

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-04-0345-012

一种新扩频码的性能分析

马旭辉^{1,2,3,4}, 荆文芳^{1,2,3,4}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101048)

摘要: 在码分多址 (CDMA) 的卫星导航定位系统中, 采用扩频码进行测距, 同时根据不同的扩频码来区分不同的卫星, 因此, 扩频码性能的优劣将直接影响导航系统定位精度、抗干扰、鲁棒性等核心性能。针对传统卫星导航信号扩频码在线性复杂度上存在的不足, 给出了一种新扩频码, 并对新扩频码的相关性、平衡性、游程性、线性复杂度以及在加性高斯白噪声信道 (AWGN) 和瑞利衰落信道 (Rayleigh) 下的误比特率 (BER) 进行了仿真分析。结果表明: 新扩频码的相关性、平衡性、游程性三方面的性能与传统扩频码相当, 能够满足卫星导航定位系统的应用需求; 新扩频码的线性复杂度明显优于传统导航信号扩频码, 能够极大增强系统的保密性; 同时, 新扩频码在两种信道下误比特率较低, 具有优良的抗干扰性能。

关键词: 扩频通信; 卫星导航定位系统; 伪随机码构造; 直接序列码分多址

Performance analysis of a new spreading code

MA Xu-hui^{1,2,3,4}, JING Wen-fang^{1,2,3,4}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. School of Electrical, Electronics and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The code division multiple access (CDMA), spread spectrum code is used for ranging in the satellite navigation and positioning system, and different satellites are distinguished according to different spread spectrum codes. Therefore, the performance of spread spectrum code will directly influences the core performance of the navigation system, such as positioning accuracy, anti-jamming and robustness. Aiming at the shortcomings of the linear complexity for the spread spectrum code of the traditional satellite navigation signal, a new spread spectrum code is presented in this study. The correlation, balance, run-length, linear complexity of the new spread spectrum code and the bit error rate (BER) under the additive white Gaussian noise channel (AWGN) and Rayleigh fading channel (Rayleigh) are simulated and analyzed. The results show that the

收稿日期: 2019-04-21; 接受日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11973045)

作者简介: 马旭辉, 男, 硕士, 主要从事卫星导航信号研究。

correlation and flatness of the new spread spectrum code are good. The performances of balance and run-length are similar to the traditional spread spectrum codes, which can meet the application requirements of satellite navigation and positioning system. The linear complexity of the new spread spectrum codes is obviously better than the traditional spread spectrum codes, which can greatly enhance the confidentiality of the system. In addition, the new spread spectrum codes have low bit error rate and excellent anti-jamming performance under two channel conditions.

Key words: spread spectrum communication; satellite navigation and positioning system; pseudo random code construction; direct sequence code division multiple access

0 引言

卫星导航定位系统大多采用扩频技术来传输导航信息,因此扩频码的优劣对卫星导航信号的性能有决定性影响。一方面,扩频码起到区分导航卫星的作用;另一方面,扩频码用于测距,其性能的优劣直接影响定位精度。此外,扩频码还影响导航信号功率谱的起伏。正因为扩频码如此重要,对扩频码的研究从未停止过,并且扩频码的设计思路正变得越来越宽。传统的卫星导航信号扩频码采用线性反馈移位寄存器产生,如 m 序列和 Gold 码,这两种扩频码存在线性复杂度低的缺点,保密性受到一定威胁。文献[1]提出了一种新的混沌序列扩频码,该扩频码不仅具有良好的捕获性能和抗窄带干扰性能,同时保持了 Gold 码的高跟踪性能,而且显著提高了复杂度,加强了可靠性和安全性。文献[2]提出一种非等长的扩频码设计方法,改善了强多址干扰环境下弱信号的捕获性能。文献[3]提出的正交扩频码构造方法具有很强的普适性,利用该方法生成的扩频码具有优良的相关性和线性复杂度。本文借鉴该方法,构造了一种全新的扩频码,并对新扩频码的性能进行了分析。

本文主要分为 3 部分,首先分析了新扩频码的构造方法并给出构造流程图,其次在相关性、平衡性、游程性、线性复杂度 4 个方面与传统扩频码进行了对比分析,最后在 Matlab 中建立多用户的 DS-CDMA 模型进行仿真,验证了新扩频码的可行性和优势。

1 新扩频码的构造方法

本节以 Kasami 序列为切入点展开,首先介绍 Kasami 序列。

Kasami 序列是 1966 年在评估线性循环码的权重过程中发现的,分为小集合序列和大集合序列,都是在 m 序列的基础上产生的。由于 Kasami 小集合序列的相关性性能优于大集合序列,因此实际应用中多用 Kasami 小集合序列。Kasami 小集合序列是选择周期为 $N = 2^n - 1$ 的 m 序列,因为总是可以分成两个相邻奇数的乘积,即: $N = 2^n - 1 = (2^{\frac{n}{2}} + 1)(2^{\frac{n}{2}} - 1)$,所以对周期为 N 的 m 序列每隔 $(2^{\frac{n}{2}} + 1)$ 抽样,产生长度为 $(2^{\frac{n}{2}} - 1)$ 的序列,将新产生的序列重复 $(2^{\frac{n}{2}} + 1)$ 次,得到与 m 序列长度相等的新序列,将新序列与选择的 m 序列逐位模二加就可以得到 Kasami 小集合序列。更进一步,我们可以发现 $(2^{\frac{n}{2}} + 1)(2^{\frac{n}{2}} - 1)$ 一定可以被 3 整除。可用数学归纳法证明如下: ① 当 $\frac{n}{2} = 1$ 时, $N = (2^1 + 1)(2^1 - 1) = 3 \times 1$ 显然成立; ② 假设 $\frac{n}{2} = k$ 时成立,即 $N = (2^k + 1)(2^k - 1)$ 能被 3 整除; ③ 当 $\frac{n}{2} = k + 2$ 时, $N = (2^{k+2} + 1)(2^{k+2} - 1) = [3 \times 2^k + (2^k + 1)]$

