー分布といった特定の受信信号電力分布に対するスループットのみについて検討されており, 達成可能な最大のスループットは明らかにされていない. そして最大スループットがどのような受信信号電力分布によって実現されるのかも明らかではない.

本論文では, SIC を用いた CDMA パケット通信システムにおける最大スループットを解析的に明らかにする. 特に本解析では, 受信信号電力分布の観点から解析を行う. その結果, SIC によるスループット改善の限界を示す. 更に最大スループットを実現する受信信号電力分布も明らかにする.

2. システムモデル

非同期 DS-CDMA パケット通信システムの無線アップリンクを取り扱う. システム内には無限個の端末 (User Station: US) が存在し, 各端末におけるパケット送信要求の発生は, 生起率  $\lambda$  のポアソン分布に従う. そのため, 1 パケット長時間に平均して発生するパケット送信要求数 (オフアードロード)  $G$  は,  $T_p$  を 1 パケット長時間として  $G = \lambda T_p$  となる. パケットの送信要求が発生した端末では, スロットに同期してパケットを送信する. 基地局では, 受信したパケット信号に対して SIC に基づく干渉除去の操作を行いつつ, 送信されたデータの推定を行う.

パケットの送信要求が発生した端末では, 最初に送信するデータを大きさが  $L$  [bit] の固定長でパケット化する. パケット化されたデータは, Binary Phase Shift Keying (BPSK) を用いて変調され, そして各端末ごとに固有に割り当てられた拡散率  $N$  の拡散符号 (ランダム符号) を用いて直接拡散される. 最後に各端末はこのパケットの信号に搬送波を乗算し, スロットに同期して 1 ホップで基地局に送信する. 送信されたパケット信号は, 両側電力スペクトル密度が  $N_0/2$  であるような加法的白色ガウス雑音 (AWGN) が加わり基地局で受信される. この様子を図 1 に示す. なお, 端末  $k$  の送信したパケット信号の受信信号電力  $P_k$  は確率密度関数  $f(P_k)$  に従い, 一般性を失わず  $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_{K(t)}$  とする. 基地局では, 入力された受信信号に対して SIC による MAI 抑圧の操作を行い, パケットのデータを推定する [6], [7]. ここで

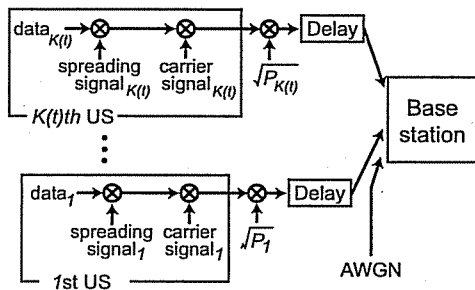


図1 送信機と通信路のモデル  
Fig.1 Transmitter and channel model.

用いる受信機は [6] のものを使用する。

3. 最大スループットの導出

SIC を用いた CDMA パケット通信システムにおける最大スループットを、受信信号電力分布の観点から解析的に導出する。ここで用いるスループットは、1 パケット時間当りに平均して伝送に成功するパケット数と定義される。また、パケットに含まれる  $L$  ビットすべてが正しく復調されたとき、パケットの伝送に成功したものとする。

任意のパケットに着目したときの平均パケット成功確率を示す。まず、あるスロットにおける同時送信局数を  $K$ 、着目パケットの干渉除去の操作が行われる順番を  $l$  と定義する。このとき、信号電力が  $P_k$  である着目パケットの平均パケット成功確率は

$$Q_s(P_k) = \sum_{K=1}^{\infty} \left\{ \sum_{l=1}^K P_c(K, l | P_k)^L P_{P_k}^d(l | K) \right\} P_G(K). \tag{1}$$

