

基于 Lorenz 混沌调频的水下正交波形集设计

田 晶¹, 陈 航^{1,2}, 唐镜治¹, 滕 舵^{1,2}

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072;

2. 水下信息处理与控制国家重点实验室, 陕西西安 710072)

摘要: 针对网络水下航行器组联合探测情况下各网络节点间信号会互相干扰的问题, 基于 Lorenz 混沌模型, 提出一种混沌调频(Chaos Frequency Modulation, CFM)的正交波形集设计方法。首先建立基于 Lorenz 序列的 CFM 信号模型, 对其进行相关特性分析和正交特性研究, 包括 CFM 正交波形集的个数和波形长度对波形集正交性能的影响, 提出对混沌序列进行加窗函数处理的 CFM 波形集正交性优化方法; 然后构造网络水下航行器组分别发射线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号和 CFM 信号的回波模型, 对比分析了匹配滤波器对回波信号的处理结果。仿真结果表明, 该设计方法简便、灵活、高效, 产生的 CFM 正交波形集性能良好, 且相对于常规信号在水下信号检测方面具有明显的优势。

关键词: 混沌序列; 频率调制; 正交波形集; 网络水下航行器

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-02-0116-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.004

Design of underwater orthogonal waveforms set based on Lorenz chaos frequency modulation

TIAN Jing¹, CHEN Hang^{1,2}, TANG Jing-zhi¹, TENG Duo^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. National key Lab of Underwater Information Processing and Control, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: A method based on Lorenz chaos frequency modulation is proposed to design orthogonal waveform sets for the joint detection of the network underwater vehicles where the interferences may exist between echo signals. First, the CFM (chaos frequency modulation) signal model based on Lorenz sequence is established, and its correlation properties and orthogonal performance are analyzed, including the effects of the number and the length of waveforms on the orthogonal performance. The optimization method of the CFM orthogonal waveforms by adding window function to the chaotic sequence is proposed. And then, the echo signal model based on the network group of underwater vehicle that transmits linear frequency modulation signal and CFM signal is structured, and the processing results of the echo signals by using matched filter are compared and analyzed. The simulation results indicate that the method is simple, flexible and efficient, producing a set of orthogonal waveforms with good performances, which has obvious advantage in underwater information detection.

Key words: chaos sequence; frequency modulation; orthogonal waveforms; network underwater vehicle

0 引言

网络水下航行器是一种高度信息化、网络化的航行器组群, 具有多输入多输出、位置分布式的特点。同时, 水声信道是一个极其复杂的随机时间-空间-频率参变信道, 可能受到窄带、高噪、多途、

强干扰和传输损耗等众多因素的制约。对于各网络水下航行器节点来说, 若是采用常规信号作为发射信号, 各节点的信号会形成相互干扰, 不仅降低了信噪比, 还使得目标检测能力变弱, 给信号处理造成极大的困难。这就要求各网络水下航行器节点间的发射信号必须具有正交性, 各节点发射通道相互独立, 以获得空间分集增益。因此, 基于水下网络航行器的正交波形集设计具有重要意义。

正交波形集需要具备两个条件, 一是具有良好的脉冲压缩性能, 即自相关函数近似于冲击函数, 二是波形间应具有尽量低的互相关性。由于混沌序列具有与冲击响应函数相类似的自相关函数, 并且相对于其他宽带平稳随机信号来说, 混沌序列的统

收稿日期: 2016-07-26; 修回日期: 2016-10-20

基金项目: 水下信息处理与控制国家重点实验室基金资助项目
(9140C230304140C23001)

作者简介: 田晶(1992-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为水下信号与信息处理。

通讯作者: 田晶, E-mail: 15339297372@163.com

计特性易于控制，较直接发射随机信号更为方便。当混沌信号类型、参数和初始值确定的时候，完全可以复制产生，为己方的信号处理提供了便利。因此，考虑设计以混沌序列为基础的正交波形集合。目前典型的混沌序列的产生可以通过选择离散混沌系统的映射算法：如 Logistic 映射、Bernoulli 映射、Tent 映射、Chebyshev 映射等；文献[1-4]采用了 Logistic 映射，文献[5]采用了 Tent 映射。由于离散系统参数少，产生机制简单，所以在一定程度上设计自由度小，生成的数字信号难以在物理上与模拟信号对应。因此，为了方便信号实现，本文采用经典的 Lorenz 连续混沌系统^[6]，提出基于 Lorenz 混沌序列调频的正交波形集设计方法。

