

基于压缩感知的 CFAR 目标检测算法

马俊虎 刘长远 甘 露*
(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

摘 要: 该文提出一种基于压缩感知(Compressive Sensing, CS)的恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)目标检测算法,首先分析了目标在距离单元上具有稀疏特性,并构造了目标回波的稀疏字典,设计特定的测量矩阵以及基于 CS 的 CFAR 检测结构,然后实现了对回波信号的压缩测量和 CFAR 检测,无需对回波信号重构。该文提出的算法具有很好的降噪性能并提高了检测效率,可以对低信噪比、低信杂比信号成功检测。仿真结果表明:当信噪比为-14 dB,信杂比为-10 dB 时,该算法与传统匹配滤波检测算法相比,减少了一半数据运算量,性能明显优于压缩匹配滤波检测算法。

关键词: 目标检测;恒虚警率;压缩感知;测量矩阵

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)12-2899-06

DOI: 10.11999/JEIT170382

CFAR Target Detection Algorithm Based on Compressive Sensing

MA Junhu LIU Changyuan GAN Lu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A new Constant False Alarm Rate (CFAR) target detection algorithm is proposed based on Compressive Sensing (CS). Firstly, the sparsity of target in the distance dimension is analyzed and the sparse dictionary is constructed for the echo signal. Secondly, a certain measurement matrix and CFAR detection structure are designed based on CS. The proposed detector can detect sparse signals directly with high accuracy without any signal reconstruction. The proposed algorithm has a good noise reduction performance, which can detect low SNR and low Signal-to-Interference Ratio (SIR) signals successfully. Finally, computer simulation results verify that when SNR is equal to -14 dB and SIR is equal to -10 dB, the proposed detector can reduce the half measurements via compared with classical Matched Filter (MF) algorithm. What's more, the performance of the proposed detector is better than CS MF algorithm.

Key words: Target detection; CFAR; Compressive Sensing (CS); Measurement matrix

1 引言

随着雷达信号处理技术的发展,对雷达信号处理正沿着高宽带和高分辨率目标努力。但是,提高分辨率的同时,也面临着处理更多的数据,这将会对硬件结构设计提更高的要求^[1]。为了减少运算量,2006 年 Donoho^[2]提出压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论。与经典的奈奎斯特采样定理不同,信号可以稀疏表示时,大量的数据在稀疏域是冗余的,因此,在对处理采样数据量明显减少的情

况下,能以很高概率重构出原信号,且基本不丢失压缩之前信号的重要参数特征^[3-5]。近几年,CS 技术在雷达信号处理、无线通信中得到了日趋成熟的应用,特别是针对信号进行检测、识别和参数估计等应用^[6-8]。

雷达信号检测时,其检测环境会随着时间、空间、频率等因素的不同而呈现很大的差异,对接收信号的概率分布也会发生变化,造成虚警或漏判^[9]。CFAR 检测器是针对雷达回波受多径杂波影响时,检测器门限随参考窗单元变化而自适应发生改变,从而完成恒虚警目标检测。目前,CFAR 的研究和改进已有大量的成果^[10-13]。然而,为了提高运算效率,压缩感知运用在 CFAR 中的研究是一个趋势^[1,14,15]。文献[14,15] 主要对压缩信号重构后再进行单元平均(Cell Average, CA)恒虚警检测,但是信号重构需要较高的信噪比,对信号检测来说,只要判

收稿日期: 2017-04-26; 改回日期: 2017-07-10; 网络出版: 2017-08-25

*通信作者: 甘露 ganlu@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(U1530126)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China-China Academy of Engineering Physics Joint Foundation (NSAF) (U1530126)

断目标是否存在即可,并不需要对信号进行完全恢复重构再检测^[16,17]。文献[16]提出了低信噪比下子空间信号检测算法,作者根据已知信号的稀疏特性,确定维数更小的子空间,然后根据子空间矩阵的性质,设计确定的测量矩阵完成对信号的检测。但是,该算法对于未知稀疏信号检测就失效了。因此,针对低信噪比 CFAR 目标检测问题,本文提出在没有对压缩信号重构而直接检测的算法,进一步减少了数据量提高了运算时间,与其他压缩检测算法比较性能更优。

