

2値シフトレジスタ系列を用いた準同期CDMA方式

久野 誠史^{†*}山里 敬也[†]片山 正昭[†]小川 明[†]

Quasi-Synchronous CDMA with Binary Shift-Register Sequences

Seiji KUNO^{†*}, Takaya YAMAZATO[†], Masaaki KATAYAMA[†], and Akira OGAWA[†]

あらまし 本論文では、スペクトル拡散通信方式に基づいた同期アクセスのずれの許容範囲をもつ準同期CDMA方式(QS-CDMA)について検討を行う。2値シフトレジスタ系列のGold系列とM系列を用い、相互・自己相関特性を考慮してアクセスタイミングずれの許容範囲の広い準同期拡散符号群(QS-sequences)を導く。これらのQS-sequencesを用いたQS-CDMA方式について検討し、その有効性を明らかにすることを目的とする。その結果として本論文で示したQS-sequencesを用いることにより非同期CDMA方式と比較して大きく特性改善がなされ、また同期CDMA方式と比較してアクセスタイミングのずれの許容範囲が増加されることが明らかとなった。

キーワード 準同期CDMA方式, Gold系列, M系列, 同期許容範囲, 符号数

1. ま え が き

スペクトル拡散通信方式に基づく符号分割多元接続方式(CDMA: Code-Division Multiple-Access)は、異なる拡散符号を各ユーザに割り当てることにより各ユーザを識別する多元接続方式である。CDMA方式は干渉に強く、秘話性をもつ等、移動体通信に適した特徴を有しており、実用化に向けて研究が盛んに行われている[1]。

しかし、CDMA方式の特徴の一つであるランダムアクセス性を利用した非同期CDMA方式(A-CDMA: Asynchronous-CDMA)では、ユーザの識別を行う拡散符号間に相互相関が存在するため同時通信を行う各ユーザ間に他局間干渉が生じ、他信号への混信、漏話となり、希望局信号の同期、復調を妨げ周波数利用率を落とす原因となる[1], [2]。この問題を解決するために、各ユーザの拡散符号のタイミングがぴったり合った状態で各ユーザが同期アクセスをし、通信を行う同期CDMA方式(S-CDMA: Synchronous-CDMA)が提案されてきた[3]。S-CDMA方式では、拡散符号として直交系列を用いることにより相互相関をゼロとし、

他局間干渉をなくすことにより効率を顕著に高めることが期待できる。しかし、S-CDMA方式を移動体通信に適用することを想定すると完全な同期アクセスを実現させることは非常に困難であり、同期アクセスのずれが存在すると特性は大きく劣化すると考えられる[3]。これに対して、同期アクセスのずれの許容範囲をもつ準同期CDMA方式(QS-CDMA: Quasi-Synchronous-CDMA)が検討されている[4]-[9]。QS-CDMA方式は、A-CDMA方式で問題となる拡散符号間の相互相関による他局間干渉と、S-CDMA方式において問題となるアクセスタイミングを同期させることの困難さの両方を解決し、通信の効率を高めることをねらいとしていて、移動体通信への適用が期待されている[4]-[9]。

QS-CDMA方式を実現するためには、アクセスタイミングのずれがあっても相互相関の小さい準同期拡散符号群(QS-sequences)を用いなければならない。QS-sequencesとしては周期多相符号、周期多値符号が同期アクセスのずれの存在する環境下において、良い相互相関特性を示すことが報告されている[6], [7]。しかし、これらの符号生成は非常に難しくシステム構成も複雑になり実用化するにおいては問題点が多く存在する。一方、符号生成、システム構成とも簡単である2値シフトレジスタ系列のQS-sequencesを用いたQS-CDMA方式[4], [5], [8]-[10]が提案されているが、同期アクセ

[†] 名古屋大学 工学部 電子情報学部, 名古屋市
Department of Information Electronics, School of Engineering, Nagoya
University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-01 Japan

* 現在, 日本電信電話(株)

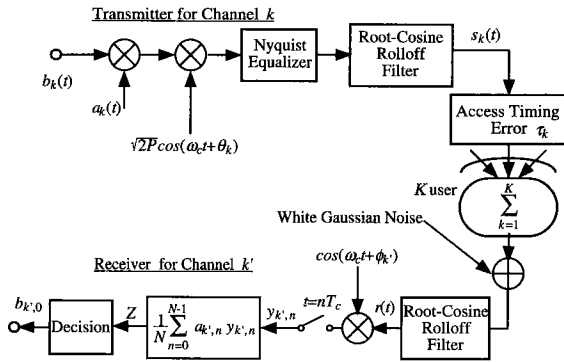


図1 システムモデル
Fig. 1 System model.

スのずれの許容範囲はかなり小さくなってしまい、同期許容範囲を増加させる試みは今までほとんどなされていない。

本論文では、移動体通信にスペクトル拡散通信方式に基づいたQS-CDMA方式を適用することを想定し、同期許容範囲の広い2値シフトレジスタ系列のQS-sequences [8], [9]を導く。なお、同種の検討として、変形M系列による同期直交SS方式が文献[10]で報告されているが、ここでは、Gold系列とM系列を用いたQS-sequencesを導くものとする。更に、Gold系列よりQS-sequencesを導く際に飛躍的に計算量を減らす方法を巻末の付録にて示す。そして、これらのQS-sequencesを用いたQS-CDMA方式について検討し、その有効性を明らかにすることを目的とする。有効性を検討する評価尺度としては平均ビット誤り率、周波数利用効率を用い、計算機シミュレーションによりこれを求め、検討を行う。

