KMM̄ 序列用作 RAKE 型 CDMA 系统扩频码的分析

饶妮妮[1], 尧德中[1], S. J. Shepherd[2]
(1. 电子科技大学自动化系, 成都 610054) (2 Dept. Of EEE, Univ. of Bradford, UK)

摘 要: 本文提出将 KMM̄ 序列用作 RAKE 型 CDMA 系统的扩频码. 基于一个 RAKE 接收机模型, 分析了 CDMA 系统性能并提出了适于作 RAKE 型 CDMA 系统扩频码的 PN 序列的特性. 接着, 分析了 KMM̄ 序列作 RAKE 型 CDMA 系统扩频码的优劣. 最后, 运用计算机仿真, 比较了 m 序列和 KMM̄ 序列的互相关特性以及在相干接收机和 RAKE 接收机下, 这两种序列和 Gold 序列对应的系统平均误码率, 从而证实了 KMM̄ 序列作为扩频码的可行性.

关键词: KMM̄ 序列; CDMA 系统; RAKE 接收机; 互相关; 平均误码率
中图分类号: TN914.42 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2000) 07-0012-04

Analysis of KMM̄ Sequences as Spreading Codes for CDMA Systems with RAKE Receiver

RAO Ni-ni[1], YAO De-zhong[1], S. J. Shepherd[2]
(1. *Dept. of Auto. UEST of China, Chengdu 610054, China*) (2 *Dept. Of EEE, Univ. of Bradford, UK*)

Abstract: In this paper, KMM̄ sequence is presented as a potentially spreading code for CDMA (Code division multiple access) system with RAKE receiver. First, based on a RAKE receiver modeling, the performance of CDMA system with RAKE receiver is analyzed, and the properties of PN sequences that are suited to the CDMA system with RAKE receiver are showed. Next, the advantages and disadvantages of KMM̄ sequences as spreading codes for CDMA system with RAKE receiver are analyzed systematically. Finally, the cross-correlation functions between m sequence and KMM̄ sequence, and the average bit error probability (BEP) corresponding to both the sequences and Gold sequence under correlating receiver and RAKE receiver, are compared. The feasibility of KMM̄ sequence as spreading codes for CDMA system with RAKE receiver is verified.

Key words: KMM̄ sequence; CDMA system; RAKE receiver; cross-correlation; average bit error probability

1 引言

直接序列码分多址(Direct Sequence Code Division Multiple Access, 简称为 DS-CDMA) 是第三代移动通信系统中的一项重要技术. 在 DS-CDMA 系统中, 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. 因此, 用作扩频码的 PN 序列性能的好坏直接影响到 DS-CDMA 系统性能的好坏. 乞今为止, 世界各国的学者在扩频码的设计与选择方面已做了大量的工作, 例如, m 序列、Gold 序列和 Blum 序列等已被建议用作扩频码[1~3]. 然而, 具备良好互相关特性的 m 序列数量较少且安全性差, 不能满足实际应用. 选择平衡的 Gold 序列工作量太大[2]; 而 Blum 序列目前还不能实时产生[1]. 由于 KMM̄ 序列具有优良的伪随机特性[4], 笔者提出把它作为 DS-CDMA 系统的扩频码. 笔者曾分析 KMM̄ 序列作相干接收的 CDMA 系统扩频码的可行性, 结果表明, 在用户数小于 75 时 KMM̄ 序列和 m 序列具有几乎相同的系统性能[5]. 在无线多径环境中, DS-CDMA 采用分离多径接收机(RAKE Receiver)来实现抗多径衰落和宽带传输. 换言之, RAKE 接收技术能够提高 DS-CDMA 系统尤其宽带 CDMA 系统的性能. 本文旨在分析 KMM̄ 序列作 RAKE 型 CDMA 系统扩频码的可行性. 第二部分分析了 RAKE 型 CDMA 系统性能, 并建立了平均位错误概率与 PN 序列参数之间的关系. 第三部分分析了 KMM̄ 序列作为扩频码的优劣. 第四部分给出计算机仿真结果, 以证实前面的理论分析.