本文主要解决对压缩采样信号在没有重构的情况下直接进行 CFAR 检测的问题。利用回波信号中目标在距离单元上具有稀疏性的优点,设计确定的测量矩阵,进而设计基于 CS 技术下的 CFAR 检测结构,完成对低信噪比、低信杂比下的压缩信号 CA-CFAR 和有序统计量(Ordered Statistics, OS)恒虚警(OS-CFAR)检测,本文提出的算法具有很好的降噪性能和鲁棒性,与传统匹配滤波检测算法相比,在保证检测概率的前提下,本算法明显减少了数据运算量。实现了 CS 信号在低信噪比下的处理技术。

本文剩余章节安排如下:第2节主要介绍压缩感知雷达信号压缩检测的数学模型;第3节主要介绍了基于压缩感知的 CFAR 目标检测算法,给出了算法实现流程步骤;第4节主要是对该算法的仿真验证;第5节总结全文。

2 雷达信号压缩检测的数学建模

2.1 CS 信号压缩检测的数学模型

稀疏信号在稀疏域投影,得到稀疏向量,其数学模型为

$$\mathbf{x} = \Psi\alpha \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{Q \times 1}$ 为待检测信号, $\Psi^{Q \times N}$ 为字典投影基矩阵, $\alpha \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 是信号 $\mathbf{x}$ 对应的稀疏向量,其中 α 有 K 个非 0 元素组成。 α 可求得为

$$\alpha = (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H \mathbf{x} \quad (2)$$

由 CS 理论可知,对信号压缩测量时,设测量矩阵 $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 与字典基矩阵,当 $\mathbf{x}$ 可以被稀疏表示时,对信号 $\mathbf{x}$ 进行压缩处理并且不丢失信号的特征。压缩检测的数学模型:

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{y} &= \Phi \mathbf{n} \\ H_1: \mathbf{y} &= \Phi(\mathbf{x} + \mathbf{n}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{n}$ 是高斯白噪声, H_0 假设表示信号不存在,只含有噪声, H_1 假设表示信号存在。结合式(1),则式(3)可写为

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{y} &= \Phi \mathbf{n} \\ H_1: \mathbf{y} &= \Phi(\Psi\alpha + \mathbf{n}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.2 雷达信号稀疏表示建模

脉冲雷达发射信号 $\mathbf{s}(t) \in \mathbf{R}^{Q \times 1}$ 的一般数学模型为

$$\mathbf{s}(t) = \text{rect}(t/\tau) e^{j2\pi(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2)} \quad (5)$$

其中, f_0 为雷达中心频率, μ 为调频系数, $\text{rect}(t/\tau)$

$= \begin{cases} 1, & -\tau/2 < t < \tau/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 为单个矩形脉冲^[18]。回波信号

的数学模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \sum_{i=1}^T c_i \mathbf{s}(t - \tau_i) \exp^{j4\pi v_i t / \lambda} + \mathbf{c}(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{s}_h(t) + \mathbf{c}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, $\mathbf{s}_h(t)$ 为目标回波, c_i 为回波幅度, τ_i 为时延, v_i 为目标运动速度。 $\mathbf{c}(t)$ 为杂波,一般服从韦布尔分布^[9], $\mathbf{n}(t)$ 为高斯白噪声。

目标在雷达探测范围内的距离维和速度维上可认为是稀疏的。按参考文献[1]中思想构建雷达信号的稀疏字典基 $\Psi \in \mathbf{R}^{Q \times N}$

$$\Psi = [\mathbf{s}(t - \tau_1) \ \mathbf{s}(t - \tau_2) \ \cdots \ \mathbf{s}(t - \tau_N)]^H \quad (7)$$

其中, τ_i 为距离上每个距离单元对应的时延,不考虑噪声和杂波时,根据式(2)和稀疏字典基 Ψ , $\mathbf{s}_h(t)$ 可以稀疏表示为

$$\alpha_r = (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H \mathbf{s}_h(t) \quad (8)$$

