

基于随机 PRI 压缩感知雷达的 速度假目标识别方法

隋金坪, 刘 振, 魏玺章, 黎 湘

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 当存在有源速度假目标干扰时, 随机脉冲重复间隔 (Random Pulse Repetition Interval, RPRI) 压缩感知雷达的回波稀疏性将被破坏, 其目标检测与测速性能无法正常发挥. 考虑到干扰机通常无法保证在相位调制时实时准确地更新雷达随机脉冲重复间隔, 这将导致其生成的虚假目标信号与真实目标信号在不同的字典上稀疏. 本文利用这一特性, 在压缩感知框架下提出速度假目标识别算法, 该算法通过建立联合字典实现真/假目标的稀疏表示与分离. 通过分析不同随机模式下联合字典的自相干性及其对分离结果的影响, 给出了本算法的适用范围, 仿真结果验证了本算法的有效性.

关键词: 随机重复间隔信号; 压缩感知; 假目标识别; 动目标检测

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)01-0098-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.01.014

Velocity False Target Identification Based on Random Pulse Repetition Interval Compressed Sensing Radar

SUI Jin-ping, LIU Zhen, WEI Xi-zhang, LI Xiang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: When the random pulse repetition interval (RPRI) compressed sensing radar suffers from the jamming of active velocity false target, the sparsity of target echoes will be destroyed and the RPRI compressed sensing radar's superiority on target detection and velocity measurement will be limited. In practice, due to the random modulation, the jammers can hardly update precise parameters such as the random PRI in time, which will induce the echo signals of true and false target to be sparse in different dictionaries. By utilizing this factor, a velocity false target identification algorithm is proposed within the frame of compressed sensing. The echo signals of true and false target can be sparsely presented and separated by building a joint dictionary. Also, to present application limitation of the algorithm, the autocorrelation of the joint dictionary under different RPRI signal's random mode is analyzed as well as its influence on the separation results. Computer simulation verifies the effectiveness and superiority of the algorithm.

Key words: random pulse repetition interval signal; compressed sensing; false target identification; moving target detection

1 引言

随机脉冲重复间隔 (RPRI) 信号自 1976 年由 M Kavch 和 G R Cooper 教授提出后^[1], 便以良好的抗有源干扰的能力而受到持续关注^[2]. 然而, 目前常用的时域相关 (Correlation Processing, CP) 算法会带来较高的旁瓣噪声基底^[3], 因此必须借助新的信号处理工具.

近年来, 将压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论^[4]应用于 RPRI 信号处理的设想得到不断实践. 文献 [5] 将 RPRI 与压缩感知与 SAR 结合, 提出了两种随机 PRI 的降采样方案. 文献 [6] 初步研究了 RPRI 压缩感知雷达中的无模糊动目标检测及杂波抑制问题, 并提出了一种结合杂波抑制的稀疏恢复算法. 文献 [7] 将压缩感知理论应用于 RPRI 调制雷达, 在较短的相参处理

时间内实现了目标的无模糊、低旁瓣检测与成像。

然而,现代雷达所处的电子对抗环境日益复杂,尤其是随着数字射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)的逐步成熟,涌现出了多种基于 DRFM 实现的新型相干干扰样式,使干扰进入有源假目标时代,不考虑干扰抑制的雷达在实际应用中将会损失甚至丧失作战效能^[8-11]。遗憾的是,关于 RPRI 压缩感知雷达如何对抗速度假目标这一问题,尚未得到有效研究成果。

目前,有源假目标干扰已成为干扰的主要形式,常见的一种速度假目标是在收发同时干扰体制下,干扰机通过对雷达信号相位调制与转发而生成,其逼真性主要取决于调制参数与雷达信号参数的相似度。而 RPRI 雷达在发射端可以对信号的 PRI、中心频率等参数实施随机捷变,那么干扰机难以在相位调制前获取当前脉冲的起始时刻,只能使用前一段周期内 PRI 的平均值,因干扰机通常无法快速准确地更新所侦察的全部雷达参数,导致其生成假目标回波时使用的某些参数必然与真实目标所蕴含的随机参数存在较大的差异^[12,13]。该差异导致二者在不同字典下稀疏,因此可以考虑通过建立一个新的字典对假目标信号进行稀疏表示,从而利用假目标信号和真实目标信号在不同字典上稀疏这一重要特性将其分离。