2. QS-CDMA方式のシステムモデル

2.1 システムモデル

ここではまず、特性評価を行うためのQS-CDMA方式のシステムモデルを設定する。搬送波変調方式としてBPSK変調方式を用い、QS-CDMA方式のシステムモデルを図1に示す。同図では、総ユーザ数 K のユーザが連続的に送信している状態を仮定している。上段は第 k ユーザの送信機、下段は第 k' ユーザ(希望波ユーザ)の受信機である。

図中の $b_k(t)$ はそれぞれ第 k ユーザ($1 \leq k \leq K$)の送信情報信号である。これらは、1シンボル継続時間が T_b である方形波列である。 $a_k(t)$ は、1チップの継続時間が T_c である系列長 N の拡散符号信号(方形波列)であ

る。ここで $T_b = NT_c$ であり、拡散符号の1周期分が1情報ビットに割り当てられているものとする。

このシステムではナイキスト型フィルタを用い、これが送信機、受信機で等しく分けられているとする。このフィルタを用いることにより符号間干渉を起こすことなく効果的に帯域制限することができる。このとき送信信号 $s_k(t)$ は

$$s_k(t) = \sqrt{2P} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left\{ b_{k,i} a_{k,i} \cos(\omega_k t + \theta_k) g_T(t - iT_c) \right\} \quad (1)$$

となる。ここで系列 $b_{k,i}$ は、第 k ユーザの i 番目の情報系列、 $b_{k,i}$ は第 k ユーザの i 番目の拡散系列であり、 $[x]$ は x を超えない最大の整数を表す関数である。 $g_T(t)$ はコサインロールオフフィルタのルート特性をもつ送信フィルタのインパルスレスポンスである。また、 P は信号電力、 ω_k は搬送波角周波数、 θ_k は搬送波初期位相である。ここで、各ユーザの搬送波初期位相 θ_k は互いに独立で一様分布する確率変数であるとし、これは希望波信号に対しては常にゼロであり、干渉波に対しては $[0, 2\pi]$ で一様分布しているものとする。また各ユーザの搬送波角周波数 ω_k 、信号電力 P はすべて等しいとする。

2.2 逆拡散後の出力

前節で設定したシステムモデルをもとに、逆拡散後の出力を求める。通信路では、 K 個の送信信号にアクセスタイミングのずれ τ_k がそれぞれ加わる。まずこのアクセスタイミングのずれ τ_k について考えてみる。QS-CDMA方式で各ユーザ局の拡散信号を基地局の受信端において同期アクセスさせる方法の一つとして考えられるのは、基地局が同期用の特別な信号を用意することである[4]。各ユーザ局は、この特別な信号を受信し、受信した信号の情報により各ユーザ局と基地局との距離を推定し、その各々の距離に合わせて基地局の受信端において同期アクセスするよう送信タイミングを調整していくものである。しかし、移動体通信に適用することを想定すると、各ユーザ局と基地局との距離変動、伝送路変動等により伝搬遅延時間は変動していく。このため各ユーザ局と基地局との距離推定を完全に行うのは困難であり、アクセスタイミングのずれが発生し、そのずれ τ_k はあるアクセスタイミング τ_0 を中心に分布することが予想される。そこで本研究では、アクセスタイミングのずれの分布は τ_0 を中心にしたガウス分布であると想定する。また、簡単のためアクセスタイミング $\tau_0 = 0$ とし、その標準偏差を σ とする。送信信号にアクセスタイミングのずれ τ_k が加わっ

たものを送信機と同じ特性をもつ受信フィルタ (整合フィルタ) によって帯域制限し, 更に同期検波, 逆拡散した後にデータ判定を行う. このとき, 逆拡散後の出力は

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\sqrt{\frac{P}{2}} a_{k,i} b_{k,i} a_{k',n} g(nT_c - iT_c - \tau_k) \cos(\phi_k) \right] \\
 &\quad + Z_{noise} \\
 &= \sqrt{\frac{P}{2}} b_{k',p} \\
 &\quad + \frac{1}{N} \sum_{\substack{k=1 \\ (k \neq k')}}^K \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\sqrt{\frac{P}{2}} a_{k,i} b_{k,i} a_{k',n} g(nT_c - iT_c - \tau_k) \cos(\phi_k) \right] \\
 &\quad + Z_{noise} \\
 &= \sqrt{\frac{P}{2}} Z_k + \sum_{\substack{k=1 \\ (k \neq k')}}^K \sqrt{\frac{P}{2}} Z_k + Z_{noise} \\
 \phi_k &= \theta_k(t - \tau_k)
 \end{aligned} \tag{3}$$

になり, 得られた逆拡散後出力の極性により送信された情報データを決定する. ここで, 第1項 Z_k は希望局第 k 局に対する出力, 第2項 Z_k は希望局以外の干渉出力, 第3項 Z_{noise} は雑音に対する出力である.

3. 2値シフトレジスタ系列のQS-sequences

QS-CDMA 方式の特性は, 用いられる準同期拡散符号群 (QS-sequences) に大きく依存する [4]-[9]. アクセスタイミングのずれが存在する中で他局間干渉を減らすためには, アクセスタイミングのずれの範囲の中で QS-sequences の相互相関値を小さくしなければならない. 本節では, アクセスタイミングのずれを許容する相互相関値の範囲 r , 最大チャネル数を決める拡散符号群の符号数 S_{max} を中心に2値シフトレジスタ系列のQS-sequences について検討して QS-sequences の導出を行う. 本論文では, 符号生成, システム構成ともに簡単になる2値シフトレジスタ系列のGold系列, M系列を取り上げる. これらの QS-sequences を用いた QS-CDMA 方式の特性評価については後節で述べる. なお, 系列の導出に関しては, 文献 [14] で, いかなる系列でも偶相互相関値が小さい位相においては, 奇相互相関値が小さくなる確率が高いことを証明されているため, ここでは, 偶相関のみを考慮し, QS-sequences の導出を行う.

