

文章编号:1001-893X(2012)09-1497-06

MIMO 雷达混沌相位编码信号设计与分析^{*}

孙成雨,付红卫,周国安,王 欣

(空军工程大学 导弹学院,陕西 三原 713800)

摘 要:传统的优化算法需要进行组合优化过程,存在算法复杂、耗时的问题,为此,设计了能够快速获得 MIMO(Multiple Input and Multiple Output)雷达正交相位编码信号的方法。基于混沌映射信号良好的相关特性和类随机特性,对 Henon 和 Logistic 混沌映射序列进行采样截取和二值量化得到二相码元,最后调制得到正交相位编码信号。仿真结果表明,利用这两种混沌映射序列可以快速获得符合条件的正交相位编码信号。

关键词:MIMO 雷达;相位编码;模拟退火算法;正交特性;模糊函数

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.016

Design and Analysis of Chaotic Phase Coded Signal for MIMO Radar

SUN Cheng-yu, FU Hong-wei, ZHOU Guo-an, WANG Xin

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: A fast method for orthogonal phase coded signals of MIMO(Multi-input Multi-output) radar is proposed to solve the problem that traditional optimization algorithms are complicated and time wasting because of combinatorial optimization. Based on chaotic map signals which get perfect property of correlation and randomness, binary phase codes are obtained by choosing and binarying sequences generated from Henon and Logistic map series. Then they are modulated to orthogonal phase coded signals. Simulation and analysis prove that it is fast to introduce Henon and Logistic map sequences into the design of appropriate orthogonal binary phase coded signals.

Key words: MIMO radar; phase encoding; simulated annealing algorithm; correlation function; ambiguity function

1 引 言

多输入多输出(MIMO)技术作为提高数据传输速率的重要手段,在通信领域受到广泛的关注。受 MIMO 通信、SIAR 雷达等技术的启发,学者提出了 MIMO 雷达概念^[1-2]。MIMO 雷达系统的发射端和接收端有多个天线,发射端通过发射相互正交的信号以形成宽波束,在接收端通过匹配滤波器恢复各个发射信号分量,再通过数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)来形成同时数字多波束,以覆盖发射波束所照射的区域。常用的正交发射信号有正交相位编码信号、离散频率编码信号、多载频信号等。

目前,正交相位编码信号是 MIMO 雷达研究中常用的波形,文献[3]在 MIMO 雷达中利用模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法设计出了一些有较好自相关和互相关特性的多相码序列,但是算法耗时,存在效率较低的问题。当天线数目、码元数目改变时,算法复杂度增加。混沌运动对初始条件具有极端敏感依赖性,给定不同的初值就可产生具有较好正交性的不同序列。本文利用 Henon 和 Logistic 混沌映射序列获得正交性优良的二相码元,与遗传算法相比较,降低设计算法的复杂性和运算时间。利用获得二相码元调制产生了符合 MIMO 雷达发射要求的正交二相编码信号,并对信号性能进行了

^{*} 收稿日期:2012-03-31;修回日期:2012-05-15

分析。

2 MIMO 雷达基本原理

2.1 MIMO 雷达信号模型

假设 MIMO 雷达有 N_T 个发射阵元和 N_R 个接收阵元,发射相互正交的波形。第 i 个阵元的发射信号为

$$x_i(t) = \text{Re}\{s_i(t)e^{j2\pi f_i t}\}, i = 1, 2, \dots, N_T \quad (1)$$

式中, $s_i(t)$ 为第 i 个发射信号的复包络, f_i 为第 i 个发射阵元发射信号的中心频率。

假设在位置 Q 处有一点目标,其角度参数向量为 Θ ,具有运动速度 v ,则第 $j(j = 1, 2, \dots, N_R)$ 个接收阵元接收到的信号可表示为

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^{N_T} \alpha_{i,j} \sqrt{\gamma_{i,j}(\Theta)} x_i(\gamma_{i,j}(\Theta)(t - \tau_{i,j}(Q))) + n_j(t) = \sum_{i=1}^{N_T} \alpha_{i,j} \sqrt{\gamma_{i,j}(\Theta)} s_i(\gamma_{i,j}(\Theta)(t - \tau_{i,j}(Q))) \cdot e^{j2\pi(f_i + f_{i,j}(\Theta))(t - \tau_{i,j}(Q))} + n_j(t) \quad (2)$$