本文首先对基于相位调制的速度假目标下的 RPRI 信号及回波信号进行数学建模,然后在压缩感知框架下,提出基于稀疏恢复的假目标识别算法,最后详细分析了不同随机模式下对算法的影响,给出了算法的适用范围。

2 数学模型抽象

2.1 RPRI 信号与运动目标回波模型

现假设 RPRI 信号有 M 个宽度为 T 的子脉冲,第 m 个子脉冲起始时刻 T_{ms} 偏离正常时刻 mT_r (其中 T_r 为均匀脉冲 PRI) 的间隔为 T_m , 则 $T_{ms} = mT_r + T_m$ ($m = 0, 1, \dots, M-1$), 其中, T_m 为随机扰动, RPRI 信号的 PRI 可表示为 $T_{rm} = T_{(m+1)s} - T_{ms} = T_r + T_{m+1} - T_m$, 发射信号可以表示为:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{MT}} \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{t - T_{ms}}{T}\right) \exp(j2\pi f_0 t + j\varphi_0) \quad (1)$$

其中 f_0 为载波频率, φ_0 为初始相位, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, & -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ 为单个矩形脉冲, 将 $T_m/T = l$ 定义为扰动系数 ($l > 0$)。

现假设同一距离门内 K 个目标的反射系数分别为

A_k , 与雷达之间的初始距离分别为 R_{ok} , 目标分别以径向速度 v_k 匀速直线运动(规定朝向雷达为正), 目标回波经混频后得到:

$$s_r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{\sqrt{MT}} \text{rect}\left(\frac{t - T_{ms} - t_k}{T}\right) \exp(-j2\pi f_0 t_k + j\varphi_0) \quad (2)$$

其中 $t_k = 2(R_{ok} - v_k t)/c = t_{ok} - 2v_k t/c$. 对混频后的回波信号进行采样, 设目标所处的采样时刻为 $t_m = T_{ms} + t'_0$ ($t'_0 = 2R'_0/c$), 初始相位 $\varphi_0 = 0$, 则目标回波采样信号可以表示为:

$$s_r[m] = \sum_{k=1}^K \frac{A_k}{\sqrt{MT}} \exp[-j2\pi f_0 (t_{ok} - 2v_k t_m/c)] \quad (3)$$

2.2 速度假目标信号模型

假设干扰机在同一距离门内产生 I 个速度假目标, 反射系数分别为 A_i , 与雷达之间的初始距离分别为 R_{oi} , 且分别以径向速度 v_i 匀速直线运动, 则干扰信号经混频后为:

$$s_i(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=1}^I \frac{A_i}{\sqrt{MT}} \text{rect}\left(\frac{t - T_{ms} - t_i}{T}\right) \exp(-j2\pi f_0 t_i + j\varphi_0) \quad (4)$$

其中 $t_i = 2(R_{oi} - v_i m T'_r)/c = t_{oi} - 2v_i T'_r/c$, T'_r 为干扰机对雷达信号 PRI 的估计, 经采样后的干扰回波信号可表示为:

$$s_i[m] = \sum_{i=1}^I \frac{A_i}{\sqrt{MT}} \exp[-j2\pi f_0 (t_{oi} - 2v_i T'_r/c)] \quad (5)$$

3 基于稀疏的速度假目标识别

为完成假目标干扰, 干扰机需对雷达信号进行截获, 利用预先估计的如 PRI 等参数生成相位调制信号对截获信号进行调制, 经调制的假目标干扰信号与真实目标回波信号一起进入接收机, 从而影响雷达对真实目标的检测跟踪。然而, 因雷达发射信号为 RPRI 信号, 所以假目标信号与真目标信号在 PRI 参数上会有一定差异。在雷达端进行信号处理时, 以 PRI 为核心参数构建真/假目标联合字典, 其中真目标稀疏表示字典是与雷达发射信号相适应并以相参积累脉冲串的 RPRI 为基础而建立; 而建立假目标稀疏表示字典时则是自适应地利用前段时间内的 PRI 平均值, 从而可以较好地匹配假目标干扰信号。因此, 真/假目标回波信号在联合字典下仅在各自对应的字典下可稀疏表示, 从而实现真/假目标分离, 算法的主要流程如图 1 所示。

3.1 真/假目标信号的稀疏表示模型

由式(3)可得:

