doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.12.003

引用格式:唐骏,张璘,袁江南.宽带随机混沌雷达高速目标速度估计与成像[J].电讯技术,2015,55(12):1324-1329.[TANG Jun,ZHANG Lin, YUAN Jiangnan. Velocity Estimation and Imaging of High-speed Targets for Wide-band Stochastic Chaotic Radar[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(12):1324-1329.]

宽带随机混沌雷达高速目标速度估计与成像*

唐 骏**,张 璘,袁江南

(厦门理工学院 通信工程系, 福建 厦门 361024)

摘 要:随机混沌具有真随机性、对初值敏感、易于产生和控制等特点,频率步进信号易于工程实现 和处理,结合两者的优势,提出了一种载频随机步进的随机混沌信号(RSCFSCS)模型,用于高速目标 的速度估计和距离维高分辨成像。首先,通过非周期函数激励非线性系统,产生不可预测的随机混 沌信号(SCS),经频率调制后用作基带子脉冲。同时,将 SCS 通过映射变换得到跳频编码(FHC),用 来决定调频脉冲串的载频步进。RSCFSCS 速度估计包括粗搜索和精搜索,粗搜索采用固定步长,保 证速度偏差小于速度分辨单元,而精搜索采用黄金分割搜索算法可得到精确的速度估计。最后,子 脉冲经相干合成形成宽带信号,实现高分辨距离成像。数值仿真表明提出的信号模型和处理算法性 能良好。

关键词:随机混沌信号;噪声雷达;高分辨成像;步进频;动目标;速度估计 中图分类号:TN958.6 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)12-1324-06

Velocity Estimation and Imaging of High-speed Targets for Wide-band Stochastic Chaotic Radar

TANG Jun, ZHANG Lin, YUAN Jiangnan

(Department of Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: A new radar signal, the randomly stepped carrier frequencies stochastic chaotic signal (RSCF-SCS), is proposed because of characteristics of stochastic chaos such as true random behavior, sensitivity to initial condition, accessibility for generation and control, and easy realization and processing for the stepped frequency signal. Firstly, excited by an aperiodic function, a nonlinear system generates unpredictable stochastic chaotic signal (SCS) to form baseband subpulse by frequency modulation. Meanwhile, SCS is transformed to frequency-hopping(FH) codes to determine carrier frequencies step. RSCFSCS is used for velocity estimation and high-resolution range imaging of high-speed moving targets. The velocity estimation includes a coarse search and a precise search, where the coarse search is conducted with a fixed step to make the velocity deviation less than the velocity resolution, while the precise search adopts the golden section search (GSS) algorithm to get an accurate estimation of velocity. Then the spectra are coherently synthesized to realize wide bandwidth and high-resolution range imaging. Finally, numerical simulations demonstrate a good performance of the proposed signal model and the processing algorithm.

Key words: stochastic chaotic signal; noise radar; high-resolution imaging; stepped frequency; moving target; velocity estimation

 ^{*} 收稿日期:2015-08-07;修回日期:2015-10-09 Received date:2015-08-07; Revised date:2015-10-09
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202013); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01670); 福建省教育厅资助项目(JA13235)
 Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61202013); The Natural Science Foundation of Fujian Province (2015J01670); The Fund of Educational Commission of Fujian Province(JA13235)

^{**} 通讯作者:xmtangjun@126.com Corresponding author:xmtangjun@126.com

1 引 言

频率步进雷达通常发射一组单频雷达信号,通 过频带合成处理方式实现距离高分辨,同时降低了 常规宽带信号工程实现上的困难^[1-4]。为克服顺序 频率步进信号距离-速度耦合、存在"栅瓣"等问题, 研究人员提出了步进 Chirp 信号(Stepped Frequency Chirp Signal, SFCS)^[5],但 SFCS 易受相干干扰影 响^[6]。为了进一步提高抗干扰能力,Chirp 信号被噪 声信号取代。然而,敌方干扰机仍然很容易检测到 线性递增/递减的载波频率并制造干扰,针对该问 题,文献[3]提出了随机频率步进信号。