3.1 Gold 系列より導出した QS-sequences

Gold 系列は優れた相互相関特性をもち, 多くの系列をもつ [11]. 更に, 系列長 $N=2^n-1$ の Gold 系列は1組の n 段シフトレジスタにより $N+2$ 個の系列を簡単に生成

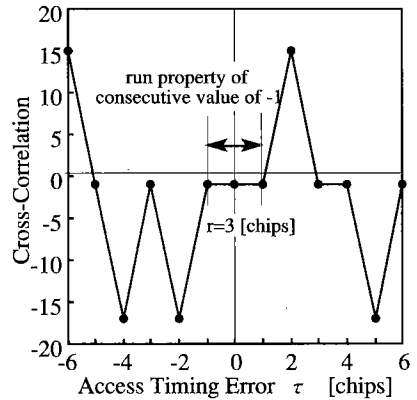


図2 系列長 $N=63$ のときのGold系列の相互相関特性
Fig. 2 Cross-correlation of Gold-sequence ($N=63$).

することができる. 図2は系列長 $N=63$ のときの任意に選びとった二つのGold系列の相互相関特性の一例である. この図よりも明らかなように相互相関値 -1 をとる場合が多く, -1 が連続する連なりが存在する. アクセスタイミングのずれの影響を避けるためには, 相互相関値はアクセスタイミングのずれの範囲において -1 をとる必要があり, 先程述べた -1 の連なりの中心に同期アクセスタイミングをもってくればアクセスタイミングのずれの影響を避けることができる [8], [9]. 図2の場合, 一方のGold系列を3回巡回置換することにより図3に示されるように -1 の連なりの中心を $\tau=0$ にもってくることができ, アクセスタイミングのずれがあっても相互相関値は -1 となり, ずれの許容範囲をもつ QS-sequences を導くことができる.

Gold 系列を用いた QS-sequences を得るには, $N+2$ 個のすべてのGold系列, すべての位相を上記に適合するように符号探索する必要がある. 表1はコンピュータサーチにより得られた系列長 $N=63, 127, 511, 1023$ の場合の QS-sequences (G-r) の符号数 S_{max} を示す. ここで, QS-sequences (G-r) をGold系列より得られる -1 の連なり r (chips) をもつ準同期拡散符号群とする. この表でわかるように相互相関値 -1 の連なり r (chips) を増加させればずれに対して強い QS-sequences を導出することができるが符号数は減少する. また, 系列長 N (N が大きいとき) が増加しても系列長に対する S_{max} の割合はほとんど変わらないことがわかる. この QS-sequences を簡単に得る導出法, 選択されるGold系列について巻末の付録で詳しく示す.

3.2 M 系列より導出した QS-sequences

ここでは, M 系列を用いた QS-sequences について述

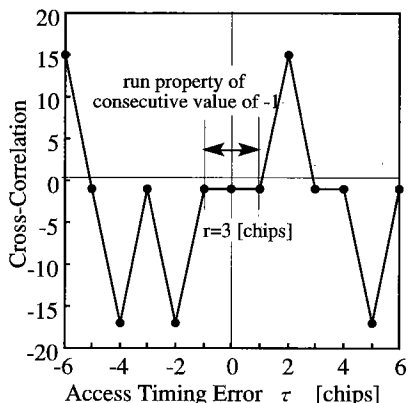


図3 Gold系列を用いたQS-sequencesの相互相関特性
Fig. 3 Cross-correlation of QS-sequences (Gold-sequence).

表1 QS-sequences(G-r)の S_{max} ($S_{max}/N \times 100$)
Table 1 S_{max} ($S_{max}/N \times 100$) of QS-sequence(G-r).

| N | r | | | |
|------|-------------|-----------|---------|---------|
| | 1 | 3 | 5 | 7 |
| 63 | 64 (100%) | 16 (25%) | 6 (10%) | 4 (6%) |
| 127 | 128 (100%) | 32 (25%) | 8 (6%) | 2 (2%) |
| 511 | 511 (100%) | 128 (25%) | 32 (6%) | 8 (2%) |
| 1023 | 1024 (100%) | 256 (25%) | 64 (6%) | 16 (2%) |

べる。M系列は優れた自己相関特性をもち、一つの線形シフトレジスタにより簡単に生成される [11]。周期 $N=2^n-1$ のM系列はn段のシフトレジスタにより生成され、自己相関関数は次式で示される。

$$r_{M,M}(\tau) = \int_0^N PN_M(t)PN_M(t-\tau)dt = \begin{cases} N & ; \tau=0 \\ -1 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

但し、 $PN_M(t)$ を周期 $N=2^n-1$ のM系列とする。この式で示されるように $\tau=0$ の位相以外の自己相関値は-1であり、この優れた自己相関特性を利用して、1回巡回置換したM系列各ユーザに割り当てることにより、各ユーザ間の相互相関関数は次式で表される [3]。

$$r_{k,l}(\tau) = \int_0^N PN^{(k)}(t)PN^{(l)}(t-\tau)dt = \begin{cases} N & ; \tau=\lambda_{k,l} \text{ mod } N \\ -1 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

但し、 λ_k は $PN^{(k)}$ と $PN^{(l)}$ との間の巡回置換量である。このように1回巡回置換したM系列を各ユーザに割り当てることにより、 $\tau=0$ では任意の拡散符号間の相互

表2 QS-sequences(M-r)の S_{max}
Table 2 S_{max} of QS-sequence(M-r).

| N | r | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 63 | 63 | 31 | 21 | 15 | 12 |
| 127 | 127 | 63 | 42 | 31 | 25 |
| 255 | 255 | 127 | 85 | 63 | 51 |
| 511 | 511 | 255 | 170 | 127 | 102 |