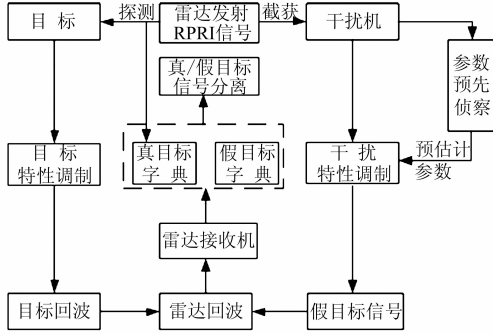


图1 基于RPRI压缩感知雷达的速度假目标识别算法流程

$$s_r[m] = \sum_{k=1}^K A'_k \exp(j4\pi f_0 T_{ms} v_k/c) \quad (6)$$

其中 $A'_k = \frac{A_k}{\sqrt{MT}} \exp(-j2\pi f_0 t_{0k}) \exp(j4\pi f_0 v_k t_0)$ 是与 m 无关的复包络, 本文主要考虑目标距离和速度在传统意义上都不模糊的情况, 即把不模糊速度周期 $v_u = \lambda/2T_r$ 平均分成 $N (> M)$ 份得到速度分辨单元 $V_n = n\Delta v$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, $\Delta v = \lambda/2NT_r$, 则目标回波信号可表示为:

$$s_r = \mathbf{U}^r \mathbf{a}^r \quad (7)$$

其中, \mathbf{U}^r 是一个 $M \times N$ 的亚高斯随机观测矩阵, 即为真目标稀疏表示字典, 其元素为 $U_{mn}^r = \exp(j4\pi f_0 T_{ms} V_n/c)$, 目标回波信号在该字典下稀疏表示为 $\mathbf{a}^r = (a_0^r, a_1^r \dots a_{N-1}^r)^T$, 即多普勒频谱. 与真目标回波信号的稀疏表示推导相类似, 将有源干扰信号表示为:

$$s_i = \mathbf{U}^i \mathbf{a}^i \quad (8)$$

\mathbf{U}^i 也是一个 $M \times N$ 的观测矩阵, 其元素为 $U_{mn}^i = \exp(j4\pi f_0 T_{ms} V_n/c)$, \mathbf{U}^i 为假目标稀疏表示字典, 假目标干扰信号在该字典下可表示为 $\mathbf{a}^i = (a_0^i, a_1^i \dots a_{N-1}^i)^T$.

3.2 基于稀疏恢复的假目标识别算法

雷达接收的信号可表示为:

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_r + \mathbf{s}_i = (\mathbf{U}^r \ \mathbf{U}^i) \begin{pmatrix} \mathbf{a}^r \\ \mathbf{a}^i \end{pmatrix} = \mathbf{U} \mathbf{a} \quad (9)$$

由真/假目标对应的字典所构成的一个联合字典 \mathbf{U} 将混叠信号稀疏表示为 \mathbf{a} , 通过求解下面的凸优化问题得到其在多普勒频域内的最优解, 实现真/假目标的分离.

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{a}\|_1 \text{ subject to } \|\mathbf{s} - \mathbf{U}\mathbf{a}\| \leq \varepsilon \quad (10)$$

3.3 算法求解性能分析

为了衡量联合字典 \mathbf{U} 的相关系数, 在假设 \mathbf{U}^r 、 \mathbf{U}^i 的自相关性较低的前提下定义了联合字典的相关系数矩阵 $\boldsymbol{\rho}$, 并将 $\boldsymbol{\rho}$ 中第 u 行第 v 列 ($1 \leq u, v \leq N$) 元素 $\rho_{u,v}$ 定义如下:

$$\rho_{u,v} = \frac{|\langle \mathbf{U}^r(u), \mathbf{U}^i(v) \rangle|}{\|\mathbf{U}^r(u)\|_2 \|\mathbf{U}^i(v)\|_2} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{U}^r(u)$, $\mathbf{U}^i(v)$ 分别为 \mathbf{U}^r 、 \mathbf{U}^i 的第 u 、 v 列, 且 $1 \leq u, v$

$\leq N$, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示两列矢量的内积, $\rho_{u,v} \in [0, 1]$, 且 $\rho_{u,v}$ 越小表示两列之间的相关性就越小, 将 $\mathbf{U}^r(u)$, $\mathbf{U}^i(v)$ 带入可得:

$$\rho_{u,v} = \left| \sum_{m=0}^{M-1} \frac{1}{M} \exp\left[\frac{j4\pi f_0 \Delta V}{c} u(T_{ms} - \frac{v}{u} T'_{ms})\right] \right| \quad (12)$$

令 $\gamma = u/v$, γ 的取值范围如下:

$$\gamma = \left\{ \frac{1}{N}, \frac{1}{N-1}, \dots, 1, \dots, N-1, N \right\} \quad (13)$$

将 γ 、 T'_m 及 T_{ms} 代入式(15)得到:

$$\rho_{u,v} = \left| \sum_{m=0}^{M-1} \frac{1}{M} \exp\left\{ \frac{j4\pi f_0 \Delta V}{c} u[m(1-\gamma)T_r + T_m + \gamma\beta_m] \right\} \right| \quad (14)$$

其中, $\beta_m = mT_r - mT'_r = m(T_r - T'_r)$, 称 β_m 为 PRI 估计误差.

