Website：ycyk.brit.com.cn

基于矩阵转换的准同步跳频序列设计方法

王乐童[1,2]，付林罡[2]，闫朝星[2]，崔学荣[1]

（1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580；
2 北京遥测技术研究所 北京 100076）

摘要：无碰撞区跳频序列在一定时延范围内序列间碰撞为零，在准同步跳频通信系统中具有广阔的未来。为降低跳频通信系统中因用户数增多而产生的频率干扰，本文实现了一种基于矩阵转换的无碰撞区跳频序列生成方法，并举例说明了构造过程，其无碰撞区范围和序列数量可灵活变动。同时本文构造了一种高复杂度RS（里德-所罗门）码作为比较，并仿真对比了两者在不同信噪比和用户数情况下的误码率。根据两者的构造理论和仿真结果，得出结论：在无碰撞区范围内接入跳频网络时，采用新型无碰撞区跳频序列比采用RS码的跳频通信系统误码率更低，大大增强了跳频系统的多址通信能力。

关键词：跳频序列；矩阵转换；RS码；无碰撞区

中图分类号：TN914.4; TN914.5 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-1000(2025)02-0034-07

DOI：10.12347/j.ycyk.20250117002

引用格式：王乐童，付林罡，闫朝星，等. 基于矩阵转换的准同步跳频序列设计方法[J]. 遥测遥控，2025，46(2)：34–40.

Design Method of Quasi-Synchronous Frequency-Hopping Sequences Based on Matrix Transformation

WANG Letong[1,2]，FU Lingang[2]，YAN Chaoxing[2]，CUI Xuerong[1]

（1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China）

Abstract: The no-hit zone frequency hopping sequence is a sequence with zero collisions between sequences within a certain delay range, and has broad prospects in quasi-synchronous frequency hopping communication systems. To reduce frequency interference among users caused by the increase in user numbers in a frequency-hopping communication system, this article implements a no-hit zone frequency hopping sequence generation method based on matrix transformation, with variable no-hit zone range and sequence quantity, and illustrates the construction process with examples. At the same time, a high-complexity RS code was constructed as a comparison in this article, and the error rates of the two were compared through simulation under different signal-to-noise ratios and user numbers. The results showed that when accessing the frequency hopping network within the no-hit zone range, the hopping system using the no-hit zone hopping sequence had a lower error rate than the hopping system using RS code, greatly enhancing the multi-access communication capability of the hopping system.

Keywords: Frequency-hopping sequence; Matrix transformation; RS code; No-hit zone

Citation: WANG Letong, FU Lingang, YAN Chaoxing, et al. Design Method of Quasi-Synchronous Frequency-Hopping Sequences Based on Matrix Transformation[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(2): 34–40.

0 引 言

跳频通信是一种调制载波受跳频码控制而不断变化的通信方式，其跳频序列在不同时隙上的频率碰撞次数是影响系统性能的关键因素之一。跳频通信系统分为同步、准同步和异步三种类型。在同步系统中，所有用户在统一的时间基准下进行同步跳频，需采用完全正交的跳频序列。对于异步通信系统，随着组网用户数的增加，相互之间的频率碰撞概率和干扰会越来越大，但能够满

基金项目：国防基础科研计划研究项目（JCKY2021602B016）
收稿日期：2025-01-17；修回日期：2025-02-08

足在整个周期的时延内都不出现频点重合的跳频序列数量有限[1]，所以大多采用相关性能较好的伪随机序列生成的跳频序列，例如RS码。对于准同步系统而言，它不要求所有用户之间完全同步，只要求用户间的相对时延不超过系统允许的时间范围。通过限定在较小的时延范围内来研究序列间的碰撞，则可以生成数量较多的序列，低/无碰撞区(LHZ/NHZ)跳频序列[2]的出现比较好地解决了这个问题，它是一种应用于准同步码分多址(Quasi-Synchronous Code Division Multiple Access，QS-CDMA)系统的跳频序列。

目前，针对无碰撞区(NHZ)跳频序列的研究主要有两方面：一是更为优化的理论界研究，二是最优NHZ序列的构造方法研究。

关于NHZ序列的理论界研究，文献[3]中Ye和Fan首次推导出NHZ跳频序列的理论界，给出了无碰撞区、频点数目和序列数的关系。文献[4]中Peng和Fan给出了已知频点数量、序列数和序列长度条件下的NHZ宽度的理论界。文献[5]中Ye和Fan给出了更为完善的基于最大周期汉明相关的NHZ跳频序列集，该序列集有关于序列数目、序列长度和频点数的理论界。

