

钟控序列用作 A-CDMA 系统扩频码的研究¹

饶妮妮 刘 聪*

(电子科技大学自动化系 成都 610054)

*(四川省教育管理信息中心 成都 610041)

摘 要 该文提出将钟控序列作为 A-CDMA 系统的一种新的和有潜在优势的扩频码。首先, 基于一个 A-CDMA 模型, 建立了平均误码率与 PN(Pseudo Noise) 序列互相关参数之间的关系。提出了 PN 序列用作 A-CDMA 扩频码应该具备的条件。接着, 分析了钟控序列用作 A-CDMA 系统扩频码的可行性。最后, 数值结果比较了 m 序列和钟控序列的互相关特性以及它们对应的平均误码率。在同时工作的用户数不多于 75 的情况下, 证实了钟控序列作为扩频码的可行性。

关键词 A-CDMA, 钟控序列, 互相关, 平均误码率

中图分类号 TN929.5

1 引 言

直接序列码分多址 (Direct Sequence-Code Division Multiple Access, 简称为 DS-CDMA) 是移动蜂窝通信及多用户通信网中一项有前景的技术。一般地说, 扩频多址方式为异步码分多址 (A-CDMA)。另外两种扩频多址方式是: (1) 同步 CDMA (S-CDMA) 和 (2) 准同步 CDMA (QS-CDMA)。三者的差异是各用户相对时延不同。在 DS-CDMA 系统中, 众多的用户工作在同一时间同一频带内, 各个用户分配一个唯一的扩频码。系统利用各个扩频码之间低的互相关值来区分不同的用户。这种互相关值将引起系统的主要干扰——多址干扰 (MAI)。多址干扰又将影响系统的容量。因此, 为了提高系统性能, 设计或选择符合要求的 PN(Pseudo noise) 序列作为扩频码, 是 DS-CDMA 研究中的一项极其重要的工作。迄今为止, 世界各国的学者在这方面已经做了大量的工作, 例如, m 序列, Gold 序列, Blum 序列等已被建议用作扩频码^[1-5]。然而, 上述序列用作扩频码时或多或少地存在一些缺点。具备好互相关特性的 m 序列数量较少, 不能满足实际应用^[1]。选择平衡的 Gold 序列工作量又太大^[2,4]。而 Blum 序列目前还不能实时产生^[3]。由于钟控序列具有优良的伪随机特性, 能克服上述缺点^[6]。因此, 本文提出把它作为 A-CDMA 系统的扩频码。

2 A-CDMA 系统和 PN 序列

本文采用的 A-CDMA 系统模型如图 1 所示, 即用户 $\rightarrow$ 基站的反向链路。 U 表示同时工作的用户数。各个用户分配一个唯一的扩频码 $a_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, U$ 。传送的信息数据为 $b_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, U$ 。第 i 个用户的发射信号为

$$S_i(t) = \sqrt{2P_i} b_i(t) a_i(t) \cos(\omega_c t + \phi_i) \quad (1)$$

接收机的输入信号为

$$r(t) = \sum_{i=1}^U \sqrt{2P_i} b_i(t - \tau_i) a_i(t - \tau_i) \cos(\omega_c t + \phi_i) + n(t) \quad (2)$$

¹ 1999-01-22 收到, 1999-07-29 定稿

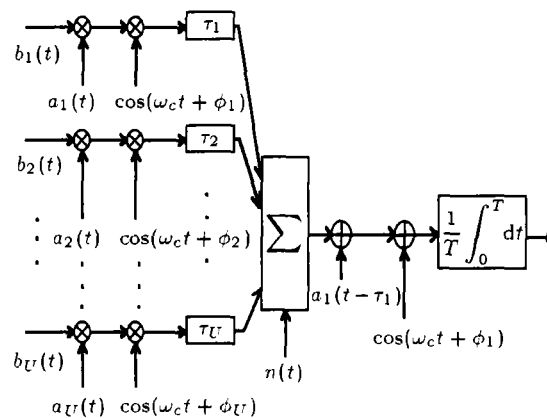


图 1 A-CDMA 系统模型

其中 $n(t)$ 是双边谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声。 ω_c 是载波频率。 P_i 是第 i 个用户的信号功率。本文中, 假设采用了完善的功率控制, 则 $P_i = P, i = 1, 2, \dots, U$ 。 T 和 T_c 分别是信息码元和扩频码元的宽度。扩频序列的周期为 N 且 $N = T/T_c$ 。 τ_i 和 ϕ_i 分别是第 i 个用户的时延和随机相位。为简化起见, 我们假设接收机解调第一个用户并令 $\tau_1 = 0$ 和 $\phi_1 = 0$ 。则 $\tau_i (i = 2, 3, \dots, U)$ 是其他用户相对于第一个用户的时延。