相関値は-1になり、アクセスタイミングのずれがなければ($\tau=0$)他局間干渉をほとんどゼロにすることができるが、アクセスタイミングのずれが生じるとユーザ間の相互相関値は最悪の場合Nとなり特性が急激に劣化することが予想される。そこで、QS-CDMA方式に適合するM系列を用いたQS-sequencesを考える。これは各ユーザに符号を割り当てるときにM系列の巡回置換量rを増やし、各ユーザに割り当てればアクセスタイミングのずれに対して強いQS-sequencesを導くことができる。一般的に巡回置換量rをもって各ユーザにM系列を割り当てれば、 $-(r-1) \leq \tau \leq r-1$ の範囲では相互相関値は必ず-1を必ずもつこととなり、QS-sequencesを導くことができる。しかし、同期誤りが大きくなると希望局信号は他局信号に大きく干渉される。そこで、この同期誤りの許容範囲を増やすためにrを増加させればよいのだが逆に符号数 S_{max} が $[N/r]$ に減少してしまい最大チャネル数が減ってしまい、同期誤り許容範囲と符号数の間にトレードオフが存在する。表2は系列長 $N=63, 127, 255, 511$ のQS-sequences (M-r) の場合の S_{max} を示す。

4. 特性評価

4.1 ビット誤り率

2.のシステムモデルをもとにQS-CDMA方式のビット誤り率(BER)を計算し、特性評価を行う。受信機において希望局信号の同期は完全であると仮定しているので、式(2)での Z_k は一意に定まる。 Z_{noise} は分散 $\sigma_n^2 = \text{var}[Z_{noise}] = N_0/4NT_c$ をもつ白色ガウス雑音である。このときBERは次のように表される。

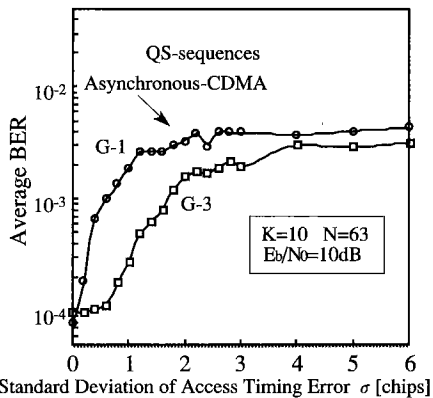


図4 QS-sequences(G-r)を用いたシステムの平均BER特性
Fig. 4 Average BER for the case of QS-sequences(G-r).

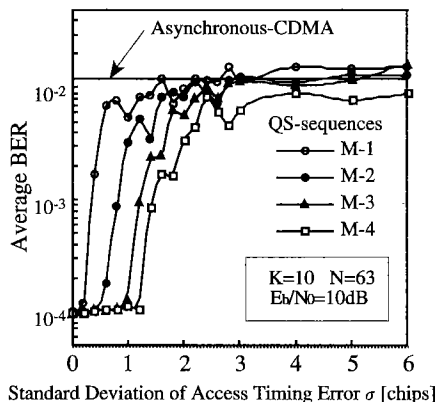


図5 QS-sequences(M-r)を用いたシステムの平均BER特性
Fig. 5 Average BER for the case of QS-sequences(M-r).

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{P}{2}} Z_k + \sum_{k=1(k \neq k')}^K \sqrt{\frac{P}{2}} Z_k}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right) \tag{5}$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_o} \left(Z_k + \sum_{k=1(k \neq k')}^K Z_k \right)}$$

と表される。ここで E_b は1ビットあたりの信号エネルギーである。この式をもとにビット誤り率特性を求め、期待値である平均ビット誤り率を用いて特性評価を行う。ここで干渉成分 Z_k は希望局と非希望局との偶相互相関、奇相互相関により得られ、希望局以外の各信号は各々独立な確率変数である伝搬遅延と搬送波位相をもつのでランダムな確率変数であり、解析的に求めるのは困難であるためコンピュータシミュレーションを用いて Z_k を導出する。また、シミュレーションでは偶相互相関と奇相互相関ともに考慮する。

QS-sequences(G-r)を用いたシステムの平均BER特性を図4に示す。ここで、ユーザ数 $K=10$ 、 $N=63$ 、 $E_b/N_0=10$ dBである。図中には、同じGold系列を用いたA-CDMA方式の特性も併せて示す。また各ユーザのアクセスタイミングのずれは、ガウス分布と想定しその標準偏差を σ とする。QS-sequences(G-r)を用いたシステムは r が増加するに従いアクセスタイミングのずれの許容範囲が増加することがわかる。しかしながら、 r が増加するに従い S_{max} は減少してしまい最大チャンネル数が減少する。QS-sequences(G-3)を用いたシステムでは、 σ が0.8(chip)以内であればA-CDMA方式と比較してかなりの特性改善が見られる。QS-sequences(G-3)を用いたシステムは σ が0.8(chips)を超えたら徐々にA-CDMA方式の特性に近づいていくことがわかる。

QS-sequences (M-r) を用いたシステムの平均 BER 特

性を図5に示す。図5のパラメータは先程の QS-sequences (G-r) の場合と同じであり、同じM系列を用いたA-CDMA方式の特性も併せて示す。先程と同じように r の増加と共に同期許容範囲が増加していることがわかる。QS-sequences (M-4) を用いたシステムでは、 σ が1.0 (chip) 以内であればA-CDMA方式と比較してかなりの特性改善が見られる。QS-sequences (M-4) の利点は σ が1.0 (chip) を超えたら急激になくなり、A-CDMA方式の特性に近づいていく。この急激な特性劣化は、希望信号と非希望信号がタイミングアクセスのずれにより一致してしまい、 N という非常に大きな相互相関値を取るためである。この特性劣化は、先程のGold系列の場合と比べて急激である。これは、Gold系列の場合タイミングアクセスのずれが大きくなってもGold系列は相互相関特性が優れているので相互相関値はあまり大きな値を取らないためである。