关于NHZ序列的构造方法研究，文献[6]基于转置法和映射法提出了两种构造NHZ跳频序列的方法，参数达到了理论界值。文献[7]基于交织的方法构造了一种NHZ跳频序列，其序列的长度大于频点个数，参数达到理论界值。文献[8]给出了一类构造NHZ跳频序列的一般方法，并给出了一种具体的方法——采样法，其参数可灵活变动且达到理论界值。文献[9]提出了一种最大汉明相关值可设定的NHZ构造方法——位移构造法，参数几乎可达最优值。文献[10]实现了一种使用笛卡儿积构造NHZ序列的方法。文献[11]提出了一种基于成熟的混沌序列的NHZ构造方法，其构造的序列在复杂度和周期性能方面具有良好性质。针对现有文献大多仅聚焦于理论方法研究，而缺少与传统跳频序列在跳频通信系统中的仿真对比，本文实现了一种新型NHZ序列构造方法，并搭建通信系统，与传统的RS码跳频序列进行仿真对比验证。

本文基于矩阵旋转法实现了一种利用设定的矩阵进行列置换的NHZ序列生成方法，相比传统序列，进一步减少了系统随着用户数增加而产生的相互干扰。比较本文构造的NHZ跳频序列与传统的RS码两者的优缺点，在一定时延(无碰撞区范围)内接入跳频网络时，相较于传统RS码，采用本文中构造的NHZ跳频序列大大减少了系统的频率碰撞，实现了更低的误码率，具备更好的多址通信能力。

1 基本定义和性质

定义1：设跳频通信系统中有q个频点，则频率集合为：$A=\{f_0,f_1,\dots,f_{q-1}\}$，长度为$L$的跳频序列可表示为$S_v=\{s_v(0),s_v(1),\dots,s_v(j),\dots,s_v(L-1)\},s_v(j)\in A$。设跳频网里共有$u$个用户，每个用户采用不同的跳频序列，将$u$个用户使用的跳频序列集合记为$S=\{S_1,S_2,\dots,S_u\},u\leqslant N$。汉明相关性是衡量跳频序列性能的重要指标，汉明相关表示的是两条跳频序列在不同延时下频点碰撞次数[11]。

频隙集合A上的长度为L的两个跳频序列X和Y，XY都属于S，在相对时延τ时的周期汉明互相关定义为

$$H_{XY}(\tau)=\sum_{j=0}^{L-1}h[x(j),y(j+\tau)],\tau\in[0,L-1] \quad (1)$$

式中$j+\tau$为$(j+\tau)\mathrm{mod}L$，且

$$h[x(j),y(j+\tau)]=\begin{cases}1,x(j)=y(j+\tau)\\0,x(j)\neq y(j+\tau)\end{cases} \quad (2)$$

$H_{XY}(\tau)$越小，两个跳频序列之间的碰撞次数就越少，表明这两条序列之间的正交性更好。长度为L的跳频序列$X=\{x(j)\}$的相对时延$j+\tau$的周期汉明自相关为：

$$H_{XX}(\tau)=\sum_{j=0}^{L-1}h[x(j),x(j+\tau)],\tau\in[0,L-1] \quad (3)$$

定义2：无碰撞区(NHZ)跳频序列的定义和跳频序列集关于自相关碰撞区、互相关碰撞区、无碰撞区的定义如式(4)所示。

$$\begin{aligned}&Z_{\mathrm{ANH}}=\max\{T\mid H_{XX}(\tau)=0,\forall X\in S,0<\tau\leqslant T\},\\&Z_{\mathrm{CNH}}=\max\{T\mid H_{XY}(\tau)=0,\forall XY\in S,0<\tau\leqslant T\},\\&Z_{\mathrm{NH}}=\min\{Z_{\mathrm{ANH}},Z_{\mathrm{CNH}}\}.\end{aligned} \quad (4)$$

NHZ跳频序列集S可定义为$S\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}$[12]，其中$q$是频点个数，$L$是序列长度，$M$是序列数目，$Z_{\mathrm{NH}}$是无碰撞区长度。