1 Lorenz 混沌序列

Lorenz 系统的数学模型为^[7]：

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\delta x + \delta y \\ rx - y - xz \\ xy - bz \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)中： b 为几何因子； δ 为普朗特数； r 为瑞利数。 r_h 为霍普夫分岔常数，需满足条件：

$$r_h = \delta(\delta + b + 3) / (\delta - b - 1) \quad (2)$$

Lorenz 系统产生混沌的必要条件为：

$$\begin{cases} \delta > b + 1 \\ r > r_h \end{cases} \quad (3)$$

当参数 $\delta=10, r=28, b=3/8$ 时，系统进入混沌状态。图 1、图 2 分别给出了初值 x_0 相差 0.01 时的 Lorenz 相图和各分量 x, y, z 的对比图(图 2 中纵坐标为归一化值)。可以看出，Lorenz 混沌系统对于初值具有极端的敏感性；通过改变 Lorenz 系统初值 $[x_0, y_0, z_0]$ 即可快速产生不同的混沌序列。鉴于 Lorenz 混沌模型是三维的，因此这里仅选取 Lorenz 混沌系统的 x 分量，基于此进行 CFM 正交波形集设计。

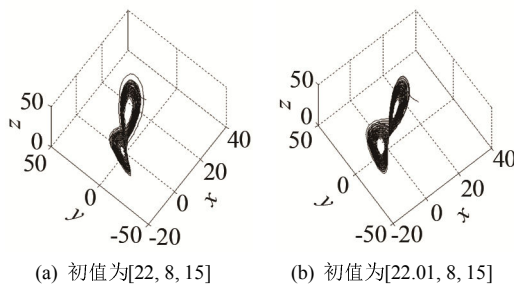


图 1 初值 x_0 相差 0.01 时 Lorenz 系统相图($\delta=10, r=28, b=3/8$)
Fig.1 The phase diagrams of Lorenz system with 0.01 difference of initial x_0 ($\delta=10, r=28, b=3/8$)

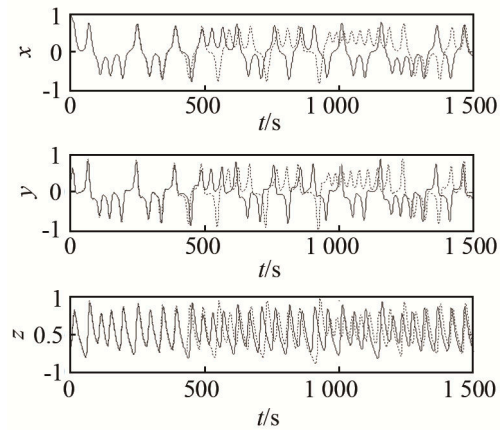


图 2 初值 x_0 相差 0.01 时 Lorenz 序列各分量对比图
($\delta=10, r=28, b=3/8$)
Fig.2 Components of Lorenz system with 0.01 difference of initial x_0 ($\delta=10, r=28, b=3/8$)

2 CFM 正交波形集设计

2.1 CFM 信号模型

一般频率调制信号可以表示为^[1]

$$S(t) = A \exp \left[j2\pi f_0 t + j2\pi K \int_0^t x(\tau) d\tau \right] \quad (4)$$

式(4)中： f_0 为载波频率； K 为调频系数； $x(\tau)$ 为调制信号。本文中 $x(\tau)$ 为 Lorenz 混沌序列产生的 x 分量的归一化序列，且 $x(\tau)$ 取值为 $[-1, 1]$ 。其复包络为

$$S(t) = A \exp \left[j2\pi K \int_0^t x(\tau) d\tau \right] \quad (5)$$

考虑到调频信号的相关性能主要与其复包络有关，因此，仅讨论其复包络部分，则式(5)的离散形式可表示为

$$S(n) = A \exp \left[j2\pi K \sum_{k=0}^n x(k) \Delta t \right] \quad (6)$$

式(6)中， $x(k) (k=0, 1, 2, \dots)$ 为调制信号的离散化采样， Δt 为采样间隔。

由式(4)可知，由于信号的瞬时频率为^[8]

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[2\pi f_0 t + 2\pi K \int_0^t x(\tau) d\tau \right] = f_0 + Kx(t) \quad (7)$$

根据采样定理，对基带信号进行采样，采样频率应满足：

$$f_s \geq 2Kx_{\max} = 2K \quad (8)$$

取采样频率为

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = 2K \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)，得到离散化 CFM 的复包络