其中, α_r 为回波信号的稀疏向量,有 L 个非 0 常数组成。

2.3 测量矩阵的设计

本文主要通过设计测量矩阵,从而完成对压缩采样信号直接检测。观察式(3)给出压缩检测的数学模型,令观测矩阵为

$$\Phi = \Phi_1 (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H \quad (9)$$

其中, $\Phi_1 \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 且 $N/M = l$, l 为整数。 Φ_1 具体设计为

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \begin{bmatrix} 1 & & & 1 \\ & 1 & & 1 \\ & & \ddots & \\ & & & 1 & & 1 \end{bmatrix} \\ &= [\text{eye}(M, M) \ \text{eye}(M, M)] \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(3),接收回波信号假设检验模型为

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{y} &= \Phi_1 (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H (\mathbf{n} + \mathbf{c}) \\ H_1: \mathbf{y} &= \Phi_1 (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H (\mathbf{x} + \mathbf{n} + \mathbf{c}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)中, H_1 假设接收信号表达式为

$$\mathbf{y} = \Phi_1 (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H (\mathbf{x} + \mathbf{n} + \mathbf{c}) = \Phi_1 (\alpha_r + \mathbf{D})$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & & & 1 & & \\ & 1 & & & 1 & \\ & & \ddots & & & \ddots \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \vdots \\ \sigma_L^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D(1) \\ D(2) \\ D(3) \\ \vdots \\ D(N-1) \\ D(N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, 杂波和噪声向量 $\mathbf{D} = \Psi(\mathbf{n} + \mathbf{c})$ 。式(12)表明, $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_L^2$ 为 L 个目标在字典基上投影的位置, 当 Φ_1 的第 i ($1 \leq i \leq L$) 行的元素 1 与 σ_i^2 对齐相乘时, 杂波和噪声 $\mathbf{D}$ 中除了与 Φ_1 的第 i ($1 \leq i \leq L$) 行的元素 1 对应的元素相乘外, 其余元素全为 0, 从而实现了很好的降噪性能。 $\Phi_1 \in \mathbb{R}^{M \times N}$, 当 M 越大时, 其降噪性能越好, 检测概率也越高。因此, 通过设计确定的测量矩阵 Φ , 使得信号在压缩采样的情况下仍然能体现目标信息, 实现了压缩信号在没有重构情况下直接检测。结合式(10)和式(12)可知, 在数据存储和运算速度上与传统匹配滤波算法相比有下面两点结论: (1)信号采样之前, 对稀疏字典基压缩处理节省了数据存储空间, 比传统匹配滤波算法节省了 $1/l$ 倍的存储空间, 其中压缩比 $N/M = l$ 。(2)对信号进行压缩采样并进行检测时, 与传统匹配滤波算法相比, 也减少了 $1/l$ 倍的乘累加运算, 缩短了检测时间, 提高了检测效率。

3 基于压缩感知的 CFAR 检测器设计

3.1 CS-CFAR 检测方案

CFAR 检测主要有 CA-CFAR, OS-CFAR 等^[9]。CA-CFAR 通过比较检测单元与它附近的若干个参考单元的算术平均值的大小, 来判断信号是否存在, 该方法的物理结构简单, 干扰信号的检测包络为瑞利分布时检测性能最好, 因此被广泛使用。OS-CFAR 检测器是对参考窗内距离单元数据进行排序, 然后选取第 k 个元素的值作为 OS-CFAR 检测器的输出, 与乘积因子作用, 判断目标信号是否存在。依据传统的 CA-CFAR 和 OS-CFAR 模型, 本节利用压缩感知技术设计 CFAR 检测模型, 流程图如图 1 所示。

具体算法步骤为:

步骤 1 设计出能够稀疏表示回波信号 $s_h(t)$ 的稀疏表示字典基, 进而根据式(9)设计测量矩阵

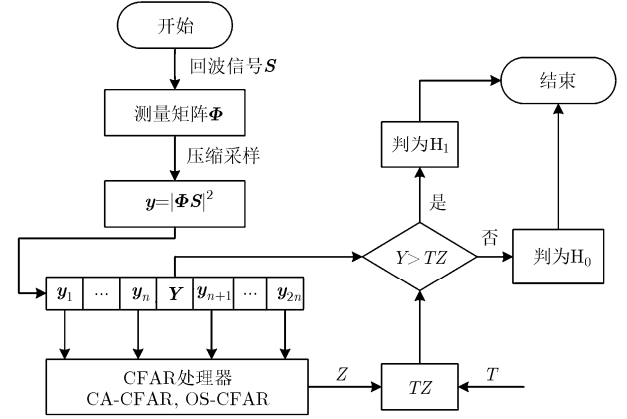


图 1 CS-CFAR 检测算法流程图

$$\Phi = \Phi_1 (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H;$$

步骤 2 测量矩阵对回波信号压缩采样得到 y_h ;