$$\left[3 \times 2^k + (2^k - 1) \right].$$

由式②可知式③也能被 3 整除。

因此周期为 N 的 m 序列可以进一步分解为： $N = 2^n - 1 = 3 \times \left[(2^{\frac{n}{2}} + 1)(2^{\frac{n}{2}} - 1) / 3 \right]$ ，其中 N_1 为 3， N_2 为 $(2^{\frac{n}{2}} + 1)(2^{\frac{n}{2}} - 1) / 3$ 。

新 Kasami 序列与 Kasami 小集合序列的生成方法相同，不同的是抽样频率，Kasami 小集合序列对周期 N 进行了一次因式分解，分解成两个相连奇数的乘积，新 Kasami 序列是对其中的一个因子继续进行分解，分解成 3 和另外一个因数。新 Kasami 序列以频率 N_1 对周期为 N 的 m 序列抽样得到序列 B ，将 B 进行 N_2 次循环移位得到与 m 序列等长的序列 B' ，之后与选择的 m 序列逐位模二加得到新 Kasami 序列。新 Kasami 序列的构造流程如图 1 所示。

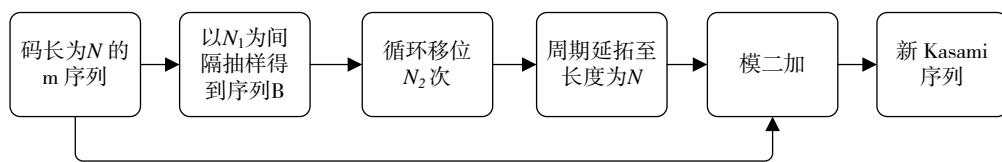


图 1 新 Kasami 序列的构造流程

H. Donelan 和 T.O. Farrell 在 1999 年提出了一种新的扩频码构造方法，该方法使用两组 m 序列，通过矩阵运算生成正交序列集，生成的正交扩频码具有良好的相关性和线性复杂度。本文参考该方法，选择两个相互正交的新 Kasami 序列，以新 Kasami 序列为基础构造矩阵，通过矩阵运算得到矩阵 M ，矩阵 M 的每一行即是一个新扩频码。新扩频码的构造流程如图 2 所示。

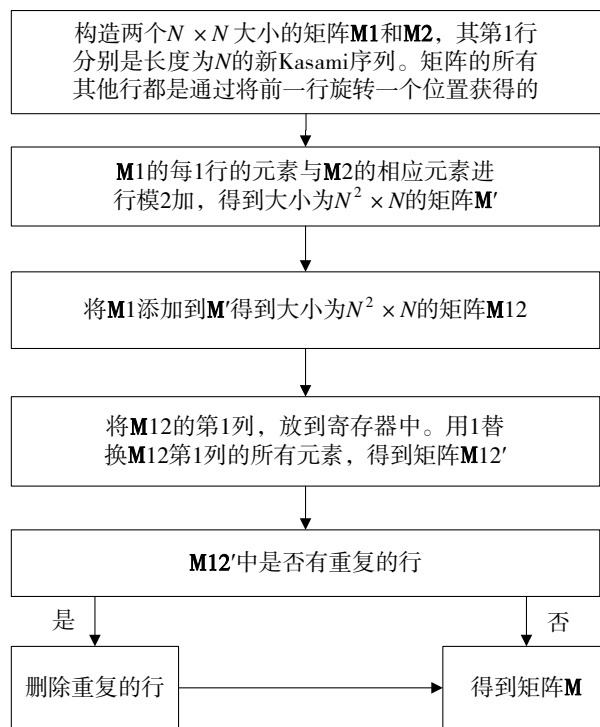


图 2 新扩频码构造流程

2 性能对比分析

扩频码的优劣对卫星导航信号的性能有决定性影响^[4], 本节对扩频码的性能分析包括相关性、平衡性、游程性以及线性复杂度。

2.1 相关性

在扩频码的实际应用中, 首先要考虑的关键因素是自相关性和互相关性。对于周期为 N 的二值扩频码序列 $X\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 、 $Y\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, 其自相关函数和互相关函数的定义可描述为:

$$P_{AC(l)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k X_{k-l}, \quad (1)$$

$$P_{CC(l)} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k Y_{k-l}, \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $P_{AC(l)}$ 与 $P_{CC(l)}$ 分别代表自相关和互相关, l 代表码片移位值, X_k 代表第 k 个码片。

可以通过相关旁瓣能量, 定量分析扩频码的性能, 相关旁瓣能量越大, 说明相关函数旁瓣峰值越大, 扩频码性能就越差, 反之扩频码性能就越好。最大相关旁瓣能量表示为

$$E_b = 20 \log_{10} \left(\frac{E_{\text{corr}}}{L} \right), \quad (3)$$

式(3)中, $\frac{E_{\text{corr}}}{L}$ 是归一化函数, E_{corr} 表示自相关旁瓣最大值或者互相关峰值, L 表示序列长度。

首先, 定性分析新扩频码的相关性。在 Matlab 仿真平台下, 取新扩频码的级数为 4、6、8、10, 分别仿真分析新扩频码的归一化自相关性和归一化互相关性, 如图 3 至图 6 所示。