2 RAKE 接收机模型和系统性能分析

本文采用有多径信号相对时延估计的 RAKE 接收机模型, 如图 1 所示. 为简化分析, 设每个用户与基站间都有 L 条路径, RAKE 接收机有 Z 个分集支路, 基站对应于第一个用户的 RAKE 接收机实现对多径信号的相关解调, 且在多径信号的到达时刻选用最大比值合并.

设小区内有 U 个同时工作的用户, BPSK 调制的第 u 个用户的发射信号为:

$$S_u(t) = Aa_u(t)\, b_u(t) \cos(\omega_c t + \Phi_u) \qquad (1)$$

式中: ω_c 是载波频率; A 是信号振幅; Φ_u 是信号相位; $b_u(t)$ 是

收稿日期: 1999-05-31; 修订日期: 1999-08-18

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

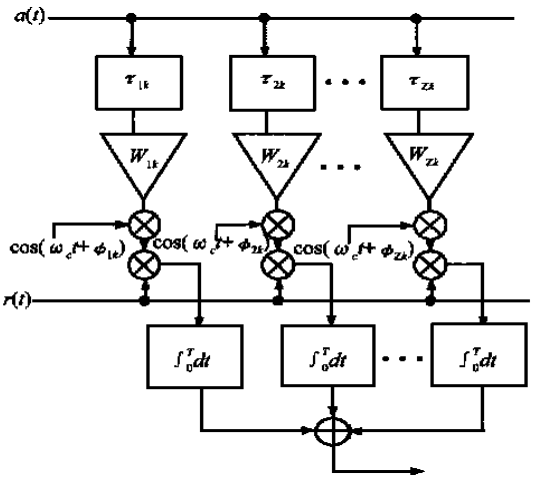


图 1　RAKE 接收机模型

第 u 个用户的数据信号, 它是脉宽为 T 的矩形脉冲序列; $a_u(t)$为取值±1 的扩频码序列, 脉冲宽度为 T_c, 码长为 N, 且 $T = NT_c$.

设用户和基站之间的信道是慢变的瑞利多径衰落信道, 则信道的复低通响应为:

$$h_u(\tau) = \sum_{l=1}^{L} \beta_{lu}\delta(t-\tau_{lu})\exp(j\phi_{lu}) \tag{2}$$

式中: β_{lu}, τ_{lu}和ϕ_{lu}分别表示第 u 个用户, 第 l 条路径的增益, 时延和相位; $\delta(\cdot)$ 是单位冲击函数.

基站的接收信号为

$$r(t) = A\sum_{l=1}^{L}\beta_{l1}a_1(t-\tau_{l1})\,b_1(t-\tau_{l1})\cos(\omega_c t+\phi_{l1}) + A\sum_{l=1}^{L}\cdot\sum_{u=2}^{U}\beta_{lu}a_u(t-\tau_{lu})\,b_u(t-\tau_{lu})\cos(\omega_c t+\phi_{lu}) + n(t) \tag{3}$$

式中 $n(t)$ 是双边谱密度为 $N_o/2$ 的高斯白噪声. 那么 RAKE 接收机的第 j 条支路判决变量为:

$$\xi_j = b_1(0)\frac{AT}{2}\beta_{j1} + \frac{A}{2}\sum_{\substack{l=1\\ l\neq j}}^{L}\beta_{l1}\cos(\phi_{l1}-\phi_{j1})[\,b_1(-1)R_{11}(t_{l1}) + b_1(0)R_{11}(t_{l1})\,] + \frac{A}{2}\sum_{l=1}^{L}\sum_{u=2}^{L}\beta_{lu}\cos(\phi_{lu}-\phi_{j1})\cdot[\,b_u(-1)R_{u1}(t_{ul}) + b_u(0)R_{u1}(t_{lu})\,] + V \tag{4}$$