由式(17)可知, $\rho_{u,v} \rightarrow 1$ 的一个充分条件是:

$$\frac{4\pi f_0 \Delta V}{c} u[m(1-\gamma)T_r + T_m + \gamma\beta_m] \rightarrow 0 \quad (15)$$

由上式可得, 当 u, v 相等时, $\rho_{u,v}$ 较大, 而当 u, v 固定, T_m 越大时, $\rho_{u,v}$ 越小.

4 仿真结果与分析

本文采用 MATLAB 进行仿真实验, 雷达工作在 X 波段, 具体仿真参数见表 1.

表 1 仿真参数设置表

f_0	10GHz	CPI	6.4ms
T	1 μ s	M	64
T_r	100 μ s	N	128

4.1 算法有效性验证

下面通过仿真分析将本算法与文献[3]及文献[14]中提到的针对 RPRI 信号的处理算法进行对比. 仿真环境假定存在 15dB 的高斯白噪声影响, 且 RPRI 信号扰动系数 l 服从离散均匀随机分布, 假设在第 45 个速度单元上存在 1 个真实目标, 同时第 33、66、88、99 个速度单元处共存在 4 个假目标, 真/假目标幅值均为 1. 现采用三种方法对回波信号进行处理, 结果如图 2 所示. 图 2(a)(b) 依次为采用 CP 算法以及采用字典 \mathbf{U}^r 对回波信号进行的处理结果. 由图 2(a) 可以看出, 尽管 CP 算法对真目标进行了准确的恢复与识别, 但是其产生了不容忽视的较高的旁瓣, 严重降低了多普勒频谱的信噪比, 降低了检测恢复性能. 从图 2(b) 中可以看到, 虽然采用稀疏恢复这一手段, 但只应用 \mathbf{U}^r 字典进行真/假目标恢复的结果是失效的, 真目标已经被噪声及假目标信号淹没. 与上述两种处理结果不同, 图 2(c) 与

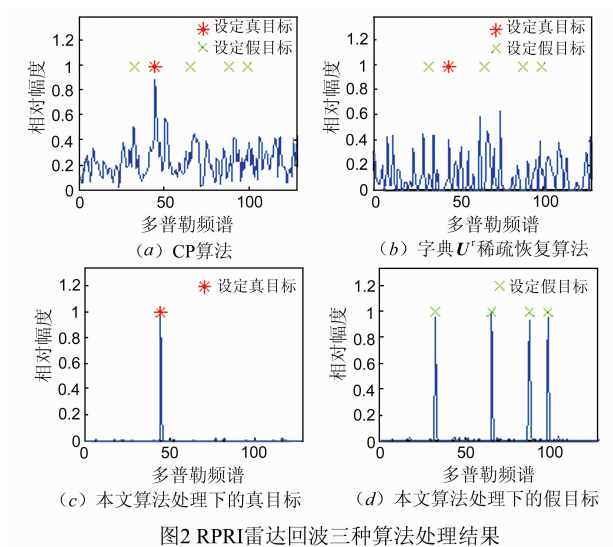


图2 RPRI雷达回波三种算法处理结果

图 2(d) 为采用本文所提出的基于 RPRI 压缩感知雷达的速度假目标识别算法处理结果,图 2(c)(d) 分别为恢复出的真/假目标在多普勒频谱内的分布情况,由图 2