假设接收机采用相干接收, 其输出信号为

$$Z_1 = \sqrt{P/T} \left(b_{i,0} + \sum_{i=2}^U I_{i1} + \eta \right) \quad (3)$$

式中 η 为零均值高斯噪声, 方差为 $(2E_b/N_0)^{-1}$, $E_b = PT$ 为信息比特能量, (3) 式中的第二项为多址干扰, 且有

$$I_{i1} = T^{-1} [b_{i,1} R_{i1}(\tau_i) + b_{i,0} \hat{R}_{i1}(\tau_i)] \cos \theta_i \quad (4)$$

其中 $\theta_i = \phi_i - \omega_c \tau_i$ 为第 i 个用户的载波相位, $R_{i1}(\tau_i)$ 和 $\hat{R}_{i1}(\tau_i)$ 则为连续时间部分相关函数^[4]。

由 (4) 式可计算多址干扰的功率。首先, 假设随机时延 τ_i 和载波相位 θ_i 分别均匀分布于 $(-\tau_m, \tau_m)$ 和 $[0, 2\pi]$ 。为方便计算, 将 τ_m 的区间改为 $(0, \tau_m)$ 和 $(T - \tau_m, T)$ 。由于扩频序列是周期的并且信息数据独立均匀分布, 所以对 τ_i 区间的变换不影响结果。

多址干扰的方差为

$$r_{i1} = E\{I_{i1}^2\} = \frac{1}{4T^2\tau_m} \left\{ \int_0^{\tau_m} + \int_{T-\tau_m}^T [R_{i1}^2(\tau_i) + \hat{R}_{i1}^2(\tau_i)] d\tau_i \right\} \quad (5)$$

多址干扰与扩频序列 $a_i(t), i = 1, 2, \dots, U$ 的周期互相关函数的关系是

$$\begin{aligned} u &= \int_0^{\tau_m} [R_{i1}^2(\tau_i) + \hat{R}_{i1}^2(\tau_i)] d\tau_i \\ &= \frac{T_c^3}{6} \left\{ \sum_{l=0}^{L-1} [2\theta_{i1}^2(l) + 2\hat{\theta}_{i1}^2 + \theta_{i1}(l)\theta_{i1}(l+1) + \hat{\theta}_{i1}(l)\hat{\theta}_{i1}(l+1)] \right. \\ &\quad \left. + \theta_{i1}^2(L-1) + \hat{\theta}_{i1}^2(L-1) - \theta_{i1}^2(0) - \hat{\theta}_{i1}^2(0) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 v &= \int_{T-\tau_m}^T \left[R_{i1}^2(\tau_i) + \hat{R}_{i1}^2(\tau_i) \right] d\tau_i \\
 &= \frac{T_c^3}{6} \left\{ \sum_{i=0}^{L-1} \left[2\theta_{i1}^2(l) + 2\hat{\theta}_{i1}^2(l) + \theta_{i1}(l)\theta_{i1}(l+1) + \hat{\theta}_{i1}(l)\hat{\theta}_{i1}(l+1) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \theta_{i1}^2(N-L) - \hat{\theta}_{i1}^2(N-L) + \theta_{i1}^2(0) + \hat{\theta}_{i1}^2(0) \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中 $L = \tau_m/T_c$, $\theta_{i1}(\cdot)$ 和 $\hat{\theta}_{i1}(\cdot)$ 分别是 $a_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, U$ 的偶和奇周期互相关函数^[7].

对于 A-CDMA 系统, $\tau_m = T/2$. 根据 (6) 式和 (7) 式, 多址干扰的方差是

$$\begin{aligned}
 r_{i1} &= \frac{1}{6N^3} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \left[\theta_{i1}^2(l) + \hat{\theta}_{i1}^2(l) + \frac{1}{2}\theta_{i1}(l)\theta_{i1}(l+1) + \frac{1}{2}\hat{\theta}_{i1}(l)\hat{\theta}_{i1}(l+1) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \theta_{i1}(0)\theta_{i1}(N-1) \right\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

所有的干扰由多址干扰和白噪声组成, 为

$$\text{Var}(z_1) = \frac{PT^2}{2} \left(\sum_{i=2}^U r_{i1} \right) + \frac{1}{4}N_0T \quad (9)$$

