

音声信号とデータパケットの混在する CDMA システムの特性解析

佐藤 毅[†] サンドウク アバス[†] 山里 敬也^{††} 片山 正昭[†]
小川 明[†]

Performance Analysis of an Integrated Voice and Data CDMA System

Takeshi SATO[†], Abbas SANDOUK[†], Takaya YAMAZATO^{††}, Masaaki KATAYAMA[†],
and Akira OGAWA[†]

あらまし 本研究ではチャンネルロードセンシングプロトコルで伝送されているデータパケットと CDMA 音声信号の混在システムに対し解析を行う。音声信号は一定時間に伝送を終了させなければならない等時性を必要とするメディア、データパケットは時間的な遅延は許容されるが、高信頼性の要求されるメディアであることを考慮する。音声信号に対するブロッキング確率、アーランキャパシティを求め、データパケットに対するスループットを求める。CDMA を用いたシステムにおける特性はその同時送信局数に強く依存する。特に、このシステムにおいては異なったメディアの呼が混在するため、それぞれお互いのトラヒックの影響も考慮しなければならない。本論文ではその点に着目し、それぞれのメディアの要求品質と同時送信局数の関係からお互いのトラヒックの影響を解析し、2種類のメディアの存在するシステムの最適化を考える。更にシステム最適化のための指標であるシステムキャパシティを導出し、チャンネルを最大限有効に利用するためのデータオフロードを求める。

キーワード チャンネルロードセンシングプロトコル、音声信号とデータパケット、システムキャパシティ

1. まえがき

近年無線通信の分野において、音声、画像、データ等のさまざまなメディアを用いた通信サービスを提供する無線マルチメディア通信システムに関する研究が盛んに行われている。無線マルチメディア通信システムでは、各メディアの伝送速度が異なり、また要求される通信品質も異なるために、それらのメディアを一括して扱えるような柔軟性をもつシステムの確立が要求されている。スペクトル拡散を用いた符号分割多元接続 (CDMA) はこのような要求に適した方式としてマルチメディア通信において注目されている [1]~[3].

本研究では、音声信号とデータパケットの混在した非同期 CDMA システムの特性解析を行う。

音声信号は短時間に伝送を終了させなければならない等時性を必要とするメディアであり、データパケットは時間的な遅延は許容されるが、高信頼性の要求

されるメディアであることを考慮しなければならない [1]. 等時性という要求を満たすため、音声ユーザは送信の際チャンネルの予約を行うことにする。送信要求が発生したときそのユーザは予約パケットを中央局からの制御信号に従って、中央局に送出する。もし中央局において確保されたチャンネル数があるスレシヨルドに達したとき、他の音声ユーザは予約を拒否される。すなわちブロックされる。データパケットユーザは予約をせずに中央局からの制御信号に従ってパケットを送出する。

本解析において、パケットの送信は CDMA Unslotted ALOHA 方式 [5],[6], 送信制御はチャンネルロードセンシングプロトコル (CLSP: Channel Load Sensing Protocol) [5]~[7] を適用する。CLSP ではチャンネル使用状況の観測は、基地局で行われる。基地局ではチャンネル使用状況の変化に伴い、伝送中のパケット数 (チャンネルロードと呼ぶ) が、定められたスレシヨルド α よりも小さければパケット送信許可、 α 以上であれば送信禁止の制御信号を随時全ユーザにブロードキャストされる。各ユーザは、送られてくる決定結果に従ってパケット送信を行う。CDMA Unslotted ALOHA 方式は送信要求 (オフロード) の高いところで、他

[†]名古屋大学工学部電子情報学科, 名古屋市
Department of Information Electronics, School of Engineering,
Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††}名古屋大学情報メディア教育センター, 名古屋市
The Center for Information Media Studies, Nagoya University,
Nagoya-shi, 464-8603 Japan

干渉の増加による品質劣化が生じてしまうが、CLSPは他干渉数の増加を防ぐことができるため、オフロードが高くなっても、ある程度のスループットを維持することができる。また、更に同時送信局数を常にある設定されたスレシヨルド値以下におさえることができるので、その設定の仕方でも回線の留保も可能となり、各メディアの要求品質、プライオリティにも対応できる [4]。

CDMAを用いたシステムにおける特性はその同時送信局数に強く依存する。特に、このシステムにおいては異なったメディアの呼が混在するため、それぞれお互いのトラヒックの影響も考慮しなければならない。本論文ではその点に着目し、それぞれのメディアの要求品質と同時送信局数の関係からお互いのトラヒックの影響を解析し、2種類のメディアの存在するシステムの最適化を考える。

本論文では音声信号に対するブロッキング確率、アーランキャパシティ、データパケットに対するスループットが導かれる。特性評価では、音声信号の要求品質を維持しながら、データパケットのスループットをどれだけ向上させることができるかということに着目しながら進めていく。

