

# 一种降低新型 OFDM 数据链误码率的方法\*

苏宇航, 陈朝, 翟 郢, 竟诗琦

(中国地质大学(武汉) 机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 针对空地雷达数据链可靠性的问题, 基于单向耦合映像格子模型, 提出了基于 OCML 的新型 OFDM 数据链模型。上述模型通过利用 OCML 时空混沌序列对 CCSK 软扩频进行改进, 同时结合编码技术以及调制技术进行仿真。仿真分析显示, 基于 OCML 的新型 OFDM 数据链模型可以有效改善 CCSK 中伪随机序列由于自相关性差导致的可靠性差等问题, 显著提高系统误比特率性能, 且有效提高空地雷达数据链的可靠性。

**关键词:** 空地雷达数据链; RS 编码; CCSK 软扩频; 单向耦合映像格子; OFDM

中图分类号: TN95

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200561

中文引用格式: 苏宇航, 陈朝, 翟郢, 等. 一种降低新型 OFDM 数据链误码率的方法[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 44-50.

英文引用格式: Su Yuhang, Chen Zhao, Zhai Nuo, et al. A way of decreasing the reliability of new OFDM data link[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(3): 44-50.

## A way of decreasing the reliability of new OFDM data link

Su Yuhang, Chen Zhao, Zhai Nuo, Jing Shiqi

(School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences Wuhan, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** A new OFDM data link model based on OCML is proposed to solve the problem of reliability of data link of air-to-ground radar. The above model uses OCML spatiotemporal chaotic sequence to improve CCSK soft spread spectrum, and simulates with coding and modulation techniques. Simulation analysis shows that the new OFDM data link model based on OCML can effectively improve the reliability of pseudorandom sequences in CCSK due to poor autocorrelation, significantly improve the bit error rate of the system and effectively improve the reliability of air-to-ground radar data chain.

**Key words:** air-ground radar data link; RS coding; CCSK; OCML; OFDM

### 0 引言

空地雷达数据链是飞机与陆地基站完成通信、确保飞机与基站能够准确、实时互相传递信息<sup>[1]</sup>的数据链路, 具有传输速率高、通信延时小等优点。数据链的发展使得现代战争的作战方式发生了非常大的改变<sup>[2]</sup>。但由于数据链信道非常复杂且具有多径衰落<sup>[3]</sup>, 同时传输速度快、工作的频段高<sup>[4]</sup>, 传输性能会受到战场复杂环境的影响, 阻碍其正常工作。因此, 提高空地雷达数据链的可靠性是本文的主要内容。

在目前所使用的提高数据链可靠性的方式中, 主要采用以扩频技术为主、非扩频技术加以辅助的方式。直序扩频和跳频是比较常用的扩频手段<sup>[5]</sup>, 可以降低干扰信号的频谱密度, 从而可以在接收端较为完整的恢复出原始信号, 但其相应的牺牲了数据传输速率<sup>[6]</sup>。

对于上述问题, 本文提出了一种基于 OCML 的新型 OFDM 数据链模型。因时空混沌的高复杂性、良好的安

全性能、大量的可用序列和良好的正交性<sup>[7]</sup>, 利用 OCML 序列作为 CCSK 软扩频中的扰码序列, 结合编码技术和调制技术, 从而提高空地雷达数据链的可靠性。

### 1 基本原理

#### 1.1 空地雷达数据链原理

该数据链体系主要由数据链处理器(Data Link Processor, DLP)、系统网络控制器(System Network Controller, SNC)、人机接口(Human Machine Interface, HMI)、链路级通信安全单元(Link Level COMSEC, LLC)、信号处理控制器(Signal Processing Controller, SPC)以及射频终端(Radio)构成。其中, 数据链处理器 DLP 主要工作在表示层, 提供给用户数据转换、格式化和语法选择等功能。除此之外, 因 SNC、LLC、SPC、Radio 这四部分作为联合战术无线电系统被封装, 因此本文的研究只针对与 DLP 模块展开。

#### 1.2 编码技术

##### 1.2.1 RS 编码技术

RS 编码(Reed-Solomon code, RS)的纠错原理是利用

\* 基金项目: 装备预研教育部联合基金项目(20180700501)

合适的生成多项式  $g(x)$  对每一个信息段  $d(x)$  进行运算, 使得通过  $d(x)$  运算获得的码字多项式  $c(x)$  必须能够被  $g(x)$  整除, 即  $c(x)/g(x)$  所得的余数必须为 0, 当结果不为 0 时, 则接收的码字一定有错误, 而且通过进一步计算可以得到可纠正的错误个数<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 交织编码技术

交织的实质就是将一路数据存入交织器中改变其排列顺序的操作。利用解交织还原原始数据, 在交织的过程中会用到交织器, 交织器其中一种结构为分组结构。数据按列依次写入交织器, 在发送时按行读取, 一次读取一行。这样就对原始的数据按照以  $m$  为周期进行分隔。在接收端与此过程相反。但由于交织器只有当完全接收到  $m \times n$  位数据后才开始解交织, 经过解交织后前一信道的突发错误将变为无记忆的、分散的随机错误和少量的连续错误——连续的 4 个和连续的 3 个错误就变成了随机差错, 因此每个交织器均存在恒定的延时。