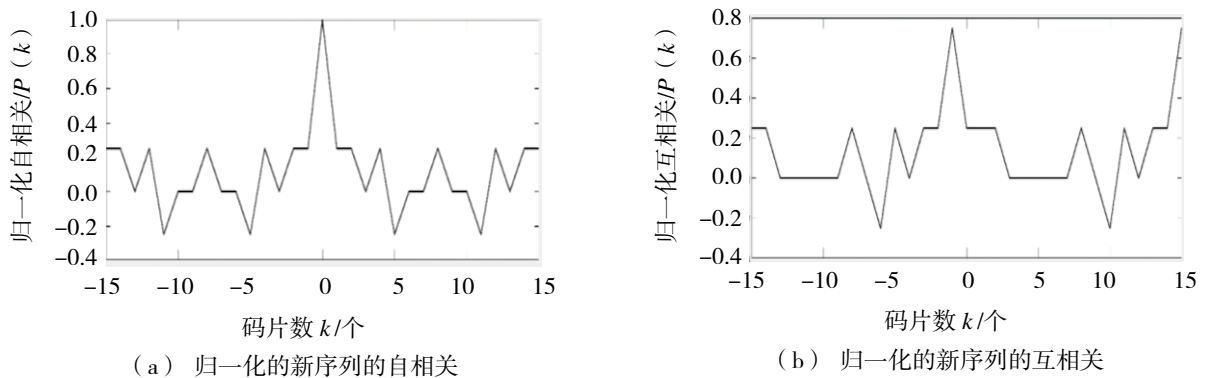
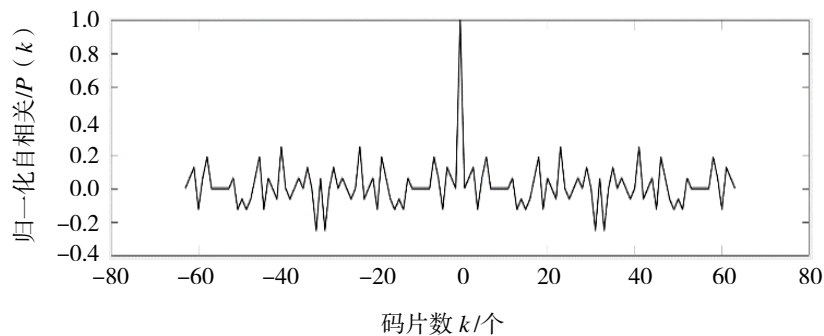
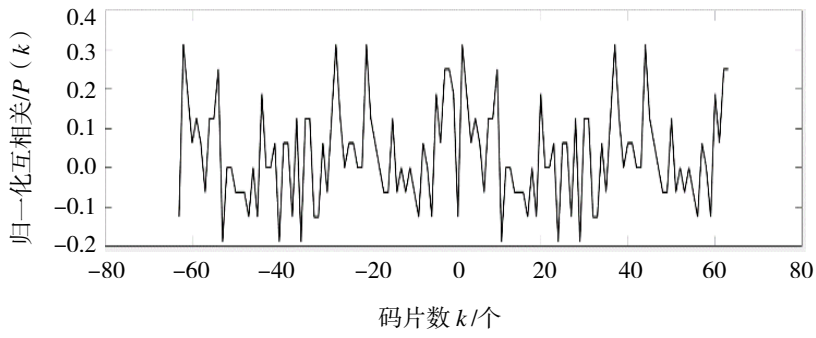


