

有限ユーザ CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット解析法に関する一検討

岡田 啓<sup>†</sup> (学生員)      山里 敬也<sup>†</sup> (正員)  
片山 正昭<sup>†</sup> (正員)      小川 明<sup>†</sup> (正員)

Throughput Analysis for CDMA Unslotted ALOHA Systems with Finite Population Assumption

Hiraku OKADA<sup>†</sup>, Student Member, Takaya YAMAZATO<sup>†</sup>,  
Masaaki KATAYAMA<sup>†</sup>, and Akira OGAWA<sup>†</sup>, Members

<sup>†</sup>名古屋大学工学研究科電子情報学専攻, 名古屋市  
Department of Information Electronics, Nagoya University, Nagoya-shi,  
464-8603 Japan

あらまし CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット特性を, ユーザ数有限という条件の下で待ち行列モデルを用いて解析的に導出し, 特性評価を行う。またこの方式に CLSP を適用したシステムも同様にして特性を解析的に導出する。

キーワード CDMA Unslotted ALOHA 方式, CLSP, ユーザ数有限, 固定長パケット, スループット特性

1. まえがき

CDMA Unslotted ALOHA (CDMA U-ALOHA) 方式は, 多元接続可能, ランダムアクセス可能といった利点をもっている。また, CDMA U-ALOHA 方式の特性向上を図る方策の一つとして, Channel Load Sensing Protocol (CLSP) がある。この方式では, 中央局がチャンネルに伝送されているパケットの数を観測し, その観測結果に基づいてパケットの送信を許可, 拒否するというアクセス制御が行われる。これらの方式は近年急速に進んでいる移動体通信にとって好ましい方式であり, いくつかの研究がなされている [2]~[8]。

単純な ALOHA 方式では同時に一つのユーザしかパケットを送出することはできない。このため, パケットが送信されているか, 送信されていないかということに着目して解析すればよかった [1]。しかし, CDMA ALOHA 方式では, 多元接続可能という性質により, 同時に複数のユーザがパケットを送出することが可能になる。更に, CDMA U-ALOHA 方式においては, 各局が非同期にパケットを送出できるといった特長をもっているため, 同時にチャンネルに伝送されているパケットの数 (同時送信局数) が時々刻々と変化する。

このような特徴をもっている CDMA U-ALOHA 方式において, ユーザ数を無限と仮定, またはユーザ数

を無限とみなせるほど十分多いと仮定して解析された研究が大部分を占める [2]~[6]。しかし, 現実的なシステムを想定した場合, ユーザ数を有限と仮定することが望まれる。例えば拡散符号として Gold 符号を用いた場合, 各ユーザに対して固有の拡散符号を割り当てるとすると, ユーザ数は最大 (拡散率 + 2) となる。このためユーザ数を有限と仮定し, ユーザ数を変化させたときに特性にどのような影響を与えるかを明らかにする必要がある。

また, ユーザ数有限を仮定したものもあるが, パケットの伝送の成功, 失敗はそのパケットの始めの部分にのみ依存するというパーフェクトキャプチャを仮定したり [7], 同時送信局数が常にあるスレッショルド以下ならパケットの伝送に成功するというチャンネルモデル (ここでは  $\beta$  チャンネルモデルと呼ぶ) を仮定している [8]。しかし, パーフェクトキャプチャを仮定すると, パケット内部の同時送信局数の遷移を考慮していない,  $\beta$  チャンネルモデルを仮定すると, スペクトル拡散の特徴である誤り率の緩やかな変化を考慮していないといった欠点がある。

そこで本研究では, ユーザ数有限という条件下で, ノンパーフェクトキャプチャを仮定し, 緩やかに変化する誤り率を用いるといったより現実的なシステムを想定し, できるだけシンプルな手法で CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性を解析的に導出する。そのために, システムを待ち行列モデルで表すことにより解析を行う。そして, ユーザ数無限と仮定して解析を行った場合と比較する。なお, 本研究ではパケット長として固定長を用いる。固定長パケットを用いると, 可変長パケットには必要だった長さに対する冗長情報や処理がいらぬ, 可変長パケットよりスループット特性がよい等の利点がある。