Gold系列とM系列より導出したQS-sequencesの比較を図6に示す。図中には直交符号のWalsh-Hadamard (WH)符号を用いたS-CDMA方式[5]も併せて示す。二つのQS-sequencesを比較するために最大チャンネル数が15と仮定すると表1、表2よりQS-sequences(G-3)とQS-sequences(M-4)を適用することができる。両者を比較すると、 σ が1.0(chips)以内であれば両方ともにA-CDMA方式と比較するとかなりの特性改善がなされる。しかし、 σ が1.0(chips)を超えたらQS-sequences(M-4)を用いたシステムは急激に特性が劣化していくが、一方QS-sequences(G-3)を用いたシステムは徐々に劣化していく様子がわかる。また、S-CDMA方式と比較すると同期許容範囲がかなり増加しているのがわかる。

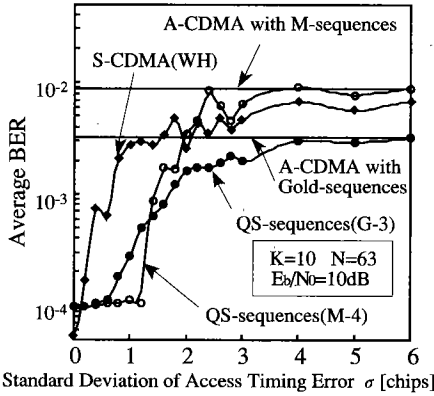


図6 M系列とGold系列より導出したQS-sequencesの比較
 Fig. 6 Average BER for the case of QS-sequences(G-3) and QS-sequences(M-4).

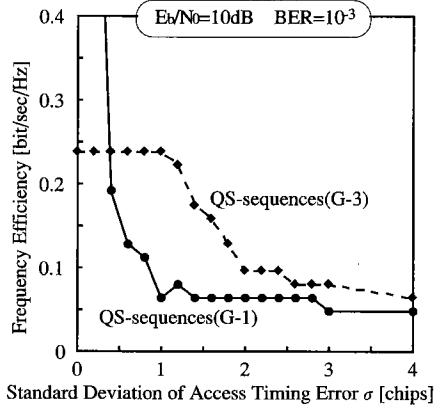


図7 QS-sequences(G-r)を用いたQS-CDMA方式の周波数利用効率
 Fig. 7 Frequency Efficiency for the case of QS-sequences(G-r).

さて、次にQS-sequenceの移动通信へ適用した想定例を考えてみる。一般に、基地局から移動局の下り回線においては同期を確保することができるが、移動局から基地局の上り回線では同期を完全に行うことが難しく準同期もしくは非同期で通信を行うこととなり、本論文のシステムは上り回線で用いることが有用と考えられる。この上り回線で準同期アクセスを行う方法として考えられる一つの方法として、基地局からの信号(下り回線)の受信タイミングに同期して各移動局が信号を送信する方法がある[14]。ここで基地局と移動局の伝搬時間の最大値を T_d とすると、基地局受信のタイミング誤差は最大 $2T_d$ となる。例えば、セル半径300m、チップ速度1Mchip/sのCDMA方式を用いる場合、チップのずれは2チップ以内となる。これより、QS-sequenceとしては $r=3$ の場合に相当し、また、符号数 S_{max} もA-CDMA方式の1/3で実現できることになる。

4.2 周波数利用効率

この節では、QS-CDMA方式の周波数利用効率を求め特性評価を行う。周波数利用効率 η は次式で与えられる[12]。

$$\eta = \frac{K_{max}R_b}{W_s} \tag{6}$$

但し

- K_{max} : 最大ユーザ数
- R_b : 情報データレート
- W_s : システムに割り当てられた帯域幅

である。

ここで K_{max} は、ある E_b/N_0 を決定したときに、あるビット誤り率を達成することが可能となる最大ユーザ

数、帯域幅 $W_s=1/T_c$ 、情報データレート $R_b=1/T_b$ である。

図7、図8に $E_b/N_0=10\text{dB}$ とし、ビット誤り率 10^{-3} を達成する場合のQS-sequences(G-r)とQS-sequences(M-r)を用いたシステムの周波数利用効率を示す。これらの図より、 σ が大きいときには r が大きいQS-sequences(G-r)とQS-sequences(M-r)のシステムの周波数利用効率が高いが、 σ が小さいときは逆に r が小さいQS-sequencesの方が周波数利用効率が高いことがわかる。これは、 r が大きいQS-sequencesほどアクセスタイミングの許容範囲は広くなるが、符号数 S_{max} が少なくなるため最大チャネル数も制限されてしまい、周波数利用効率は頭打ちになる。これより、周波数利用効率を高めるにはシステムの性能(同期の正確さ、最大チャネル数等)に合わせたQS-sequencesを用いる必要があることがわかる。またQS-sequences(G-r)とQS-sequences(M-r)を比較するとアクセスタイミングのずれが小さいときには周波数利用効率はほぼ等しいが、アクセスタイミングのずれが大きいときにはQS-sequences(G-r)を用いたシステムの周波数利用効率が高いことがわかる。

6. むすび

本研究では、移動体通信にスペクトル拡散通信方式に基づいたQS-CDMA方式を適用することを想定し、アクセスタイミングずれの許容範囲の広い2値のQS-sequencesを導き、それらを用いたQS-CDMA方式について伝送特性の面から検討を行い、評価を行った。QS-sequencesとしては、生成方法・システム構成ともに非常に簡単になる2値シフトレジスタ系列のGold系列と