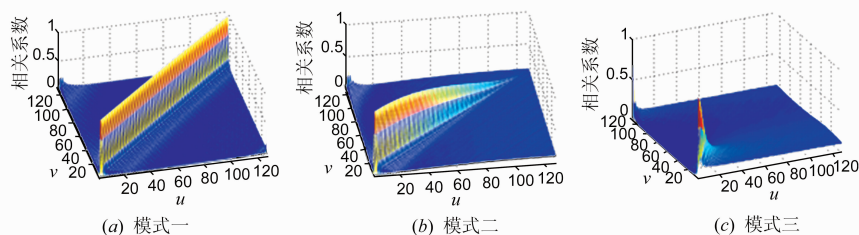
图3 三种RPRI信号模式下联合字典相关系数 $\rho_{u,v}$ 分布

表 2 三种模式下相关系数统计情况

模式 区间	模式一	模式二	模式三
[0.0, 0.3]	0.9766	0.9844	0.9960
(0.3, 0.6]	0.0084	0.0086	0.0031
(0.6, 1.0]	0.0150	0.0070	0.0009

结合图 3 及表 2 分析可得:①三种模式下,均有超过 97% 的相关系数值集中在 0.3 以下,而仅有约 1% 的相关系数值超过 0.6,说明联合字典中绝大部分列之间的相关性比较低,这是真/假速度目标成功恢复分离的基础;②三种模式下,相关系数较大值均出现在 $u-v$ 平面上二者相等的线上及其附近区域,这证明了本文在 3.3 节关于相关系数的两点结论;③从相关系数的统计分布这个角度来看,模式三属于最优的,而模式一最差,这是由于模式三的随机性最强,故其所带来的随机程度高从而导致相关系数普遍降低。

4.2.2 不同信噪比下算法恢复性能分析

为了对恢复性能进行定量评价,首先定义一个评

可以看出,该算法对信号的恢复不仅产生的旁瓣基底较小,多普勒频谱的信噪比相对较高,提高了真目标检测性能,而且对目标的运动参数恢复也十分精准。

4.2 算法性能分析

本节主要从相关系数、恢复性能等角度对该方法进行评价,本节仿真工作是针对 RPRI 信号可能服从的下面几种具体模式展开的:模式一: l 服从 $[-10, 10]$ 之内的随机均匀分布;模式二:通过令 l 服从 $[-50, 50]$ 之内的随机均匀分布来增强 RPRI 信号的扰动性能;模式三:在整个 CPI 内,随机生成 M 个脉冲,即 T_{ms} 服从 $[0, 6400]$ 的随机均匀分布。

4.2.1 相关系数分布

下面对三种模式下联合字典各列之间的相关系数矩阵进行仿真求解,整个仿真采用蒙特卡罗方法(1000 次),最终求取平均相关值。图 3 为三种 RPRI 信号模式下得到的相关系数矩阵 $\rho_{u,v}$ - $u-v$ 分布,表 2 为相关系数数值位于区间 $[0, 0.3]$ 、 $(0.3, 0.6]$ 以及剩余区间内的数量在全体相关系数中所占比重。

价指标,即多普勒频谱中恢复出的真/假目标与原始设定目标之间的运动参数的相关系数同时大于 0.9 时为成功恢复,反之为失效,该指标将是衡量本方法性能是否稳健的重要参数之一。在 4.1 节的真/假目标等仿真参数设置下,对真/假目标在不同信噪比下的成功恢复概率进行仿真,如图 4 所示。

由图 4 可得:①随着信噪比的增加,三种模式下的 RPRI 信号的成功恢复概率均有所提升;②同一信噪比下,模式三的成功恢复性能要优于模式二,亦远优于模式一,这是由于模式三下,RPRI 信号随机性强,致使真/假目标对应的字典之间相关度低,从而提升了分离恢复性能。

4.3 算法适用范围分析

为了探究较大相关值对整个算法恢复性能的影响,进行如下仿真,将真/假目标速度对应 u, v 值设置在三种模式下相关系数均比较大的情况,得到三种模式下的成功恢复概率。

由图 5 可得,在该仿真条件下,三种模式的成功恢复概率均大幅下降,在信噪比 20dB 的情况下,模式三的成功恢复概率仅约为 35%,这一方面说明了相关系

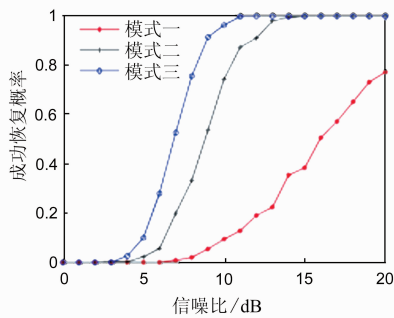


图4 相关系数低时不同信噪比下三种模式成功恢复概率

数对恢复性能的影响,另一方面也对本算法的适用范围进行了约束.能否通过选取适当的 RPRI 形式,优化联合字典的相关系数来提高本算法的恢复分离的性能,是下一步工作的重点.