从噪声雷达的研究来看^[7-9],真正的噪声信号 难于产生和控制,实际应用存在诸多困难。而混沌 信号具有类随机性、无周期、对初始条件极为敏感且 易于产生等特点,可以作为一种较为理想的随机雷 达信号使用。研究人员基于现有的混沌系统设计出 了性能优良的雷达波形^[10-15],但是,由于这些系统 根本上而言是确定性的,从而决定了混沌信号的内 在结构性和确定性,所设计的波形并不具有严格意 义的随机性。

综合混沌信号和频率步进雷达各自的特点和优势,本文提出一种基于随机混沌信号的随机频率步进雷达信号,以解决随机频率步进信号产生过程中"随机性"的问题。

2 随机混沌信号

文献[16]最先证明了

$$X_n = \sin^2(\theta \pi 2^n) \tag{1}$$

是 Logistic 映射 $X_{n+1} = 4X_n(1-X_n)$ 的通解, $X_n \in [0, 1]$, *n* 为自然数, θ 为非零的实数。之后陆续发现许 多混沌系统可以精确求解^[17]。这些混沌解可用如 下通式表示:

 $X_n = P(\theta T z^n)$ 。 (2) 式中, $P(\cdot)$ 是周期函数,周期为T, z为整数。由于 方程(2)描述的是一个确定性的过程,因此当z为整 数时,式(2)也是一个确定性的序列。然而,当z为 非整数时,情况变得有所不同^[18], X_n 将是不可预测 的真随机序列。

通过对式(2)产生随机行为的机理进行分析, 如果写成一般形式:

 $X_n = h(\theta_0 f(n)),$ (3) 则 f(n) 为指数函数, h(y) 为周期函数, 分别对应混 沌形成机理中的"拉伸"和"折回", θ_0 为初始参数。 将该思想推广到连续系统,可以构造形式上更为简 单的混沌信号:

$$X(t) = P(A\exp[Q(t)])_{\circ}$$
 (4)

式中,*P*(·)是周期函数,*A*为非零常数,*Q*(·)是伪周期函数,因此 *A*exp [*Q*(*t*)]满足有界非周期振荡,且在各振荡区间内具有有界的指数特性。

根据式(4),我们构造一个可以解析地求解 Lyapunov 指数的混沌函数:

$$X(t) = \Phi(t) \pmod{1} - 0.5$$
, (5)

$$Q(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) ,$$

$$P_i(t) = at - akT_i, kT_i \le t \le (k+1)T_i \circ \qquad (6)$$

式中, $\Phi(t) = \exp[Q(t)]$, k 为整数, 比值 T_2/T_1 、 T_3/T_2 、 T_3/T_1 是无理数,则 X(t)的 Lyapunov 指数理 论值为 $\lambda = \ln 3a_\circ$

为表述方便,X(t)记为 Stochastic Chaotic Signal (SCS)。

3 载频随机步进混沌信号模型

3.1 基带 SCFM 信号

由 SCS 经调频得到 SCFM 信号,并作为基带信号。SCFM 信号可表示为

$$g(t) = A \exp\left[\int_{0}^{t} X(\tau) \, \mathrm{d}\tau\right] \quad (7)$$

式中,A为调频指数。模糊函数是考查雷达信号的常用工具^[19]。g(t)的模糊函数定义为

$$\left|\chi(\tau,f_d)\right|^2 = \left|\int_{-\infty}^{\infty} g^*(t)g(t-\tau)\exp(-j2\pi f_d t)dt\right|^2$$
(8)

式中, 7为时延, f_d为多普勒频率。

设 CSFM 信号的持续时间(Time Duration, TD) 为 T_n,则多普勒分辨率为

$$\mathrm{d}f_d = \frac{1}{T_p},\tag{9}$$

速度分辨率为

$$\mathrm{d}v = \mathrm{d}f_d \cdot \frac{c}{2f_c} = \frac{c}{2f_c \cdot T_p} \circ \tag{10}$$