式中, $n_j(t)$ 是加在第 j 个接收阵元上的背景噪声, $\alpha_{i,j}$ 为 (i, j) 发射接收通道的目标散射函数, $f_{i,j}(\Theta)$ 为目标运动引起的频移, $\tau_{i,j}(Q)$ 表示位于 Q 处的目标与第 i 个发射阵元和第 j 个接收阵元间的时延之和, $\gamma_{i,j}(\Theta)$ 为目标运动拉伸因子, $\gamma_{i,j}(\Theta) = 1 + f_{i,j}(\Theta)/f_i$ 。进行复解调后,接收信号为

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^{N_T} \alpha_{i,j} \sqrt{\gamma_{i,j}(\Theta)} s_i(\gamma_{i,j}(\Theta)(t - \tau_{i,j}(Q))) \cdot e^{j2\pi f_{i,j}(\Theta)t} + n_j(t) \quad (3)$$

根据模糊函数的定义可知,MIMO 雷达接收信号是由一系列发射信号的目标回波组成,每个接收机中都有 N_T 个匹配滤波器分别与每一个发射信号相对应,用 $\hat{i} = 1, 2, \dots, N_T$ 表示。这样在第 j 个接收端经过与第 i 个发射信号相匹配的滤波器输出省去噪声项得 MIMO 雷达的模糊函数^[6] $\chi(\Theta_1, \Theta_2)$ 为

$$\chi(\Theta_1, \Theta_2) = \left| \sum_{j=1}^{N_R} \sum_{\hat{i}=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} A e^{-j2\pi\tau_{i,j}(P_1)(f_i + f_{i,j}(\Theta_1))} \cdot e^{j2\pi\tau_{i,j}(Q_2)(f_i + f_{i,j}(\Theta_2))} \cdot \int s_i(\gamma_{i,j}(\Theta_1)(t - \tau_{i,j}(Q_1))) \cdot s_i^*(\gamma_{i,j}(\Theta_2)(t - \tau_{i,j}(Q_2))) \cdot e^{j2\pi(f_{i,j}(\Theta_1) - f_{i,j}(\Theta_2))t} dt \right|^2 \quad (4)$$

式中, $\hat{i} = 1, 2, \dots, N_T$ 表示匹配滤波器,也对应着 $i = 1, 2, \dots, N_T$ 个发射信号。 $f_{i,j}(\Theta)$ 为目标运动引起

的频移, $\gamma_{i,j}(\Theta)$ 为目标运动拉伸因子, $\gamma_{i,j}(\Theta) = 1 + f_{i,j}(\Theta)/f_i$, $\tau_{i,j}(Q)$ 表示位于 Q 处的目标与第 $\hat{i}$ 个发射阵元和第 j 个接收阵元间的时延之和。

2.2 MIMO 雷达信号正交性

MIMO 雷达向空间发射相互正交的信号,避免了传统雷达发射相干信号造成的通道之间的相互干扰,获得空间分集增益。两个信号相互正交即满足内积为零:

$$\int_0^T s_m(t) s_n^*(t) dt = 0 \quad (5)$$

MIMO 雷达在接收端采用匹配滤波器实现对目标的检测,如果匹配滤波器的输出结果中互相关或者自相关旁瓣峰值过高,将会产生虚假目标或者掩盖较弱的真实目标。MIMO 雷达正交信号的设计要求不同发射信号之间互相关峰值尽可能小,也就是

$$C(s_m, s_n, t) = \int_0^T s_m(t) s_n^*(t - \tau) dt \approx 0, m \neq n \quad (6)$$

3 MIMO 雷达二相编码信号设计

3.1 Henon 和 Logistic 混沌映射

(1) Henon 映射

该映射是天文学家 Henon 在研究球状星运团以及 Lorenz 吸引子得到启发,在 1976 年提出的一个二维非线性混沌系统,其数学表达式如下:

$$\begin{cases} x_{k+1} = 1 + y_k - ax_k^2 \\ y_{k+1} = bx_k \end{cases} \quad (7)$$

式中, a, b 是混沌控制参数。由文献[5]可知,当 $1.05 < a < 1.8, b = 0.3$ 时系统产生混沌现象。

(2) Logistic 映射

该映射由生物学家 R. May 于 1976 年提出,是一个简单又具有重要意义的非线性迭代方程。该系统在保密通信领域的应用十分广泛,其数学表达式为

$$x_{n+1} = \beta x_n(1 + x_n), \beta \in [0, 4], x \in [0, 1] \quad (8)$$

式中, β 被称为 Logistic 参数。研究表明,当 $3.569946 < \beta < 4$ 时,Logistic 映射进入混沌状态。

保持混沌映射系统的控制参数不变,在不同的初值下得到混沌序列的自相关特性和互相关特性如图 1~2 所示。图中说明混沌序列具有很好的自相关特性和互相关特性,符合 MIMO 雷达正交波形设计的要求。