信号功率是 $PT^2/2$, 平均信噪比等于 $PT^2/2$ 除以 $\text{Var}(z_1)$, 即

$$\text{SNR} = 1 / \left(\frac{N_0}{2E_b} + \sum_{i=2}^U r_{i1} \right) \quad (10)$$

在系统中用户数足够多, 扩频序列足够长的情况下, 由中心极限定理, 可得到系统的误码率^[8]:

$$P_e = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (11)$$

从 (10) 式和 (11) 式可知, 多址干扰是 A-CDMA 系统的主要干扰源. 减小 r_{i1} 或扩频序列的周期互相关值, 便能减小误码率, 从而提高系统性能. 因此, 我们归纳出用作 A-CDMA 系统扩频码的 PN 序列 $S(j) = \{s_i(j), i = 1, 2, \dots, U\}$ 应该具备的条件如下: (1) $S(j) = \{s_i(j), i = 1, 2, \dots, U\}$ 是 ± 1 平衡的. (2) 在各种移位长度不是码长整数倍的情况下, $S(j)$ 都有低的自相关值. (3) 在各种移位条件下, $S(j)$ 都有低的互相关值, (4) 周期长, 码量大, 线性复杂度高. (5) 易于软件和硬件实时产生.

3 钟控序列用作扩频码分析

本文提及的钟控序列由图 2 所示的钟控模型产生^[9]. 在图 2 中, $K, M, \bar{M}$ 均为线性移位寄存器. M 和 $\bar{M}$ 的级数相等, 反馈函数为互反多项式. 设 $K, M, \bar{M}$ 均是 m 序列且分别用 $\{k_t\}$, $\{m_t\}$ 和 $\{\bar{m}_t\}$, $t = 0, 1, 2, \dots$ 表示, 则输出序列为

$$\omega_t = m_{d(t)} \oplus \bar{m}_{d'(t)}$$

其中 $d(t) = \sum_{i=0}^{t-1} k_i$ 和 $d'(t) = t - d(t)$.

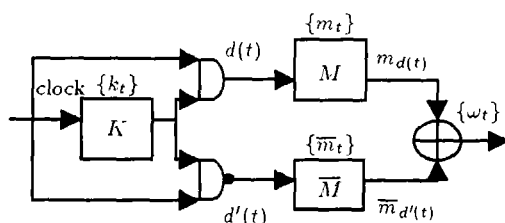


图 2 钟控序列产生模型

文献 [6] 对钟控序列的伪随机特性进行了详尽的论述。从文献 [6] 中知, 钟控序列的周期很长。其值等于 $\{k_t\}$ 的周期和 $\{m_t\}$ 的周期的乘积且随着移位寄存器的级数指数增长。例如, 若 $k = m = 31$, 则钟控序列的周期 $= (2^{31} - 1)^2 = 4.6 \times 10^{18}$ 。文献 [6] 又告诉我们, 钟控序列的码量大。钟控序列的上述两项特性为 A-CDMA 系统选择好属性的扩频码提供了极为有利的条件, 也便于系统增大容量。从文献 [6] 中知, 钟控序列具有与 m 序列可比拟的 ± 1 平衡性。在 A-CDMA 系统中, 扩频序列的平衡性与载波抑制制度有着密切关系。钟控序列良好的平衡特性能够有效地减小 A-CDMA 系统的载波泄漏。进一步, 由于钟控序列具有低的自相关和互相关 [6], 因此, 它引起的多址干扰相应地小。作为一种附加优势, 钟控序列长的周期和高的线性复杂度能为 A-CDMA 系统提供密码学意义上的安全性。钟控序列另一优点是易于软硬件实时产生。

综上所述, 对于 A-CDMA 系统来说, 我们认为钟控序列是一种好的并有潜力的扩频序列。

4 数值结果

为了证实上述分析和评估钟控序列对 A-CDMA 系统性能的影响, 我们进行了计算机模拟。在模拟实验中, 假设 $N = 63$ 。对于 $N = 31, 127, 255$ 等情况, 大量的模拟实验表明能够得到类似的结论。其他假设条件与前面相同。

根据 (10) 式和 (11) 式, 我们知道, 扩频序列的互相关值越低, 它在系统中引起的多址干扰越小。为了研究钟控序列的互相关特性, 在钟控序列中取一个 64 位的参考分组, 再与随机抽取的另外 4 个分组进行互相关计算, 结果与 m 序列的互相关进行比较。1000 次蒙特卡罗计算机模拟结果示于图 3 和图 4。图 3 是 m 序列的互相关特性, 反馈多项式为

$$f(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} \\ + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$$