式中: $t_{lu} = \tau_{lu} - \tau_{j1}$.

$$R_{u1}(\tau) = \int_0^{\tau} a_u(t-\tau)\,a_1(t)\,dt \tag{5}$$

$$R_{u1}(\tau) = \int_{\tau}^{T} a_u(t-\tau)\,a_1(t)\,dt \tag{6}$$

由式(4)知, 第 1 项是所需信号, 第二项是自相关旁瓣引起的自干扰, 第三项是另外 $U-1$ 个用户的多址干扰, 最后一项是高斯噪声. 当 U和N 足够大时, 多址干扰可近似为高斯噪声. 因此对于一个固定的 β_1, 信号功率计算为$(AT/2)^2\beta_1^2$, 噪声功率为 $N_oT/4$, 干扰功率为 $LU(\frac{AT}{2})^2e^2E(\beta^2)/2$($\beta$ 是除β_1 之外的任何一个瑞利分布的随机变量 β_{lu}). 则信号干扰噪声比的平均值为

$$SNR_o = \frac{E_b}{\eta e^2\bar{E}_b + N_o} \tag{7}$$

式中: $E_b = A^2T/2$, $\bar{E}_b = E(\beta^2)E_b$, $\eta = U/L$, $e^2 = E\left\{[\,a_{-1}R(t_1) + a_0\hat{R}(t_1)\,]^2/T^2\right\}$, ($a_i = \pm 1$, $i = 1$ 或 0 是一个二值随机变量).

在多址干扰的高斯假设下, Proakis[6]证明了系统的平均误码率为

$$P(SNR_o) = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{SNR_o}{1+SNR_o}}\right) \tag{8}$$

式中 SNR_o 为信号干扰噪声比的平均值. 最大比值合并 RAKE 接收机的平均误码率为:

$$P_e = [\,P(SNR_o)\,]^Z\sum_{i=0}^{Z-1}\binom{Z-1+i}{i}[\,1-P(SNR_o)\,]^i \tag{9}$$

由式(4)~(9)知, 扩频码自相关和互相关特性对 RAKE 型 CDMA 系统的平均误码率存在直接的影响, 再结合系统性能的其它要求, 可归纳出适用于 RAKE 型 CDMA 系统扩频码的 PN 序列应具备的特性: (1) ±1 平衡; (2) 在各种移位条件下, 都具有低的自相关旁瓣值和互相关值; (3) 周期长, 码量大, 线性复杂度高; (4) 易于软硬件实时产生.

3　KMM̄ 序列用作扩频码的分析

本文提及的 KMM̄ 序列由图 2 所示的钟控模型产生[2]. 在图 2 中, K、M 和$\bar{M}$ 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 和$\bar{M}$ 均是 m 序列且分别用$\{k_t\}$、$\{m_t\}$和$\{\bar{m}_t\}$, $t = 0, 1, 2, \cdots$表示, 则输出序列为

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

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

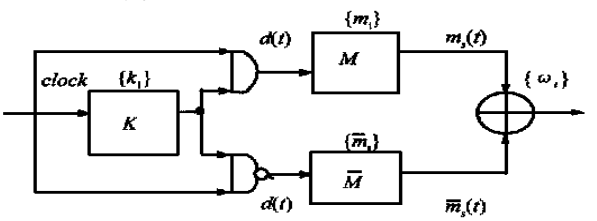


图 2　KMM̄ 序列产生模型

文献[4]对 KMM̄ 序列的伪随机特性进行了详尽的论述. 文献[4]表明, KMM̄ 序列具有周期长和码量大的特点. 其周期等于$\{k_t\}$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 和M 级数均取为 31, 则 KMM̄ 序列的周期 $= (2^{31}-1)^2 = 4.6\times 10^{18}$, 平移相异的 KMM̄ 序列数量为 1.03×10^{22}. KMM̄ 序列的上述特性为 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. 文献[4]还表明, KMM̄ 序列具有与 m 序列可比拟的±1 平衡性, 而良好的平衡性能够有效地减小系统的载波泄漏. 作为一种附加优势, KMM̄ 序列长的周期和高的线性复杂度还能为 RAKE 型 CDMA 系统提供密码学意义上的安全性. 此外, KMM̄ 序列易于软硬件实时产生的特性使它更具实际应用价值.