と書ける [1], [6]。ここで、 $P_c(K, l | P_k)$  は着目パケットのビット成功確率である。また、 $P_G(K)$  は  $K$  個のパケットが同時に送信される確率を表し、平均  $G$  のポアソン分布に従う。更に、 $P_{P_k}^d(l | K)$  は着目パケットに対する干渉除去の操作が  $l$  番目に行われる確率を表し、以下のように書ける [6]：

$$P_{P_k}^d(l | K) = \binom{K-1}{l-1} (1 - F(P_k))^{l-1} F(P_k)^{K-l} \tag{2}$$

$$F(x) = \int_0^{\infty} f(x) dx. \tag{3}$$

式 (1) を用いるとスループットは

$$S(G) = G \cdot \int_0^{\infty} Q_s(P_k) f(P_k) dP_k \tag{4}$$

のように求められる。

式 (1) の平均パケット成功確率の最大化を、中括弧の中の項の最大化により行う。特にここでは受信信号電力に関する最大化を考えているため、まず受信信号電力に依存する、ビット成功確率  $P_c(K, l | P_k)$  の最大化を考える。 $P_e(K, l | P_k)$  を着目パケットのビット誤り率とすると

$$P_c(K, l | P_k) = 1 - P_e(K, l | P_k) \tag{5}$$

であるので、

$$\begin{aligned} \max_{P_k} & \left[ \sum_{l=1}^K P_c(K, l | P_k)^L P_{P_k}^d(l | K) \right] \\ &= \sum_{l=1}^K \max_{P_k} \left[ \left\{ 1 - P_e(K, l | P_k) \right\}^L P_{P_k}^d(l | K) \right] \\ &\leq \sum_{l=1}^K \left\{ 1 - \min_{P_k} [P_e(K, l | P_k)] \right\}^L \\ &\quad \cdot \max_{P_k} [P_{P_k}^d(l | K)]. \end{aligned} \tag{6}$$

以下では、式 (6) のビット誤り率  $\min_{P_k} [P_e(K, l | P_k)]$  を求める。

相加相乗平均の関係より

$$\frac{1}{K} \sum_{l=1}^K \left\{ P_e(K, l | P_k) \right\} \geq \left\{ \prod_{l=1}^K P_e(K, l | P_k) \right\}^{\frac{1}{K}} \tag{7}$$

が成立する。等号が成立する条件は

$$P_e(K, 1 | P_k) = \dots = P_e(K, K | P_k) \tag{8}$$

である。ここで式 (8) を満たすビット誤り率を  $Q(\sqrt{\gamma K})$  と定義する。なお、 $\gamma K$  は信号対雑音干渉電力比であり、

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \tag{9}$$

である。式 (8) を満たすビット誤り率を与える受信信号電力は、平均ビット誤り率を最小化するような受信信号電力  $\check{P}_k^K$  である。このような受信信号電力は、文献 [8] において、Error Propagation のある場合を想定したときに求められている受信信号電力分布に従う。

つまり

$$\check{P}_{k+1}^K = \frac{1 + \frac{1}{3N}}{1 + \frac{1}{3N}\gamma_K} \check{P}_k^K \quad (10)$$

のように与えられる。このとき式(7), (8)より

$$\begin{aligned} Q(\sqrt{\gamma_K}) &= \min_{P_k} \left[ \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K P_e(K, l | P_k) \right] \\ &= \min_{P_k} \left[ P_e(K, l | P_k) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

が得られる。よって、式(1)の平均パケット成功確率は、式(6), (11)より

$$\begin{aligned} Q_s(P_k) &= \sum_{K=1}^{\infty} \left\{ \sum_{l=1}^K P_c(K, l | P_k)^L P_{P_k}^d(l | K) \right\} P_G(K) \\ &\leq \sum_{K=1}^{\infty} \max_{P_k} \left[ \sum_{l=1}^K P_c(K, l | P_k)^L P_{P_k}^d(l | K) \right] P_G(K) \\ &\leq \sum_{K=1}^{\infty} \left[ \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L \right. \\ &\quad \left. \cdot \max_{P_k} \left[ P_{P_k}^d(l | K) \right] \right] P_G(K) \end{aligned} \quad (12)$$