图 3 新扩频码级数为 4 的仿真分析的相关性

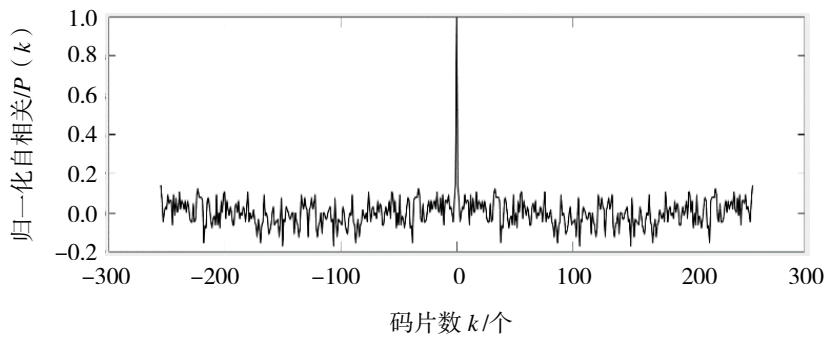


(a) 归一化的新序列的自相关

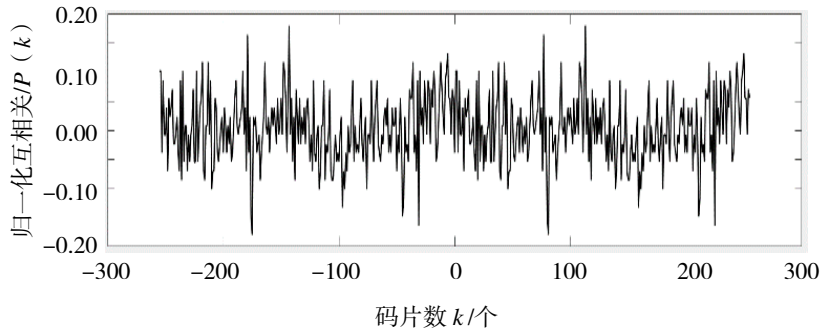


(b) 归一化的新序列的互相关

图 4 新扩频码级数为 6 的仿真分析的相关性

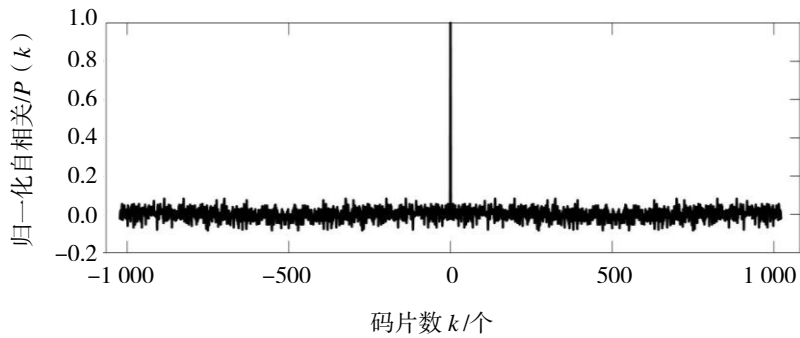


(a) 归一化的新序列的自相关

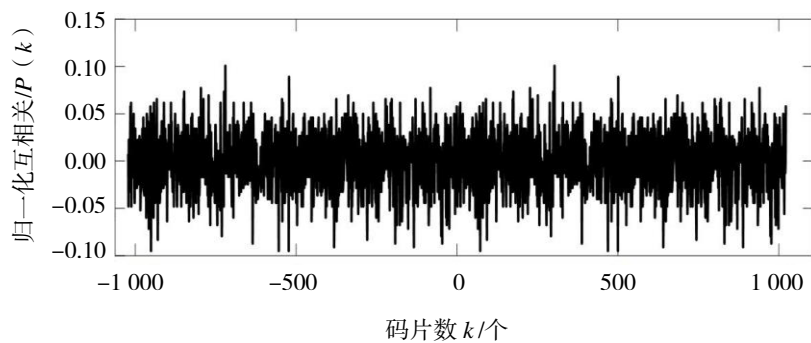


(b) 归一化的新序列的互相关

图 5 新扩频码级数为 8 的仿真分析的相关性



(a) 归一化的新序列的自相关



(b) 归一化的新序列的互相关

图 6 新扩频码级数为 10 的仿真分析的相关性

从图 3 至图 6 可以看出,随着序列长度的增加,新扩频码的自相关函数的主瓣表现为 δ 函数,主瓣与旁瓣峰值比越大,自相关性越好。良好的自相关性能有利于提高系统的抗干扰能力,便于信号的接收和检测,提高信号的捕获速度和跟踪精度,这样的特性满足高精度测距的要求。互相关函数随着序列长度的增加,越来越趋近于 0,良好的互相关性可以提高频谱利用率,降低各系统信号之间互相干扰的影响^[5]。

为了定量分析新扩频码的相关性,本文对比了新扩频码、Gold 码以及 Kasami 小集合序列的最大自相关旁瓣能量和互相关峰值能量,如表 1 和表 2 所示。

表 1 3 种扩频码的最大自相关旁瓣 dB

级数	Gold 码	Kasami 小集合序列	新扩频码
$n = 4$	-11.479 5	-13.979 4	-12.020 6
$n = 6$	-12.464 8	-19.085 7	-14.540 0
$n = 8$	-14.689 5	-18.301 3	-16.123 6
$n = 10$	-22.247 7	-21.819 6	-20.470 5

由表 1 可以看出,最大自相关旁瓣的功率随着序列长度的增加而逐渐降低,新扩频码的自相关性能与 Gold 基本相当,比 Kasami 小集合序列稍逊一筹。总的来说,新扩频码能够满足卫星导航定位系统对信号的捕获和跟踪需求^[6]。

表 2 3 种扩频码的互相关峰值 dB

级数	Gold 码	Kasami 小集合序列	新扩频码
$n = 4$	-5.460 6	-6.543 3	-6.498 8
$n = 6$	-12.464 8	-11.379 2	-12.041 2
$n = 8$	-16.144 0	-17.246 6	-17.540 0
$n = 10$	-22.247 7	-19.939 4	-21.304 0

由表 2 可以看出,3 种扩频码的互相关峰值功率随着序列长度的增加而降低,新扩频码的互相关性能要优于 Kasami 小集合序列,与 Gold 码基本相当。总之,新扩频码的互相关性能优异,可以降低多址干扰,提高卫星导航定位系统的信号传输质量以及系统容量^[7]。

2.2 平衡性

扩频码的平衡性与系统的载波抑制制度有关,如果扩频码不平衡,则会造成卫星导航定位系统载波泄

漏，降低系统的保密性、抗干扰和抗侦破能力^[8]。

平衡度 E 定义为：

$$E = \frac{|P - Q|}{L}, \quad (4)$$

式 (4) 中， L 表示序列的长度， P 表示序列中 1 的个数， Q 表示序列中 0 的个数。 E 越小，序列的平衡度越好，性能越好。

在 Matlab 仿真平台下，根据上述平衡度的定义，取序列的级数分别为 4、6、8、10，将新扩频码、Gold 码以及 Kasami 小集合序列 3 种扩频码，做平衡度的对比仿真分析，如图 7 所示。