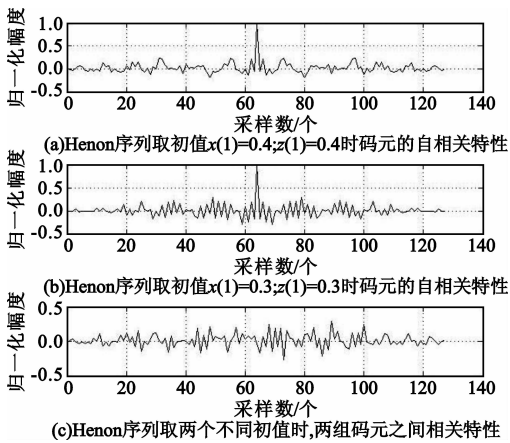


图 1 Henon 映射序列的相关特性

Fig.1 The correlation performance of sequences based on Henon map

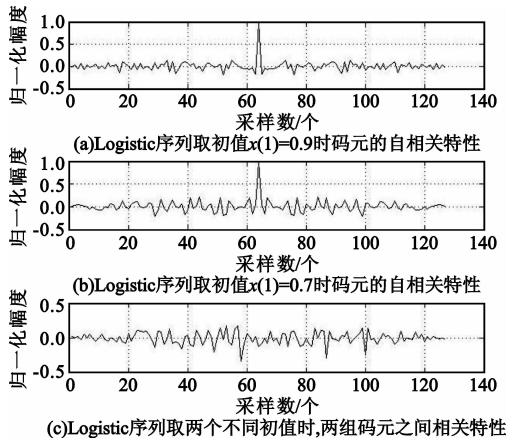


图 2 Logistic 映射序列的相关特性

Fig.2 The correlation performance of sequences based on Logistic map

3.2 信号设计

假设 MIMO 雷达系统的波形组由 N_T 个波形构成。每个波形由 L 个持续时为 Δ 的连续子脉冲构成相位编码信号,调相信号的一般表达式为

$$s(t) = a(t)e^{j\phi(t)}e^{j2\pi f_0 t} \tag{9}$$

其中信号复包络为

$$s(t) = a(t)e^{j\phi(t)} \tag{10}$$

在二相编码信号中,相位调制函数 $\phi(t)$ 只有 0 和 π 两个可能取值,也可用二进制序列 $\{c_k = e^{j\phi_k} = 1, -1\}$ 表示,则复包络可以写为

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{P-1} c_k v(t - kt), & 0 < t < PT \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{11}$$

式中, $v(t)$ 是子脉冲函数, T 为子脉冲宽度, P 为码长, Δ 为脉冲持续时间。

选取二相码的准则是:只考虑自相关特性

$$\max_{0 < m < P-1} \frac{|x_b(m)|}{p} = \min, x_b(m) \text{ 为自相关函数的所有副瓣幅度, } p \text{ 为主瓣幅度}^{[7-8]}。$$

获取二相码元的步骤如下。

- (1)在不同的初值条件下,利用混沌映射获得长度为 N 的混沌序列 x_n 。
- (2)对序列进行二值量化,得到长度为 N 的二相码序列。假设混沌序列均值为 E ,二值量化规则为

$$x_n = \begin{cases} 1, & x_n \geq E \\ -1, & x_n \leq E \end{cases}$$

- (3)对长度为 N 的混沌二相码序列进行 K 位采样截取,得到 $[N/K]$ (表示取不大于 N/K 的最大整数)个混沌二相码。
- (4)对每个混沌二相码进行自相关运算,求出 $[N/K]$ 个最大副主瓣比。

- (5)在最大副主瓣比中选出最小比值,对应的 K 位混沌二相码就是自相关特性最好的二相码元。

最后利用得到 K 位混沌二相码序列对载波相位进行调制,得到相位编码信号。

利用混沌映射获得长度为 $N = 10\ 000$ 的混沌序列,进行 64 位采样截取,并为了清楚地表示信号形式假设码元宽度 $5\ \mu\text{s}$,载波频率 $0.2\ \text{MHz}$,利用上文所述方法获得 64 位二相码元序列对载波进行调制,仿真得到相位编码信号如图 3 和图 4 所示。