为

$$S(n) = A \exp \left[j\pi \sum_{k=0}^n x(k) \right] \quad (10)$$

在得到混沌调频信号模型后, 任选几个初值不同的 Lorenz 混沌序列, 选取其 x 分量, 即可生成相应的 CFM 波形集, 作为网络水下航行器的发射波形。

2.2 CFM 信号特性分析

取初值分别为 [21.99, 8, 15]、[22, 8, 15]、[22.01, 8, 15] ($\delta=10, r=28, b=3/8$) 的 Lorenz 系统, 选取其 x 分量, 生成混沌序列 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 、 $x_3(n)$, 并将 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 、 $x_3(n)$ 分别代入式(10)得到基于 Lorenz 序列的 CFM 信号 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 、 $S_3(n)$ 。

根据模糊度函数的定义^[9]:

$$\chi(\tau, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t+\tau) \exp(j2\pi\varphi t) dt \quad (11)$$

式(11)中, τ 为时延; φ 为多普勒频移。则其离散形式为

$$\chi(\tau, \varphi) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-\tau} S(n) S^*(n+\tau) \exp(j2\pi\varphi n), & 0 \leq \tau < N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-\tau}^{N-1} S(n) S^*(n+\tau) \exp(j2\pi\varphi n), & -(N-1) \leq \tau < 0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可得, CFM 信号的自相关函数为

$$\chi(\tau, 0) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-\tau} S(n) S^*(n+\tau), & 0 \leq \tau < N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-\tau}^{N-1} S(n) S^*(n+\tau), & -(N-1) \leq \tau < 0 \end{cases} \quad (13)$$

CFM 信号的互相关函数为

$$\chi_{1,2}(\tau, 0) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-\tau} S_1(n) S_2^*(n+\tau), & 0 \leq \tau < N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=-\tau}^{N-1} S_1(n) S_2^*(n+\tau), & -(N-1) \leq \tau < 0 \end{cases} \quad (14)$$

图 3、图 4 中分别给出了基于 Lorenz 混沌序列的 CFM 信号的模糊度图和自相关函数, 可以看出, 基于 Lorenz 混沌序列的 CFM 波形具有近似图钉型的模糊度函数, 自相关函数具有尖锐的主瓣和较低的旁瓣。因此基于 Lorenz 混沌序列的 CFM 信号具有较好的距离分辨力, 是一种性能良好的脉冲压缩信号。

图 5 给出了基于 Lorenz 混沌序列的 CFM 信号的互相关函数。表 1 中主对角线为 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 、 $S_3(n)$ 的自相关函数旁瓣峰值, 其平均值为 -17.76

dB; 其他数据表示 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 、 $S_3(n)$ 两两之间的互相关峰值, 其平均值为 -18.38 dB。可以看出, CFM 信号波形集间的互相关系数比较低, 波形集之间的相关性比较弱, 满足准正交的特性, 因此基于 Lorenz 的 CFM 波形集具有很好的正交性能。

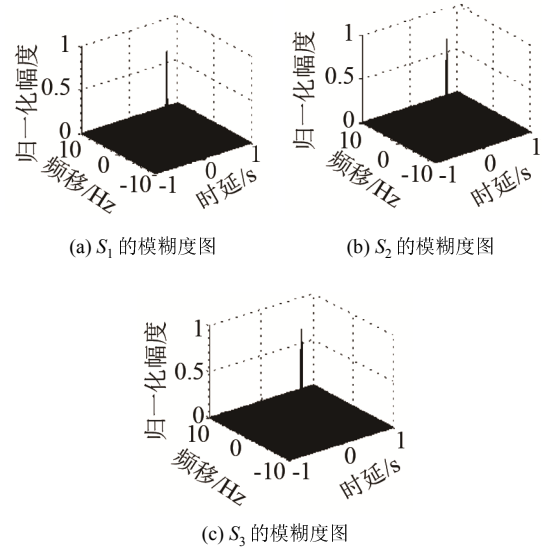


图 3 CFM 信号 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 和 $S_3(n)$ 的模糊度图
Fig.3 Ambiguity diagrams of CFM signals: $S_1(n)$, $S_2(n)$ and $S_3(n)$