2. システムモデル

本論文では定常状態における CDMA U-ALOHA 方式を取り扱う。各ユーザは固有に割り当てられた拡散符号を用いてパケットを直接拡散し, そのパケットを非同期で中央局に送信する。ユーザ数  $K$  は有限とする。各ユーザにおけるパケット送信要求の発生間隔は平均  $1/\lambda$  の指数分布に従うものとする。パケット長は固定長 ( $L$  [bits]) とし, パケット長時間を  $T_p (= L/R, R$  は転送レート) とする。パケットの送信を行っている最中のユーザ局において, 新たにパケットの送信要求は生じないとする。誤り訂正符号は用いない。つまり, 1 ビットでも誤るとそのパケットは正しく受信さ

れない。

また、以下のようなビット誤り率  $P_b(k)$  ( $k$  は干渉パケット数) を用いることにする。各ユーザに割り当てられる拡散符号はランダム符号とし、各パケットはすべて等しい電力で受信されるとする。このとき、熱雑音と多元接続干渉を考慮したビット誤り率は次式によって得られる [9]。

$$P_b(k) = \frac{2}{3} Q \left[ \left( \frac{k}{3N} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-1/2} \right] + \frac{1}{6} Q \left[ \left( \frac{k \cdot N/3 + \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-1/2} \right] + \frac{1}{6} Q \left[ \left( \frac{k \cdot N/3 - \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-1/2} \right] \quad (1)$$

但し、

$$\sigma^2 = k \left\{ N^2 \frac{23}{360} + N \left( \frac{1}{20} + \frac{k-1}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{k-1}{36} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $N$  は拡散率、 $E_b$  はビットエネルギー、 $N_0/2$  は両側雑音電力スペクトル密度、そして

$$Q[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2/2) du \quad (3)$$

### 3. ユーザ数有限の場合の特性解析

2. で述べたシステムを待ち行列モデルとして表す。このシステムでは、パケットの生起間隔は指数分布、サービス時間分布 (パケット長) は固定、同時に送信されるパケット数に制限はないので窓口は無限、ユーザ数は有限である。よって、システムは待ち行列モデルにおける  $M/D/\infty//K^{(注1)}$  に従うとみなすことができる。

ところで、サービス時間分布が固定の場合、パケットの終了はそのパケットの発生、すなわち過去の状態に依存することになる。よって、マルコフ性が成り立たず、終了率を一意に求めることができない。しかし、 $M/D/\infty//K$  のような準ランダム生起する即時式の待ち行列モデルは、サービス時間のロバストネスという性質により定常状態においては  $M/M/\infty//K$  と等価である [10]。以下においてこのことを利用し、文献 [2] の手法をユーザ数有限の場合に拡張して特性解析を行う。

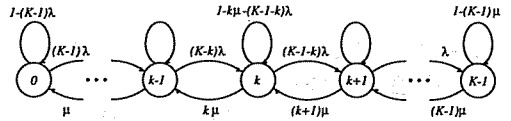


図1 有限ユーザ、CDMA U-ALOHA 方式における干渉パケット数の状態遷移図

Fig.1 State transition of the number of interfering packets for CDMA U-ALOHA system with finite population assumption.

まず始めに、実際に送信されているパケットの平均トラヒック量  $G_{sys}$  を求める。これはパケットの同時送信局数の平均値として求めることができるので、 $G_{sys}$  は次式のようになる [10]。

$$G_{sys} = \sum_{m=0}^K m \cdot \frac{(\lambda/\mu)^m \binom{K}{m}}{(1 + \lambda/\mu)^K} = \frac{G}{1 + G/K} \quad (4)$$

但し、終了率  $\mu = 1/T_p$ 、オフアードロード  $G = \lambda \cdot T_p \cdot K$  とする。

次にパケット成功確率を求める。あるパケットに着目し、このパケットは時刻  $t=0$  に送信されるものとする。確率  $P_S(k, \tau)$  を、着目パケットが時刻  $t=0$  から  $\tau$  まで伝送に成功し、 $t=\tau$  における干渉パケット数が  $k$  となる確率とする。

サービス時間のロバストネスという性質より終了率をサービス時間分布が指数分布の場合と同様に定めると、干渉パケット数の状態遷移は図1のような出生死滅過程に従う。このように、システムを非常にシンプルな形で表すことができる。

(i)  $\tau=0$  のとき

定常状態の式 [10] より  $P_S(k, \tau)$  は以下のようになる。

$$P_S(k, \tau) = \begin{cases} \frac{(\lambda/\mu)^k \binom{K-1}{k}}{(1 + \lambda/\mu)^{K-1}} & ; \text{if } k < K \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