基本的にどちらかのトラヒック量が増加するともう一方の特性を劣化させることが予想される。そのため、このシステムの評価は、音声トラヒックとデータパケットトラヒックのトレードオフを考えることが重要である。そこで、アーランキャパシティとデータスループットの和であるシステムキャパシティを定義する。これによってチャンネルを最大限有効に利用するためのデータオフロードの存在を導く。

以降、2.においてシステムモデル、3.において音声信号とデータパケットが混在する場合の特性解析、4.では解析結果に対する考察を行い、5.で結びとする。

2. システムモデル

図1にシステムモデルを示す。本解析では上り回線のみに着目する。複数の音声ユーザが1ホップで中央局にスペクトル拡散された信号を送信する。音声信号の送信要求が生じたユーザは中央局からのCLSPによる制御信号(CS)が送信許可ならばリザベーションパケット(RP)を送出する(図2)。このリザベーションパケットもスペクトル拡散されたものとする。送信禁止の場合は、送信許可になるまで待つ。リザベーションパケットが送信に成功したら、そのユーザは送

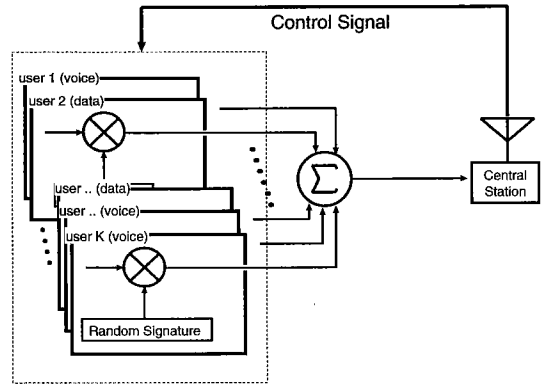


図1 システムモデル
Fig.1 System model.

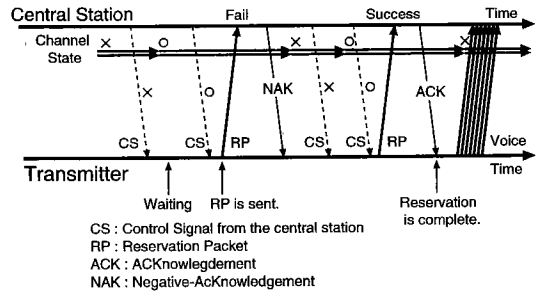


図2 リザベーション完了までの過程
Fig.2 Process of getting reservation for voice users.

信モードに入り、音声信号を送信する。ユーザは固有に割り当てられた拡散符号を用いて音声信号を直接拡散する。そして、その音声信号を中央局に送信する。その際、音声ユーザはCLSPによる制御信号を考慮する必要はなく、信号の等時性は確保される。

データパケットユーザは固有に割り当てられた拡散符号を用いて信号を直接拡散する。中央局からの制御信号をもとに信号を1ホップで中央局に送信する。

CDMAを用いたシステムにおいて重要な二つのファクタ、2呼種それぞれの要求品質と同時送信局数に重点をおいて解析を行っていくという目的のため、以下のような仮定を行う。

- 各ユーザの音声通話時間長は指数長、データパケットは固定長。
- リザベーションパケットは平均到着率 λ_r (個/秒)、データパケットは λ_d でそれぞれポアソン生起する。
- 音声、データパケットとも電力制御が完全であるものとし、各信号はすべて等しい電力で受信される。

- 拡散符号はランダムシグナチャとする。
- 拡散符号同期は完全であるとする。
- 音声, データパケットともビットレート, 拡散率は等しいものとする。
- CLSP において伝搬遅延やその他信号処理の際生じる遅延はないものとする。
- 誤り訂正符号は用いない。よって1ビットでも誤りがあるとそのパケットは正しく伝送されない。
- 非同期 CDMA 方式におけるランダムシグナチャに対するビット誤り率 $BER(k)$ は, スタンダードガウシアン近似により得られるものを用いる [8]。

$$BER(k) = Q \left[\left(\frac{k}{3N} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \quad (1)$$

但し, k は同時送信局数, N は拡散率で $N = W/R$ より導出されるものとする。 W は使用周波数帯域幅, R はビットレートを示す。また, $Q(x) = 1/2 \cdot \text{erfc}(x/\sqrt{2})$ 。

3. Analysis for Voice and Data system

3.1 Voice Only System

3.1.1 プロッキング確率

音声信号のみのシステムにおいて, リザーベーションが1回の送信で確実にとれるものとし, リザーベーションパケットを送信してから音声信号の送信が終了するまでの間隔はサービス終了率 μ_v の指数分布に従うものとする。更に中央局の制御信号に従ってパケットが送出されるので, CLSP において, 中央局に存在する音声信号の個数の遷移は待ち行列システムの $M/M/\alpha/\alpha$ に従う [9]。但し, 記号 $M/M/\alpha/\alpha$ は (信号の発生間隔: 指数分布) / (信号長: 指数分布) / (出線数) / (中央局におけるバッファ数) を表している。このとき, プロッキング確率は, リザーベーションパケットの送出が中央局の制御信号によって拒否される確率として, アーラン B 式で表される [9]。

$$P_{\text{erlangB}} = \frac{(\lambda_v/\mu_v)^\alpha/\alpha!}{\sum_{m=0}^{\alpha} (\lambda_v/\mu_v)^m/m!} \quad (2)$$