### 1.3 CCSSK 软扩频

循环移位键控(Cyclic Code Shift Keying, CCSSK)是一种  $M$  进制的软扩频技术, 该技术的决定性要素是选取一个自相关性良好的序列当作其扩频的基序列  $S_0$ 。同时, 利用  $S_0$  以及其循环移位所得到的序列  $S_1, S_2, \dots, S_n$  作为不同的数据信息位, 该信息位也即将数据信息序列映射到循环移位的序列集中<sup>[9]</sup>。CCSK 表示  $(M, k)$  编码的软扩频信号, 其中,  $M$  表示扩频后信息码的长度,  $k$  位信息码表示着  $2^k$  个状态, 每  $k$  位信息码就需要有  $2^k$  个长度为  $M$  的伪随机序列一一对应。

### 1.4 OCML 时空混沌序列

在 OFDM 系统中, 为降低 PAPR 以及使子载波性能达到最好, 扰码和导频序列在 SLM 算法、多普勒频移估计值以及进行信道估计方面有显著影响。通常, 扰码序列应具有良好的时间自相关性和正交性, 以及容量大、安全性强、复杂度高等优点<sup>[10]</sup>。

时空混沌序列只由初始值和非线性映射决定, 且具有良好的正交性和自相关性、不变分布性、序列数量多等优点<sup>[11]</sup>。本文采用的单向耦合映像格子(One-way Coupled Map Lattice, OCML)模型是更高维的时空混沌, 其有最为简单的结构, 且它的格点间的相互作用具有方向性, 相邻格点间无相互影响。其序列复杂性和随机性高于其他序列, 具有计算的并行度高、计算效率快的优势<sup>[12]</sup>。具体定义如下:

$$x_{n+1}(i) = (1-\varepsilon)f(x_n(i)) + \varepsilon f(x_n(i-1)) \quad (1)$$

式中,  $n$  为离散的时间, 代表模型的演化代数;  $i$  是空间上的格点位置 ( $i \in 1, 2, \dots, L, L$  是 OCML 序列尺度);  $\varepsilon$  是耦合系数;  $x_n(i)$  是第  $i$  个格点在时刻  $n$  的状态;  $f(x) = 1 - ax^2$  是一维混沌映射,  $a$  为非线性强度<sup>[13]</sup>。

### 1.5 OFDM 调制原理

因为 OFDM 系统是将信息传输到若干个正交的子

载波上, 所以 OFDM 子载波频谱可以出现混叠现象, 在子载波是彼此正交的情况下, 就可以从彼此重叠的子载波上提取信息。同时, 多载波传输能够很好地抵抗频率选择性衰落, 拥有比较高的比特率, 是一种有效的调制技术<sup>[14]</sup>。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM)调制的本质是利用多个子载波将信道均分, 将初始信号通过子载波的调制, 对调制后的子信号求和后发送, 达到多个子载波并行传输的目的。各个子信号的频谱只有信号带宽的  $1/N$ 。同时也保证了在 OFDM 周期  $T$  内各子载波保持良好的正交性。用  $X_i$  表示子载波的符号数, 则经过调制后的 OFDM 频域序列为<sup>[15]</sup>:

$$X = \{X_i = a_i + b_i, i = 1, 2, \dots, N-1\} \quad (2)$$

其中,  $a, b$  为相正交的子载波。

为将该频域信号转换到时域, 利用 IFFT 变换进行处理, 当时间  $t = t_s$  时, OFDM 信号可以表示为:

$$s(t) = \begin{cases} \text{Re} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} X_i \text{rect} \left( t - t_s - \frac{T}{2} \right) e^{j2\pi \frac{i}{T} (t-t_s)} \right], & t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0, & t < t_s \text{ 或 } t > t_s + T \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $X$  为 OFDM 频域序列,  $T$  为周期。

## 2 模型搭建

### 2.1 编码模块

#### 2.1.1 RS 编码模块

为了验证本文选取的 RS(15, 11) 的编码可以提高数据传送的可靠性, 搭建了 RS 编码的 Simulink 模型, 对比了不同 RS 编码码率下, 其抗干扰能力随码率的变化情况如图 1 所示。

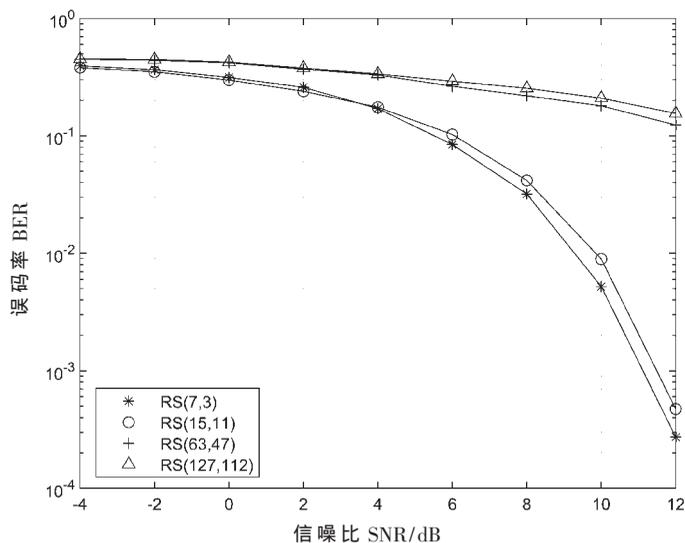


图 1 RS 各个码率下误码率随 SNR 变化图

从图 1 中可以看出, 当 RS 编码码率变小时, 其抗干扰能力就增强, 传输数据的可靠性就升高。但从传输的时效性分析, 当 RS 编码效率过低时, 其数据的传输效率