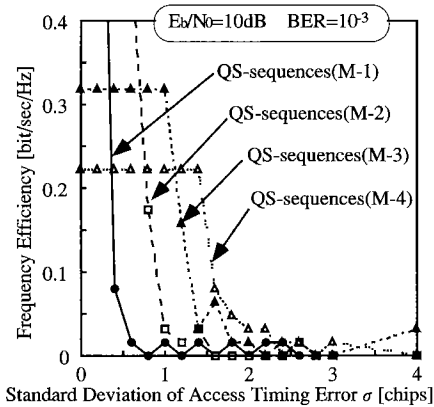


図 8 QS-sequences(M-r)を用いたQS-CDMA方式の周波数利用効率

Fig. 8 Frequency efficiency for the case of QS-sequences(M-r).

M系列を用いた。Gold系列では同期アクセスタイミングの前後に小さな相互相関値をもつように拡散符号群を符号探索しQS-sequencesを導いた。M系列では優れた自己相関特性を利用して各ユーザに巡回置換した系列を割り当てることによりQS-sequencesを導いた。またこのGold系列を用いたQS-sequencesの簡単な導出方法を巻末の付録に示した。次にQS-sequencesを用いたシステムの平均ビット誤り率特性・周波数利用効率を求め、QS-CDMA方式の伝送特性を検討した。その結果、QS-sequencesを用いたシステムはアクセスタイミングのずれが小さいときはA-CDMA方式と比べてかなり特性改善がなされ、S-CDMA方式と比較して同期許容範囲がかなり増加されることが確認された。周波数利用効率の面からQS-CDMA方式を検討していくと必ずしも同期許容範囲の広いQS-sequencesが最も優れているとは言えず、システムの性能(同期の正確さ、最大チャネル数等)に合わせて符号数・同期許容範囲の両面を検討しQS-sequencesを選ぶ必要があるということがわかった。本研究では、2値の拡散符号群に限定しQS-sequencesを導いたが、アクセスタイミングの許容範囲を増やすと符号数(最大チャネル数)が少なくなるという問題点が残っている。このため許容範囲が広く、符号数が多い拡散符号群を検討する必要がある。

文 献

[1] 河野隆二, “スペクトル拡散通信の展望と課題,” 信学技報, IT93-61, pp. 19-28, Oct. 1993.
 [2] M. B. Pursley, “Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication-part I: System analysis,” IEEE Trans. Commun., vol. 25, no. 8, pp. 795-799, Aug. 1977.

[3] 谷本正幸, 住吉浩次, 駒井又二, “変形M系列を用いた同期式スペクトル拡散多重通信方式,” 信学論(B), vol. J67-B, no. 3, pp. 297-304, March 1984.
 [4] R. D. Gaudenzi, C. Elia, and R. Viola, “Bandlimited Quasi-Synchronous CDMA: A Novel Satellite Access Technique for Mobile and Personal Communication Systems,” IEEE JSAC, vol. 10, no. 2, pp. 328-343, Feb. 1992.
 [5] V. M. DaSilva and E. S. Sousa, “Multicarrier Orthogonal CDMA Signals for Quasi-Synchronous Communication Systems,” IEEE JSAC, vol. 12, no. 5, pp. 842-852, June 1994.
 [6] Y. Tanada, “Real-valued orthogonal pseudonoise sequences without crosscorrelation within certain shift limits and their application to quasi-synchronous SSMA system,” Trans. IEICE, vol. E74-A, no. 1, pp. 104-110, Jan. 1991.
 [7] N. Suehiro, “A Signal Design without Co-Channel Interference for Approximately Synchronized CDMA Systems,” IEEE JSAC, vol. 12, no. 5, pp. 837-841, June 1994.
 [8] S. Kuno, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, “A study onquasi-synchronous CDMA based on selected PN signature sequences,” IEEE Third International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, pp. 479-483, July 1994.
 [9] 久野誠史, 山里敬也, 片山正昭, 小川 明, “準同期スペクトル拡散通信方式に関する一考察,” 信学技報, SST93-26, pp. 43-48, Aug. 1993.
 [10] 笹岡秀一, “非同期直交スペクトル拡散通信方式の提案,” 信学技報, SST93-103, pp. 19-24, March 1994.
 [11] D. V. Sarwate and M. B. Pursley, “Crosscorrelation Properties of Pseudorandom and Related Sequences,” Proc. IEEE, vol. 68, no. 5, pp. 593-619, May 1980.
 [12] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani and L. A. Weaver, “Increased Capacity Using CDMA for Mobile Satellite Communication,” IEEE JSAC, vol. 8, no. 4, pp. 503-513, May 1990.
 [13] W. W. Peterson and E. J. Weldon Jr., “Error-Correcting Codes,” 2nd ed. Cambridge, MA: M.I.T. Press, 1972.
 [14] 松藤信哉, 上原 健, 山中輝樹, “2値系列の奇相関分布の近似について,” 信学技報, SST 94-58, pp. 25-30, Oct. 1994.