ここで, m は音声ユーザ数, α は CLSP のスレシヨルドを示している。また値 α は音声信号が許容できるビット誤り率から求められている。すなわち, 次の式を満たす最大の同時送信局数 k をスレシヨルドとしている。

$$BER(k) < 10^{-3}$$

$BER(k)$ はビット誤り率 (1), 音声信号の最大許容誤り率を 10^{-3} とする。

3.1.2 平均音声信号数

CLSP においては送信を拒否される場合もあるので送信要求数と実際に送信される信号数は異なる。音声ユーザのオフロード $G_v (= \lambda_v/\mu_v)$ を平均通話時間内に通話している平均音声ユーザ数と定義する。 G_v に対して実際に送出される音声信号の平均音声信号数 E_v を求める。この値は待ち行列システム $M/M/\alpha/\alpha$ の平均音声信号数に相当するので, 次の式で与えられる。

$$E_v = \sum_{k_v=0}^{\alpha} k_v \cdot \frac{(G_v \cdot \rho)^{k_v}/k_v!}{\sum_{m=0}^{\alpha} \{(G_v \cdot \rho)^m/m!\}} \quad (3)$$

但し, m は同時送信局数である。 ρ は Voice Activation (V.A) rate を示す。 V.A とは, 会話中のポーズとか相手の話を聞いている無声音の期間は信号を伝送しない方法である。但し, CLSP において中央局は通話中の音声ユーザ数をもとに制御を行っているものとする。図 3 に音声ユーザのオフロード G_v に対する, 平均音声信号数を示す。用いたパラメータは, 5. の数値例で示されているが, CLSP のスレシヨルド $\alpha = 98$, 使用周波数帯域幅 $W = 20$ MHz, 音声信号のビットレート $R = 32$ kbps, V.A rate $\rho = 0.4$ とする。また, 多元接続干渉のみを考慮するために $E_b/N_0 \rightarrow \infty$ とする。 V.A を用いない場合に比べて平均音声信号数は減少するようすがわかる。すなわち, V.A を用いれば信号品質を維持しながら, より多くのユーザを受け入れることが期待できることがわかる。

3.2 An Integrated System

つぎに CLSP を用いた音声システムに CDMA データパケットを送出していく。データパケットもまた CLSP の制御を受ける。従って, 基地局はデータパケットの個数と通話中音声ユーザ数によって信号の送信を制御するものとする。

3.2.1 データスループット解析

データのスループット S を求める。スループット S は1パケット長時間に送信に成功するパケット数, また, 1パケット長時間の平均発生パケット数をオフロード G_d とする。 CLSP におけるデータおよび音声信号の同時送信局数は時々刻々と変化していく。

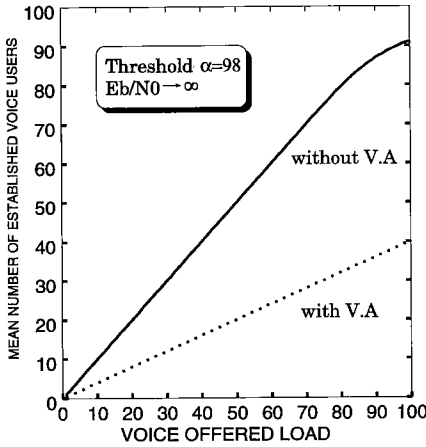


図3 平均音声信号数
Fig. 3 Average number of voice transmission.

データのみ解析の場合ではスループットとデータのオフロードが1対1対応で関係づけることができた[6]。そのため、同時送信局数の遷移をマルコフモデルで忠実に表した解析手法を用いることができた。ところが今回のシステムの場合、音声信号の同時送信局数もまたデータのスループットに影響してくる。特徴の異なる音声信号も考慮すると同時送信局数の遷移はとても複雑になり簡単なマルコフモデルの図では描くことができない。ところが、着目パケット内においては、音声ユーザ数は変化しないと考えることができる(付録1)。そこで、音声信号の通話ユーザ数 k_v を固定する手法を用いることができる。この手法を用いることにより、この解析はデータの同時送信局数の遷移のみを考えればよいことになり、データの場合と同様、解析を行うことができる。音声ユーザとデータパケットの個数を考慮したビット誤り率が式(1)の拡張により次のように得られる。

$$BER(k_d) = Q \left[\left(\frac{k_d}{3N_d} + \frac{k_v}{3N_v} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \quad (4)$$

ここで、 k_d はデータパケットの同時送信局数、 k_v は通話中音声ユーザ数、 N_d データパケットの拡散率、 N_v は音声信号の拡散率を表している。

ところで、音声信号の発生とデータの発生はお互いに独立でない。なぜなら、それぞれの発生は両方の同時送信局数の和によってCLSPの制御を受けているからである。固定値 k_v は音声信号のオフロード G_v に依存し、この確率密度関数は次のように $M/M/\alpha/\alpha$ の定常確率で与えられるものとする。