3.2 跳频编码

通过以下变换,将 SCS 序列的取值范围变换到 跳频编码 $c_n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$ 范围:

$$X_{n}^{*} = \left\lfloor \left(X_{n} + \frac{1}{2} \right) \times N \right\rfloor_{\circ}$$
(11)

式中, $\left[(X_n + \frac{1}{2}) \times N \right]$ 是等于或小于 $(X_n + \frac{1}{2}) \times N$ 的最大整数。由于 X_n^* 相邻的值存在强迭代相关性, • 1325 • 因此,我们从每 m 个样点中抽取一个形成新的序列,即

$$\hat{X}_{n} = X_{n*m}^{*}, n \in \left[0, \left\lfloor \frac{N}{m} \right\rfloor\right]_{\circ}$$
(12)

序列 \hat{X}_n 可能存在相同值,所以我们只抽取不同的值来生成跳频编码 c_n 。

3.3 发射信号

雷达发射信号由子脉冲串组成。设开始时载频 为 f_0 ,频率步长为 Δf ,则第n个子脉冲的载频为 $f_n = f_0 + c_n \Delta f$,其中 c_n 是跳频编码,N是一个脉冲包含的 子脉冲数目,每个子脉冲的带宽为B,所以合成带宽 $B_{syn} = (N-1) \cdot \Delta f + B_o$ 为了避免栅瓣,子脉冲带宽应 等于或大于频率步长。

图1是信号模型的结构,用数学方式表示如下:

$$s(t) = g_n(\hat{t}) \cdot \exp(j2\pi f_n t) \cdot \operatorname{rect}\left(\frac{t - nT_r}{T_p}\right),$$
$$\hat{t} = t - t_n, 0 \leq \hat{t} \leq T_p,$$
$$t_n = nT_r, n = 0, 1, \cdots, N - 1_{\circ}$$
(13)

式中, $g_n(\hat{t})$ 是第n个子脉冲信号, t_n 是第n个子脉 冲的起始时间, T_r 是子脉冲间隔, \hat{t} 是快时间, T_p 是 每个子脉冲的持续时间, $rect(\cdot)$ 是矩形窗。



图 1 载频随机步进宽带随机混沌信号 Fig. 1 Wide-band stochastic chaotic signal with randomly stepped carrier frequencies

3.4 回波信号

假设雷达到各目标(散射中心)的初始距离为 $R_k(k=1,2,...,K)$,且各目标有相同的匀速度 v_{\circ} 当 目标朝向雷达移动时的速度v为正,远离雷达移动 时为负。雷达接收到的基带回波信号为

$$s_{br}(t_n, \hat{t}) = \sum_{k=1}^{K} A_k g_n \left[\left(1 + \frac{2v}{c} \right) \hat{t} - \frac{2R_k}{c} + \frac{2vt_n}{c} \right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_n \left(\frac{2R_k}{c} - \frac{2v(t_n + \hat{t})}{c} \right) \right] \approx \sum_{k=1}^{K} \tilde{A}_k g_n \left[\hat{t} - \frac{2R_k}{c} + \frac{2vt_n}{c} \right] \cdot$$

$$\left(\frac{j4\pi f_n v t_n}{c}\right) \cdot \exp\left(\frac{j4\pi f_n v \hat{t}}{c}\right)_{\circ} \quad (14)$$

式中, $\tilde{A}_k = A_k \exp\left(\frac{-j4\pi f_n R_k}{c}\right)$,因为 $v \ll c$,所以忽略回波的尺度变化。将基带回波从时域变换到频域,即得

$$S_{\rm br}(t_n, f) = \sum_{k=1}^{K} \tilde{A}_k G_n(f - f_{dn}) \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f R_k}{c}\right) \cdot \exp\left[\frac{j4\pi (f + f_n) v t_n}{c}\right]_{\circ}$$
(15)