降低,从而影响作战中信息传递的时效性。因此综合考虑编码的可靠性以及传输的时效性,在本文中选用RS(15,11)的编码方式。

2.1.2 交织编码

经过RS编码后,首先消除了部分随机误码。但针对突发的码元错误,RS编码则无法检测并消除。因此,在RS编码之后引入了交织编码模块验证不同交织编码方式对数据传送的可靠性的影响,如图2所示。

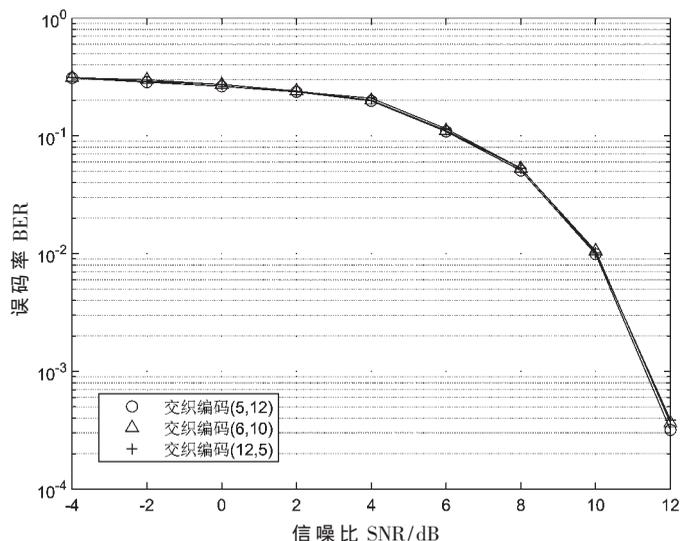


图2 不同交织编码方式对比

图2中可以看到,SNR为12dB,采用(5,12)交织编码方式的误码率为 $3.179 \times 10^{-4}$ ,采用(6,10)交织编码方式的误码率为 $3.633 \times 10^{-4}$ ,采用(12,5)交织编码方式的

误码率为 $3.864 \times 10^{-4}$ 。采用(5,12)交织编码方式对空地雷达数据链传输的可靠性略有提升。因此,在交织编码部分,选取行列交织数为(5,12)的编码方式,即将 $60 \times 1$ 的矩阵序列转换为 $5 \times 12$ 的矩阵序列。

2.2 CCSK软扩频

2.2.1 基于PN序列的CCSK软扩频

CCSK编码技术的决定性要素是选取一个自相关性良好的序列当作其扩频的基序列 $S_0$ 。

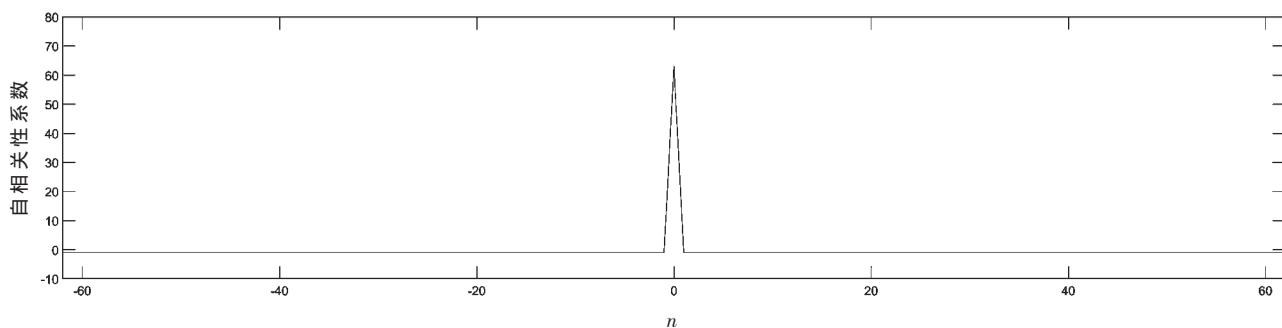
当PN序列长度为31时,将其进行二值化后,图3为其生成的相关性对比。

从图3中可以看出,其自相关性在 $n=0$ 的右侧才形成一个冲击,其互相关性多在零值上下,未趋近于0,因此PN序列的相关性较差,不能很好地满足CCSK对基序列相关性的要求。