文献[4]中分析表明: KMM̄ 序列的周期自相关函数中, 最

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大旁瓣$|\theta_{b\max}|$满足

$$|\theta_{b\max}| \le \frac{P_D}{5} \tag{9}$$

式中P_D是KMM序列的周期. 扩频码自相关旁瓣值越大, 在系统中引起的自干扰就越大. 式(9)的$|\theta_{b\max}|$界值超过了RAKE型CDMA系统对扩频码自相关旁瓣值的要求, 这是KMM序列作扩频码的主要弱点. 然而, 从文献[4]中的计算机模拟实验中发现: 部分KMM序列自相关函数的$|\theta_{b\max}|$远小于式(9)中的界值(约占实验序列总数的2/5), 可与m序列的自相关特性相比拟. 因此, 在实际应用中, 可以选择那些自相关特性优良的KMM序列作扩频码. 由于KMM序列周期长、码量很大, 使自相关特性优良的KMM序列数量足以满足RAKE型CDMA系统对扩频序列数量的需求.

综上所述, 对于RAKE型CDMA系统来说, KMM序列是一种好的并有潜力的扩频序列.

4 数值结果

用计算机模拟实验来说明KMM序列具有良好的互相关特性以及KMM序列作扩频码时对RAKE型CDMA系统性能的影响. 本计算机实验中, 产生m序列的反馈多项式为

$$f(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^{7} + x^{6} + x^{5} + x^{3} + x^{2} + x + 1$$

产生KMM序列的K、M的反馈多项式为$x^{13} + x^{4} + x^{3} + x + 1$和$\overline{M}$的反馈多项式为$x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^{9} + 1$, 扩频序列互相关的计算式以及相关接收机下CDMA系统的平均误码率(BEP)与E_b/N_o的函数关系见文献[8]. 为简化分析, RAKE接收机采用最大比值合并, RAKE型CDMA系统的BEP与E_b/N_o的函数关系见本文式(7)~(9).

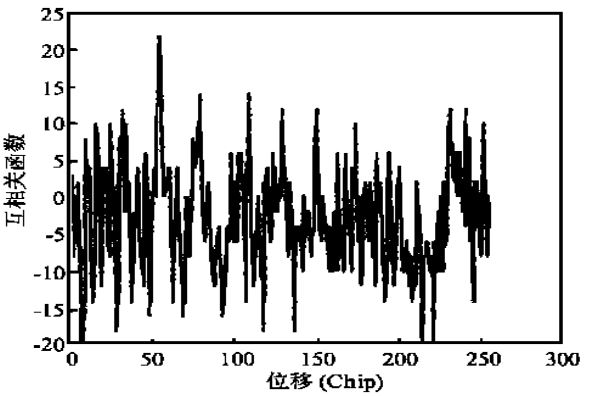


图3 m序列互相关特性

在KMM序列和m序列的一个周期中随机地取一个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, 并比较它们的互相关特性. 500次蒙特卡洛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, 最大互相关值为$\theta_{max+} = +22$和$\theta_{max-} = -20$. 图4是KMM序列的互相关特性, 最大互相关值为$\theta_{max+} = 20$和$\theta_{max-} = -22$. 这些结果表明, KMM序列具有与m序列可比拟的互相关特性. 根据前面的分析, 扩频序列的互相关值越低, 在系统中引起的多址干扰越小.