步骤 3 把 y_h 取模平方得到 y , 并以串行方式进入长度为 $2n$ 的移位寄存器;

步骤 4 对除参考窗的 $2n$ 个数据进行 CA-CFAR 或 OS-CFAR 处理, 得到结果 Z , 与乘数因子 T 相乘得到判决门限;

步骤 5 待检测单元的数据与门限比较, 如果 $Y > TZ$, 判为 H_1 , 即目标存在; 否则判为 H_0 , 目标不存在。

3.2 确定检测门限

CA-CFAR 检测器中, Z 是 $2n$ 单元之和, 即

$$Z = \sum_{i=1}^{2n} y_i \quad (13)$$

OS-CFAR 检测器是对 L 个单元数据进行排序有:

$y_1 \leq y_2 \leq \dots y_k \dots \leq y_{2n}$, 然后取

$$Z = y_k \quad (14)$$

文献[9]中根据噪声是高斯分布, 其模值服从瑞利分布, 平方率检波输出服从指数分布, 推导出乘数因子为

$$T = P_f^{-1/(2n)} - 1 \quad (15)$$

因为高斯白噪声是均匀的, 不会发生突变, 式(15)成立。但是, 回波信号一般含有杂波干扰, 杂波分布不均匀, 式(15)设计门限的方法就不适应。本文考虑杂波为韦布尔分布, 根据杂波和噪声特性, 给出窗长度为 32, CA-CFAR 和 OS-CFAR, $k = 26$ 时的乘数因子如表 1 所示。

表 1 不同虚警概率下乘数因子取值

P_f	10e-3	10e-4	10e-5	10e-6
$T(\text{CA-CFAR})$	0.4475	0.5520	0.6532	0.7641
$T(\text{OS-CFAR})$	2.4713	10.9621	12.5231	14.4723

4 计算机仿真试验

本节主要对本算法进行了2个仿真实验,实验1针对回波信号有一个目标进行检测,实验2针对回波信号有3个目标进行检测,并与传统匹配滤波和基于压缩感知的匹配滤波检测算法^[19]性能进行比较。

仿真试验1 试验中选择本地雷达信号为

$$x(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2\right)\right\} \quad (16)$$

回波信号表达式为

$$x(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0(t-\tau) + \frac{\mu}{2}(t-\tau)^2\right)\right\} \cdot \exp(-j2\pi f_d t) + c(t) + n(t) \quad (17)$$

其中, τ 为时延, f_d 为多普勒频移, $c(t)$ 为杂波, 本实验考虑杂波为韦布尔杂波, $n(t)$ 为高斯白噪声。仿真参数设置: 设雷达探测距离 $R_{\min} = 10000$ m, $R_{\max} = 15000$ m, 中心频率 $f_0 = 100$ MHz, 信号带宽 $B = 30$ MHz, 时宽 $T = 10$ μ s, 采样频率 $f_s = 90$ MHz, 调频斜率为: $\mu = B/T = 3 \times 10^{12}$ Hz/s。本次实验设置一个目标, 在 $R = 12500$ m 处, 多普勒频移 $f_d = 200$ Hz。根据本地雷达信号设计回波信号的稀疏字典基 $\Psi = [x(t-\tau_1) \ x(t-\tau_2) \ \dots \ x(t-\tau_N)]^H$, 其中 τ_i 为距离上每个距离单元对应的时延。计算机仿真结果如图2, 给出了本算法对直接压缩采样的信号检测结果, 其中虚线表示随噪声和杂波变化而实时改变的门限, 图3给出了本文算法与传统匹配滤波检测算法、压缩感知匹配滤波检测算法(文献[19])性能上的比较, 参考窗长度 $2n = 32$, 图4对上述3种检测算法同时做了 CA-CFAR 和 OS-CFAR 检测比较。图5给出了不同压缩比下检测概率随信噪比的变化曲线, 蒙特卡洛 1000 次。