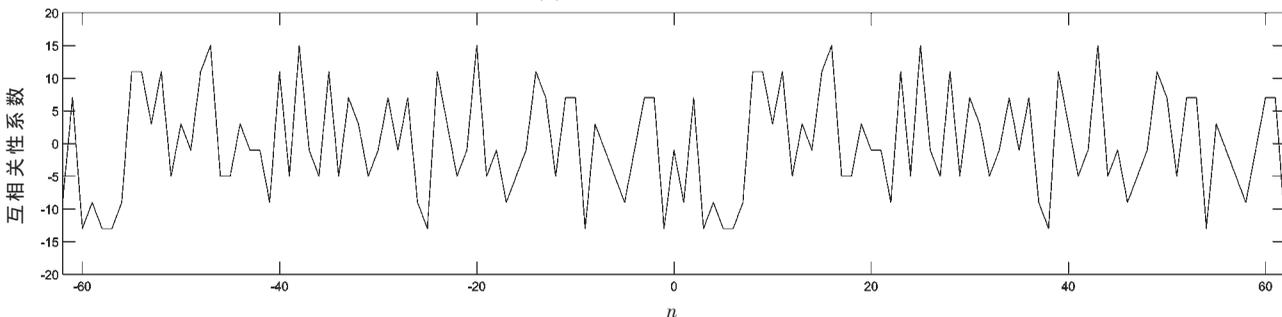
2.2.2 基于OCML的CCSK软扩频

因此本文提出了利用OCML时空混沌序列对CCSK扩频编码模块进行改进,从而改进PN的自相关性以及安全性。

选取OCML作为CCSK的基序列主要是由于OCML具有良好的自相关性。一般情况下,取 $f(x)=1-ax^2$ ( $a$ 为非线性强度),周期性边界条件由 $x_n(0)=x_n(L)$ 决定。为了保证Lyapunov指数大于0,使OCML模型能够进入完全混沌状态,所以仿真时取系统参数 $a=1.9$ , $\varepsilon=0.95$ , $N=256$ (迭代次数上限), $I=3000$ (每次点数上限),生成的矩阵在时间和空间上都是正交的。在MATLAB仿真平台上进行相应的实验,图4为OCML的时间自相关结果图和互相关结果图。



(a)PN序列的时间自相关图



(b)PN序列的时间互相关图

图3 PN序列相关性图

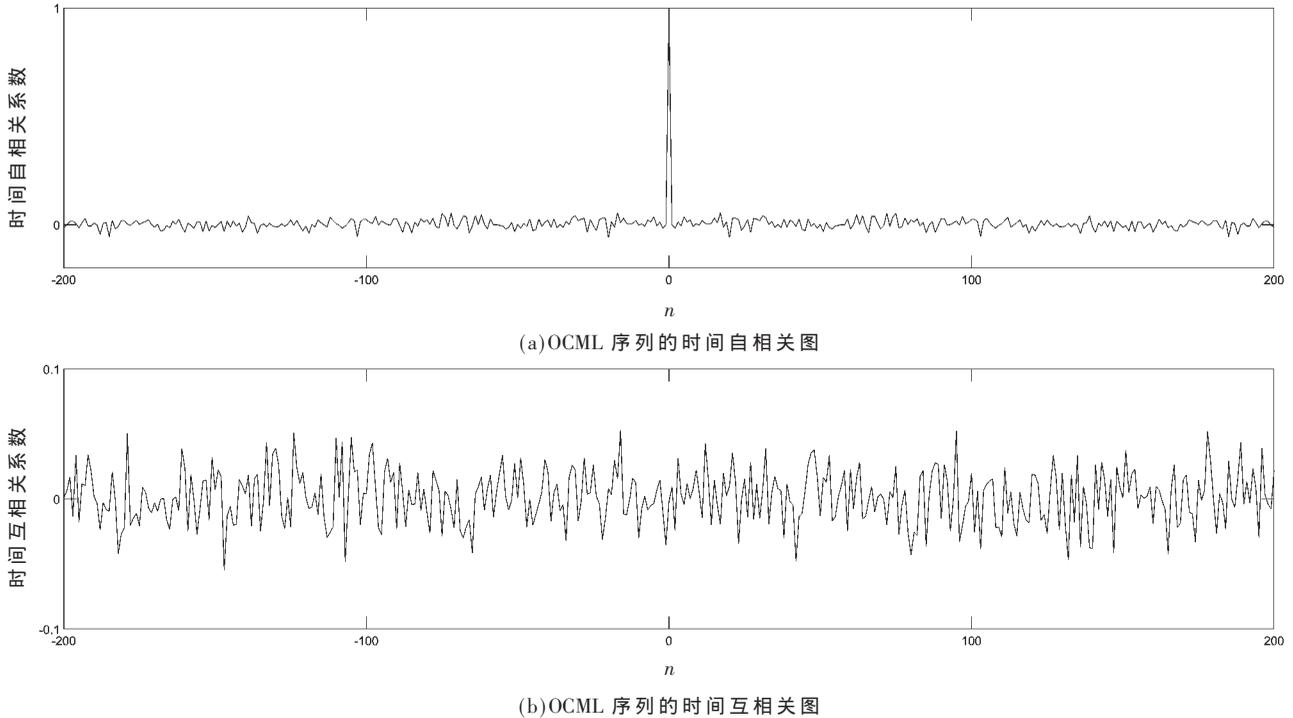


图 4 OCML 相关性结果图

从图 4 中可以看出, OCML 序列其自相关在  $n=0$  处是一个冲击, 其互相关均在 0 值附近, 由此可以说明 OCML 具有良好的时间自相关性。且每两个 OCML 是正交的, 具有良好的正交性。