其中最大互相关值为 $\theta_{\max+} = 22$ 和 $\theta_{\max-} = -20$ 。图 4 是钟控序列的互相关特性。为了获得与图 3 序列几乎等长的周期, K 和 M 的反馈多项式取为 $x^{13} + x^4 + x^3 + x + 1$, $\bar{M}$ 的反馈多项式取为 $x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^9 + 1$ 。其中, 最大互相关值为 $\theta_{\max+} = 20$ 和 $\theta_{\max-} = -22$ 。图 3 和图 4 的结果表明钟控序列具有与 m 序列可比拟的互相关特性。

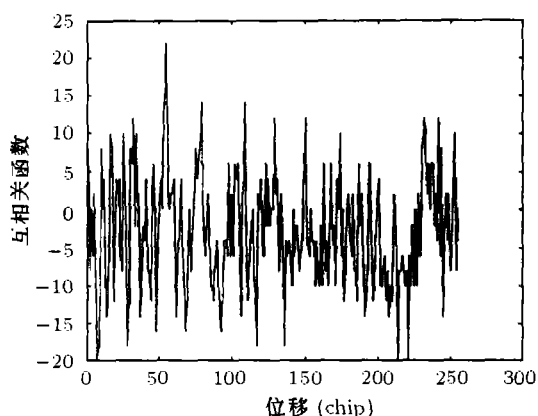
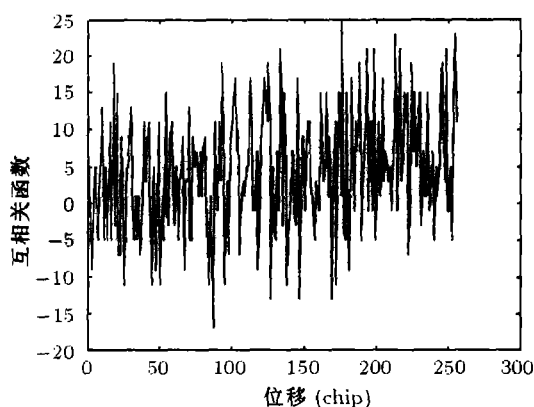
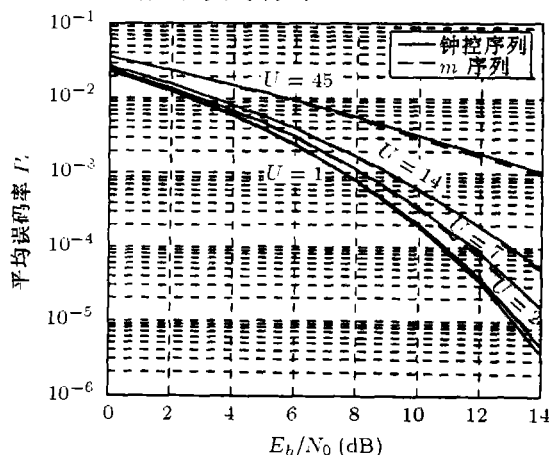
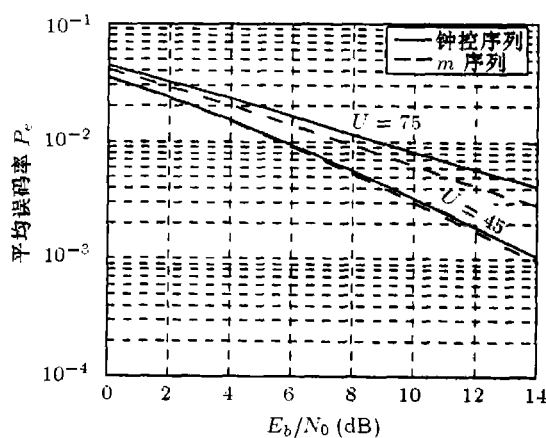
图3 m 序列相关特性