式中, $G_n(f) \neq g_n(\hat{t})$ 的频谱, $f_{dn} = \frac{2vf_n}{c} \neq \pi n$ 个载频 f_n 对应的多普勒频率, $\exp\left(\frac{-j4\pi fR_k}{c}\right)$ 是初始距离引 起的第 k 个目标的相位, $\exp\left(\frac{j4\pi fvt_n}{c}\right)$ 代表在第 n 个 子脉冲期间的距离走动, $\exp\left(\frac{j4\pi f_n vt_n}{c}\right)$ 是第 n 个子 脉冲引起的多普勒效应。

4 速度估计与宽带合成

目标运动的径向速度会导致一维距离像的走动 和失真,所以在对目标成像前要完成运动参数估计 及补偿。传统的步进频雷达目标速度估计方法,如 相位对消法、最大似然估计法、时域互相关法以及最 小熵法等^[20-21],或者运算量较大,或者抗噪性能差, 或者无法满足随机发射信号的要求。基于本文提出 的信号模型,高速移动目标高分辨距离成像算法分 两个步骤:一是子脉冲压缩和速度估计;二是根据所 估计的速度进行运动补偿,然后对各子脉冲进行相 干带宽合成。速度估计分两步完成:先基于 SCFM 信号的模糊函数特点进行粗搜索,以获得真实速度 的存在区间,然后采用黄金分割搜索(GSS)算法实 现速度的精估计。

4.1 子脉冲压缩与速度估计

假设参考速度和参数距离分别是 v_{ref}和 R_{ref}。与 方程(15)相似,基带参考信号的频域形式为

$$S_{\text{ref}}(t_n, f) = G_n(f - f_{dn_{\text{ref}}}) \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f R_{\text{ref}}}{c}\right) \cdot \exp\left[\frac{j4\pi (f + f_n) v_{\text{ref}} t_n}{c}\right]_{\circ}$$
(16)

式中,*f*_{dn_ref}是参考速度对应的多普勒频率。从而经匹配滤波后,子脉冲压缩的频域表示为

$$S(t_{n},f) = S_{br}(t_{n},f) \cdot S_{ref}^{*}(t_{n},f) = \sum_{k=1}^{K} \tilde{A}_{k} G_{n}(f-f_{dn}) \cdot G_{n}^{*}(f-f_{dn_{ref}}) \cdot$$

· 1326 ·

$$\exp\left[\frac{-j4\pi f\Delta R_{k}}{c}\right] \cdot \exp\left[\frac{j4\pi (f+f_{n})\Delta vt_{n}}{c}\right]_{\circ}$$
(17)

式中, $\Delta R_k = R_k - R_{ref}$, $\Delta v = v - v_{ref}$ 。此外,子脉冲压缩结 果的时域形式为

$$R_n = F^{-1} \{ S(t_n, f) \}_{\circ}$$
 (18)

4.1.1 速度粗搜索

我们知道,SCFM 信号的模糊函数的速度切面 是一个 sinc 函数。只有当目标速度和参考速度的 偏差小于速度分辨率时,子脉冲压缩后才会出现一 个明显的峰值。另外,对于 sinc 函数,当速度偏差 是 dv/2,其中 dv 是速度分辨率,脉压峰值正好下降 3 dB。因此,在粗搜索过程中,参考速度从0开始,以 固定步长 dv/4 增加,如此可以保证参考速度将不会 超过目标速度。同时,由于我们不知道目标的运动方 向,所以需要在朝向或远离雷达两个方向上搜索。

为了得到稳定的结果,我们对 N 个子脉冲的匹 配滤波结果进行平均得到 \overline{R}_{peak} 。将峰均比设为目 标函数,即峰值幅度 \overline{R}_{peak} 和平均幅度 \overline{R}_{mean} 的比值。 \overline{R}_{peak} 的门限可以根据 SCFM 信号的峰值旁瓣比 (Peak-sidelobe Ratio, PSLR)确定,单位为 dB。当

$$20 \times \log \left(\frac{\overline{R}_{\text{peak}}}{\overline{R}_{\text{mean}}} \right) > R_{\text{PSLR}},$$
 (19)