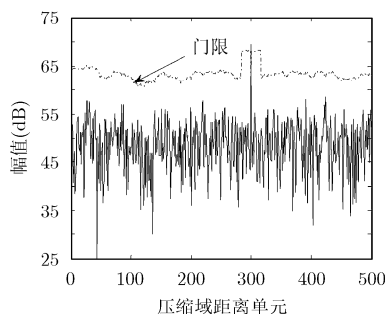


图2 压缩信号与门限比较

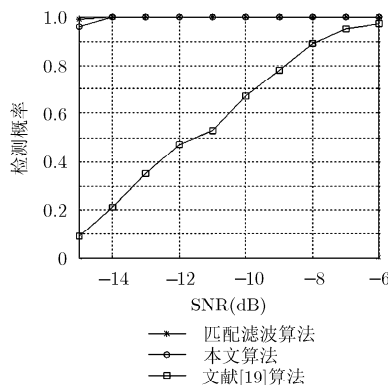


图3 3种检测算法比较

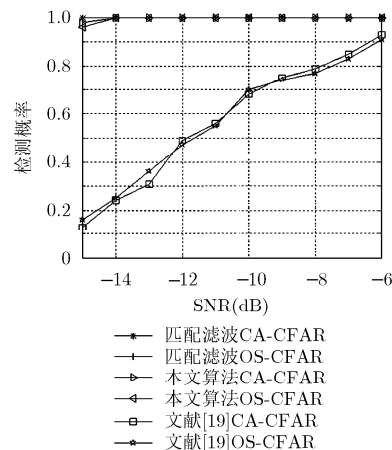


图4 3种算法 CA-CFAR 检测和 OS-CFAR 检测比较

图2是信杂比 $SIR = -10$ dB, 信噪比 $SNR = -10$ dB, $M/N = 0.5$ 时, 压缩信号与门限比较结果。从图2看出该算法能够在低信噪比时, 没有信号重构的情况下能够明显观察出目标所在位置。图2说明了本算法具有较好的降噪性能。

图3给出了在虚警概率 $P_f = 10^{-3}$, $SIR = -10$ dB, $M/N = 0.5$ 时, 传统匹配滤波检测算法、本文算法和压缩匹配滤波算法检测性能的比较结果。从图3可看出当信噪比 $SNR = -15$ dB, 压缩比 $M/N = 0.5$ 时, 本文所提算法检测概率可达到 96%, 并且与压缩匹配滤波算法处理相同数据的情况下, 性能明显优于压缩匹配算法。相比于传统匹配检测算法, 本算法数据量减少了一半。

图4给出了虚警概率 $P_f = 10^{-3}$, $SIR = -10$ dB, $M/N = 0.5$ 时, 传统匹配滤波检测算法、本文算法和压缩匹配滤波算法分别进行了 CA-CFAR 和 OS-CFAR 检测性能的比较。从图4可得到与图3同样的结果, 即与传统匹配滤波检测算法相比, 本算法减少了一半数据运算量。另外, 虚警概率相同的条件时, 可以得到 CA-CFAR 和 OS-CFAR 检测性能接近。

图5表明当虚警概率 $P_f = 10^{-3}$, 信杂比 $SIR = -10$ dB 时, 不同压缩比下的信号在不同信噪比下的 CA-CFAR 检测概率变化。从图5可以得到, 当 $M/N = 0.5$, $SNR = -15$ dB 时, 成功检测出目标的概率为 96%; 当 $M/N = 0.25$, $SNR = -12$ dB 时, 成功检测出目标的概率为 95%。相同信噪比下, 随着压缩比的增加, 检测概率也在增大。

仿真试验2 试验中选择本地雷达信号为

$$x(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2\right)\right\} \quad (18)$$