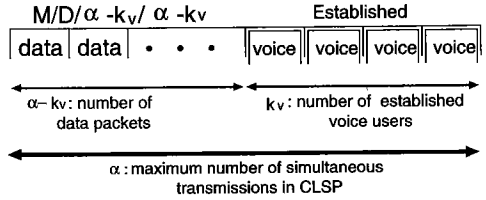


図4 データパケットの到着状況
Fig. 4 The arrival of data packets.

$$P_\alpha(k_v) = \frac{(G_v)^{k_v} / k_v!}{\sum_{m=0}^{\alpha} \{(G_v)^m / m!\}} \quad (5)$$

但し、 m は同時送信局数を示す。

通話中音声ユーザ数を k_v 個に固定したとき、データに対する同時送信局数の遷移は、待ち行列システムにおける $M/D/(\alpha - k_v)/(\alpha - k_v)$ に従う(図4)。但し、 D は(信号長:固定長)を表す。

従って、データの同時送信局数 k_d はこの定常確率を用いて、 k_v との条件付き確率として次のように与えられることになる。

$$P_\alpha(k_d | k_v) = \frac{(G_d)^{k_d} / k_d!}{\sum_{m=0}^{\alpha - k_v} (G_d)^m / m!} \quad (6)$$

ところで、CLSPにおいては送信要求数と実際に中央局に到着する信号の数は異なる。送信を拒否される場合があるからである。そこで、実際に中央局に到着するデータパケットの平均数 E_d を求める。式(5)においてV.A rateを考慮したものを、式(6)と掛け合わせ、 k_v 、 k_d のすべての取りうる値について平均することによって、次のように与えられる。

$$E_d = \sum_{k_v=0}^{\alpha} \sum_{k_d=0}^{\alpha - k_v} k_d \cdot P_\alpha(k_d | k_v) \cdot \frac{(G_v \cdot \rho)^{k_v} / k_v!}{\sum_{m=0}^{\alpha} (G_v \cdot \rho)^m / m!} \quad (7)$$

但し、 m は同時送信局数。

図5に通話中音声ユーザ数が k_v のとき、着目データパケット内における干渉データパケット数の遷移に対する状態遷移図を示す。干渉データ数が $\alpha - k_v$ 個となるまでは普通のポアソン生起をしますので発生率 λ 、終了率 $\mu(k_{d1})$ を用いる[6]。但し、 k_{d1} は着目データパケット1ビット目の同時送信データパケット数を表

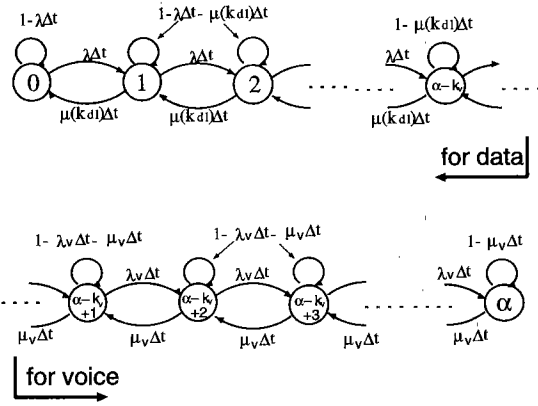


図5 状態遷移図
Fig.5 State transition diagram.

す。 $\alpha - k_v$ より大きい状態の確率は 0 となる。すなわち、データパケットに対して与えられたチャネル数 (server 数) が $\alpha - k_v$ であるとみなし解析を進めていく。確率 $P(k, i, k_{d1})$ を定義する。1 ビット目の干渉データ数が k_{d1} のとき、 $i - 1$ ビットまでが成功し、更に i ビット目の干渉データ数が k である確率である。

(i) $i = 1$ のとき

$k_{d1} \leq \alpha - k_v - 1$, すなわち着目データパケット 1 ビット目の同時送信データパケット数 k_{d1} が $\alpha - k_v - 1$ 個以下のときまでは $M/D/(\alpha - k_v)/(\alpha - k_v)$ の定常確率より得られる。

$$P(k_d = k_{d1}, i = 1, k_{d1} < \alpha - k_v) = P_\alpha(k_d | k_v) \quad (8)$$