则认为速度的偏差小于速度分辨率,其中 R_{PSLR} 为比较门限,取值为-PSLR。当目标朝向雷达时,粗搜索之后的速度取值范围将是 $v_e \in (v-dv,v)$;当目标远离 雷达时,粗搜索后的速度取值范围将是 $v_e \in (v,v+dv)$ 。

4.1.2 精搜索

由于 sinc 函数的主瓣是一个凸函数,仅有一个 峰值,因此,我们可以采用简单的 GSS 算法来获得 精确的速度估计。黄金分割搜索是通过依次缩小极 值所在范围来寻找极值。GSS 算法步骤如下:

(1)设定初始速度。若粗搜索之后的速度为 正,即目标朝向雷达,初始速度设定为 $v_a = v_c, v_b = v_c + dv$;若粗搜索之后的速度为负,初始速度设定为 $v_a = v_c - dv, v_b = v_c$,转向步骤 2;

(2)选取 $x_1 = v_b - 0.618 \times (v_b - v_a), x_2 = x_a + 0.618 \times (v_b - v_a)$ 作为参数速度,然后计算 N 个子脉冲相应的 匹配滤波结果平均值,分别用参考速度 $v_{ref} = x_1, v_{ref} = x_2$ 计算出 $\bar{R}_{peak}(x_1)$ 和 $\bar{R}_{peak}(x_2)$,然后转向步骤 3;

(3)比较 $\overline{R}_{\text{peak}}(x_1)$ 和 $\overline{R}_{\text{peak}}(x_2)$,如果 $\overline{R}_{\text{peak}}(x_1)$ = $\overline{R}_{\text{peak}}(x_2)$,则意味着已经达到精确速度。在实际信 号处理中,由于回波中存在噪声,我们比较 $\left|\frac{\bar{R}_{peak}(x_1)}{\bar{R}_{peak}(x_2)}-1\right|$ 将设定一个很小的门限 ε ,如 0.0001。如果 $\left|\frac{\bar{R}_{peak}(x_1)}{\bar{R}_{peak}(x_2)}-1\right| < \varepsilon$,则转向步骤 5,否 则转向步骤 4;

(4) 如果 $\overline{R}_{\text{peak}}(x_1) < \overline{R}_{\text{peak}}(x_2)$,我们设 $v_a = v_a$, v_b = x_2 ;否则如果 $\overline{R}_{\text{peak}}(x_1) > \overline{R}_{\text{peak}}(x_2)$,我们设 $v_a = x_1$, v_b = v_b ,然后转向步骤 2;

(5)得到速度的精确估计值 $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$ 并停止 搜索。

4.2 带宽相干合成

在得到精确的速度估计之后,将它用于运动补 偿,然后相干合成整个脉冲中所有子脉冲的频谱形 成更宽的信号频谱,经傅里叶反变换,最后得到高分 辨的距离像。相干合成宽带频谱的表达式为

$$S_{\rm syn}(f) \approx \sum_{n=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} \tilde{A}_{k} |S(t_{n}, f - c_{n}\Delta f)|^{2} \cdot \exp\left\{\frac{-j4\pi \left[f - c_{n}\Delta f\right]\Delta R_{k}}{c}\right\}_{\circ}$$
(20)

合成带宽是(*N*−1) Δ*f*+*B*≈*N*Δ*f*,从而相应的距离分辨率也要比单个子脉冲信号的分辨率高约 *N*倍,因此高分辨距离像通过下式得到:

$$s(t) = \text{IFFT}\{S_{\text{syn}}(f)\}_{\circ}$$
(21)

5 高速目标速度估计与成像仿真

表1列出了高速移动目标高分辨一维成像的仿 真参数。

表1 高速运动目标高分辨距离成像参数

Table 1 Parameters for high-resolution range imaging of high-speed moving targets

	00	
参数名	参数值	
子脉冲持续时间 TD(T_p)/ μ s	10	
子脉冲间隔 $T_r/\mu s$	15	
子脉冲带宽 B/MHz	105	
起始载频 f_0 /GHz	30	
载频步进 Δf/MHz	100	
载频数量 N	20	
合成带宽/MHz	2005	
目标初始位置/m	[3688,3688.5,3698,3699]	
归一化 RCS	[1,1,1,1]	
速度/(m・s ⁻¹)	6300	
回波信噪比/dB	10	