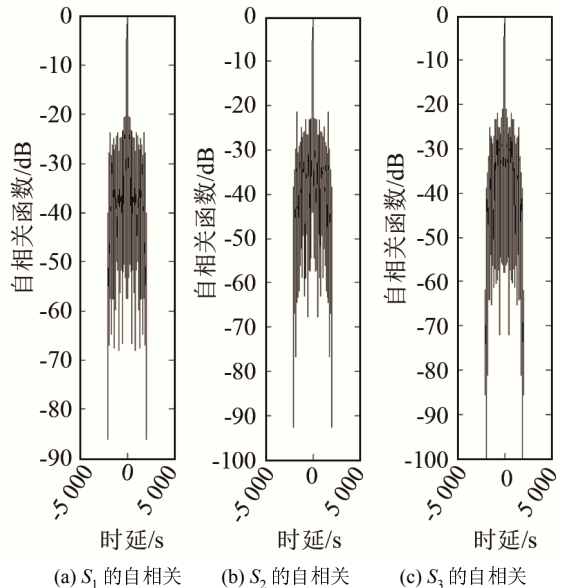
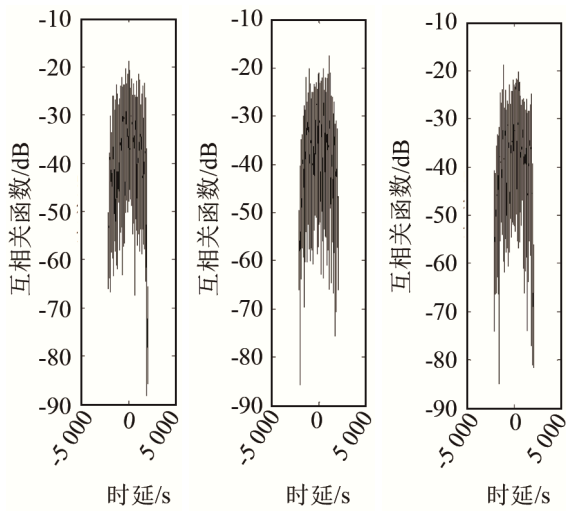


图 4 CFM 信号 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 和 $S_3(n)$ 的自相关特性
Fig.4 Auto-correlations of CFM signals: $S_1(n)$, $S_2(n)$ and $S_3(n)$

表 1 自相关旁瓣峰值和互相关峰值(单位: dB)
Table 1 Auto-correlation sidelobe peaks and cross-correlation peaks of CFM signals (in dB)

序号	$S_1(n)$	$S_2(n)$	$S_3(n)$
$S_1(n)$	-17.37	-18.69	-17.62
$S_2(n)$	-18.69	-18.12	-18.84
$S_3(n)$	-17.62	-18.84	-17.78



(a) S_1 和 S_2 的互相关 (b) S_1 和 S_3 的互相关 (c) S_2 和 S_3 的互相关

图 5 CFM 信号 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 和 $S_3(n)$ 的互相关特性

Fig.5 Cross-correlations of CFM signals: $S_1(n)$, $S_2(n)$ and $S_3(n)$

2.3 CFM 波形集个数和长度对波形集性能的影响分析

传统的利用随机寻优算法进行正交波形集设计时，正交波形集的性能会随着波形集中波形个数的增加而下降，降低了波形设计效率^[10]。图 6 给出了波形个数与波形集性能(平均自相关旁瓣峰值和平均互相关峰值)之间的关系曲线。由图 6 可以看出，波形集的性能没有明显变化，因此基于 Lorenz 序列的 CFM 正交波形集设计方法可以设计任意数目的波形集，不影响系统的性能，且设计时间不会增加，提高了波形集的设计效率。

图 7 给出了波形长度与波形集性能(平均自相关旁瓣峰值和平均互相关峰值)之间的关系曲线，其中波形个数为 3。由图 7 可以看出，波形集的正交性能与波形长度有关，且长度越长，平均自相关旁瓣峰值和平均互相关峰值越低，波形集的正交性能越好。因此，在实际应用中，基于工程实践可行性