となる。ここで、全確率の定理より

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^K \max_{P_k} \left[ P_{P_k}^d(l | K) \right] &= \max_{P_k} \left[ \sum_{l=1}^K P_{P_k}^d(l | K) \right] \\ &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

である。よって式(12)は

$$Q_s(P_k) \leq \sum_{K=1}^{\infty} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L P_G(K) \quad (14)$$

となる。すなわち受信信号電力  $P_k$  を、平均ビット誤り率を最小化するような受信信号電力  $\check{P}_k^K$  とすることで、平均パケット成功確率の上界が得られる。そして式(4)のスループットは、式(12)を用いて

$$\begin{aligned} S(G) &\leq G \int_0^{\infty} \sum_{K=1}^{\infty} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L \\ &\quad \cdot P_G(K) f(P_k) dP_k \\ &= G \sum_{K=1}^{\infty} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L P_G(K) \end{aligned} \quad (15)$$

となる。

式(15)のスループットの最大値を求める。式(15)のスループットは、無限個までパケットが送信される場合を想定したときの期待値である。これは、パケットの送信を  $\kappa$  個まで制限する場合において、 $\kappa$  を無限大とする場合と等価としてよい。すなわち式(15)は

$$\begin{aligned} S(G) &\leq \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \left[ G_{sys}(\kappa) \sum_{K=1}^{\kappa} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L \right. \\ &\quad \left. \cdot P_G(K, \kappa) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

と書ける。なお、 $\kappa$  個までのパケット送信の制限下において、オフロードロードが  $G$  のときに同時送信局数が  $K$  となる確率を

$$P_G(K, \kappa) = \frac{G^K / K!}{\sum_{j=0}^{\kappa} G^j / j!} \quad (17)$$

とした。更に、このときに実際に送信されているパケットのトラフィック量  $G_{sys}$  を

$$G_{sys}(\kappa) = \frac{\sum_{j=0}^{\kappa} j \cdot G^j / j!}{\sum_{j=0}^{\kappa} G^j / j!} \quad (18)$$

とした[10]。

式(16)において、同時送信局数  $K$  が大きくなるとパケットの伝送に失敗する確率も高くなり、スループットは劣化する。この劣化は、同時送信局数がある値以下に制限することで小さくなる[10], [11]。そのため、式(16)はしきい値  $\kappa$  が無限大ではなく、ある適当な値をとる場合に最大となる。すなわち

$$\begin{aligned} S(G) &\leq \max_{\kappa} \left[ G_{sys}(\kappa) \sum_{K=1}^{\kappa} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L \right. \\ &\quad \left. \cdot P_G(K, \kappa) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

となる。そこで式(19)のスループットを与えるしきい値  $\bar{\kappa}$  を求める。これはオフロードロード  $G$  が無限大のときを考えることで求められる[11]。つまり

$$\bar{\kappa} = \arg \max_{\kappa} \left[ \lim_{G \rightarrow \infty} G_{sys}(\kappa) \right]$$

$$\sum_{K=1}^{\kappa} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L P_G(K, \kappa) \quad (20)$$

ここで

$$\lim_{G \rightarrow \infty} G_{sys}(\kappa) = \kappa \quad (21)$$

$$\lim_{G \rightarrow \infty} P_G(K, \kappa) = \begin{cases} 1 & (K = \kappa) \\ 0 & (K \neq \kappa) \end{cases} \quad (22)$$

の係数を用いると、式 (20) は

$$\bar{\kappa} = \arg \max_{\kappa} \left[ \kappa \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_{\kappa}}) \right\}^L \right] \quad (23)$$

となる。そして最大スループットは式 (19) より

$$S(G) \leq G_{sys}(\bar{\kappa}) \sum_{K=1}^{\bar{\kappa}} \left\{ 1 - Q(\sqrt{\gamma_K}) \right\}^L P_G(K, \bar{\kappa}) \quad (24)$$