NHZ跳频序列集中的任意序列间的汉明互相关，在零延迟即无碰撞区范围内，汉明互相关和

自相关为零，NHZ 跳频序列的汉明互相关和自相关示意图如图 1 所示。

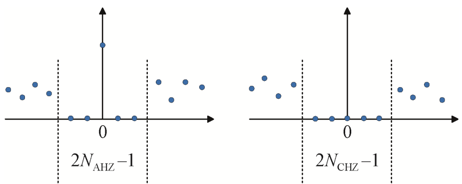

图 1 NHZ 跳频序列汉明相关示意图

Fig. 1 NHZ frequency hopping sequence Hamming correlation diagram

NHZ 跳频序列集受到理论界的制约[13]，对于理论界的研究成果很多，更多参数或者更加优化的理论界成果在近几年被陆续发现，NHZ 序列有以下两条性质。

性质 1：若构造的 NHZ 跳频序列集 $\boldsymbol{S}$ 中的相关参数与某理论界的等号成立，则称 NHZ 序列集 $\boldsymbol{S}$ 关于该理论界是最优的。

性质 2[14]：若有 NHZ 跳频序列集 $\boldsymbol{S}\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}$，将其排列成 $M\times L$ 的矩阵，则用 $M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)$ 的窗口沿矩阵循环位移滑动，无论移动到哪个位置，窗口中不会出现相同的频点。由此可得 $q\geqslant M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)$。

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} s_0^0 & s_1^0 & \cdots & s_{Z_{\mathrm{NH}}}^0 & s_{Z_{\mathrm{NH}}+1}^0 & \cdots & s_{L-1}^0 \\ s_0^1 & s_1^1 & \cdots & s_{Z_{\mathrm{NH}}}^1 & s_{Z_{\mathrm{NH}}+1}^1 & \cdots & s_{L-1}^1 \\ \cdots & \cdots & & \cdots & \cdots & & \cdots \\ s_0^{M-1} & s_0^{M-1} & \cdots & s_{Z_{\mathrm{NH}}}^{M-1} & s_{Z_{\mathrm{NH}}+1}^{M-1} & \cdots & s_{L-1}^{M-1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

由此可知，若存在序列集满足性质 2，则其 NHZ 长度至少为 Z_{NH}。

2 基于 RS 码的跳频序列

RS 码是周期为 $N=q-1$ 的 q 元域 BCH(博斯-乔赫里-霍昆格姆)循环码，RS 码的符号取自有限域 $GF(q)$。在通信中通常按非系统码生成 RS 码，RS(L,b)的编码方法如下：

假设有 b 个信息位、定义于 $GF(q)$ 的 RS 码是如式(6)生成矩阵的向量空间

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ a & a^2 & \cdots & a^{q-1} \\ a^2 & a^4 & \cdots & a^{2(q-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a^{b-1} & a^{2(b-1)} & \cdots & a^{(b-1)(q-1)} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中，a 是 q 元域中的本原元，$k=b-1$ 为最大重合次数。当信息元向量为 $v=[v_0,v_1,\dots,v_{b-1}]$ 时，RS 码的码字向量为 $S_v=vG$。

由研究可知 RS$(N,2)$ 可以构造出最佳的 RS 跳频图案，RS 码的周期越长，构造出的序列的性能越好。$GF(1\,048\,576)$ 上的 RS(1 048 575，2)码的码字向量为 $\boldsymbol{S}_v=[v_0,v_1]\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & a & \cdots & a^{1\,048\,574}\end{bmatrix}$，设 $v_0=0$，$v_1=1$，生成码字为 $[1,a,a^2,\dots,a^{1\,048\,574}]$，$GF(1\,048\,576)$ 中本原元 a 的最小生成多项式为 $f(x)=1+x^3+x^{20}$，根据伽罗华域中元素的运算法则，可以得到域中的其他元素，编码电路如图 2 所示。