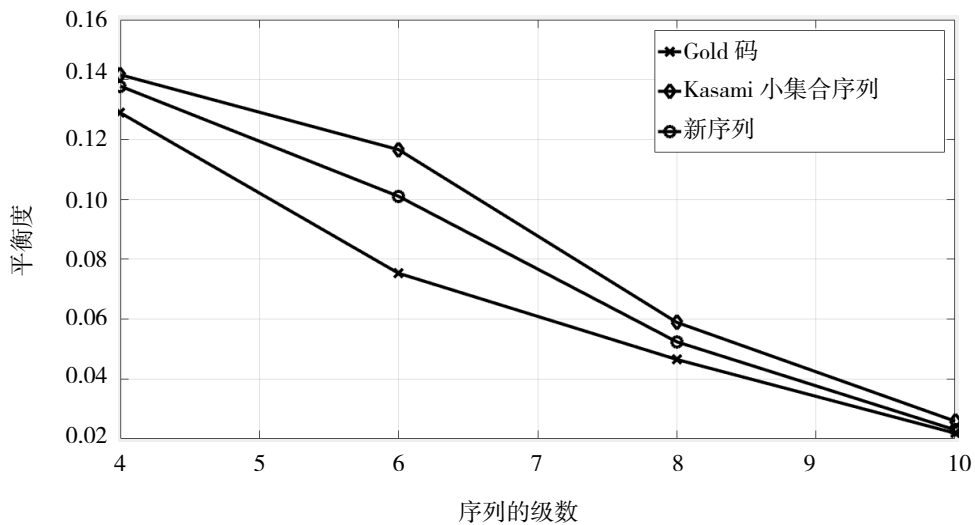


图 7 3 种扩频码的平衡度对比

从图 7 可以看出，随着序列级数的增加，3 种扩频码的平衡度都在降低，越来越接近 0。新扩频码的平衡性介于 Gold 码和 Kasami 小集合序列之间。总体表明，该扩频码能够抑制卫星导航定位系统的载波泄漏，提高导航定位系统的保密性和抗干扰能力^[9]。

2.3 游程性

序列中连续出现 0 或 1 的子序列称为游程，连续的 0 或 1 的个数称为游程长度，游程特性是表征序列随机特性的一个重要方面。在 n 级的 m 序列的每个周期内，总的游程数为 2^{n-1} ，长度为 k 的游程占游程总数的 $1/2^k$ ，且在等长游程中，0 游程和 1 游程各占一半， m 序列的游程特性是非常优良的^[10]。因此，可以将 Gold 码、Kasami 小集合序列、新扩频码与 m 序列进行对比。

在 Matlab 仿真平台下，取序列的级数 $n = 8$ ，将 Gold 码、Kasami 小集合序列、新扩频码与 m 序列的对比如表 3 所示。

表 3 Gold 码、Kasami 小集合序列、新扩频码与 m 序列的游程性对比 (序列级数 $n = 8$)

游程长度 k	m 序列	Gold 码	Kasami 小集合序列	新序列
1	64	64	64	65
2	32	32	32	32
3	16	16	16	16
4	8	8	8	8

由表 3 可以看出,新构造的扩频序列的游程长度与 m 序列基本一致,具有很好的游程性。

2.4 线性复杂度

在卫星导航定位系统中,对抗干扰和抗截获的性能要求比较高,所以新构造的扩频码必须具有较高的线性复杂度,这直接关系到导航系统保密性能的优劣^[11]。一般来讲,对于长度为 N 的序列,线性复杂度为 $N/2$ 时,序列的安全性最好。所谓线性复杂度就是利用线性反馈移位寄存器去恢复该序列的难易程度。例如,设 $\alpha=(a_0, a_1, \dots, a_{N-1})$ 是一个长度为 N 的序列,那么该序列的线性复杂度就是能够生成该序列的最短线性反馈移位寄存器的级数。1967 年, Berlekamp 发现了一个 BCH 译码算法,到了 1969 年 Massey 将该算法成功应用于线性反馈移位寄存器的重构问题,提出了著名的 Berlekamp-Massey 算法,简称为 B-M 算法。B-M 算法的基本思想是对序列求 $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 的线性反馈移位寄存器 $\langle f_n(x), l_n \rangle$, 当 $\langle f_n(x), l_n \rangle$ 等于 $\langle f_{n+1}(x), l_{n+1} \rangle$ 时,序列的线性复杂度为 l_n 。具体算法如下:

设序列 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-1}$ 是有限域上 $GF(q)$ 上的一个任意给出的长为 N 的有限序列。对 n 用数学归纳法来定义一系列的 $\langle f_n(x), l_n \rangle$, $n=1, 2, 3, \dots, N$ 。① 设 n_0 是非负整数使: $a_0 = a_1 = a_2 = \dots = a_{n_0-1} = 0$, $a_{n_0} \neq 0$, 约定: $d_0 = d_1 = d_2 = \dots = d_{n_0-1} = 0$, $d_{n_0} = a_{n_0}$, 并令: $f_1(x) = f_2(x) = \dots = f_{n_0}(x) = 1$, $l_1 = l_2 = \dots = l_{n_0} = 0$, 同时可以任取一个 $n_0 + 1$, 线性移位寄存器作为 $\langle f_{n_0+1}(x), l_{n_0+1} \rangle$ 。为确定起见,令: $f_{n_0+1}(x) = 1 - d_{n_0} x^{n_0+1}$, $l_{n_0+1} = n_0 + 1$ 。② 设 $\langle f_i(x), l_i \rangle$, $i=1, 2, \dots, n$ ($n_0 < n < N$) 已经求得。而: $l_1 = l_2 = \dots = l_{n_0} < l_{n_0+1} < l_{n_0+2} \leq \dots \leq l_n$, 另: $f_n(x) = 1 + c_{n_1} x + c_{n_2} x^2 + \dots + c_{n_n} x^{l_n}$, 计算: $d_n = a_n + c_{n_1} a_{n-1} + c_{n_2} a_{n-2} + \dots + c_{n_n} a_{n-l_n}$ 。 d_n 为第 n 步的差值, 区别下面两种情况: 1) $d_n = 0$, 这时令 $f_{n+1}(x) = f_n(x)$, $l_{n+1} = l_n$; 2) $d_n \neq 0$, 这时取 m ($1 \leq m < n$) 使 $l_m < l_{m+1} = l_{m+2} = \dots = l_n$, 并令 $f_{n+1}(x) = f_n(x) - d_n d_m^{-1} x^{n-m} f_m(x)$, $l_{n+1} = \max\{l_n, n+1-l_n\}$ 。最后, 得到序列 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-1}$ 的一个最短线性移位寄存器 $\langle f_n(x), l_n \rangle$ 。