$k_{d1} \geq \alpha - k_v - 1$, 着目パケット 1 ビット目の干渉データ数が $\alpha - k_v - 1$ 個より大きくなってしまわないので

$$P(k_d = \alpha - 1, i = 1; k_{d1} \geq \alpha - k_v - 1) = 0 \quad (9)$$

(ii) $i > 1$ のとき

状態遷移図, 図 5 から求められる。 $k_d < \alpha - k_v - 1$ のとき、干渉信号数は $\alpha - k_v - 1$ より小さいので、発生率 $\lambda_d \Delta t$, 終了率 $\mu_d(k_{d1}) \Delta t$ の遷移を行う。ここで Δt はデータパケットの 1 ビット時間としている。 $i - 1$ から i ビット目に至るすべての場合について、それぞれビット成功確率、遷移率を掛けることによって次式が得られる。

$$P(k_d < \alpha - 1, i, k_{d1}) = \begin{cases} P(k_d, i - 1, k_{d1}) \cdot \{1 - \mu(k_{d1}) \Delta t - \lambda_d \Delta t\} \\ \times \{1 - BER(k_d)\} \\ + P(k_d + 1, i - 1, k_{d1}) \cdot \mu(k_{d1}) \Delta t \\ \times \{1 - BER(k_d + 1)\} \\ + P(k_d - 1, i - 1, k_{d1}) \cdot \lambda_d \Delta t \\ \times \{1 - BER(k_d - 1)\} \end{cases} \quad (10)$$

$k_d = \alpha - k_v - 1$ のとき、着目パケット自身の個数を考慮すると同時送信局数はスレシヨルドの $\alpha - k_v$ になってしまうので発生は止まる。従って式 (10) において第 1 項を $\lambda_d \Delta t = 0$ とし、第 2 項の確率は存在しないことから式 (11) が得られる。

$$P(k_d = \alpha - k_v - 1, i, k_{d1}) = \begin{cases} P(k_d, i - 1, k_{d1}) \cdot \{1 - \mu(k_{d1}) \Delta t\} \\ \times \{1 - BER(k_d)\} \\ + P(k_d - 1, i - 1, k_{d1}) \cdot \lambda_d \Delta t \\ \times \{1 - BER(k_d - 1)\} \end{cases} \quad (11)$$

$k_d > \alpha - k_v - 1$ のとき、総同時送信局数がスレシヨルドを超えることはないので次式となる。

$$P(k_d > \alpha - k_v - 1, i, k_{d1}) = 0 \quad (12)$$

$P(k_d, i, k_{d1})$ を用いてパケット成功確率 Q を求める。確率 $P(k_d, i, k_{d1})$ において $i = L$ とし、 L ビット目が成功する確率を掛ける。更に、干渉パケット数 k_d, k_{d1} のとりうるすべての値について平均をとると Q は次のようになる。

$$Q = \sum_{k_d=0}^{\infty} \sum_{k_{d1}=0}^{\infty} P(k_d, L, k_{d1}) \cdot (1 - BER(k_d)) \quad (13)$$

更に、通話中の音声ユーザ数 k_v のとりうるすべての値について平均をとると、スループット S は次のように導出される。

$$S = E_d \cdot \sum_{k_v=0}^{\alpha} Q \cdot P_\alpha(k_v) \quad (14)$$

3.2.2 音声ユーザブロッキング確率

2. で求めたブロッキング確率を、データの同時送信局数をも考慮したものに拡張して考える。その手法と

して3. で用いたように、今度はデータの同時送信局数を固定して解析を行う (付録 2.)。データの同時送信局数 k_d は $M/D/\alpha/\alpha$ の定常確率 $P_\alpha(k_d)$ から得られる。このとき、音声信号に対する同時送信局数の遷移は $M/M/(\alpha - k_d)/(\alpha - k_d)$ で与えられる。従って、データの同時送信局数 k_d のときの音声信号のブロッキング確率はアラン B 式 (2) を用いて次のような条件付き確率で与えられる。

$$P_{\text{blocking}}(k_v|k_d) = \frac{G_v^{(k_v)} / (k_v)!}{\sum_{m=0}^{\alpha - k_d} G_v^m / m!} \quad (15)$$

データの同時送信局数 k_d に対する定常確率を考慮すると求めるブロッキング確率は次のように求まる。

$$P_{\text{blocking}}(G_v) = \sum_{k_v=0}^{\alpha} \sum_{k_d=0}^{\alpha} P_{\text{blocking}}(k_v|k_d) \times \frac{(G_v)^{k_v} / k_v!}{\sum_{m=0}^{\alpha} \{(G_v)^m / m!\}} \quad (16)$$

アランキャパシティ E_{rlang} は許容ブロッキング確率を維持し得る最大の許容オフロードと定義され、次のように得られる。

$$E_{\text{rlang}} = G_v \quad (17)$$

但し、 G_v は $P_{\text{blocking}}(G_v) \leq 0.01$ を満たす最大の値とし、0.01 は音声信号に対する最大許容ブロッキング確率を示す。

図 7 に音声ユーザに対するブロッキング確率を示す。また、データのオフロードを考慮した場合の平均通話音声ユーザ数は次のように求まる。

$$E_v = \sum_{k_d=0}^{\alpha} \left\{ \sum_{k_v=0}^{\alpha - k_d} k_v \cdot \frac{(\lambda_v / \mu_v)^{k_v} / k_v!}{\sum_{m=0}^{\alpha - k_d} (\lambda_v / \mu_v)^m / m!} \right\} \times \frac{(G_d)^{k_d} / k_d!}{\sum_{m=0}^{\alpha} \{(G_d)^m / m!\}} \quad (18)$$