时空混沌序列是状态连续的模拟序列, 不能直接在数字通信系统传输, 所以, 将模拟序列二值化是在应用里首先需解决的问题。对于由 OCML 系统产生的时空混沌序列, 概率密度分布不是均匀对称的, 使用均值法进行二值化会破坏 OCML 序列的伪随机性。因此, 利用 OCML 的不变分布性质进行二值化。取  $a=1.9, \varepsilon=0.95$ , 迭代 256 次, 根据 OCML 时空混沌序列的不变分布特性, 可以找到在概率分布为 0.5 时所对应的基准值  $x_e$ , 选取对应  $x_e$ , 将系统产生的 OCML 序列与其对比生成仅含  $\pm 1$  的序列。用  $b_i(k) (i=1, 2, \dots, L; k=1, 2, \dots, N)$  表示生成的二值化序列:

$$b_i(k) = \begin{cases} -1, & x_i(k) < x_e \\ 1, & x_i(k) \geq x_e \end{cases} \quad (4)$$

在式(4)中, 在  $\varepsilon$  和  $a$  确定的条件下, OCML 系统的不变分布是固定的, 且可以预先确定,  $x_e$  是一个确定的常数。OCML 系统每进行一次迭代, 将每个格点的状态值与  $x_e$  相比较, 大于等于  $x_e$  取 1, 小于  $x_e$  取 -1, 大于基准  $x_e$  和小于基准  $x_e$  的码元数相等, 得到的序列中 1 和 -1 的数目等同, 最后生成二值化后的 OCML 序列。

### 3 仿真性能分析

#### 3.1 基于 OCML 的新型 OFDM 数据链仿真模型

基于 OCML 的新型 OFDM 数据链仿真模型采用 MATLAB 下的 Simulink 进行建模, 采用的 MATLAB 版本为 2016(a)。在该模型中, 为了模拟现实环境中外界噪声干扰对传输信号的影响, 因此在该仿真模型中加入了瑞利衰落以及高斯白噪声对传输信号进行干扰。为了对比不同条件下对数据链传输误码率的影响, 在该仿真模型中加入了接收端的仿真模型。

图 5 为具体发送和接收数据链仿真整体模型。

该模型由编码、CCSK 软扩频、调制以及 OFDM 系统

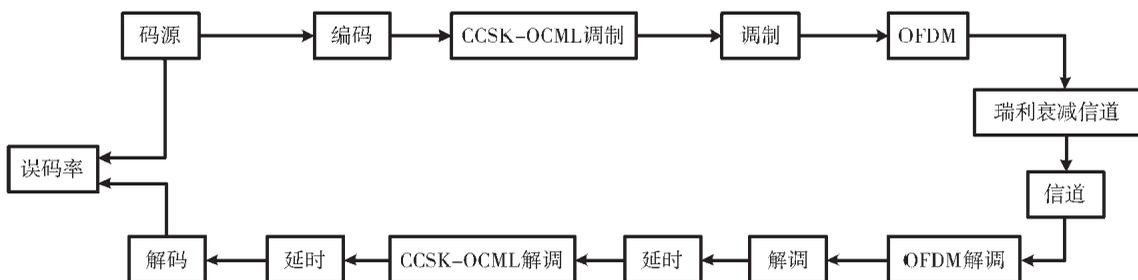


图 5 新型数据链仿真模型

组成。在CCSK软扩频模型中运用OCML对其进行了改进。该模型的仿真参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

参数名称	参数值
采样时间/s	0.01/44
采样数/bit	44
初始采样率/kHz	4.4
总码元数/bit	$8.8 \times 10^4$
仿真时间/s	20

### 3.2 编码模型优化性能分析

#### 3.2.1 RS编码优化性能分析

为了验证RS编码是否能够对空地雷达数据链传输的可靠性带来一定的提升,在相同信道,初始码元数44 bit,采样时间0.01/44 s,初始采样率4.4 kHz,仿真时间10 s,同时均经过QPSK调制方式的条件下,对比分析了采用RS(15,11)编码方式和未采用RS编码的误码率降低情况,如图6所示。

图6表明,随着SNR的上升,采用RS(15,11)编码方式和未采用RS编码方式其误码率都依次降低,但未使用RS编码方式降低幅度明显小于使用RS(15,11)编码;当SNR=12 dB时,采用RS(15,11)编码方式的误码率为 $6.13 \times 10^{-4}$ ,相比没有采用RS的误码率降低了 $1.94 \times 10^{-2}$ 。由此可以看出,采用RS编码方式对于改善数据链数据传输过程中出现的随机错码有十分明显的作用,利用RS编码可以作为数据链信号传输可靠性的基本保障。同时其传输速率也相应地提高了15/11。

#### 3.2.2 交织编码优化性能分析

为了验证交织编码对纠正突发码元错误的的能力,仿真参数设置在3.1节的基础上,对比了经RS编码后使用交织编码及不使用交织编码的误码率,此时仍使用RS(15,11)编码方式,交织编码采用(5,12)编码方式,二者对比图如图7所示。