B-M 算法流程图如图 8 所示, 其中, l_n 表示序列的线性复杂度, $f_n(x)$ 表示移位寄存器的状态, d_n 表示第 n 步的差值。

根据 B-M 算法, 比较 m 序列、Gold 码、Kasami 小集合序列、新扩频码 4 种序列的线性复杂度, 结果如表 4 所示。

表 4 m 序列、Gold 码、Kasami 小集合序列、新扩频码线性复杂度对比

序列长度 N	m 序列	Gold 码	Kasami 小集合序列	新序列
15	4	4	8	9
63	6	12	27	26
255	8	16	93	93
1023	10	20	351	352

由表 4 可以看出, 相比较于其他 3 种扩频码, 新构造的扩频码的线性复杂度更接近 $N/2$ 这一指标, 序列具有较高的安全性。

3 新扩频码误码性能仿真分析

为了全面评估新扩频码的性能, 本节利用 Matlab 软件对基于 DS-SS-SS-SS 系统进行建模, 分别在加性

高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下，仿真分析 Gold 码、Kasami 小集合序列以及新扩频码的误比特率。

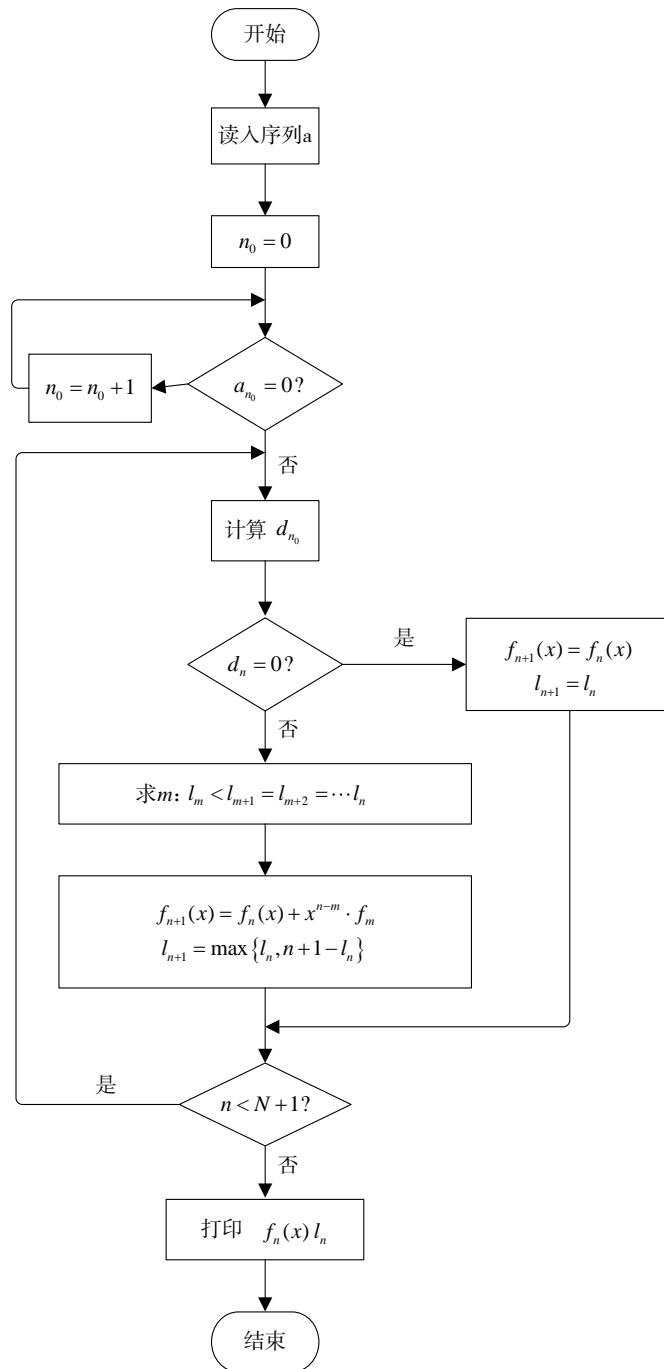


图 8 B-M 算法流程图

3.1 系统建模

假定系统的发射端与接收端实现载频完全同步，发射端与接收端的扩频码序列的产生也实现完全同步，只考虑高斯白噪声和多径衰落对 DS-SS-CDMA 系统误码性能的影响^[12]。在 Matlab 仿真平台下搭建 DS-SS-CDMA 系统，其系统原理图如图 9 所示。