となる。

以上をまとめると次のようになる。CDMA パケット通信システムに SIC を用いた場合の最大のスループットは式 (24) である。そしてこの最大スループットは、受信信号電力が次のような値をとる場合に実現される：

$$P_k = \begin{cases} \check{P}_k^{\bar{\kappa}} & (k \leq \bar{\kappa}) \\ 0 & (k > \bar{\kappa}) \end{cases} \quad (25)$$

#### 4. 最大スループットの例

3. で求めた最大スループットの例を示し、これを評価する。比較のため、文献 [6] に示されている均一な受信信号電力分布の場合のスループットと、不均一な受信信号電力の場合（レイリーフェージング環境下）のスループットも示す。

スループットを図 2 に示す。ここで、パケット長  $L = 500$  [bits]、拡散率  $N = 31$ 、1 ビット当りの平均エネルギー  $E_b/N_0 = 30$  [dB] とした。このとき、式 (23) より  $\bar{\kappa} = 20$  のときに最大スループットは得られる。

図 2 より、解析によって得られた最大スループットは、他のものに比べても上回っていることが確認できる。またこの図より、オフロードがある程度小さい領域においては、SIC を用いることで、送信要求の発生したすべてのパケットがその伝送に成功する、傾き 1 の理想特性が得られるといえる。しかしオフロードが大きい領域では、SIC を用いることによ

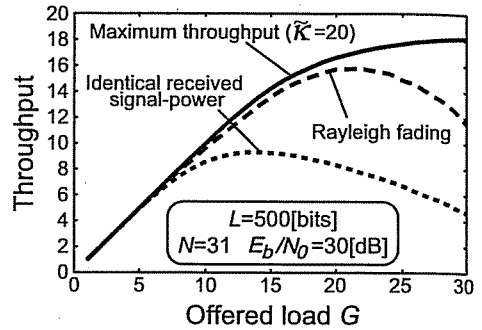


図 2 スループット特性  
Fig. 2 Throughput performance.

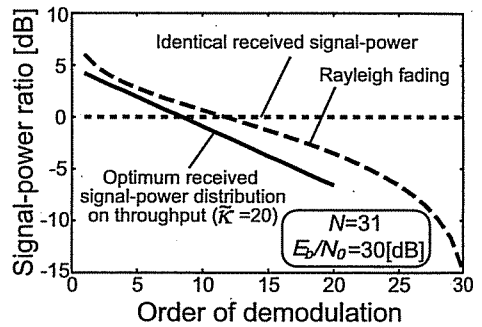


図 3 受信信号電力分布  
Fig. 3 Signal-power distribution.

てスループットを理想特性にすることができず、ある一定値に収束する。SIC では着目パケットの復調時に、着目パケットの受信信号電力より小さい受信信号電力をもつパケットからの MAI を抑圧できない [5], [7]。そのため、同時送信局数が大きくなると SIC の MAI 抑圧効果は減少し、パケットの信号対雑音干渉電力比は小さくなる。これはパケットの伝送失敗を引き起こし、達成可能なスループットに制限を与えてしまう。つまり、オフロードが大きくなっても、パケットの伝送成功に必要な信号対雑音干渉電力比を維持できる領域までしかスループットは達成できない。なお、この場合のパケットの伝送成功に必要な信号対雑音干渉電力比  $\gamma_{\bar{\kappa}}$  は以下の式を満たす [8]

$$\bar{\kappa} = \left\lfloor \frac{\log_{10} \gamma_{\bar{\kappa}}}{\log_{10} \left( 1 + \frac{1}{3N} \gamma_{\bar{\kappa}} \right) - \log_{10} \left( 1 + \frac{1}{3N} \right)} \right\rfloor \quad (26)$$

ここで  $\lfloor x \rfloor$  は  $x$  を越えない最大の整数を表す。図 2 の場合、 $\gamma_{\bar{\kappa}}$  はおよそ 11 [dB] となる。