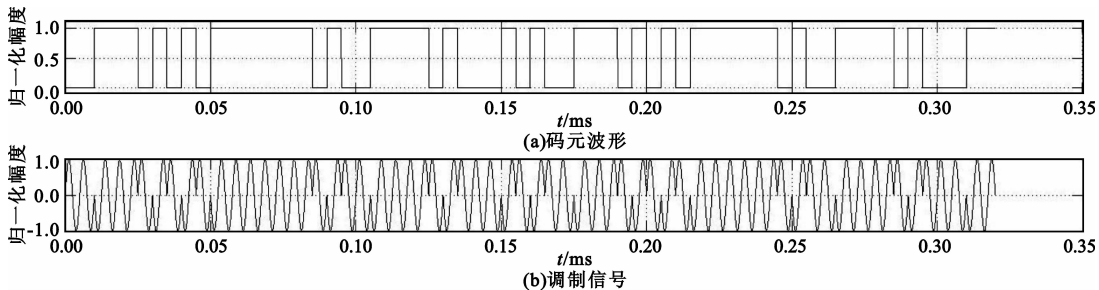


图 3 基于 Henon 映射的调相信号

Fig.3 Phase coded signal based on Henon map

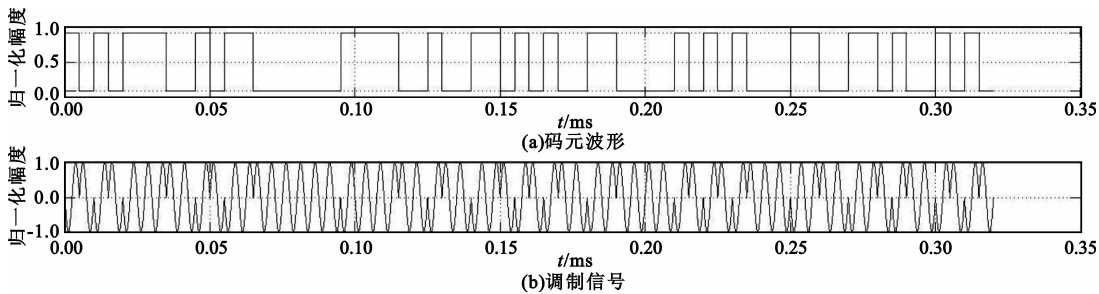


图 4 基于 Logistic 映射的调相信号
Fig.4 Phase coded signal based on Logistic map

在 MIMO 雷达中,发射信号的数量随着阵元数目的增加而增加,表 1 给出了采用不同方法在不同阵元数目时获得二相编码信号所用的时间,可以看出基于混沌序列的设计方法相比模拟退火算法减少了运算量。在集中式 MIMO 雷达中,发射阵元数目可能达到上千个,对应的发射信号数目较多,利用模拟退火算法设计波形耗时巨大,如果阵元数目改变,又需要重新设计,算法复杂度也相应增加。混沌序列具有初值敏感性,改变初值就能获得多组性能优良的码元,设计灵活。表 1 中利用 Logistic 序列的设计方法相比利用 Henon 序列的设计方法运算速度快,这是因为一维 Logistic 序列模型简单,而 Henon 序列模型是二维模型,运算时间较长。但是 Henon 映射具有很好的密码学特性,序列选择空间比较大。

表 1 不同设计方法所需运算时间

Table 1 Operation time taken by different measures

设计方法	所需运算时间/s				
	阵元数 32	阵元数 64	阵元数 128	阵元数 256	阵元数 512
模拟退火算法	5.46	9.14	10.19	12.54	14.36
基于 Henon 序列设计方法	4.16	5.35	6.21	7.16	8.65
基于 Logistic 序列设计方法	3.21	4.26	5.39	6.89	7.23

4 性能分析

4.1 二相编码信号相关特性

Henon 映射系统分别设置两个初值为 $x(1) = 0.4, y(1) = 0.4$ 以及 $x'(1) = 0.3, y'(1) = 0.3$ 。

Logistic 映射分别设置两个初值为: $x(1) = 0.9$ 以及 $x'(1) = 0.7$ 。利用上文所述的方法在不同初始值条件下获得相位编码信号,其相关特性如图 5 和

图 6 所示。从图中可以看出,基于混沌映射的相位编码信号波形在未经过寻优和旁瓣抑制的情况下就具有了类似白噪声的自相关和互相关特性,符合 MIMO 雷达正交波形设计的要求。针对 MIMO 雷达多发射天线的要求,改变不同的初值就可以获得具有良好正交性的码元序列,而且波形的设计方法比较简单,省去了复杂的寻优过程。