但し、 m は同時送信局数である。

4. 数 値 例

表 1 に示したパラメータを用いて、特性を示す。ラ

ンダムシグナチャに対する拡散率 N は使用周波数帯域幅 $W = 20$ MHz, ビットレート $R = 32$ kbps を用いて $N \approx W/R$ から導出した。

図 6 にデータのオフロード G_d に対するデータスループットを示した。音声ユーザのオフロード G_v をパラメータとした。 G_d の増加に従って、スループットは最大値に近づいていき、更に増やしていくと、システム全体のオフロードが増加し、干渉の影響が強くなるためスループットは減少していく。更に、 G_v の増加による特性劣化も示されている。また、V.A によってスループットが改善されていることも確認される。

図 7 に音声ユーザに対するブロッキング確率をデータのオフロード G_d をパラメータとして示した。 G_d の増加と共に、システム全体のオフロードも増加するのでブロッキング確率は増加していく。すなわち、音声ユーザにとってはリザベーションをとりにくい状況になっていく。

図 8 に音声信号のアランキャパシティに対するデータパケットのオフロードの影響を示した。これは音声ユーザ最大許容ブロッキング確率を 1% としたときの音声ユーザ最大許容オフロードと定義した。ここではデータパケットに対するビットレートを変えたときの特性をも示した。データパケットのオフロードが高くなるに従い、データパケットがチャンネルを占める割合が増加してしまうので、アランキャパシティは減少する。データパケットのビッ

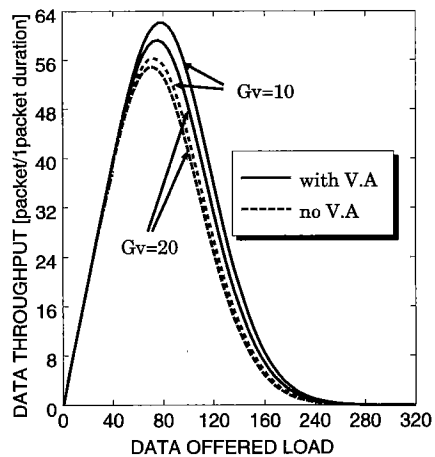


図 6 データスループット
Fig.6 Data throughput.

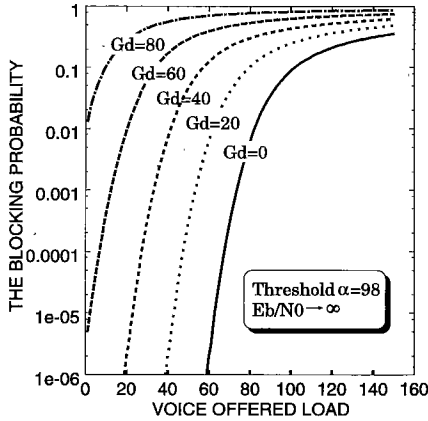


図7 ブロッキング確率
Fig.7 Blocking probability.

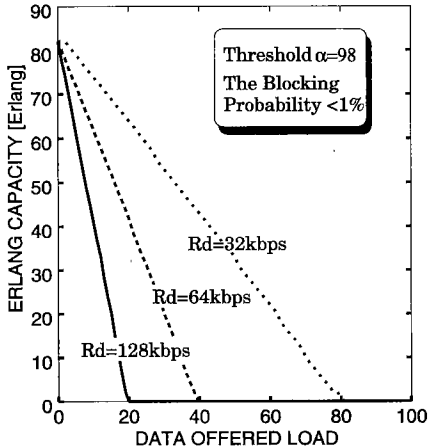


図8 アーランキャパシティ
Fig.8 Erlang capacity.

トレート小さくすると、すなわちデータパケットの拡散率を大きくするに従って、アーランキャパシティは増加していくことがわかった。この現象は次のように説明される。1ビット当りのエネルギーが一定であるとき、データパケットの拡散率を大きくするに従って、信号電力密度は小さくなっていく。従って、データの発生数と同じところで比較すると拡散率が高い場合のほうがオフロードは小さくなる。すなわち、音声信号に対するデータの干渉量が小さくなる。そのために、音声ユーザのアーランキャパシティはデータパケットのビットレートを小さくするに従って大きくなっていく。

このシステムの最適化は、データスループットと

表1 パラメータ
Table 1 Parameter.