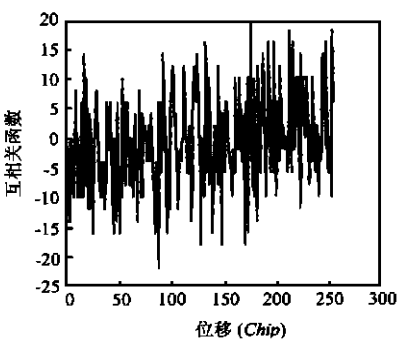


图4 钟控序列互相关特性

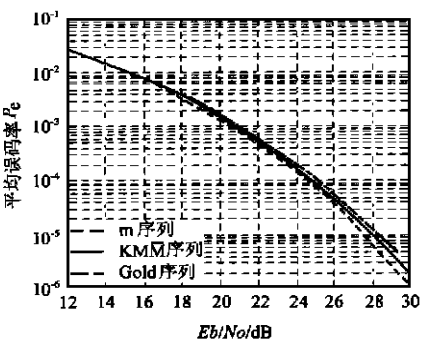


图5 在相关接收机下, 系统BEP随信噪比的变化

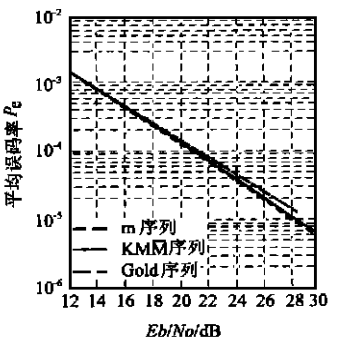


图6 在RAKE接收机下, 系统的*BEP*随信噪比的变化

图5是m序列, KMM序列和Gold序列分别作扩频码时, 在无线多径环境下, 具有相关接收机的CDMA系统平均误码率与信噪比之间的关系曲线. 本实验中, $U=6$, $L=3$, $N=64$, $Z=1$. 从图5知, KMM序列的平均误码率($P_e < 10^{-3}$时, 所需的$E_b/N_o \ge 21$dB)略差于m序列($P_e < 10^{-3}$时, 所需的$E_b/N_o \ge 20.8$dB), 但略优于Gold序列的平均误码率($P_e < 10^{-3}$时, 所需的$E_b/N_o \ge 21.2$dB). 不难知, 随着同时工作的用户数增加, 多址干扰将增大, 三种序列的平均误码率将变坏. 文献[5]的研究表明: 当用户数小于75时, KMM序列作为具有相关接收机的CDMA系统的扩频码是可行的. 图5也表明: 在高信噪比(>28dB)下, 三种序列的平均误码率均得到迅速改善.

图6是三种序列分别作扩频码时, 在无线多径环境下, 具有RAKE型接收机的CDMA系统平均误码率与信噪比之间的关系曲线. 本实验中, $U=6$, $L=3$, $Z=3$, 瑞利分布参数$E(\beta^2) = 0.02$, $N=64$时, 计算出m序列的$e^2 \approx 0.0034$, KMM序列的$e^2 \approx 0.0043$和Gold序列的$e^2 \approx 0.0106$. 从图6知, m序列, KMM序列和Gold序列的平均误码率($P_e < 10^{-3}$时, 所需的E_b/N_o分别大于13.1dB, 13.2dB和13.5dB)较相关接收系统的改善了很多, KMM序列与m序列的平均误码率之差也大大减小, 均仍优于Gold序列的平均误码率. 这说明了RAKE型接收机能够克服多径干扰和多址干扰对系统的影响, 从而提高系统性能, 也证实了KMM序列作扩频码时, RAKE型CDMA

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系统仍具有较好的 BEP 性能. 然而, 图 5 和图 6 表明, 在高信噪比下(> 28dB), 相关接收机的平均误码率比 RAKE 接收机的减小得快. 这一现象是由于二种接收机的接收原理所致, 与扩频码的特性无关.

5 结论

本文提出将KMMM 序列用作RAKE 型 CDMA 系统的扩频码. 研究结果表明: KMM 序列具有与 m 序列可比拟的互相关特性, 部分 KMM 序列具有与 m 序列可比拟的自相关特性, 且易于软硬件实时产生; 在 RAKE 型 CDMA 系统中, KMM 序列作扩频码时的平均误码率较相关接收机的有很大改善, 与 m 序列的平均误码率之差大大减小, 同时, 系统具有良好的 BEP 性能. 因此, KMM 序列用作 RAKE 型 CDMA 系统的扩频码是可行的.