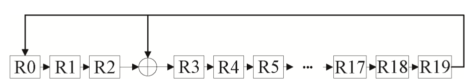

图 2 周期为 2^{20} 的 RS 码编码电路

Fig. 2 RS code encoding circuit with a period of 2^{20}

受实际工程中频点数量的影响，无法直接使用该长周期的跳频序列控制频点的跳变。因此采用非线性转换处理，将生成的 20 bit RS 码右乘一个 20×5 的矩阵，可将其转换为 5 bit 跳频序列[15]。该转换过程可以通过寄存器分组来实现，为保证均匀性和遍历性，每组中的寄存器等间隔抽取，抽取方式如图 3 所示，这样处理之后在实际工程中即可直接控制 2^5 个频点跳变。

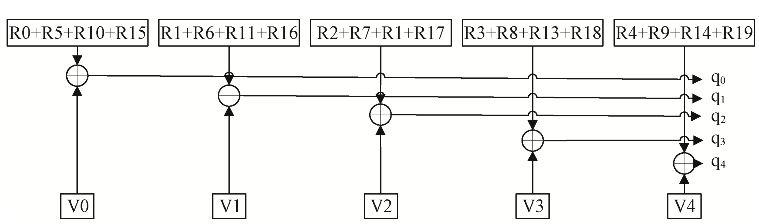

图 3 非线性转换示意图

Fig. 3 Nonlinear conversion diagram

经上述方法任取一条生成的基于RS码的跳频序列Q

$$Q=\{13,22,1,14,16,13,29,1,14,16,10,22,8,16,13,\ldots,21,2,25,11,6,1,12,20,5,6,3,12\}$$

设置序列间隔值不小于$\sigma=10$，经过对偶频带法[16]进行宽间隔处理后生成宽间隔序列Q'

$$Q'=\{13,54,1,14,48,13,29,1,14,48,10,22,8,48,13,\ldots,21,2,25,11,38,1,12,52,5,38,3,44\}$$

应用了经过宽间隔处理后的跳频序列的通信系统，其相邻频点间隔显著增加，因而具有较强的抗干扰能力。

通过计算汉明相关值来验证序列的性能。具体而言，取一条最终生成的跳频序列并仿真其汉明自相关性。当时延为0时，序列的汉明自相关值最大，这意味着序列的每个元素发生重合；当时延不为0时，序列的汉明自相关值约占序列周期的3%，由此可见该序列具备良好的汉明自相关性。接着，取两条序列并仿真其汉明互相关性。当时延为0时，序列的汉明互相关值为0，即表明序列间没有重合的频点；当时延不为0时，序列的汉明互相关值约占序列周期的1.5%，这体现出该序列具备良好的汉明互相关特性。

在此基础上，所采用的生成RS码的方法较为简单，并且方便针对信息向量v、时间参数TOD或是密钥PK等因素进行非线性运算。通过这种方式，跳频序列的数目可以进一步增加，跳频序列的复杂度也能够得到提高，因此该方法广泛应用于实际工程中。

3　基于矩阵转换法的NHZ跳频序列

由定义2可知，NHZ跳频序列集可表示为$S\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}$，其中$q$是频点个数，$L$是序列长度，$M$是序列数目，$Z_{\mathrm{NH}}$是无碰撞区长度，下面给出构造步骤。

构造方法：给定频隙集$F=\{f_0,f_1,\ldots\}$为跳频可用频隙集，从中选出频隙数为q的跳频频点，其中q需满足$q=M(Z_{\mathrm{NH}}+1)$，从频隙集F中任选q个即$M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)$个跳频频点[17]；把他们随机组合成为一个$M$行$(Z_{\mathrm{NH}}+1)$列的矩阵，记为$\boldsymbol{C}_0$。给定旋转矩阵为向量$X=[x_l],l=0,1,\ldots,Z_{\mathrm{NH}}+1$，由$\boldsymbol{C}_0$按$X$旋转一次后得到$\boldsymbol{C}_0$，其中$\boldsymbol{C}_{1(i,j)}=\boldsymbol{C}_{0((i+x_l)\bmod M,j)},i=0,1,\ldots M-1,j=0,1,\ldots,Z_{\mathrm{NH}}$；现在给定一个向量序列$X=[x_l^n],n=1,2,\ldots N,l=0,1,\ldots,Z_{\mathrm{NH}}+1$作为旋转向量，将$\boldsymbol{C}_0$按照旋转向量序列$X$进行$N$次旋转之后，产生了$N$个$M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)$的矩阵$\boldsymbol{C}_1,\boldsymbol{C}_2,\ldots,\boldsymbol{C}_N$；最后，将矩阵$\boldsymbol{C}_0,\boldsymbol{C}_1,\ldots,\boldsymbol{C}_N$横向排列成为一个$M$行$(N+1)(Z_{\mathrm{NH}}+1)$列的矩阵$\boldsymbol{S}$，将$\boldsymbol{S}$表示为$\boldsymbol{S}=\{s^0,s^1,\ldots,s^{M-1}\}$，其中$s^m$为$\boldsymbol{S}$的第$m$行向量，$m\in[0,M-1]$。经过上述方法，可产生$M$个长度为$(N+1)(Z_{\mathrm{NH}}+1)$的NHZ跳频序列，将其记为$\boldsymbol{S}\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}=\boldsymbol{S}(M(Z_{\mathrm{NH}}+1),(N+1)(Z_{\mathrm{NH}}+1),M,Z_{\mathrm{NH}})$。