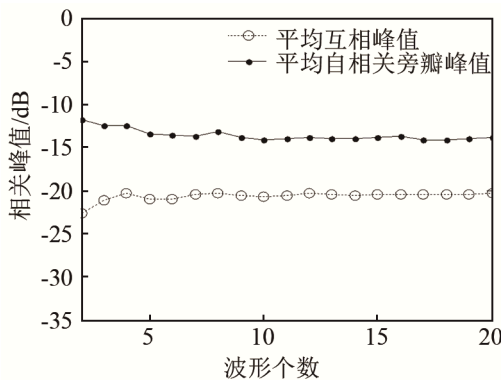


图 6 波形集个数与波形集性能曲线

Fig.6 Relation curves of waveform number vs. performance of waveform set

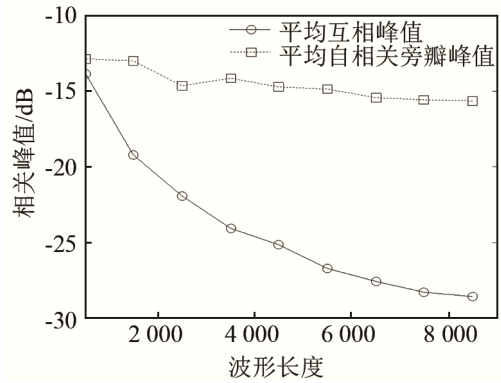


图 7 波形长度与波形集性能曲线

Fig.7 Relation curves of waveform length vs. performance of waveform set

的基础上，生成序列长度较大的波形集，以此保证波形集更好的正交性。

3 正交波形集的优化

利用混沌序列构成正交波形的方法简单易行，可实时产生正交波形集。在此基础上，还可从正交波形之间相关性的角度进行优化，进一步提高波形集的正交性能。本文中提出对混沌序列进行加 Kaiser 窗处理，然后采用混沌序列调制波形生成 CFM 信号，研究波形集之间的相关性能。

利用 Lorenz 混沌模型生成混沌序列 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ ，通过对 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 进行加 Kaiser 窗处理，得到混沌序列 $x'_1(k)$ 、 $x'_2(k)$ ，并将其代入式(10)，得到 CFM 信号 $S'_1(n)$ 、 $S'_2(n)$ ，图 8、图 9 分别给出了加 Kaiser 窗前后 $S_1(n)$ 、 $S'_1(n)$ 的自相关函数和 $S_1(n)$ 与 $S_2(n)$ 、 $S'_1(n)$ 与 $S'_2(n)$ 的互相关函数。可以

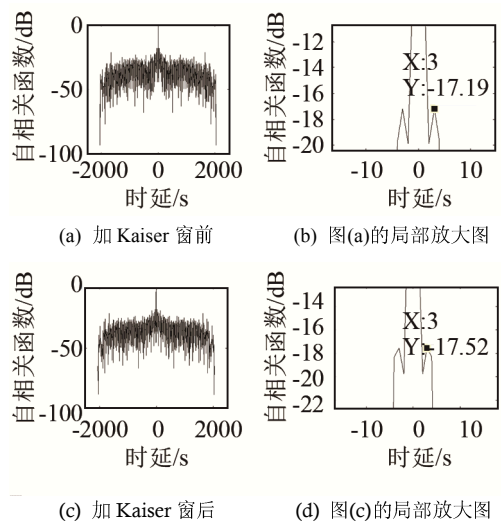


图 8 加 Kaiser 窗前后的 CFM 自相关函数对比

Fig.8 Auto-correlations of CFM signals with and without adding Kaiser window

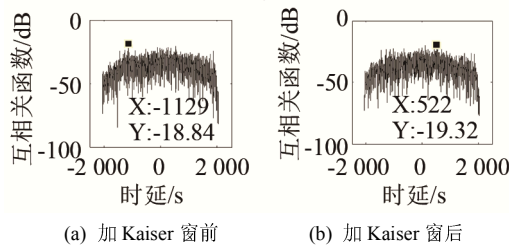


图 9 加 Kaiser 窗前后的 CFM 信号互相关函数对比
Fig.9 Cross-correlations of CFM signals with and without adding Kaiser window

看出，自相关旁瓣峰值从-17.19 dB 降低到-17.52 dB，互相关峰值从-18.84 dB 降低到-19.32 dB，波形集的正交性有一定的改善。因此在对波形进行混沌调频之前，可以先对 Lorenz 混沌序列进行加窗处理，以此降低 CFM 波形的自相关峰值旁瓣和互相关峰值，使信号的正交性能更好。

4 CFM 信号的检测性能研究

图 10 给出了网络水下航行器多节点探测的模型，假设有 3 个探测器，分别发射信号 S_1 、 S_2 、 S_3 ，由于回波信号间的串扰，对于每个探测器的接收机来说，都可以接收到三个发射信号经过目标反射后的回波。本文主要对比分析了当探测器分别发射 CFM 信号和 LFM 信号时，探测器对于本机接收到的回波信号的处理以及后续的检测性能，观察探测器能否正确识别本机所发射的信号对应的回波并进行后续的信号检测与处理，以此说明将 CFM 作为发射信号时的优势。图 11 给出了正交混沌波形集检测框图^[2]，图中 CFM 正交波形由发射端发出后，目标回波在接收时进行自相关、互相关匹配滤波，接收端信号则与发射端一一对应，避免信号波形相互干扰。

探测器 1 与目标的距离 $r_1=1\ 000\text{ m}$ ，探测器 2 与目标的距离 $r_2=800\text{ m}$ ，探测器 3 与目标的距离 $r_3=500\text{ m}$ 。信号载波频率 $f_0=10\text{ kHz}$ ，采样频率