付 録

Gold系列を用いたQS-sequencesの簡単な導出法

この付録では、Gold系列によるQS-sequencesを簡単に導出する方法を示し、その具体例を示す。Gold系列はプリファードペアなM系列の排他的論理和により得られる[11]。ここで、系列uを次数n、系列長N=2^n-1のM系列とする。次にq=2^k+1あるいはq=2^{2k}-2^k+1でgcd(N,q)=1を満たすときにuとv=u[q]をプリファードペアなM系列と言う[11], [13]。u[q]は系列uをq番目ごとに取り出してできる系列であり、この操作をデシメーション(decimation)と言う[13]。このプリファードペアなM系列の排他的論理和を取るによりN+2個のGold系列を生成することができる。

QS-sequences (G-r) は 3.1 で述べたように相互相関値 -1 が r (chips) 連続する拡散符号群であり, この QS-sequences (G-r) を導出するアルゴリズムを次に示す. まずはじめに, $N+2$ 個の Gold 系列の中で任意の 1 個の基準となる Gold 系列を決め QS-sequences の集合に入れる. 次に基準以外の $N+1$ 個の Gold 系列の中から任意に 1 個の Gold 系列を取り出し, QS-sequences の集合に含まれるすべての Gold 系列 (今の場合, 基準となる Gold 系列のみ) との相互相関値 -1 が r (chips) 連続するように巡回置換させすべての位相について調べる. もし, 相互相関値 -1 が r (chips) 連続するような位相があれば, その Gold 系列を QS-sequences の集合に入れる. 残りの N 個の Gold 系列も同様に符号探索を行い, QS-sequences (G-r) を導出する. なおこのアルゴリズムを全探索と呼ぶこととする. 全探索では, $N+2$ 個のすべての Gold 系列, Gold 系列場合の Gold 系列の選ばれ方に注目してみると, 数種の限られた選ばれ方しかないことが筆者等によって確認されている. よって, その限られた選ばれ方に従って Gold 系列をサーチしていけば, 計算量を大きく激減することができ, 簡単に QS-sequences (G-r) を得ることができる. 次にその限られた選ばれ方の中で, 一番簡単に QS-sequences (G-r) を得る方法を示す.

まずはじめに, $N+2$ 個の Gold 系列を次式のようにラベルを付ける. 但し, $u, v=u[q]$ は特性位相 [13] であるプリファードペアな M 系列である.

$$G(u, v) = \{u, v, v \oplus u, v \oplus Tu, v \oplus T^2u, \dots, v \oplus T^{N-1}u\} \\ = \{g(1, 0), g(2, 0), g(3, 0), g(4, 0), \dots, g(N+2, 0)\} \quad (A \cdot 1)$$

ここで \oplus は modulo 2 の加算 (排他的論理和: exclusive-or operation), T は巡回置換の演算子 [11] を表す. この Gold 系列の中でお互いに相互相関値 -1 が r (chips) 連続する QS-sequences (G-r) の集合を次式のように表す.

$$QS\text{-sequences}(G-r) = \{g(m_1, l_1), g(m_2, l_2), g(m_3, l_3), \dots, g(m_{S_{max}}, l_{S_{max}})\} \quad (A \cdot 2)$$

ここで $g(m, l)$ は, m 番目 ($1 \leq m \leq N+2$) の Gold 系列であり, $g(m, l)$ は $g(m, 0)$ を l 回巡回置換したものである. このとき, 相互相関値 -1 をとる r (chips) の連なりを中心が $g(m, l)$ の位相であるとする.

これから示す QS-sequences (G-r) を得る方法では, 注

表 A・1 QS-sequences(G-r)の一例, $N=63$
Table A・1 Example of QS-sequence(G-r), $N=63$.

$$u : h_1(x) = x^6 + x + 1 \\ v : h_2(x) = x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$$

| | $r=3$ $S_{max}=16$ | $r=5$ $S_{max}=5$ | $r=7$ $S_{max}=3$ |
|-----------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $g(m, l)$ | $g(1, 0)$ | $g(1, 0)$ | $g(1, 0)$ |
| | $g(7, 0)$ | $g(11, 0)$ | $g(19, 0)$ |
| | $g(8, 0)$ | $g(13, 0)$ | $g(57, 0)$ |
| | $g(12, 0)$ | $g(35, 0)$ | |
| | $g(13, 0)$ | $g(48, 0)$ | |
| | $g(14, 0)$ | | |
| | $g(17, 0)$ | | |
| | $g(18, 0)$ | | |
| | $g(19, 0)$ | | |
| | $g(20, 0)$ | | |
| | $g(35, 0)$ | | |
| | $g(48, 0)$ | | |
| | $g(51, 0)$ | | |
| | $g(56, 0)$ | | |
| | $g(57, 0)$ | | |
| | $g(65, 0)$ | | |

意しなければならないのは系列 u を巡回置換させて Gold 系列を発生させることである. $v=u[q]$ の M 系列を巡回置換させて Gold 系列を発生させると次に示す方法では QS-sequences は得られない.

QS-sequences (G-r) を得るには, $N+2$ 個のすべての系列, すべての位相をサーチする必要があり, またサーチする系列の順番も影響することを先ほど述べたが, (A・1) のように Gold 系列を発生させれば次に示す系列の順番, 位相でサーチをすれば, その Gold 系列で得られる符号数がほぼ最大となる QS-sequences (G-r) を得ることができる. このことは, $N=1023$ 以下で確かめられている. これは, 任意の二つの Gold 系列の相互相関値は $\tau=0$ のとき必ず -1 を取るため, その前後の τ で相互相関値 -1 を満たせば QS-sequences を導出することができる.