证明：因上述方法构造的$\boldsymbol{S}=\{s^0,s^1,\ldots,s^{M-1}\}$的行列数已知，即$M$行$(N+1)(Z_{\mathrm{NH}}+1)$列，所以构造的跳频序列集$\boldsymbol{S}$中频隙数为$M(Z_{\mathrm{NH}}+1)$，序列数为$M$，序列长度为$(N+1)(Z_{\mathrm{NH}}+1)$。下面证明$\boldsymbol{S}$的NHZ长度为$Z_{\mathrm{NH}}$。

由上述过程可知$\boldsymbol{S}$为$M\times(N+1)(Z_{\mathrm{NH}}+1)$的矩阵，如式(7)所示：

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} s^0\\ s^1\\ \cdots\\ s^{M-1}\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix} s_0^0 & s_1^0 & \cdots & s_{Z_{\mathrm{NH}}}^0 & s_{Z_{\mathrm{NH}}+1}^0 & \cdots & s_{L-1}^0\\ s_0^1 & s_1^1 & \cdots & s_{Z_{\mathrm{NH}}}^1 & s_{Z_{\mathrm{NH}}+1}^1 & \cdots & s_{L-1}^1\\ \cdots & \cdots & & \cdots & \cdots & & \cdots\\ s_0^{M-1} & s_0^{M-1} & \cdots & s_{Z_{\mathrm{NH}}}^{M-1} & s_{Z_{\mathrm{NH}}+1}^{M-1} & \cdots & s_{L-1}^{M-1}\end{bmatrix}}_{M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)} \tag{7}$$

初始的矩阵$\boldsymbol{C}_0$为频点的随机组合，没有重复的元素，$\boldsymbol{C}_i(i\in[1,N])$中的全部元素全部由$\boldsymbol{C}_0$与旋转矩阵运算得到，$\boldsymbol{C}_i$中所有元素的位置只改变了其在矩阵中的行数，而列数不变，所以使用$M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)$的窗口在$\boldsymbol{S}$上水平方向任意循环位移滑动过程中，窗口中不含有相同频点。根据性质2，可知其NHZ长度为Z_{NH}，由于所选频隙$q=M\times(Z_{\mathrm{NH}}+1)$，根据性质1，其参数是最优的。

下面举一个简单的例子，说明这种构造方法。

设有14个跳频频点f_0-f_{13}，采用频隙集$F=\{0,1,\ldots 13\}$依次代表这14个跳频频点，构造Z_{NH}为1的NHZ序列，序列数目M取为7，N取为6，构造$\boldsymbol{S}\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}=\boldsymbol{S}(14,14,7,1)$的跳频序列集。

（1）将$\{0,1,\ldots,13\}$随机排列成一个7行2列的矩阵$\boldsymbol{C}_0$，下面由大到小按顺序排列

$$\boldsymbol{C}_0=\begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 12\\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

（2）设定旋转矩阵$X=[x_l^n],n=1,2,\ldots,N,l=0,1,\ldots,Z_{\mathrm{NH}}+1$，随机设定一个旋转矩阵$\boldsymbol{X}$

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6\\ 7 & 8 & 9 & 1 & 2 & 3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