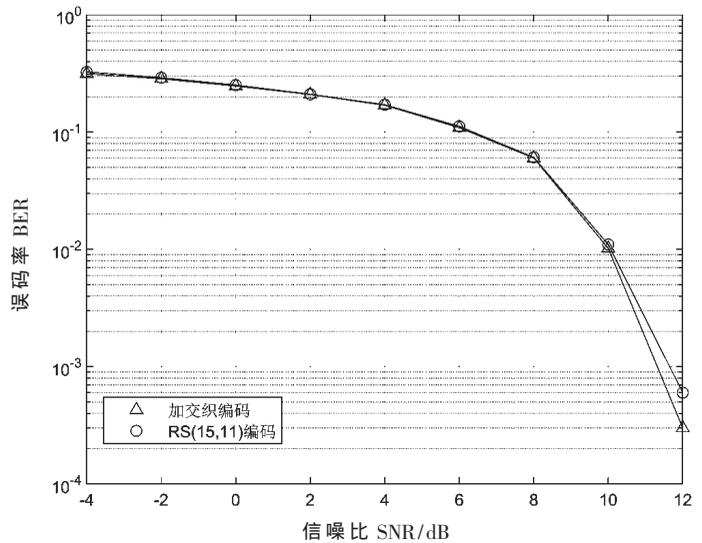


图7 采用交织及不采用交织对比图

从图7可以看出,当采用交织编码后,误码率的降低幅度大于未采用交织编码;当SNR达到7 dB之后,使用交织编码的误码率开始出现了明显的下降;当SNR等于12 dB时,相对于仅使用RS编码的误码率降低了 $3.18 \times 10^{-4}$ 。由此说明,在RS编码后再采用交织编码可以有效地纠正突发差错,确保信息传递的可靠性。

### 3.3 CCSK软扩频优化性能分析

为了对比利用OCML对CCSK的改进情况,搭建了Simulink模型进行仿真,得到了对CCSK改进前后其误码率随SNR的变化情况,图8给出了仿真结果。

由图8可知,利用OCML对CCSK进行改进后,其误码率有了一定程度的下降。当SNR=14 dB时,基于OCML的CCSK误码率达到了 $5 \times 10^{-3}$ ,而采用PN序列的CCSK其误码率在 $3 \times 10^{-2}$ 左右。由此可以看出,利用OCML混沌序列良好的自相关性能够一定程度降低数据链传输的误码,保证其传输的可靠性。