参考文献

[1] A. H. Kemp, S. J. Shepherd and S. K. Barton. Multi-function coding and modulation for spread spectrum and CDMA with inherent security. In Communications Signal Processing and Coding Annual Conference, Sheffield, Jan. 1996

[2] Xu Duan Lin and Kyung Hi Chang. Optimal PN sequence design for quansi-synchronous CDMA communication systems. IEEE Trans. On COM, Feb. 1997, 45(2) : 221~ 226

[3] N. Suehiro and M. Hatori. Modulatable orthogonal sequences and their application to SSMA systems. IEEE Trans. On IT, Jan. 1988, 34: 93~ 100

[4] 饶妮妮, 龚耀寰. KMM 序列伪随机特性分析. 电子科技大学学报, 1994, 23(4) : 363~ 369

[5] Nini RAO. DS-CDMA system performance with KMM sequences as spreading codes. In Optic-electronics and IT Annual Conference, London, June 1998

[6] J. G. Proakis. Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 1983

[7] C. G. Gunther. A generator of pseudo-random sequences with clock controlled linear feedback shift-registers. Advances in Cryptology of EUROCRYPT' 87, Extend Abstract: F 1~ F 4

[8] 胡健栋等. 码分多址与个人通信. 北京: 人民邮电出版社, 1998 年 10 月 9: 91~ 129



饶妮妮　1963 年出生, 副教授. 1983 年、1989 年在电子科技大学获工学学士、硕士学位, 1997~ 1998 为英国百拉德福德大学电子工程系访问学者, 1998 年入选电子科技大学 211“人才工程”计划. 在国内外发表涉及信息加密技术、移动通信及教学研究的论文约 10 篇, 获部 2 等奖一项, 参编《微型计算机在电路设计中的应用》等教材. 目前主要研究方向: 移动通信、生物医学信号与信息处理. E-mail: cliu@uestc.edu.cn.



尧德中　1965 年出生, 教授、博士生导师. 1985 年、1988 年、1991 年分别在西南师范大学、浙江大学、成都理工大学获学士、硕士和博士学位, 1997- 1998 为依利诺斯大学(Chicago) 访问学者. 目前主要研究方向: 脑功能成像的理论与方法; 现代信号处理理论及其在生物医学和现代通信系统中的应用.

(上接第 22 页)

参考文献

[1] Longsong Lin, Lih-Chyau Wuu, Cherr-Chin Lin. Minimum hop-count multicast algorithms for reliable multi-stream communications. GLOBECOM' 97, 1997: 1886~ 1890

[2] Aref Meddeb, Andre Girard, Catherine Rosenberg. The impact of tree selection on the design of networks with multipoint. GLOBECOM' 97, 1997: 1891~ 1897

[3] Yih-Fuh Wang, Rong-Feng Chang. Self healing on ATM multicast tree. IEICE Trans. Commun., August 1998, E81-B(8) : 1590~ 1598

[4] K. Sato, H. Hadama, I. Tokizawa. Network reliability enhancement with virtual path strategy. Proc. GLOBECOM' 90, Dec 1990, 403. 5. 1~ 403. 5. 6

[5] E. Oki, N. Yamanaka, F. Pitcho. Multiple availability-level ATM network architecture. IEEE Comm. Magazine, Sept 1995: 80~ 89

[6] R. Kawamura, K. Sato, I. Tokizawa. Self-rerouting ATM networks based on virtual path concept. IEEE J-SAC, 1994, 12(1) : 120~ 127

[7] Hiroyuki Saito, Yasuhiro Miyao. Joint capacity assignment to state-independent working and spare paths for enhanced network survivability. ICC' 98, 1998, 3: 1743~ 1748

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net