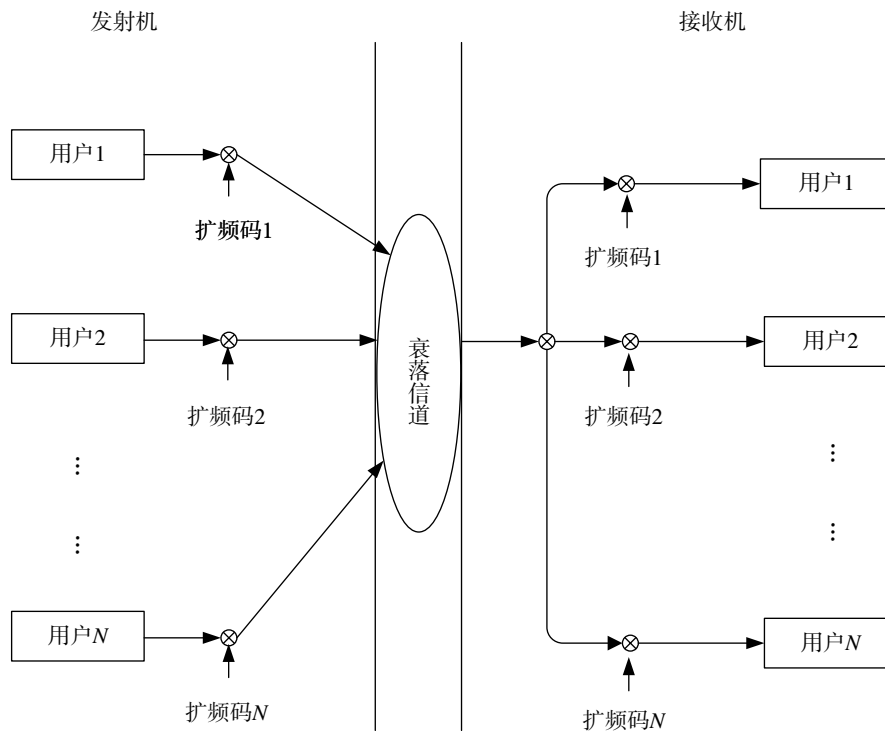


图 9 DS-CDMA 系统原理图

3.2 加性高斯白噪声信道的误码性能

AWGN 信道是通信系统中最基本的信道，在 AWGN 信道中只考虑加性高斯白噪声对传输信号的影响^[13]。在 Matlab 仿真平台下，分别仿真分析 Gold 码、Kasami 小集合序列以及新扩频码应用于 DS-CDMA 系统中时，其在 AWGN 信道下的误比特率。如图 10 所示，图中扩频码长度为 63，信噪比变化范围为 0~10 dB，用户数为 4，发射数据进行 Gray 编码并进行 4-QAM 调制。

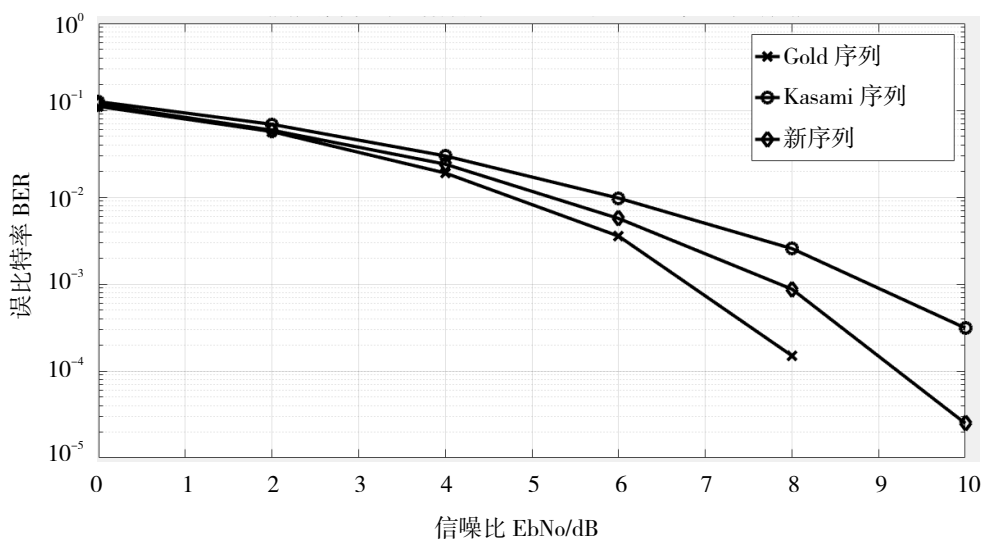


图 10 当用户数为 4 时 3 种扩频码在 AWGN 信道下的性能表现

由图 10 可以看出，信噪比相同的情况下，Gold 码性能最佳，Kasami 小集合序列性能最差，新扩频码性能介于两者之间。当信噪比大约大于 6.8 dB 时，Gold 码的误比特率小于 10^{-3} ；当信噪比大约大于 8 dB

时,新扩频码的误比特率小于 10^{-3} ;当信噪比大约大于 9 dB 时,Kasami 小集合序列的误比特率小于 10^{-3} 。综上所述,在 AWGN 信道下,Gold 码性能最优,新扩频码次之,Kasami 小集合序列最差。

3.3 瑞利衰落信道的误码性能

在卫星导航定位系统中,导航信号传播的环境是复杂多变的,存在多径衰落现象^[4]。所谓多径衰落,是指接收机收到经折射、反射和直射等几条路径到达的信号,这些不同路径到达的信号相位不一致且具有时变性,接收信号将被增强或者削弱。多径衰落的信号包络的浮动服从瑞利分布,传输路径中相位变化服从均匀分布,我们将此多径衰落称为 Rayleigh 衰落^[15]。本文利用改进的 Jakes 模型来产生单径的平坦型 Rayleigh 衰落信道。在 Matlab 仿真中,假定各用户信号经过 5 条路径到达接收端,每条路径由 6 个或 7 个平面波叠加产生 Rayleigh 衰落波形,扩频码序列长度为 63,同时传输的用户数为 4,信噪比变化范围为 0~10 dB,在 Rayleigh 衰落信道加 AWGN 信道情况下,DS-CDMA 系统的误码性能分析如图 11 所示。