回波信号表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) = & \sum_{i=1}^3 \exp \left\{ j2\pi \left(f_0(t - \tau_i) + \frac{\mu}{2}(t - \tau_i)^2 \right) \right\} \\ & \cdot \exp(-j2\pi f_{di}t) + \mathbf{c}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

其中, τ_i 为第 i 个目标的时延, f_{di} 为第 i 个目标的多普勒频移, $\mathbf{c}(t)$ 为杂波, 本实验考虑杂波为韦布尔杂波, $\mathbf{n}(t)$ 为高斯白噪声。仿真参数设置: 设雷达探测距离 $R_{\min} = 10000$ m, $R_{\max} = 15000$ m, 中心频率 $f_0 = 100$ MHz, 信号带宽 $B = 30$ MHz, 时宽 $T = 10^{-5}$ s, 采样频率 $f_s = 90$ MHz, 调频斜率为: $\mu = B/T = 3 \times 10^{12}$ Hz/s。本次实验设置 3 个目标分别在 $R_1 = 13500$ m, $R_2 = 13800$ m, $R_3 = 14500$ m 处, 多普勒频移 $f_{d1} = 250$ Hz, $f_{d2} = 100$ Hz, $f_{d3} = 300$ Hz。根据本地雷达信号设置回波信号的字典基 $\Psi = [\mathbf{x}(t - \tau_1) \mathbf{x}(t - \tau_2) \cdots \mathbf{x}(t - \tau_N)]^T$, 其中 τ_i 为距离上每个距离单元对应的时延。计算机仿真结果如图 6 给出了本算法对直接压缩采样的信号检测效果, 其中虚线表示随噪声和杂波变化而实时改变的门限, 图 7 给出了本文算法与传统匹配滤波检测算法、文献[19]算法性能上的比较, 参考窗长度 $2n = 32$, 并进行蒙特卡洛 1000 次仿真实验。

图 6 表明当信杂比 $\text{SIR} = -5$ dB, 信噪比 $\text{SIR} = -5$ dB, $M/N = 0.5$ 时, 压缩信号与门限比较结果。从图 6 看出该算法对多个目标存在时, 本算法可以明显检测出目标位置, 进而能够完成在低信噪比、低信杂比下的 CFAR 检测。

图 7 给出了虚警概率 $P_f = 10^{-3}$, 信杂比 $\text{SIR} =$

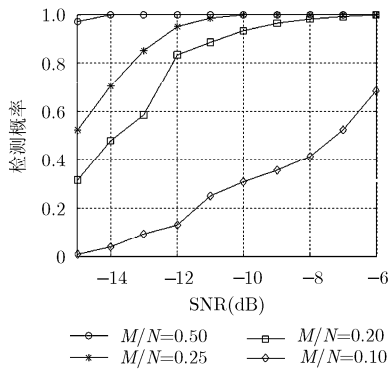


图 5 不同压缩比下 CFAR 检测概率

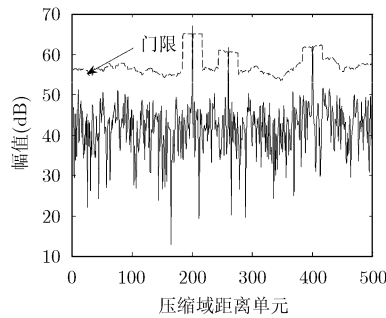


图 6 压缩信号与门限比较

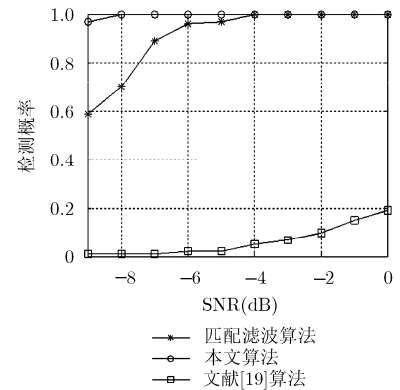


图 7 3 个目标同时检测到的概率

-5 dB, $M/N = 0.45$ 时, 对 3 个目标进行 CA-CFAR 检测, 记 3 个目标同时检测到为一次实验成功。图 7 为传统匹配滤波检测算法、本文算法和压缩匹配滤波算法性能比较。从图 7 可看出, 对于多个目标存在时, 压缩匹配滤波算法性能明显下降, 本文所提算法与压缩匹配滤波算法处理相同数据的情况下, 性能明显优于压缩匹配算法。而且在信噪比大于 -5 dB 时, 可认为本算法与传统匹配检测算法性能一样, 明显减少了数据量。