パラメータ	値
音声ユーザー平均通話時間長	$T_r = 60s$
音声活性化率	$\rho = 0.4$
データパケット長	$L_d = 500bits$
ビットレート (Voice, Data)	$R_v, R_d = 32kbps$
使用周波数帯域幅	$W = 20MHz$
拡散率 (Voice, Data)	$N_v, N_d = 312$
CLSPPのスレシールド	$\alpha = 98$
音声信号の最大許容誤り率	10^{-3}

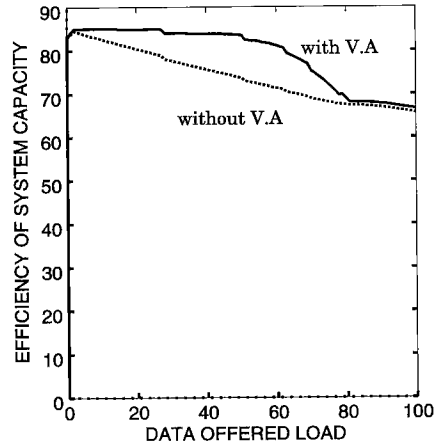


図9 システムキャパシティ
Fig.9 System capacity.

アーランキャパシティのトレードオフに強く依存していることが予想される。そこで、システム全体のキャパシティを次のように定義する。

$$C_{system} = S + E_{erlang}$$

図9にデータパケットのオフロード G_d に対するシステムキャパシティを示した。音声信号とデータパケットに対するデータレートは同じものとする。これは音声信号の品質（ブロッキング確率1%以内）を維持しながら、二つのメディアが利用できる、このシステムがもつ最大のチャンネルキャパシティと定義できる。この量はCDMA音声システムにデータパケットを送出していく際に、どれくらいデータパケットのオフロードを増加させればシステムのもつキャパシティが有効に利用されるかという一つの指標を示すものである。V.Aを考慮すると、システムキャパシティは増加する。これは、V.Aによって音声ユーザのアーランキャパシティは増加しないが、データパケットのスループット特性が増加するということが原因で

あると考えられる。V.Aを考慮した場合、 $G_d = 0$ から $G_d = 30$ あたりまでにおいて、このシステムのもつキャパシティが最も有効に利用されるということが言える。また、 $G_d = 50$ あたりまではアーランキャパシティは減少してしまうもののデータスループットが向上してくるために、ほぼキャパシティの最大有効利用を維持している。それ以降はデータスループットのピークを境に減少していく。また $G_d = 80$ を超えたあたりで両方の特性は等しくなるが、ここでは音声ユーザの発生が止まってしまっており、特性はデータパケットのスループットのみによるためである。

5. むすび

本研究では、チャンネルロードセンシングプロトコルで伝送されているデータパケットと CDMA 音声信号との混在システムに対しそれぞれスループット解析、アーラン容量解析を行い、お互いのトラヒックがそれぞれの特性に与える影響を明かにした。CDMA を用いたシステムにおいては、同時送信局数とその特性解析において重要なファクタになる。音声とデータ両トラヒックの要求品質（ビット誤り率）と同時送信局数との関係に着目し、待ち行列システムを用いることでこのシステムに対する解析を行った。更にシステムの最適化について論じた。

このシステム全体の評価基準として、音声ユーザ、データパケット双方の評価基準のトレードオフを示す基準であるシステムキャパシティを定義し導出した。この量は CDMA 音声システムにデータパケットを送出していく際に、どれくらいデータパケットのオフアードロードを増加させればシステムのもつキャパシティを有効に利用できるかという一つの指標を示すものである。その結果、チャンネルキャパシティを有効に利用できるデータのオフアードロードを導いた。すなわち、データパケットの発生をトラヒックコントロール等を用い更に制御することで、システムの最適化、すなわちデータパケットのスループット、音声ユーザのアーラン容量をそれぞれある程度に維持しながらシステムのもつキャパシティの有効利用をはかることが可能である。

文 献

- [1] W.-B. Yang and E. Geraniotis, "Admission Policies for Integrated Voice and Data Traffic in CDMA Packet Radio Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.12, no.4, May 1994.
- [2] R. Ganesh, K. Joseph, N.D. Wilson, and D.

Raychaudhuri, "Performance of Cellular Packet CDMA in an Integrated Voice/Data Network," *Int. J. Wireless Information Networks*, vol.1, no.3, 1994.

- [3] J.M. Jacobsmeyer, "Congestion Relief on Power-Controlled CDMA Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.14, no.9, Dec. 1996.
- [4] S. Tsuzuki, Y. Nakayama, Y. Yamada, and S. Tazaki, "A Traffic Analysis of a Spread Unslotted Aloha System with the Trunk Reservation Method," IEICE, Technical Report, 1995.
- [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 with Fixed Packet Length," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 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] M.B. Pursley, "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread Spectrum Multiple-Access Communication—Part 1 System Analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM25, no.8, Aug. 1977.
- [9] L. Kleinrock, *Queueing Systems*, vol.1, Wiley-Interscience, New York, 1975.