图4 钟控序列互相关特性

图5是在不同用户数下, m 序列和钟控序列分别作扩频码时 A-CDMA 系统的平均误码率曲线。从图5中知道, 对于 $U=1$ (即系统中无多址干扰的情况), 对应于 m 序列和钟控序列的误码率曲线重合。 $P_e < 10^{-3}$ 所需的 $E_b/N_0 \geq 7.5\text{dB}$ 。对于 m 序列, 当 $U=2, 7, 14$ 和 45 时, $P_e < 10^{-3}$ 所需的 E_b/N_0 分别大于 7.7 dB, 8dB, 8.5dB 和 14dB, 且随着用户数的增加而缓慢增大。众所周知, m 序列由于其好的伪随机特性和易于产生, 因而, 它适合被用作 A-CDMA 系统的扩频码。然而, 图5说明在不同的用户数下, 钟控序列的 P_e 曲线与 m 序列的 P_e 曲线变化趋势相同。在用户数较小的情况下, 例如, $U < 7$, 钟控序列的 P_e 曲线与 m 序列的 P_e 曲线几乎重叠。但二者的差异随着用户数的增加而增大。对于 $U < 75$, 图6表明二者的 P_e 曲线相差仍然很小。因此, 对于钟控序列且 $U < 75$, A-CDMA 系统具有与 m 序列几乎相同的误码率性能。换句话说, 当 $U < 75$ 时, 钟控序列作为 A-CDMA 系统的扩频码是切实可行的。

图5 在不同用户下, m 序列和钟控序列的系统平均误码率曲线图6 在 $U=45$ 和 $U=75$ 时, m 序列和钟控序列的系统平均误码率曲线的差异

5 结 论

本文提出将钟控序列用作 A-CDMA 系统的扩频码。理论分析和计算机模拟表明: 钟控序列具有与 m 序列可比拟的互相关特性, 且易于实时产生。对于钟控序列, 当同时工作的用户数 $U < 75$ 时, A-CDMA 系统能获得与 m 序列几乎相同的误码率性能。因此, 在 $U < 75$

的条件下, 钟控序列作为 A-CDMA 系统的扩频码是切实可行的。

参 考 文 献

- [1] M. B. Pursley, H. F. Roefs, Numerical evaluation of correlation parameters for optimal phases of binary shift-register sequences, IEEE Trans. on COM, 1979, COM-27(10), 1597-1604.
- [2] R. Gold, Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing, IEEE Trans. on IT, 1967, IT-13(4), 619-621.
- [3] A. H. Kemp, S. J. Shepherd, S. K. Barton, Multi-function coding and modulation for spread spectrum and CDMA with inherent security, In Communication Signal Processing and Coding Annual Conference, Sheffield, 1996, 233-241.
- [4] Xu Duan Lin, Kyung Hi Chang, Optimal PN sequence design for quansisynchronous CDMA communication systems, IEEE Trans. on COM, 1997, COM-45 (2), 221-226.
- [5] N. Suehiro, M. Hatori, Modulatable orthogonal sequences and their application to SSMA systems, IEEE Trans. on IT, 1988, IT-34(1), 93-100.
- [6] 饶妮妮, 龚耀寰, $KM\overline{M}$ 钟控序列伪随机码特性分析, 电子科技大学学报, 1994, 23(4), 363-369.
- [7] 胡健栋等, 码分多址与个人通信, 北京, 人民邮电出版社, 1996 年 10 月, 90-134.
- [8] M. B. Pursley, D. V. Sarwate, Error probabilities for direct sequence spread spectrum multiple access communication systems, IEEE Trans. on COM, 1982, COM-30(5), 975-984.
- [9] C. G. Gunther, A generator of pseudo-random sequences with clock controlled linear feedback shift-registers, Advances in Cryptology of EUROCRYPT'87, Extend Abstract, I-1-I-4.

A CLASS OF CLOCK-CONTROLLED SPREADING SEQUENCES FOR A-CDMA SYSTEMS

Rao Nini Liu Cong*

(Dept. of Automation, UEST of China, Chengdu 610054, China)

*(Sichuan Education Management Information Center, Chengdu 610041, China)

Abstract In this paper, the clock-controlled sequence is presented as a potentially superior spreading code for A-CDMA systems. First, on the basis of an A-CDMA system model, the relationship between the average bit error probability and the cross-correlation parameters of the PN (Pseudo Noise) sequences is established. The conditions, which the PN sequences as spreading codes should satisfy, are derived from the above relationship. Next, the feasibility of the clock-controlled sequences as the spreading codes for an A-CDMA system are analyzed systematically. Finally, the cross-correlation functions between m -sequence and clock-controlled sequence, as well as the average bit error probability (BEP) corresponding to both sequences under various user number, are compared in numerical results. The feasibility of the clock-controlled sequences as spreading codes is thus verified when $U < 75$.

Key words A-CDMA, Clock-controlled sequence, Cross-correlation, Probability of bit error

饶妮妮: 女, 1963 年生, 副教授, 目前的研究方向是移动通信, 信息加密技术和电路 CAD.

刘 聪: 男, 1958 年生, 高级工程师, 目前的研究方向是移动通信和计算机通信网络技术.