粗搜索中的峰均比门限设为20dB,粗搜索步长

设为 dv/4≈121 m/s。每步进匹配滤波输出的峰均比 与参考速度如图 2 所示,当参考速度搜索至 6050 m/s 时停止粗搜索,对应的峰均比为23.15 dB。





速度精搜索及其结果如表 2 所示,最后得到精确的速度估计值为(6295.19+6305.49)/2=6300.34 m/s,相对误差仅 0.0054%。

表 2	速度精搜索步进及对应的结果
Table 2 Precise vel	ocity search steps and the corresponding result

	2	1	1 0
搜索步数	$v_a/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	$v_b/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	$rac{\overline{R}_{ ext{peak}}(x_1)}{\overline{R}_{ ext{mean}}(x_2)}$
1	6050.00	6534.00	0.105 07
2	6234.89	6534.00	0.950 34
3	6234.89	6419.74	0.963 52
4	6234.89	6349.13	0.962 37
5	6234.89	6305.49	1.102 57
6	6261.86	6305.49	1.107 43
7	6278.52	6305.49	1.104 63
8	6288.82	6305.49	1.093 61
9	6295.19	6305.49	1.000 03

在得到精确的速度估计之后,对移动目标进行 运动补偿。通过这种方法我们可以实现相干带宽合 成,合成的频谱如图3所示,其带宽约为2GHz。



合成宽带高分辨距离成像与单个子脉冲成像的 •1328 • 结果对比如图 4 所示。子脉冲的带宽为 105 MHz, 对应的距离分辨率为 1.5 m,而目标 1 和目标 2 之 间的距离是 0.5 m,目标 3 和目标 4 之间的距离是 1 m,即它们都小于单个子脉冲的距离分辨率。因 此,仅用单个子脉冲无法分辨目标 1 和 2,也无法分 辨目标 3 和 4。然而,在相干带宽合成之后,距离分 辨率达到 0.075 m,所以 4 个目标都可明显区分开。



Fig. 4 High-resolution range imaging result of four high-speed targets

6 结束语

本文提出了一种载频随机进步的随机混沌信号 脉冲模型,具备宽带雷达信号的优点,同时又克服了 工程实现困难的问题,可用来对高速移动目标进行 速度估计和高分辨距离成像。随机混沌信号具有完 全不可预测性,与噪声相比,易于产生和控制。载频 的随机步进由 SCS 决定。SCFM 信号作为基带噪声 信号,具有图钉形的模糊函数,因此距离和速度相互 独立,能够很好地同时对移动目标的距离和速度进 行估计。

基于载频随机步进的宽带随机混沌噪声信号, 我们提出了仅用单个子脉冲串来估计目标速度的搜 索算法。搜索包括粗搜索和精搜索,粗搜索用固定 的步长,使得速度偏差小于速度分辨率;精搜索采用 GSS 算法,该算法可以得到非常精确的速度估计。 在得到速度的精确估计之后,对移动目标进行运动 补偿,从而它们的回波可以相干合成,最后得到高分 辨距离像。仿真结果证明了信号模型和处理算法的 有效性。

参考文献:

[1] 毛二可,龙腾,韩月秋. 频率步进协达数字信号处理 [J]. 航空学报,2001,22(6):16-24.