按照 $\boldsymbol{C}_{1(i,j)}=\boldsymbol{C}_{0\left((i+x_i^1)\bmod M,j\right)}$，$\boldsymbol{C}_{2(i,j)}=\boldsymbol{C}_{0\left((i+x_i^2)\bmod M,j\right)}$，…，$\boldsymbol{C}_{6(i,j)}=\boldsymbol{C}_{0\left((i+x_i^6)\bmod M,j\right)}$ 得到 $\boldsymbol{C}_1-\boldsymbol{C}_6$

$$\boldsymbol{C}_1=\begin{bmatrix}2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 0\\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13\end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{C}_2=\begin{bmatrix}4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 0 & 2\\ 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{C}_3=\begin{bmatrix}6 & 8 & 10 & 12 & 0 & 2 & 4\\ 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 1 & 3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{C}_4=\begin{bmatrix}8 & 10 & 12 & 0 & 2 & 4 & 6\\ 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{C}_5=\begin{bmatrix}10 & 12 & 0 & 2 & 4 & 6 & 8\\ 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 1 & 3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{C}_6=\begin{bmatrix}12 & 0 & 2 & 4 & 6 & 8 & 10\\ 7 & 9 & 11 & 13 & 1 & 3 & 5\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

将 $\boldsymbol{C}_0-\boldsymbol{C}_6$ 组合为矩阵 $\boldsymbol{S}$，$\boldsymbol{S}$ 矩阵为

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}s^0\\ s^1\\ s^2\\ s^3\\ s^4\\ s^5\\ s^6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 2 & 1 & 4 & 3 & 6 & 5 & 8 & 3 & 10 & 5 & 12 & 7\\ 2 & 3 & 4 & 3 & 6 & 5 & 8 & 7 & 10 & 5 & 12 & 7 & 0 & 9\\ 4 & 5 & 6 & 5 & 8 & 7 & 10 & 9 & 12 & 7 & 0 & 9 & 2 & 11\\ 6 & 7 & 8 & 7 & 10 & 9 & 12 & 11 & 0 & 9 & 2 & 11 & 4 & 13\\ 8 & 9 & 10 & 9 & 12 & 11 & 0 & 13 & 2 & 11 & 4 & 13 & 6 & 1\\ 10 & 11 & 12 & 11 & 0 & 13 & 2 & 1 & 4 & 13 & 6 & 1 & 8 & 3\\ 12 & 13 & 0 & 13 & 2 & 1 & 4 & 3 & 6 & 1 & 8 & 3 & 10 & 5\end{bmatrix}$$

此矩阵的 s^0-s^6 即为构造的 $\boldsymbol{S}\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}=\boldsymbol{S}(14,14,7,1)$NHZ 跳频序列。经计算，序列集 $\boldsymbol{S}$ 在 $\tau=0,1,\ldots,13$ 时均满足，因此验证上述方法构建出 $\boldsymbol{S}\{q,L,M,Z_{\mathrm{NH}}\}=\boldsymbol{S}(14,14,7,1)$ 的 NHZ 跳频序列集。$H_{xx}(\tau)=$ (14 0□□□□□□□□□□□□), $H_{xy}(\tau)=$ (00□□□□□□□□□□□□)

4 性能仿真与结果分析

在 MATLAB 环境下搭建通信系统进行对比，分析两种跳频序列，通过对各用户施加不同的时延 τ 来仿真准同步和异步通信系统，其基本框图如图 4 所示。

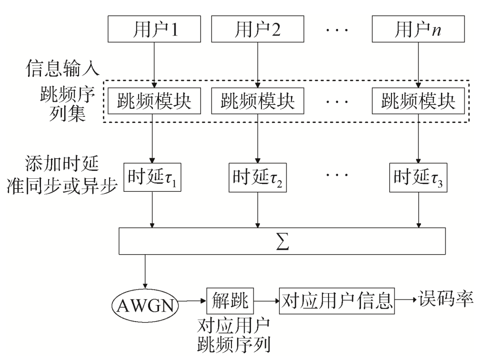

图 4 通信系统仿真模型

Fig. 4 Communication system simulation model

采用 NHZ 序列与传统 RS 码的跳频序列进行跳频系统仿真，不同条件下通过对比误码率来对比验证 NHZ 跳频序列性能。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameter table