(ii)  $\tau > 0$  のとき

まず、時間  $\Delta t$  をこの時間内にパケットの複数個の生起、複数個の終了、および生起、終了が同時に起こ

(注1) : Kendall の標記法 A/B/C/D/E を用いている。但し、A は到着時間分布、B はサービス時間分布、C は窓口の数、D は許される待ち行列の最大長、E は客の発生源の数である。また、時間分布として、M は指数分布、D は一定 (固定) を意味する。

ることは無視できるほど微小とする。但し、 $T_p/\Delta t$  が整数になるようにする。時間  $\Delta t$  におけるシステム全体のパケット生起率は  $(K-1-k)\lambda\Delta t$  であり、終了率は  $k\mu\Delta t$  である。本論文では定常状態を想定しているの、干渉パケット数  $k$  はオフロード  $G$  の値付近をとることになる。このことを考慮すると、生起率はおよそ  $(K-1-G)\lambda\Delta t$  になり、更に、 $(K-1-G)\lambda\Delta t < K\lambda\Delta t = G \cdot \Delta t/T_p$  となる。終了率はおよそ  $G\mu\Delta t = G \cdot \Delta t/T_p$  になる。よって、 $G \cdot \Delta t/T_p$  が十分小さくなるように  $\Delta t$  を定めればよい。

また、干渉パケット数の遷移は微小時間  $\Delta t$  ごとに起るものと仮定する。つまり時間  $\Delta t$  内では干渉パケット数は一定であるとする。上記のように、干渉パケット数は  $\Delta t$  時間内にたかだか1しか遷移しないと仮定している。スペクトル拡散を用いた場合、ビット誤り率は干渉パケット数に対して穏やかに変化するので、干渉パケット数がたかだか1変化したとしても、誤り率の値はほとんど変わらない。よって、この仮定を設けたとしても、ほとんど影響がないと考えられる。

これらの仮定と図1の状態遷移図より、以下のよう  
に  $P_S(k, \tau)$  が得られる。

(a)  $k < K-1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, \tau) &= P_S(k, \tau - \Delta t) \\ &\cdot \{1 - k\mu\Delta t - (K-1-k)\lambda\Delta t\} \cdot P_c(k, \Delta t) \\ &+ P_S(k+1, \tau - \Delta t) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\ &\cdot P_c(k+1, \Delta t) + P_S(k-1, \tau - \Delta t) \\ &\cdot (K-k)\lambda\Delta t \cdot P_c(k-1, \Delta t) \end{aligned} \quad (6a)$$

(b)  $k = K-1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(K-1, \tau) &= P_S(K-1, \tau - \Delta t) \\ &\cdot \{1 - (K-1)\mu\Delta t\} \cdot P_c(K-1, \Delta t) \\ &+ P_S(K-2, \tau - \Delta t) \cdot \lambda\Delta t \cdot P_c(K-2, \Delta t) \end{aligned} \quad (6b)$$

(c)  $k > K-1$  のとき

$$P_S(k, \tau) = 0 \quad (6c)$$

但し、 $P_c(k, \Delta t)$  は  $\Delta t$  時間における成功確率であり、

$$P_c(k, \Delta t) = \{1 - P_b(k)\}^{\Delta t \cdot R} \quad (7)$$

となる。

$P_S(k, \tau)$  を漸化的に計算して  $P_S(k, T_p)$  を求め、これを用いてパケット成功確率は、

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, T_p) \quad (8)$$

となる。

ここで、スループット特性を伝送に成功するパケットの平均トラヒック量とすると、スループット特性は実際に送信されているパケットの平均トラヒック量とパケット成功確率との積で求めることができるので、

$$S = G_{sys} \cdot Q_S(G) \quad (9)$$

となる。

#### 4. CLSP を適用した CDMA U-ALOHA 方式の特性解析

本章では CDMA U-ALOHA 方式に CLSP を適用したシステムを、ユーザ数を有限と仮定して解析する。

CLSP では、中央局がチャネル伝送中のパケットの数を観測し、この数があるスレッショルド  $\alpha$  未満ならパケット送信を許可、以上なら送信を拒否するというアクセス制御が行われる [5]~[7]。このような制御を行うことにより、パケットの同時送信局数は常にスレッショルド以下に抑えられる。よって、窓口はスレッショルド  $\alpha$  になるので、システムは待ち行列モデル  $M/D/\alpha/\alpha/K$  に従うことになる。そこで、先程と同様の手法を用いて特性解析を行う。

実際に送信されているパケットの平均トラヒック量  $G_{sys}$  は次式によって得られる [10]。

$$G_{sys} = \frac{\sum_{m=0}^{\alpha} m \cdot (\lambda/\mu)^m \binom{K}{m}}{\sum_{n=0}^{\alpha} (\lambda/\mu)^n \binom{K}{n}} \quad (10)$$