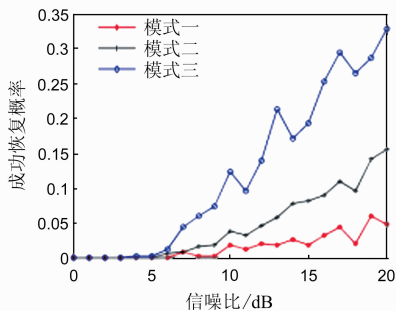


图5 相关系数高时不同信噪比下三种模式成功恢复概率

5 结论

增强 RPRI 压缩感知雷达的有源假目标识别能力,对有效提高其对目标和环境的信息获取能力以及复杂电子战场上的生存能力有着重要的理论和实际意义.本文提出了一种基于 RPRI 压缩感知雷达的速度假目标识别算法,通过与传统的随机信号处理等手段相比,得出了该算法对真/假目标的恢复不仅产生的旁瓣基底较小,多普勒频谱的信噪比更高,而且对目标的运动参数恢复也更加精准的结论,证明了本算法的有效性和优越性,并且通过从真/假目标联合字典的相关系数求解,对 RPRI 信号进行了优化设计,提高了该算法的成功恢复概率,改善了算法的性能.

参考文献

- [1] Kaveh M, Cooper G R. Average ambiguity function for a randomly staggered pulse sequence [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, AES - 12: 410 - 413.
- [2] 朱晓华. 脉位调制脉冲串雷达信号理论与应用研究[D]. 江苏南京:南京理工大学, 2002. 11.
Zhu Xiaohua. Study on pulse-position-modulated pulse-se-

quence radar signal theory and its applications [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2002. 11. (in Chinese)

- [3] 刘振,等. 一种新的随机 PRI 脉冲多普勒雷达无模糊 MTD 算法[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 28 - 35.
Liu Zhen, et al. Novel method of unambiguous moving target detection in pulse-Doppler radar with random pulse repetition interval [J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 28 - 35. (in Chinese)
- [4] Donoho D. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289 - 1306.
- [5] Patel V M, Easley G R, et al. Compressed synthetic aperture radar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 244 - 254.
- [6] Quan Y H, Zhang, et al. Velocity ambiguity resolving for moving target indication by compressed sensing [J]. Electronics Letters, 2011, 47(22): 1249 - 1251.
- [7] 刘振. 基于压缩感知的随机调制雷达信号处理方法与应用研究[D]. 湖南长沙:国防科学技术大学, 2013. 4.
Liu Zhen. Methods and applications of random modulated radar signal processing based on compressed sensing [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology, 2013. 4. (in Chinese)
- [8] 卢刚. 雷达有源假目标抑制方法研究[D]. 四川成都:电子科技大学, 2012. 6.
Lu Gang. Study of algorithms on suppression of radar active false targets [D]. Chengdu, Sichuan: University of Electronic Science & Technology of China, 2012. 6. (in Chinese)
- [9] Pace P E, Fouts D J, et al. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR [J]. IEE Proc Radar Sonar Navigation, 2002, 149(5): 248 - 257.
- [10] Zhang J D, Zhu D Y. New antivelocety deception jamming technique using pulses with adaptive initial phases [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1290 - 1300.
- [11] Soumek M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 191 - 205.
- [12] AKHTAR J. Orthogonal block coded ECCM schemes against repeat radar jammers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 1218 - 1226.
- [13] AKHTAR J. An ECCM scheme for orthogonal independent range-focusing of real and false targets [A]. IEEE Radar Conference [C]. IEEE, 2007. 846 - 849.
- [14] Zhen Liu, Xizhang Wei, Xiang Li. Aliasing-free moving

target detection in random pulse repetition interval radar based on compressed sensing [J]. IEEE Sensors Journal,

2013,13(7):2523-2534.

作者简介



隋金坪 男,1990年9月出生于吉林敦化. 2015年12月毕业于国防科学技术大学信息与通信工程专业获硕士学位. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为雷达对抗、雷达信号处理、压缩感知等.

E-mail:nudtsjp@163.com



刘振 男,1983年7月出生于江苏泰兴. 2013年6月毕业于国防科学技术大学信息与通信工程专业获博士学位. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师. 主要研究方向为雷达波形设计、雷达抗干扰、压缩感知等.

E-mail:zhen_liu@nudt.edu.cn