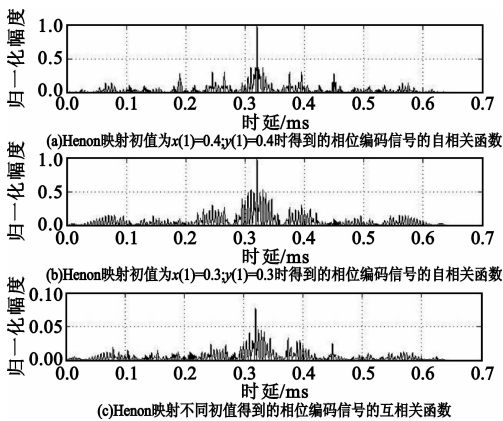


图 5 基于 Henon 映射相位编码信号的相关特性
Fig.5 The correlation performance of phase coded signal based on Henon map

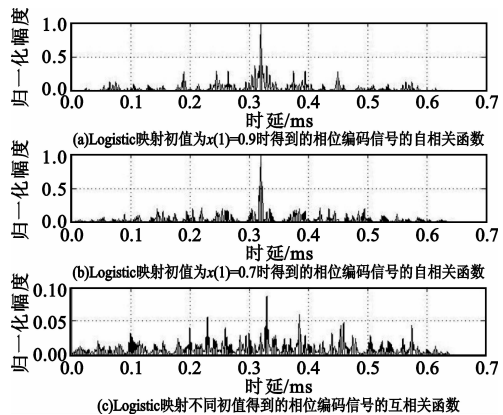


图 6 基于 Logistic 映射相位编码信号的相关特性
Fig.6 The correlation performance of phase coded signal based on Logistic map

4.2 不同参数设置比较

保持混沌映射的控制参数不变,设置不同的混沌映射迭代初值和不同长度的二相码元得到几组不同的二相编码信号,其自相关函数的主旁瓣比值如表 2 和表 3 所示。从表中可以看出,混沌序列对初始值的变化非常敏感,通过对初始值的微小变动并进行选择,就能够获得性能优良的混沌序列相位编码信号,以满足 MIMO 雷达多个正交发射波形的需求,而码元数目的不同也影响着相位编码信号的性能,随着采样码元数目的增多,信号的自相关函数的主旁瓣比增大,信号自相关特性越好。

表 2 基于 Henon 映射相位编码信号自相关函数主旁瓣比

Table 2 Peak-to-side lobe ratio of self-correlation function of phase coded signal based on Henon map

Henon 映射	主旁瓣比/dB			
	码元数 32	码元数 64	码元数 128	码元数 256
0.5,0.5	11.37	11.70	13.90	14.40
0.4,0.4	12.04	12.35	12.51	13.89
0.3,0.3	11.71	11.83	11.86	14.11
0.2,0.2	12.10	12.28	12.33	13.93
0.1,0.1	11.80	12.05	12.35	14.06

表 3 基于 Logistic 映射相位编码信号自相关函数主旁瓣比

Table 3 Peak-to-side lobe ratio of self-correlation function of phase coded signal based on Logistic map

Logistic 映射	主旁瓣比/dB			
	码元数 32	码元数 64	码元数 128	码元数 256
0.9	10.26	11.43	14.23	15.17
0.8	10.11	12.35	14.26	16.37
0.7	10.36	12.83	13.95	15.98
0.6	10.28	12.26	13.17	16.10
0.5	10.14	11.07	13.65	15.39

4.3 二相编码信号模糊函数

模糊函数是考察雷达距离分辨力和速度分辨力的重要方法,根据式(5)可以得到 MIMO 雷达的模糊函数,分别求初值为 $x(1)=0.4$ 、 $y(1)=0.4$ 的 Henon 映射和初值为 $x(1)=0.9$ 的 Logistic 映射对应的混沌相位编码信号的模糊函数如图 7 和图 8 所示。

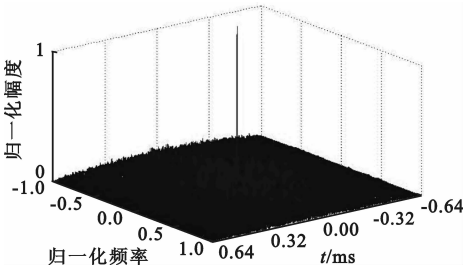


图 7 基于 Henon 映射的相位编码信号的模糊函数
Fig.7 The ambiguity function of phase coded signal based on Henon map