参数名称	参数取值或范围
码元周期/s	10^{-6}
跳频频点数目	32
跳频频率集/MHz	900-932
调制方式	BPSK
跳频速率 hops/s	5 000
信道	AWGN
RS 跳频序列	$(2^{20}-1,2)$
NHZ 跳频序列	$(32,32,8,3)$

固定跳频系统中用户个数为 8，对 NHZ 序列与基于 RS 生成的跳频序列进行仿真验证对比，图中时延超出/不超出 NHZ 表示的是时延小于/大于 NHZ 与跳频周期的乘积，两种跳频序列在不同信噪比下的系统误码率变化如图 5 所示。

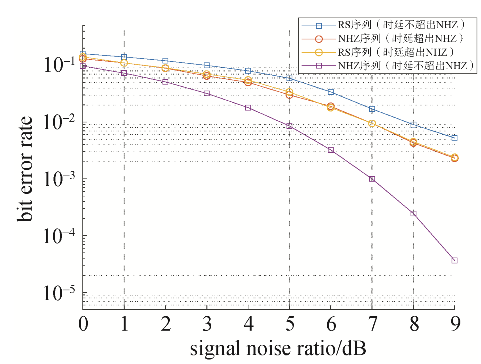

图 5 不同信噪比下 NHZ 序列与 RS 序列的系统误码率关系曲线

Fig. 5 System bit error rate relationship curve using NHZ sequence and RS sequence

由图5可知，随着信噪比的增加，四种情况下的误码率都有所降低。其中，采用NHZ跳频序列且时延不超过NHZ的通信系统误码率曲线下降最快；而采用RS码的通信系统，由于用户数较多，相互之间存在频点干扰，因此误码率曲线下降较慢，且时延是否超出NHZ对其几乎无影响，这与其汉明相关性的性质相符合。当时延超出NHZ时，NHZ序列的汉明相关性无法保证，其误码率相比采用RS码的通信系统更大。因此，要保证通信系统的准同步性，才能发挥出NHZ序列在NHZ内汉明相关为零的性质。

固定跳频系统中的信噪比为定值7 dB，改变跳频系统中用户个数，基于NHZ序列与基于RS生成的跳频序列进行仿真验证对比，两种跳频序列的系统误码率随用户数变化如图6所示。

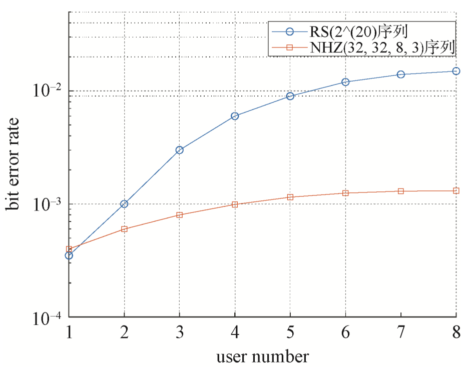

图6　固定信噪比为7 dB时误码率随用户数变化曲线

Fig. 6　Bit error rate curve versus the number of users at a fixed signal-to-noise ratio of 7 dB

由图6可知，随着使用NHZ序列的跳频通信系统用户的增多，其误码率曲线变化较缓，保持在0.001附近，而采用RS序列的跳频通信系统误码率会随着用户数目的增加有明显上升。这说明随着用户的增多，采用NHZ序列比采用RS序列的通信系统的用户间频率的相互干扰更少，NHZ序列具有良好的抗多址干扰能力。

5　结束语

基于RS码构造跳频序列因其具有硬件实现简单、序列数目多以及汉明相关性好等优点，被广泛应用于跳频通信系统当中，但随着系统中用户数的增多，相互之间的干扰会越来越大。本文实现了一种基于矩阵转换的无碰撞区跳频序列，该序列具备零延时附近的频率碰撞为零的特点，序列个数等参数均达到了理论极限，应用于准同步跳频通信系统中，具备更强的多址通信能力。后续可寻找更为简单的构造方法，增加其工程实用性。

参考文献

[1] 张秀杰, 牛宪华. 基于有限域理论的最优低碰撞区跳频序列集构造[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 45-52.
ZHANG Xiujie, NIU Xianhua. The construction of optimal low hit zone frequency hopping sequence set based on finite field theory[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2023, 42(2): 45-52.

[2] 冯莉芳. 基于无碰撞区跳频码的跳频通信系统仿真分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.