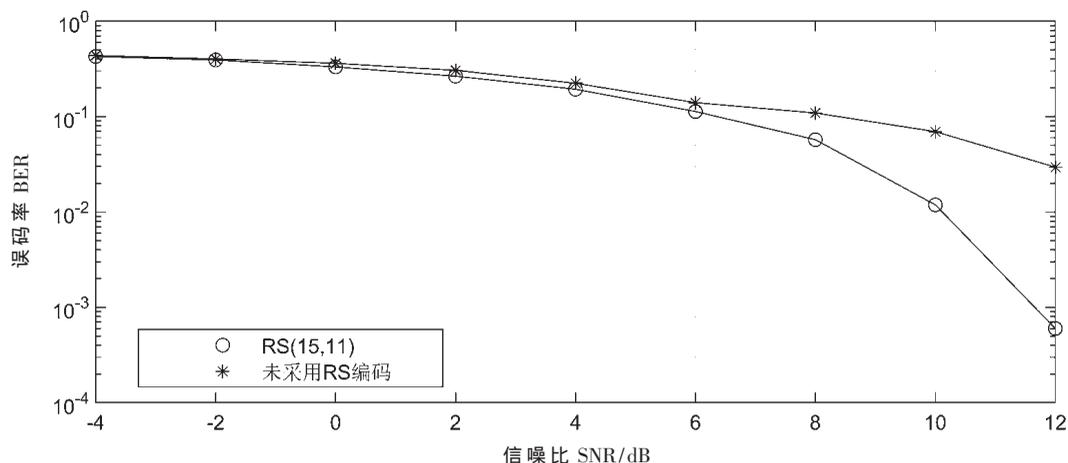


图6 RS编码与未经RS编码误码率对比

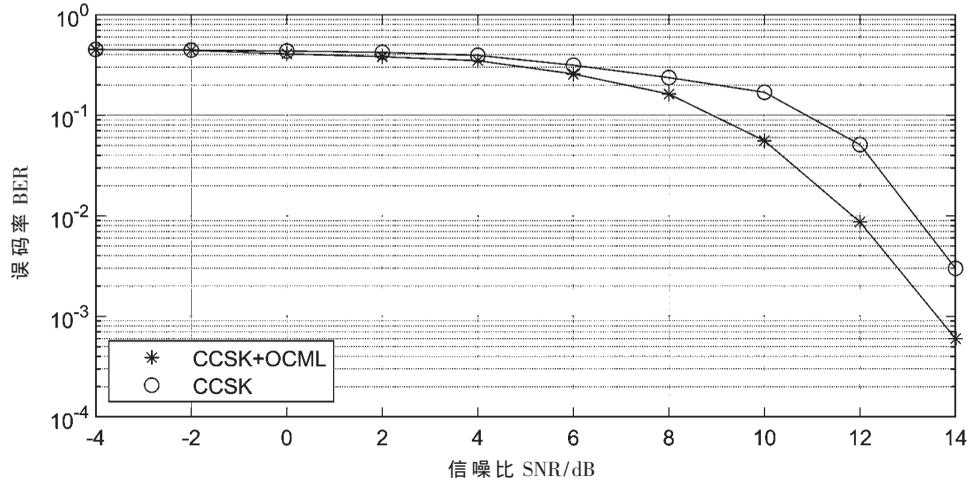


图8 基于 OCML 的 CCSK 误码率对比

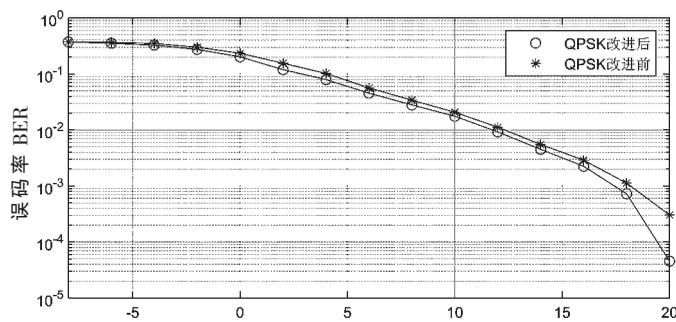
### 3.4 基于 OCML 的新型数据链模型性能优化分析

基于 OCML 的新型 OFDM 数据链模型主要利用了 OCML 时空混沌序列良好的自相关性以及其序列长度无限且复杂度高特性对 CCSK 软扩频技术进行改进,降低在粗同步时的误捕概率,提升了多条信息之间的抗干扰性,从而增强了数据链信息的可靠性。同时,该数据链工作在 HF 定频和 UHF 定频,在信道带宽受限或频率资源受限的条件下,结合了 OFDM 技术,实现了数据链高速传送大量数据的要求。为了验证基于 OCML 的新型 OFDM 数据链技术能够改善数据链传输的可靠性,通过仿真分别对比了 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 调制方式

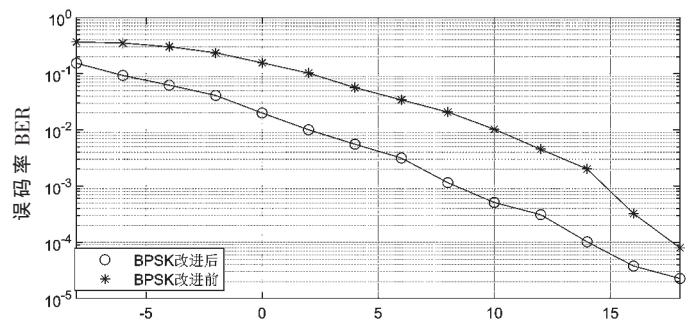
下,改进前数据链模型与改进后新型数据链模型误码率随 SNR 的变动对比,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 4 种调制方式下,基于 OCML 的新型 OFDM 数据链对误码率的改善都起到了很大的作用,随 SNR 的变大,误码率持续降低,且整体的降低幅度均大于改进前数据链模型。

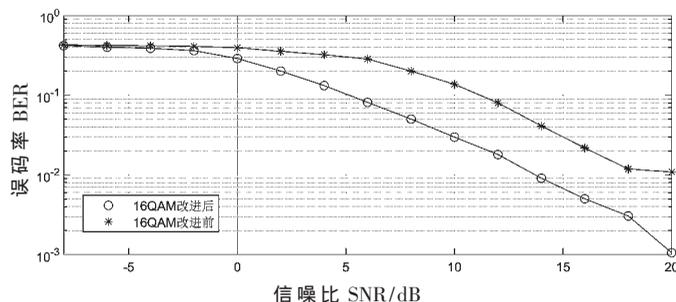
使用 BPSK 调制,在 SNR=18 dB 时,原始基础模型的误码率为  $7.954 \times 10^{-5}$ ,而采用改进后的数据链,误码率降低至  $2.273 \times 10^{-5}$ ,相较于原始误码率降低了  $5.681 \times 10^{-5}$ ;使用 QPSK 调制,在 SNR=20 dB 时,原始基础模型的误码率为  $3.037 \times 10^{-4}$ ,采用改进后的数据链,误码率降低至



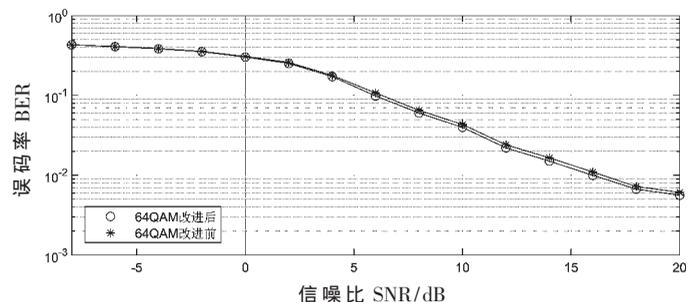
(a) QPSK 调制方式



(b) BPSK 调制方式



(c) 16QAM 调制方式



(d) 64QAM 调制方式

图9 模型改进前后误码率对比图

$4.545 \times 10^{-5}$ , 相较于原始模型误码率降低了  $2.5825 \times 10^{-4}$ ; 使用 16QAM 调制, 在 SNR=20 dB 时, 原始基础模型的误码率为  $1.098 \times 10^{-3}$ , 而采用改进后的数据链模型, 其误码率降低至  $1.057 \times 10^{-3}$ , 相比于原始模型误码率降低了  $9.923 \times 10^{-3}$ ; 使用 64QAM 调制, 在 SNR=20 dB 时, 原始基础模型的误码率为  $6.114 \times 10^{-3}$ , 而采用改进后的数据链模型, 其误码率降低至  $5.625 \times 10^{-3}$ , 相比于原始模型降低了  $0.498 \times 10^{-3}$ 。