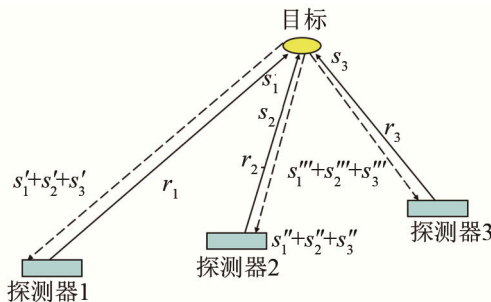


图 10 探测器发射信号、接收回波模型
Fig.10 The detector model for transmitting signal and receiving echo

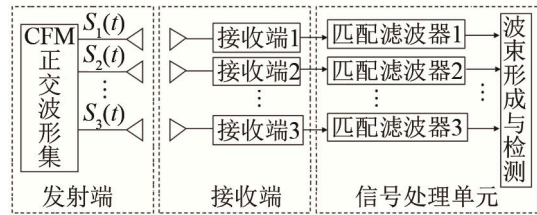
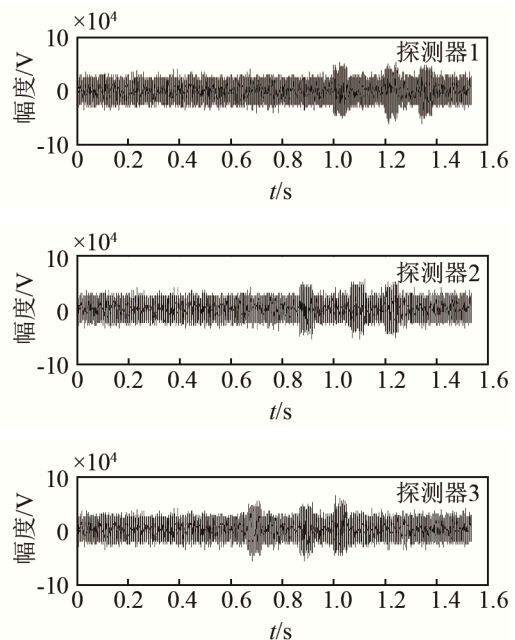


图 11 正交混沌波形集检测框图
Fig.11 The block diagram of chaotic orthogonal waveform set detection system

$f_s=40\text{ kHz}$ 。信号采样点数 $N=2\ 048$ ，信号时宽 $T=51.2\text{ ms}$ 。LFM 信号的带宽为 $BW=2\text{ kHz}$ ，调频系数 $K=0.98$ 。基于 Lorenz 序列的 CFM 正交波形集选用的 Lorenz 混沌序列的初值分别为 $[21.99,8,15]$ 、 $[22,8,15]$ 、 $[22.01,8,15]$ ，控制参数为 $\delta=10$ ， $r=28$ ， $b=3/8$ 。假设背景环境是均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声，信噪比 $SNR=5\text{ dB}$ ，三个探测器同时发射信号。

图 12(a)、12(b)分别给出了发射 CFM 信号时探测器 1、探测器 2、探测器 3 接收到的回波信号和经过匹配滤波器处理后的输出结果。图 13(a)、图 13(b)分别给出了发射 LFM 信号时探测器 1、探测器 2、探测器 3 接收到的回波信号和经过匹配滤波器处理后的输出结果。可以看出，相对于 LFM 信号，将 CFM 信号作为发射信号时，由于 CFM 波形集的正交性，对回波作匹配滤波处理的过程中有效克服了回波信号间的串扰，信号处理器对目标的检测性能更好。