由图 11 可以看出,信噪比相同时,新扩频码的误码性能最佳,Kasami 小集合序列的误码性能最差,Gold 码介于两者之间。当信噪比大于 2 dB 时,新扩频码的误比特率小于 10^{-1} ,而 Gold 码和 Kasami 小集合序列的误比特率大于 10^{-1} 。随着信噪比的增加,新扩频码的误比特率下降明显,当信噪比等于 10 dB 时,新扩频码的误比特率接近 10^{-2} ,优于 Gold 码和 Kasami 小集合序列。

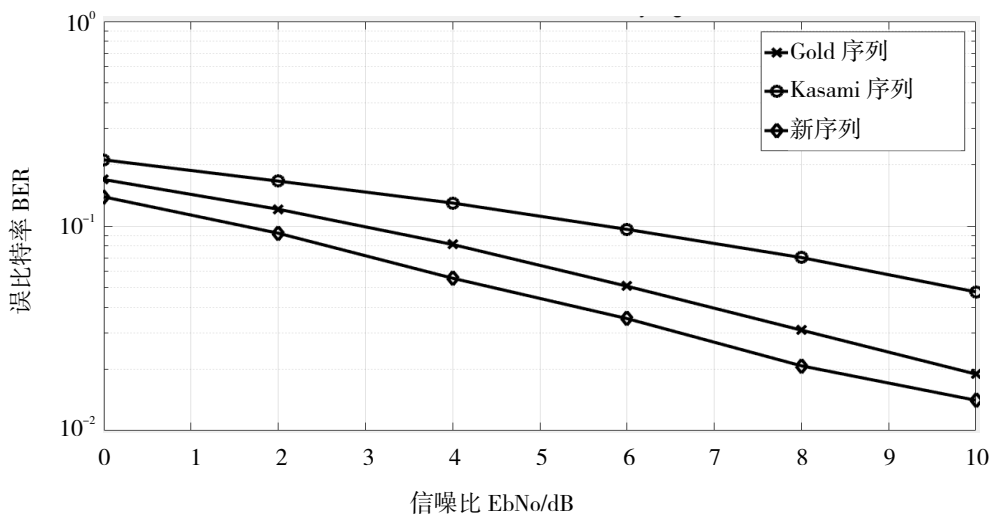


图 11 当用户数为 4 时 3 种扩频码在 Rayleigh 衰落信道下的性能表现

4 结语

本文提出了一种新的扩频码,在相关性、平衡性、游程性、线性复杂度 4 方面与传统扩频码进行了对比分析。结果表明:新扩频码具有优良的自相关性和互相关性;平衡性与 Gold 码基本一致,比 Kasami 小集合序列有一定改善,序列级数分别为 4、6、8、10 时的新序列的平衡度比 Kasami 小集合序列的平衡度分别改善了 7.65%、11.87%、11.97%、10.03%;保持了较好的游程性;线性复杂度比传统扩频码更加接近理想设计,理想指标 $N/2$,解决了传统扩频码线性复杂度不足的问题。利用 Matlab 仿真平台,搭建了加性高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下的多用户 DS-CDMA 系统,对新扩频码的误码性能进行了仿真分析,结果表明:在两种信道下,新扩频码具有较低的误比特率,抗噪声性能优异。总而言之,新扩频码本身具有一定的优势。

参考文献:

- [1] WANG D, XUE R, SUN Y. A ranging code based on the improved logistic map for future GNSS signals: code design and performance evaluation[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2017, 2017(1): 57.
- [2] 张祥莉, 胡修林, 唐祖平. 一种改善 GNSS 弱信号捕获性能的伪码优化设计[J]. *电子学报*, 2013, 41(10): 1953–1957.
- [3] DONELAN H, FARRELL T O. Method for generating sets of orthogonal sequences[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(18): 1537–1538.
- [4] ZHENG Y R, XIAO Ch Sh. Improved models for the generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms[J]. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(6): 256–258.
- [5] 宫剑, 毕红军, 贾怀义. Kasami 扩频序列的研究[J]. *北方交通大学学报*, 2001, 25(3): 103–106.
- [6] 朱建锋. 卫星导航信号扩频码构造、优选和增强接收技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [7] HONG G K, HICKHO S, SEIKHO Y, et al. PN code acquisition using signed-park-based nonparametric detectors in DS/SS Systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(4): 172–176.
- [8] 肖国镇, 梁传甲, 王育民. 伪随机序列及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [9] 卢晓春, 陈清刚, 胡永辉, 等. 卫星导航定位系统中伪随机码的研究[J]. *时间频率学报*, 2004, 27(1): 23–31.
- [10] KOS T, GRGIC M, MANDIC L. GPS modernisation and GNSS development[J]. *47th International Symposium ELMAR–2005*, 2005, 8(10): 269–273.
- [11] LIU M H, ZHAN X Q, LI W, et al. A compatibility analysis between GNSS and radio astronomy/microwave landing system in C band[J]. *Aeronaut. Astronautics Aviat*, 2014, 46(2): 102–107.
- [12] GOLD R. Optimal binary sequences for spread spectrum mutli-plexing[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1967, 13(4): 619–621.
- [13] WAN G B, KWON H M. PN code acquisition using smart antenna for spread-spectrum wireless communications-part I[J]. *Transactions on Vehicular Techology*, 2003(1): 142–149.
- [14] 张志辉, 宋花荣. m 序列与 Gold 序列比较[J]. *信息技术*, 2006, 30(6): 69–71.
- [15] YANG C X, LU X C, WANG L. Performance analysis for ranging codes of satellite navigation system[J]. *Time Freq*, 2013, 36(6): 173–180.