簡単な QS-sequences(G-r)の導出法

基準となる Gold 系列

$$g(1, 0)$$

サーチする Gold 系列の順番

$$g(1, 0), g(2, 0), g(3, 0), g(4, 0), \dots, g(N+2, 0) \text{ の順番}$$

サーチする Gold 系列の位相

$$g(m, \frac{-(r-1)}{2}), \dots, g(m, 0), \dots, g(m, \frac{(r-1)}{2}) \text{ の } r \text{ 個の位相のみ}$$

但し, r は奇数であるとする. 上に示す Gold 系列の r 個の位相のみ, Gold 系列の順番で相互相関値 -1 が r (chips) 連続するようにサーチをすることにより簡単に S_{max} がほぼ最大となる QS-sequences (G-r) を得ることが

表A・2 QS-sequences(G-r)の一例, N=127
Table A・2 Example of QS-sequence(G-r), N=127.

$$u : h_1(x) = x^7 + x + 1$$

$$v : h_2(x) = x^7 + x^3 + x^2 + x + 1$$

| | $r=3$ $S_{max}=32$ | $r=5$ $S_{max}=8$ | $r=7$ $S_{max}=2$ |
|-------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $g(m, l)$ | $g(1, 0)$ | $g(1, 0)$ | $g(1, 0)$ |
| | $g(4, 0)$ | $g(14, 0)$ | $g(61, 0)$ |
| | $g(8, 0)$ | $g(26, 0)$ | |
| | $g(9, 0)$ | $g(28, 0)$ | |
| | $g(10, 0)$ | $g(39, 0)$ | |
| | $g(11, 0)$ | $g(61, 0)$ | |
| | $g(26, 0)$ | $g(79, 0)$ | |
| | $g(27, 0)$ | $g(111, 0)$ | |
| | $g(31, 0)$ | | |
| | $g(34, 0)$ | | |
| | $g(35, 0)$ | | |
| | $g(38, 0)$ | | |
| | $g(39, 0)$ | | |
| | $g(40, 0)$ | | |
| | $g(41, 0)$ | | |
| | $g(42, 0)$ | | |
| | $g(45, 0)$ | | |
| | $g(48, 0)$ | | |
| | $g(54, 0)$ | | |
| | $g(64, 0)$ | | |
| | $g(65, 0)$ | | |
| | $g(66, 0)$ | | |
| | $g(75, 0)$ | | |
| | $g(76, 0)$ | | |
| | $g(84, 0)$ | | |
| | $g(85, 0)$ | | |
| | $g(90, 0)$ | | |
| $g(105, 0)$ | | | |
| $g(106, 0)$ | | | |
| $g(107, 0)$ | | | |
| $g(118, 0)$ | | | |
| $g(123, 0)$ | | | |

表A・3 全探索法により得られたQS-sequences(G-r)の一例, N=127
Table A・3 Example of QS-sequence(G-r), N=127 obtained by fullsearch procedure.

$$u : h_1(x) = x^7 + x + 1$$

$$v : h_2(x) = x^7 + x^3 + x^2 + x + 1$$

| | $r=3$ $S_{max}=32$ | $r=5$ $S_{max}=8$ | $r=7$ $S_{max}=2$ |
|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $g(m, l)$ | $g(3, 117)$ | $g(12, 76)$ | $g(9, 10)$ |
| | $g(4, 118)$ | $g(53, 36)$ | $g(37, 38)$ |
| | $g(12, 126)$ | $g(75, 103)$ | |
| | $g(13, 0)$ | $g(90, 119)$ | |
| | $g(14, 1)$ | $g(92, 120)$ | |
| | $g(15, 2)$ | $g(99, 0)$ | |
| | $g(23, 10)$ | $g(100, 2)$ | |
| | $g(24, 11)$ | $g(128, 29)$ | |
| | $g(35, 22)$ | | |
| | $g(38, 25)$ | | |
| | $g(43, 30)$ | | |
| | $g(46, 33)$ | | |
| | $g(47, 34)$ | | |
| | $g(48, 35)$ | | |
| | $g(51, 38)$ | | |
| | $g(56, 43)$ | | |
| | $g(64, 51)$ | | |
| | $g(65, 52)$ | | |
| | $g(68, 55)$ | | |
| | $g(69, 56)$ | | |
| | $g(73, 60)$ | | |
| | $g(83, 70)$ | | |
| | $g(84, 71)$ | | |
| | $g(85, 72)$ | | |
| | $g(86, 73)$ | | |
| | $g(87, 74)$ | | |
| | $g(88, 75)$ | | |
| $g(102, 89)$ | | | |
| $g(114, 101)$ | | | |
| $g(115, 102)$ | | | |
| $g(116, 103)$ | | | |
| $g(126, 113)$ | | | |

できる。この導出法を用いることにより系列長が長くなっても簡単にQS-sequences (G-r)を得ることができる。例えば、N=63でr=3のQS-sequences (G-3)を探索する場合、本導出法では約1/500の時間で探索ができる事が確認されている。しかし、この証明はまだされておらず今後の課題の一つであると言える。次にこの方法で得たQS-sequences (G-r)の具体例を示す。表A・1, 表A・2にそれぞれ系列長N=63, 127の場合を示す。また表A・3に全探索により得られたN=127のQS-sequences (G-r)を示す。表A・1, 表A・2よりわかるように S_{max} は全探索で得られた S_{max} とほぼ等しいことがわかる(表1参照)。また、表A・3と比較すると全探索では相互相関値-1がr(chips)連続する位相の中心は任意の値をとるが、ここで示した方法では相互相関値-1がr(chips)連続する位相の中心は常に0であることがわかる。

(平成7年3月2日受付, 7月20日再受付)



久野 誠史 (学生会員)

平5名大・工・電気卒。平7同大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。これまで、スペクトル拡散方式に基づいたCDMA方式に従事。



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。工博。同年名大助手、現在に至る。符号化変調方式、衛星通信/測位方式、スペクトル拡散通信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同大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大・助手。平1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同大助教授。現在に至る。衛星通信/測位方式、スペクトル拡散通信、変復調理論、雑音理論、トランシエック理論および計算機ネットワークなどの研究に従事。情報処理学会、情報理論とその応用学会、IEEE各会員。昭61本会篠原記念学術奨励賞受賞。



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名古屋大学に移る。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、名大・工・教授。工博。IEEE会員。共著書「衛星通信技術」。