次にパケット成功確率を求める。CLSP を用いた CDMA U-ALOHA 方式の干渉パケット数の状態遷移図は図2に示されるようになる。

(i)  $\tau = 0$  のとき

定常状態の式 [10] より  $P_S(k, \tau)$  は以下のようになる。

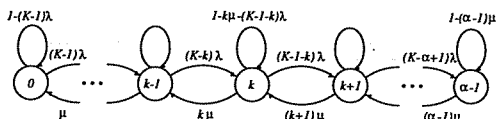


図2 CLSPを用いたときの干渉パケット数の状態遷移図  
Fig.2 State transition of the number of interfering packets for CDMA U-ALOHA system using CLSP.

$$P_S(k, \tau) = \begin{cases} \frac{(\lambda/\mu)^k \binom{K-1}{k}}{\sum_{n=0}^{\alpha-1} (\lambda/\mu)^n \binom{K-1}{n}} & ; \text{if } k < \alpha \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

(ii)  $\tau > 0$  のとき

図2の状態遷移図より、以下の通りである。

(a)  $k < \alpha - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, \tau) &= P_S(k, \tau - \Delta t) \\ &\cdot \{1 - k\mu\Delta t - (K-1-k)\lambda\Delta t\} \cdot P_c(k, \Delta t) \\ &+ P_S(k+1, \tau - \Delta t) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\ &\cdot P_c(k+1, \Delta t) + P_S(k-1, \tau - \Delta t) \\ &\cdot (K-k)\lambda\Delta t \cdot P_c(k-1, \Delta t) \end{aligned} \quad (12a)$$

(b)  $k = \alpha - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(\alpha-1, \tau) &= P_S(\alpha-1, \tau - \Delta t) \\ &\cdot \{1 - (\alpha-1)\mu\Delta t\} \cdot P_c(\alpha-1, \Delta t) \\ &+ P_S(\alpha-2, \tau - \Delta t) \\ &\cdot (K-\alpha+1)\lambda\Delta t \cdot P_c(\alpha-2, \Delta t) \end{aligned} \quad (12b)$$

(c)  $k > \alpha - 1$  のとき

$$P_S(k, \tau) = 0 \quad (12c)$$

$P_S(k, \tau)$  を漸的に計算して  $P_S(k, T_p)$  を求め、これを用いてパケット成功確率は、

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, T_p) \quad (13)$$

となる。よって、スループット特性は、

$$S = G_{sys} \cdot Q_S(G) \quad (14)$$

となる。

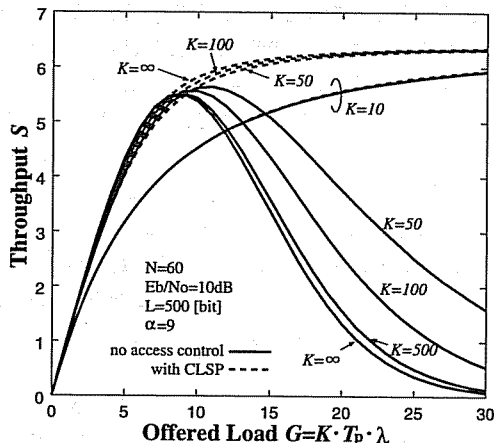


図3 有限ユーザ、CDMA U-ALOHA方式のスループット特性

Fig.3 Throughput performance for CDMA U-ALOHA system with finite population assumption.

### 5. 数値例

図3に解析的に求めたスループット特性を示す。比較のためにユーザ数無限を仮定したときの解析結果も示してある[6]。なお、ユーザ無限を仮定したときの解析では、干渉パケット数にかかわらず、パケット送信要求の生起率を常に  $K\lambda$  としている。拡散率  $N = 60$ ,  $E_b/N_0 = 10$  dB, パケット長  $L = 500$  bitsである。このとき、 $\Delta t$  は1ビット時間程度で十分である。また、このパラメータにおいてスループット特性を最適にするスレッシュホールドは  $\alpha = 9$  である[6]。

この図より、ユーザ数が増えるにつれ、ユーザ数無限を仮定した場合に近づいていくことがわかる。アクセス制御を用いない場合はおよそ  $K = 500$  くらいで、CLSPを用いた場合は  $K = 50$  くらいでほぼ一致する。CLSPを用いた場合の方がユーザ数が少ないときに無限を仮定した場合に近づくのは、同時送信局数が常にスレッシュホールド以下に抑えられており、ユーザ全体に対してパケット送信中のユーザの割合が低くなるからである。