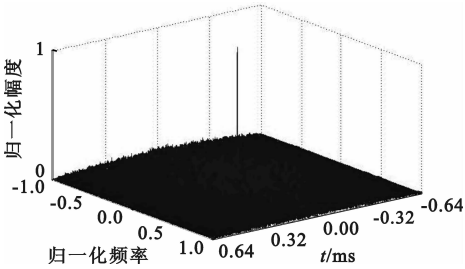


图 8 基于 Logistic 映射的相位编码信号的模糊函数
Fig.8 The ambiguity function of phase coded signal based on Logistic map

5 结束语

本文利用 Henon 和 Logistic 混沌序列,设计产生二相码元并调制产生了 MIMO 雷达正交二相编码信号,设计方法运算量比遗传算法明显减少,能够适应 MIMO 雷达天线数目的改变,具有较高的灵活性。仿真结果表明,获得的二相编码信号能够满足 MIMO 雷达正交发射波形性能要求。

参考文献:

[1] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]//Proceeding of the IEEE Radar Conference. Philadelphia: IEEE,2004:71 – 78.

[2] Hai Deng. Discrete Frequency Coding Wave form Design for Netted Radar Systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):179 – 182.

[3] 李梅. MIMO 雷达发射波形设计及信号处理研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.

LI Mei. Study on Transmit Waveform Design and Signal Processing for MIMO Radar[D]. Xi'an:Xidian University,2010. (in Chinese)

[4] 艾名舜,马红光,王令欢.混沌二相编码的雷达脉冲压缩信号[J].火控雷达技术,2007(36):26 – 29.

AI Ming-shun,MA Hong-guang,WANG Ling-huan. Chaotic Binary-phase Coded Radar Pulse Compression Signal [J]. Fire Control Radar Technology,2007,(36):26 – 29. (in Chinese)

- [5] 李恩,吴敏,熊永华.一种基于双混沌映射的加密算法设计与应用[J].计算机应用研究,2009,26(4):1512-1514.
LI En,WU Min,XIONG Yong-hua. Design and application of encryption algorithm based on double chaos map[J]. Application Research of Computers, 2009, 26 (4): 1512 - 1514. (in Chinese)
- [6] 杨明磊,陈伯孝,齐飞林,等.多载频 MIMO 雷达的模糊函数[J].系统工程与电子技术,2009,31(1):5-9.
YANG Ming-lei, CHEN Bo-xiao, QI Fei-lin, et al. Ambiguity functions of multiple-carrier frequency MIMO radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1): 5 - 9. (in Chinese)
- [7] 李冠章,武文,林云生,等.一类混二相码的获取方法[J].空军雷达学院学报,2002,16(3):40-42.
LI Guan-zhang, WU Wen, LIN Yun-sheng, et al. Acquisition Method of a Species of Chaotic Binary-phased Codes [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2002, 16(3): 40 - 42. (in Chinese)
- [8] Lindner J. Binary Sequences up to length 40 with best possible autocorrelation function[J]. Electronic Letters, 1975, 11(21): 507.

作者简介:

孙成雨(1989—),男,山东临沂人,2010年获学士学位,

现为硕士研究生,主要研究方向为雷达系统建模与仿真;

SUN Cheng-yu was born in Linyi, Shandong Province, in 1989. He received the B.S. degree in 2010. He is now a graduate student. His research concerns radar system modeling and simulation.

Email:chengyu0539@163.com

付红卫(1966—),男,陕西凤翔人,2000年获博士学位,现为副教授、硕士生导师,主要研究方向为超宽带技术;

FU Hong-wei was born in Fengxiang, Shaanxi Province, in 1966. He received the Ph.D. degree in 2000. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns UWB technique.

周国安(1965—),男,湖北襄樊人,1989年获硕士学位,现为教授、硕士生导师,主要研究方向为雷达系统建模与仿真;

ZHOU Guo-an was born in Xiangfan, Hubei Province, in 1966. He received the B.S. degree in 1989. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns radar system modeling and simulation.

王欣(1984—),男,山东菏泽人,2011年获博士学位,现为助教,主要研究方向为超宽带技术。

WANG Xin was born in Heze, Shandong Province, in 1984. He received the Ph.D. degree in 2011. He is now a teaching assistant. His research concerns UWB technique.