#### 4 结论

本文给出了基于 OCML 的新型 OFDM 数据链模型。仿真结果表明, 利用 RS 编码相比于不采用其误码率会降低  $1.94 \times 10^{-2}$ , 在 RS 编码后采用交织编码能够消除突发错误, 误码率在该基础上又降低了  $3 \times 10^{-4}$ , 增强数据链传输的可靠性。同时, 使用改进后的软扩频模块误码率相较于原始模块能降低  $2.5 \times 10^{-3}$ , 能够增强数据链传输的抗干扰能力。最后在 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 4 种调制方式下对比改进前后模型, 仿真结果表明, 改进后模型均能提高空地雷达数据链的可靠性。

#### 参考文献

- [1] YANG Y, XIANG L L, HU Z H, et al. Modeling and simulation of air-to-air data link protocol for MAV swarm[C]. 2013 3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, 2013.
- [2] 陈强, 陈长兴, 陈婷, 等. 基于灰色层次分析法-BP 神经网络的数据链系统效能评估[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(3): 109-113, 116.
- [3] 刘冰, 石吉利, 宋祖勋. 空地数据链自适应编码调制方法研究[J]. 航空电子技术, 2011, 42(3): 17-21, 50.
- [4] 陈婷, 郑昱, 洪伟. 一种空地数据链通信系统的无线信道分析方法[J]. 火控雷达技术, 2019, 48(1): 89-92.
- [5] NIU X H, XING C P. New extension constructions of optimal frequency-hopping sequence sets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2019, 65(9): 5846-5855.
- [6] QIN X Z, QU F Z, ZHENG Y R. Circular superposition spread-spectrum transmission for multiple-input multiple-output underwater acoustic communications[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(8): 1385-1388.
- [7] 傅志坚. 时空混沌伪随机序列及其应用研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2005: 1-57.
- [8] MATEER T D. Simple algorithms for decoding systematic Reed-Solomon codes[J]. Designs Codes Cryptogr, 2013, 69(1): 107-121.
- [9] 王立雅, 周亮. CCSK 编码扩频技术及其应用[J]. 信息安全与通信保密, 2009(11): 51-54.
- [10] 孙玉花. 伪随机序列的性质及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [11] 洪婷, 陈朝, 刘子君. 时空混沌伪随机序列及其在 C/A 码中的应用[J]. 计算机仿真, 2014, 31(6): 225-229.
- [12] 李红燕, 杨万里. 时空混沌二值化方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(21): 65-69.
- [13] 李天龙, 贾振宏, 覃锡忠, 等. 降低 OFDM 系统峰均比的改进方法[J]. 通信技术, 2010, 43(12): 41-43.
- [14] ABBAS A S, MEHDI H A. A novel hybrid genetic algorithm to reduce the peak-to-average power ratio of OFDM signals[J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 80: 106498.
- [15] BIALER O, RAPHAELI D, WEISS A J. Unsynchronized OFDM network positioning in multipath[J]. Signal Processing, 2020, 168: 107344.

(收稿日期: 2020-06-28)

#### 作者简介:

苏宇航(1999-), 男, 本科, 主要研究方向: 混沌通信。

陈朝(1974-), 通信作者, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 无线通信, 信道编、译码, 混沌通信, E-mail: chenzhao217@126.com。

翟都(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 混沌通信。

(上接第 43 页)

ment of Data, 2020, 29: 93-104.

- [12] MADDEN S. Intel research lab at Berkeley[EB/OL]. (2006-11-xx)[2020-08-31]. http://db.lcs.mit.edu/labdata/labdata.html.
- [13] ZHANG Y, MERATNIA N, HAVINGA P. Outlier detection techniques for wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(2): 159-170.
- [14] ZHANG Y, MERATNIA N, HAVINGA P J M. Adaptive and online one-class support vector machine-based outlier detection techniques for wireless sensor networks[C]. International Conference on Advanced Information Networking &

Applications Workshops. IEEE, 2009.

- [15] RASSAM M A, ZAINAL A, MAAROF M A, et al. Advances of data anomaly detection research in wireless sensor networks: a survey and open issues[J]. Sensors(Basel), 2013, 13(8): 10087-10122.

(收稿日期: 2020-08-31)

#### 作者简介:

周万里(1990-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 软件工程、数据结构算法。

王子谦(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 计算机仿真、数据理论。

谢婉利(1993-), 通信作者, 女, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 软件工程、计算机应用, E-mail: sandieg0@qq.com。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所