(a) 探测器接收到的回波信号

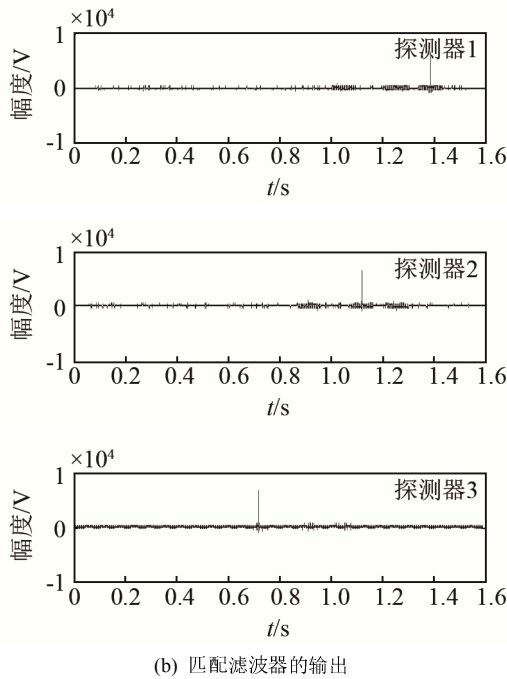
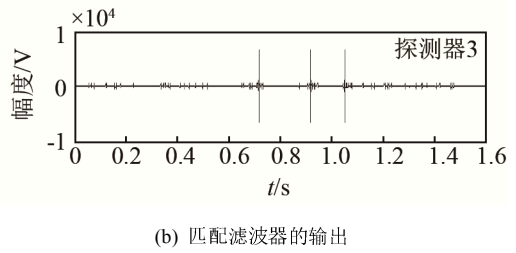
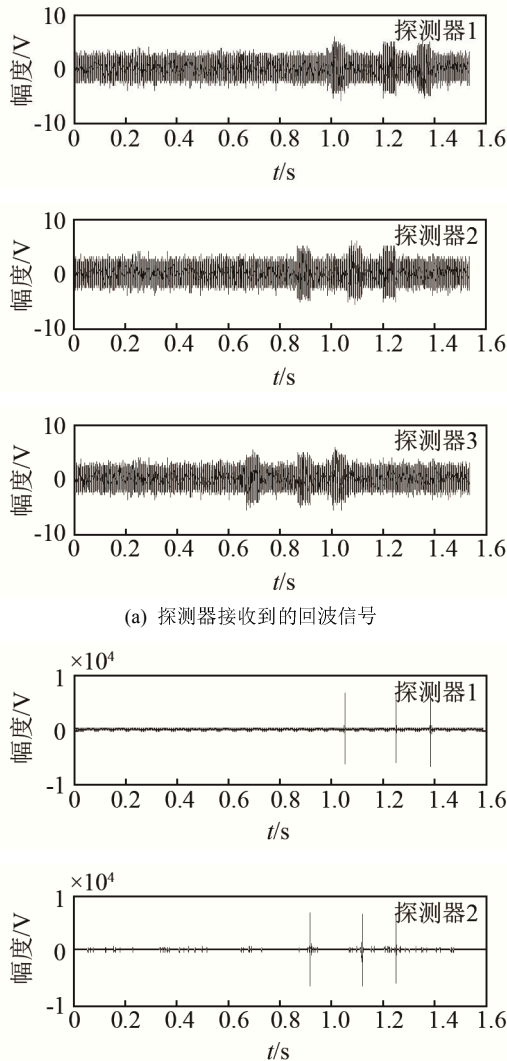
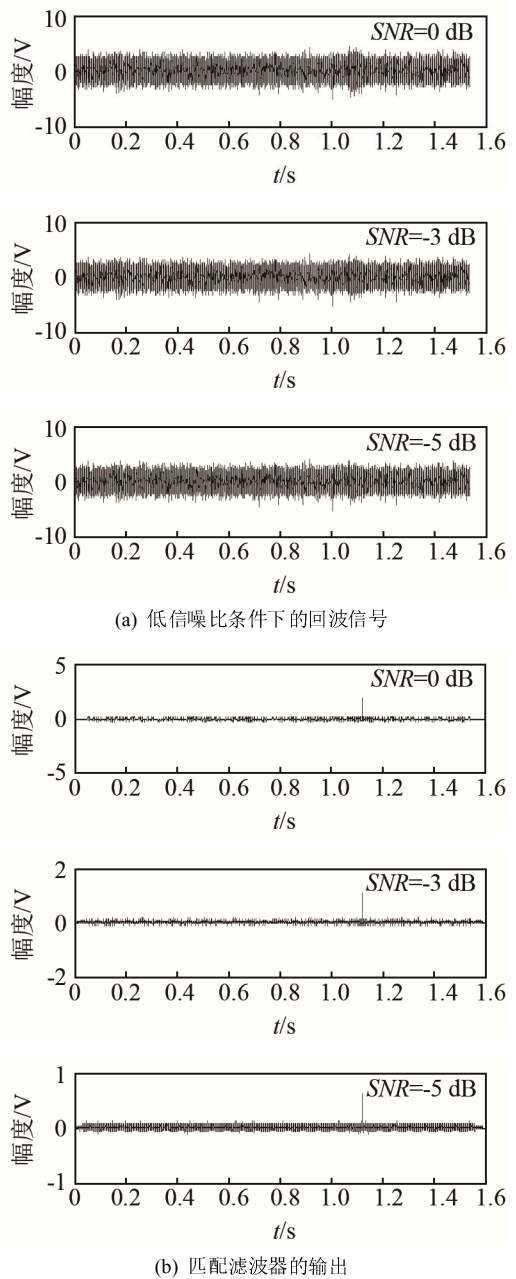