最大スループットを与える受信信号電力分布を図 3

に示す。ここでは、各分布における受信信号電力の平均値  $\bar{P}_k$  に対する受信信号電力のデシベル表示、つまり  $10 \log_{10}(P_k/\bar{P}_k)$  を示してある。また、パケットの送信要求数が 30 のときを取り上げている。式 (25) より、最大スループットを与える受信信号電力分布では、送信要求の発生したパケットすべてが送信されず、 $\bar{r}_k = 20$  個まで送信される。そして実際に送信されたパケットの受信信号電力は、平均ビット誤り率特性を最小にするような受信信号電力分布に従う。図 3 より、最大スループットを与える受信信号電力分布は直線となり、適当な傾きをとることが分かる。この直線の傾きは

$$10 \log_{10} \frac{\bar{P}_{k+1}^{\bar{r}_k} - 10 \log_{10} \bar{P}_k^{\bar{r}_k}}{1 + \frac{1}{3N} \gamma_{\bar{r}_k}} \quad (27)$$

と求められる [8]。式 (26), (27) より、パケットの伝送に必要な信号対雑音干渉電力比  $\gamma_{\bar{r}_k}$  が、最大スループットを与える受信信号電力分布の傾きとして現れていることが分かる。

## 5. むすび

本論文では、SIC を用いた CDMA パケット通信システムにおける最大スループットを解析的に明らかにした。その際、SIC を用いた CDMA パケット通信システムではスループットが受信信号電力分布に大きく依存することから、受信信号電力分布の観点から解析を行った。その結果、SIC によるスループットの改善効果に限界のあることが分かった。また、最大スループットを実現する受信信号電力分布は、平均ビット誤り率に関して最適化した受信信号電力を、一定数までのパケットに割り当てたものであることを示した。

## 文 献

- [1] T. Yamazato, A. Ogawa, M. Katayama, and A. Jamalipour, "Introduction to CDMA ALOHA," IEEE Global Telecommunications Conference, Tutorial Note, TI-13, 1998.
- [2] P.W. Graaf and J.S. Lehnert, "Performance comparison of a slotted ALOHA DS/SSMA network and a multichannel narrow-band slotted ALOHA network," IEEE Trans. Commun., vol.46, no.4, pp.544-552, April 1998.
- [3] 立川敬二, W-CDMA 移動通信方式, 丸善, 2001.
- [4] T. Shinomiya and H. Suzuki, "Slotted ALOHA mobile packet communication system with multiuser detection in a base station," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.49, no.3, pp.948-955, May 2000.
- [5] S. Verdú, Multiuser Detection, Cambridge University Press, 1998.
- [6] 田所幸浩, 岡田 啓, 山里敬也, 片山正昭, 小川 明, "逐次型干渉除去法を用いた CDMA Unslotted ALOHA 方式の特性評価," 信学論 (A), vol.J86-A, no.2, pp.168-178, Feb. 2003.
- [7] P.R. Patel and J.M. Holtzman, "Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.12, no.5, pp.796-807, June 1994.
- [8] R.M. Buehrer, "Equal BER performance in linear successive interference cancellation for CDMA systems," IEEE Trans. Commun., vol.49, no.7, pp.1250-1258, July 2001.
- [9] J.G. Andrews and T.H. Meng, "Optimum power control for successive interference cancellation with imperfect channel estimation," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.2, no.2, pp.375-383, March 2003.
- [10] K. Toshimitsu, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "A novel spread slotted aloha system with channel load sensing protocol," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.12, no.4, pp.665-672, May 1994.
- [11] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "Throughput of DS/SS unslotted aloha system with channel load sensing," IEEE Global Telecommunications Conference, vol.2, pp.1492-1496, 1995.

(平成 16 年 7 月 14 日受付, 9 月 10 日再受付,  
10 月 8 日最終原稿受付)