また、ユーザ数が少ないとき、アクセス制御を用いない場合と、CLSPを用いた場合はほぼ同じ特性が得られるが、ユーザ数が増えるにつれ、アクセス制御を用いた場合は特性が劣化し、CLSPを用いた場合は特性が向上することがわかる。アクセス制御を用いない場合、ユーザ数が増えると送信されるパケットの数も増えるので、特性の劣化が生じる。これに対し、CLSPを用いた場合はパケット送信要求の発生が増えると、

同時送信局数がスレッシュホールドに満たない状態が減り、スレッシュホールドに等しい数のパケットを送信している状態が増えるので、チャンネルを有効に利用でき、特性の向上が見られる。

## 6. むすび

CDMA U-ALOHA 方式において、ユーザ数有限、固定長パケットを仮定して、スループット特性を解析的に導出した。本論文では、システムを  $M/D/\infty//K$  や  $M/D/\alpha/\alpha/K$  という待ち行列モデルで表した。そして、これらの待ち行列モデルはサービス時間のロバストネスという性質により、それぞれ  $M/M/\infty//K$ ,  $M/M/\alpha/\alpha/K$  と等価になる。このことを利用して、スループット特性を比較的簡単な方法で求めた。また、この解析結果を用いてユーザ数を変化させたとき、特性にどのような影響があるかを明らかにした。

ここで、本論文で提案した解析手法が適用できる範囲について検討する。この解析が適用されるためには、図 1, 2 に示されるように、システムを出生死滅過程として表すことができなければならない。出生死滅過程に従うシステムとして文献 [10] で示されているように、(準) ランダム生起、指数サービス時間分布するようなマルコフ過程に従うシステムが考えられる。また、本論文で用いたシステムのように非マルコフ過程であっても、サービス時間のロバストネスという性質が成り立てば問題ない。この性質は即時式システムで (準) ランダム生起するものなら成立する [10]。よって、この近似解析が適用できるのは、(1) 即時式システム、(2) パケットの発生は (準) ランダム生起、(3) サービス時間分布が指数分布でないときは即時式システムに限る、である。例えば、パケット長が固定長でなく任意の分布に従うものにも、即時式システムで平均パケット長ささえわかっているならば適用可能である。また、MCLSP [4] を用いたシステムにもパケット生起率を変えることで適用できる。このように、本論文で提案した近似解析はほんの少しの変更でいろいろなシ

ステムに適用できるので、非常に有効な解析手法であると言える。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金によって行われた。

## 文 献

- [1] N. Abramson, "The ALOHA system—Another alternative for computer communications," AFIPS 1970 Fall Joint Comput. Conf., Houston, U.S.A., vol.37, pp.281–285, Nov. 1970.
- [2] K. Joseph and D. Raychaudhuri, "Stability analysis of asynchronous random access CDMA systems," GLOBECOM, pp.1740–1746, Dec. 1986.
- [3] K. Joseph and D. Raychaudhuri, "Throughput of unslotted direct-sequence spread spectrum multiple-access channels with block FEC coding," IEEE Trans. Commun., vol.41, no.9, pp.1373–1378, Sept. 1993.
- [4] H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "CDMA ALOHA systems with modified channel load sensing protocol for satellite communications," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E79-A, no.12, pp.2035–2042, Dec. 1996.
- [5] M. Yin and V.O.K. Li, "Unslotted CDMA with fixed packet lengths," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.8, no.4, pp.529–541, May 1990.
- [6] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, "Throughput analysis of DS/SSMA unslotted ALOHA system with fixed packet length," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.14, no.4, pp.750–756, May 1996.
- [7] A.H. Abdelmonem and T.N. Saadawi, "Performance analysis of spread spectrum packet radio network with channel load sensing," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.7, no.1, pp.161–166, Jan. 1989.
- [8] D.M. Lim and H.S. Lee, "Throughput-delay and stability analysis of an asynchronous spread spectrum packet radio network," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.41, no.4, pp.469–478, Nov. 1992.
- [9] Jack M. Holtzman, "A Simple, accurate method to calculate spread-spectrum multiple-access error probabilities," IEEE Trans. Commun., vol.40, no.3, pp.461–464, March 1992.
- [10] 藤木正也, 雁部頼一, 通信トラヒック理論, 丸善, 1980.  
(平成 10 年 1 月 5 日受付, 3 月 4 日再受付)