图 12 发射 CFM 信号时的回波检测性能
Fig.12 Echo detection performance for transmitting CFM signals



(b) 匹配滤波器的输出
图 13 发射 LFM 信号时的回波检测性能
Fig.13 Echo detection performance for transmitting LFM signals

图 14(a)、14(b)分别给出了发射 CFM 信号时探测器接收到的低信噪比条件下的回波和经过匹配



(a) 低信噪比条件下的回波信号
(b) 匹配滤波器的输出
图 14 低信噪比条件下 CFM 回波检测性能
Fig.14 CFM Echo detection performance under low signal to noise ratio

滤波器处理后的输出结果,其中,探测器与目标的距离为 800 m,CFM 信号选用 Lorenz 序列的初值为 [21.99, 8, 15],控制参数为 $\delta=10$ 、 $r=28$ 、 $b=3/8$,信噪比分别为 0、-3、-5 dB。可以看出,在低信噪比条件下,CFM 信号的检测能力突出,随着信噪比的降低,CFM 信号的检测性能有一定程度的降低,但并不影响对信号的检测能力,理论上可以截止到信噪比为-15 dB。

5 结 论

通过理论分析和计算机仿真可以看出,基于混沌序列的 CFM 正交波形集的设计方法是简便可行的。文中给出了基于 Lorenz 混沌序列的正交波形集的设计及特性研究,并提出了正交波形集的优化方法。最后,研究了 CFM 信号相对于常规 LFM 信号在检测方面的优势。仿真结果表明,利用 Lorenz 混沌系统产生的混沌序列能设计任意波形个数的正交波形集,设计灵活多变,算法简便高效。

参 考 文 献

- [1] 牛朝阳,李晓波. MIMO 雷达正交混沌调频波形集设计[J]. 信号处理, 2013, 29(3): 394-399.
NIU Zhaoyang, LI Xiaobo. Design of orthogonal waveforms set for mimo radar based on chaos frequency modulation[J]. Signal Processing, 2013, 29(3): 394-399.
- [2] 牛朝阳,张剑云. 混沌序列的 MIMO 雷达正交波形集设计[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 151-154.
NIU Zhaoyang, ZHANG Jianyun. Design of orthogonal waveforms set for mimo radar based on chaotic sequence[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(8): 151-154.
- [3] 孙明亮. 基于混沌信号的 MIMO 雷达波形设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 24-26.
SUN Mingliang. Research on methods of MIMO radar waveform design based on chaotic signals[D]. Changchun: University of Jilin, 2014: 24-26.
- [4] 王佳佳,谢亚楠,谭子苗. 混沌调频-调相 MIMO 雷达正交波形设计[J]. 应用科学学报, 2014, 32(6): 588-595.
WANG Jiajia, XIE Yanan, TAN Zimiao. Frequency-modulated and phase-modulated orthogonal waveform design for MIMO radar based on chaotic map[J]. APPLIED SCIENCE-Electronics and Information Engineering, 2014, 32(6): 588-595.
- [5] 周云,卢霞霞,于雪莲,等. 基于混沌的调频调相的多输入多输出雷达正交波形设计[J]. 计算机应用, 2015, 35(12): 3357-3361.
ZHOU Yun, LU Xiaxia, YU Xuelian, et al. Multiple input multiple output radar orthogonal waveform design of joint frequency-phase modulation based on chaos[J]. Computer Applications, 2015, 35(12): 3357-3361.
- [6] Lorenz E N. Deterministic non-periodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(2): 130-141.
- [7] 陈玉明. 基于 Lorenz 型系统的四维超混沌系统的复杂动力学研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 19-20.
CHEN Yuming. Research on complex dynamics of four-dimensional hyperchaotic systems based on Lorenz-type systems [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 19-20.
- [8] 李志舜. 鱼雷自导信号与信息处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 143-144.
LI Zhishun. Signal and Information processing of ho-ming torpedo[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004: 143-144.
- [9] 朱堃. 主动声呐检测信息原理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 76-77.
ZHU Ye. Active sonar detection information theory[M]. Beijing: Science Press, 2014: 76-77.
- [10] 刘波. MIMO 雷达正交波形设计及信号处理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007: 67-68.
LIU Bo. Research on generation of orthogonal waveform and signal processing for MIMO radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007: 67-68.