付 録

1. データスループットを求める際、音声信号の同時送信局数を固定できる理由

音声通話時間はデータパケット長に比べて長く、本解析では約 5,000 倍もの長さを仮定している。更に、データ、音声ともオフアードロードは平均信号時間に発生する信号の個数（音声の場合はリザベーションパケットの個数）と平均パケット長時間（音声の場合は平均通話時間）の積と定義している。従って、例えば、同じオフアードロードのところでは比較した場合、平均通話長の長い音声信号のほうが、データパケットよりも発生率、サービス終了率が小さくなる。すなわち、1 データパケット長内において音声チャンネル数に変化する確率はかなり小さくなり、音声チャンネル数は一定とみなすことができる。実際に数値的に示すと次のようになる。音声ユーザのオフアードロードを G_v として平均音声通話時間を T_v とする。あるデータパケットが発生したときにすでに存在している音声ユーザ数を k_v とする。データパケット長時間 T_d 内に新規音声ユーザの平均発生個数 k_{v_birth} は次のように音声ユーザの発生率 λ_v と T_d の積になる。

$$k_{v_birth} = \lambda_v \cdot T_d = (G_v/T_v) \cdot T_d$$

更に、すでに存在している k_v の音声ユーザがデータパケット長時間 T_d 内に終了する平均個数 k_{v_birth} は音声通話終了率 μ_v を用いて次のようになる。

$$k_{v_death} = k_v \cdot \mu_v \cdot T_d = k_v \cdot (1/T_v) \cdot T_d$$

$G_v = 50$, $k_v = 50$ とするとそれぞれの値は $k_{v_birth} = 0.0125$ 個, $k_{v_death} = 0.0125$ 個となる。但し、データパケット長は 500 ビット, 平均音声通話時間 $T_v = 60$ s, ビットレートは双方とも 32 kbps とする。このことからわかるように、1 データパケット長内では音声ユーザの発生終了はほとんどないとみなすことができる。もちろんこの値は条件によって変わり、もし 1 データパケット長内において音声チャネル数が変化してしまうほど、音声信号のオフロードが大きくなった場合はこの仮定を用いることは不可能になってしまう。しかし、実際問題として、利用音声ユーザ数のオフロードがそこまで大きくなってしまえば、システムとして成り立たなくなってしまうので、本論文で示した範囲における利用音声ユーザのオフロードを考えれば十分であると考えられる。従って、この仮定は十分に有効なものと考えられる。

2. 音声ユーザのブロッキング確率を求める際、データの同時送信局数を固定できる理由

音声信号のリザベーションパケットの発生は CLSP によって制御されているので、その瞬間瞬間の中央局における信号数（データパケットと通話音声ユーザ数）に依存する。従って、それぞれの新規音声ユーザが発生するとき、重要となるのがその瞬間の中央局における信号数のみとなる。すなわち、音声ユーザがチャネルの予約を受け入れられるか、否か、つまり、ブロッキング確率もその瞬間の信号数にのみ依存することになる。上で示したデータの解析の場合と違う点は、上の場合はある時間区間（データパケット時間）に同時送信局数が変化しないということが重要であったため、音声信号の個数を固定したというイメージであった。しかし、この場合は瞬間瞬間の信号数がどのように与えられるかということが重要になる。従って、本論文では定常状態を考えているので、 $M/D/\alpha/\alpha$ で与えられる定常確率から得られるデータパケット同時送信局数をその値とした。よって、求めるブロッキング確率は本文式 (16) の結合確率から得られる。

(平成 9 年 3 月 17 日受付, 6 月 30 日再受付)



佐藤 毅 (学生会員)

平 6 名大・工・電気卒。平 10 同大大学院博士課程了。工博。これまで、スペクトル拡散通信方式を用いたパケット通信に関する研究に従事。IEEE 会員。



サンドウーク アバス (学生会員)

平 3 ダマスカス大・工・電気卒。平 10 同大大学院修士課程了。現在、同大大学院博士課程在学。これまで、スペクトル拡散通信方式を用いたパケット通信に関する研究に従事。IEEE 会員。



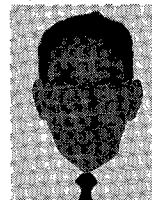
山里 敬也 (正員)

昭 63 信州大・工・電気卒。平 2 同大大学院修士課程了。平 5 慶大大学院博士課程了。同年名大助手。平 10 同大・情報メディア教育センター・助教授。現在に至る。工博。符号化変調方式、衛星通信測位、通信理論等に関する研究に従事。情報理論とその応用学会、IEEE 各会員。



片山 正昭 (正員)

昭 56 阪大・工・通信卒。昭 61 同大大学院博士課程了。同年豊橋技術科学大・助手。平元阪大・大型計算機センター・講師。平 4 名大・工・電子情報・講師。平 5 助教授。現在に至る。工博。衛星通信/測位、スペクトル拡散通信、変復調理論、雑音理論、トラヒック理論および計算機ネットワーク等の研究に従事。昭 61 本会篠原記念学術奨励賞受賞。情報理論とその応用学会、IEEE 各会員。



小川 明 (正員)

昭 35 名大・工・電気卒。同年国際電信電話(株)入社。同社研究所勤務を経て、昭 63 名大に移る。この間、デジタル通信方式、衛星通信、移動体通信等に関する研究開発に従事。現在、同大工・教授。工博。共著書「衛星通信技術」。IEEE 会員。