> MAO Erke, LONG Teng, HAN Yueqiu. Digital signal processing of stepped frequency radar [J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(6):16-25. (in Chinese)

- [2] GILL G S. Step frequency waveform design and processing for detection of moving targets in clutter [C]//Proceedings of 1995 IEEE International Radar Conference. Alexandria, VA: IEEE, 1995:573-578.
- [3] 刘宏伟,沈福民,张守宏.随机序列步进频率信号及其处理[J].电子科学学刊,1999,21(3):343-348.
 LIU Hongwei,SHEN Fumin,ZHANG Shouhong. Random sequence stepped frequency signal and its processing[J]. Journal of Electronics,1999,21(3):343-384. (in Chinese)
- [4] 李鸣.毫米波频率步进雷达前端关键技术研究[D].南京:南京理工大学,2007.
 LI Ming. Key technique research on millimeter stepped frequency radar transmitter [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2007. (in Chinese)
- [5] LIU Z, Deng B, WEI X Z. Modified stepped-frequency train of LFM pulses [C]//Proceedings of 2008 International Conference on Information and Automation. Changsha: IEEE, 2008:1137-1141.
- [6] LEVANON N. Stepped-frequency pulse-train radar signal[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2002,149(6):297-309.
- [7] 刘国岁,顾红,苏卫民.随机信号雷达[M].北京:国防工业出版社,2005.
 LIU Guosui, GU Hong, SU Weimin. Random signal radar [M]. Beijing; Defense Industry Process, 2005. (in Chines)
- [8] AXELSSON S R J. Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(4): 890–904.
- [9] AXELSSON S R J. Noise radar using random phase and frequency modulation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11):2370-2384.
- [10] YANG J, NIE L, QIU Z, et al. Frequency Modulated Radar Waveform based on Sampled Chaotic Series [J]. Chinese Journal of Electronics, 2013, 22(2):426–432.
- [11] YANG Q, ZHANG Y, GU X. A signal model based on combination chaotic map for noise radar[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2013, 28:57-71.
- [12] PAPPUC S, FLORES B C. Generation of high-range resolution radar signals using the Lorenz chaotic flow[C]//Proceedings of SPIE. San Diego:SPIE,2010:1-12.
- [13] WILLSEY M S, CUOMO K M, OPPENHEIM A V. Quasi-orthogonal wideband radar waveforms based on chaotic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3):1974-1984.
- [14] CHEN B. Improving autocorrelation and RFM autocorrelation performance of Skew tent sequence [C]//Proceedings of 2011International Conference on Network Computing and Information Security. Guilin: IEEE, 2011:298–301.

- [15] XIE S, HE Z, HU J, et al. Performances of improved Tent chaos-based FM radar signal [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(3):385-390.
- [16] STEIN P R, ULAM S M. Non-linear transformation studies on electronic computers [R]. New Mexico: Los Alamos Scientific Laboratory, 1962.
- [17] GONZALEZ J A, PINO R. A random number generator based on unpredictable chaotic functions [J]. Computer Physics Communications, 1999, 120(2):109-114.
- [18] GONZALEZ J A, PINO R. Chaotic and stochastic functions [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2000, 276(3):425-440.
- [19] RICHARDSM A. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [20] HE S,ZHU Y F,ZHAO H Z, et al. Analysis of rotating structures for stepped frequency radar [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Radar. Adelaide, Australia: IEEE, 2008:386–390.
- [21] 曹宇飞,屈晓光,黄培康.双载频步进频率雷达精确 速度测量方法[J].电子与信息学报,2009,31(5): 1113-1116.

CAO Yufei, QU Xiaoguang, HUANG Peikang. Precise velocity measurement approach in dual-carrier-frequency stepped-frequency radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31 (5): 1113 – 1116. (in Chines)

作者简介:



唐 骏(1977—),男,湖南永州人,2007 年于西安电子科技大学大学获硕士学位,现 为博士研究生,主要研究方向为雷达信号 处理;

TANG Jun was born in Yongzhou, Hunan Province, in 1977. He received the M. S. degree from Xidian University in 2007. He is currently

working toward the Ph. D. degree. His research concerns radar signal processing.

Email:xmtangjun@126.com

张 璘(1982—),女,吉林长春人,博士研究生,主要研 究方向为雷达信号处理;

ZHANG Lin was born in Changchun, Jilin Province, in 1982. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns radar signal processing.

袁江南(1971—),男,福建龙岩人,副教授,主要研究方向为无线通信系统。

YUAN Jiangnan was born in Longyan, Fujian Province, in 1971. He is now an associate professor. His research concerns wireless communication system.