[3] YE W X, FAN P Z. Construction of frequency hopping sequences with no hit zone[J]. Journal of Electronics (China), 2007, 24(3): 305-308.

[4] PENG D, FAN P. Lower bounds on the Hamming auto-and cross correlations of frequency-hopping sequences [J]. IEEE Transactions Information Theory, 2004, 50(9): 2149-2154.

[5] YE W X, FAN P Z, PENG D Y, et al. Theoretical bound on no hit zone of frequency hopping sequences[C]//Proceedings of the Fifth International Worshop on Sequence Design and its Applications in Communications (IWSDA2011), October 10-14, 2011, Guilin, China. New York: IEEE, 2011: 115-117.

[6] YE W X, FAN P Z. Two classes of frequency hopping sequences with no hit zone[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Communications Theory and Applications, Ambleside, UK. New York: IEEE, 2003: 304-306.

[7] 李明阳, 柏鹏, 林晋福, 等. 一种最优零碰撞区跳频序列集的构造方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 59-64.
LI Mingyang, BAI Peng, LIN Jinfu, et al. A construction method of optimal no-hit zone frequency hopping sequence set[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2013, 33(6): 59-64.

[8] 陈浩源, 柯品惠, 张胜元. 基于矩阵置换的最优无碰撞区跳频序列集的构造[J]. 计算机应用, 2013, 33(11): 3028-3031.
CHEN Haoyuan, KE Pinhui, ZHANG Shengyuan, et al. Construction of optimal frequency hopping sequence sets with no-hit zone based on matrix permutation[J]. Journal

of Computer Applications, 2013, 33(11): 3028-3031.

[9] 柯品惠, 陈浩源. 无碰撞区跳频序列集的进一步构造[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(2): 38-42.
KE Pinhui, CHEN Haoyuan. Further constructions of frequency hopping sequence sets with no-hit zone[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(2): 38-42.

[10] 许成谦, 李伟杰, 徐琪, 等. 基于笛卡儿积构造时频二维部分周期低碰撞区跳频序列集[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(3): 262-267.
XU Chengqian, LI Weijie, XU Qi, et al. Constructing time-frequency two-dimensional partially periodic low hit zone frequency hopping sequence based on Cartesian product[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(3): 262-267.

[11] WEI Qianhui, HAN Hongyu, ZHOU Limengnan, et al. New bounds of no-hit-zone frequency-hopping sequences with frequency shift[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2023, 106: 803-806.

[12] HAN H Y, PENG D Y, PARAMBALLI U. New sets of optimal low-hit-zone frequency-hopping sequences based on m-sequences[J]. Cryptography and Communications, 2017, 14(4): 358-361.

[13] 许成谦, 曹琦. 时频二维低/无碰撞区跳频序列集构造[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 898-903.
XU Chengqian, CAO Qi. Construction of frequency hopping sequence set with time-frequency two-dimensional low orno hit zone[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(4): 898-903.

[14] 张笑宇, 冯永新, 钱博. 一种基于RS编码的NHZ跳频序列构造方法[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(3): 98-102.
ZHANG Xiao, FENG Yongxin, QIAN Bo. The no-hit-zone design method of frequency hopping sequence based on RS encoding[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(3): 98-102.

[15] 罗翔, 周三文, 焦东立, 等. 一种基于RS码的宽间隔跳频序列生成方法[J]. 遥测遥控, 2015, 36(1): 24-29.
LUO Xiang, ZHOU Sanwen, JIAO Dongli, et al. A method of the generation of wide interval FH sequences based on RS code[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(1): 24-29.

[16] ZHAO Yadong, ZHANG Yu, SONG Jian, et al. Design of wide interval frequency hopping pattern for frequency hopping mobile ad-hoc networks[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1584(1): 012037.

[17] 彭代渊, 韩鸿宇. 无碰撞区跳频/时序列理论界与设计[J]. 成都信息工程学院学报, 2015, 30(1): 1-6.
PENG Daiyuan, HAN Hongyu. Frequency/time hopping sequences with no hit zone: bounds and designs[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2015, 30(1): 1-6.

[作者简介]

王乐童　2000年生，硕士研究生。

付林罡　1982年生，硕士，研究员。

闫朝星　1985年生，博士，研究员。

崔学荣　1979年生，博士，教授。

(本文编辑：傅　杰)