本文提出的算法可以实现基于压缩感知的微弱信号 CFAR 检测, 而且不需要信号完全恢复。比较图 3, 图 4 和图 7 可知本算法在一定信噪比下的检测性能与传统匹配滤波一样并都明显优于压缩匹配算法。由图 5 表明随着压缩比的增加检测概率明显增大。综上可以说明本算法可以在低信噪比、信杂比下完成对雷达信号 CFAR 的检测。

5 结束语

本文主要解决了利用压缩感知技术在没有信号重构步骤时, 对雷达回波信号进行 CFAR 目标检测的问题。从目标在距离单元上是稀疏的性质出发, 设计特定的测量矩阵和基于 CS 的 CFAR 检测结构, 直接对回波信号检测, 并分析了该算法具有优良的降噪性能。实验结果显示, 本文所提算法对低信噪比、低信杂比下目标回波信号依然能成功检测, 特别地, 当多个目标存在时, 在保证高检测概率的前提下, 明显减少了数据运算量, 提高了检测效率。

参考文献

- [1] 李莹, 张弓, 陶宇, 等. 基于压缩感知的步进频雷达目标检测算法[J]. 现代雷达, 2015, 37(9): 22-25. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.
- [2] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306. doi: 10.1109/TIT.2006.871582.
- [3] CANDLES E J and WAKIN M B. An introduction to compressive sensing based on step frequency radar[J]. *Modern Radar*, 2015, 37(9): 22-25. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.

LI Ying, ZHANG Gong, TAO Yu, et al. Target detection in

- compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21–30. doi: 10.1109/MSP.2007.914731.
- [4] 吴建宇, 徐海东, 王珏. 基于过完备字典稀疏表示的多通道脑电信号压缩感知联合重构[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1666–1673. doi: 10.11999/JEIT151079.
- WU Jianyu, XU Haidong, and WANG Jue. A new joint reconstruction algorithm of compressed sensing for multichannel EEG signals based on over-complete dictionary approach[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2016, 38(7): 1666–1673. doi: 10.11999/JEIT151079.
- [5] 岑翼刚, 岑丽辉. 基于峰值变换的信号稀疏表示及重建[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 326–331. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00305.
- CEN Yigang and CEN Lihui. Sparse representation and reconstruction of signals based on the peak transform[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2011, 33(2): 326–331. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00305.
- [6] ENDER J H G. On compressive sensing applied to radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(5): 1402–1414. doi: 10.1016/j.sigpro.2009.11.009.
- [7] 王伟伟, 廖桂生, 朱圣棋, 等. 一种基于压缩感知的地面运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1872–1878. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01285.
- WANG Weiwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi, *et al.* A ground moving target indication method based on compressive sensing[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2012, 34(8): 1872–1878. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01285.
- [8] 赵瑞珍, 王若乾, 张凤珍, 等. 分块的有序范德蒙矩阵作为压缩感知测量矩阵的研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1317–1322. doi: 10.11999/JEIT140860.
- ZHAO Ruizhen, WANG Ruoqian, ZHANG Fengzhen, *et al.* Research on the blocked ordered vandermonde matrix used as measurement matrix for compressed sensing[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2015, 37(6): 1317–1322. doi: 10.11999/JEIT140860.
- [9] 王明宇. 复杂环境下雷达 CFAR 检测与分布式雷达 CFAR 检测研究[D]. [博士论文], 西北工业大学, 2001: 20–28.
- WANG Mingyu. Radar CFAR detection and distributed radar CFAR detection under complicated environments[D]. [Ph.D. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2001: 20–28.
- [10] RAGHAVAN R S. Analysis of CA-CFAR processors for linear-law detection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1992, 28(3): 661–665. doi: 10.1109/7.256288.
- [11] ROHLING H. Radar CFAR threshold in clutter and multiple target situation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1983, 19(4): 608–621. doi: 10.1109/TAES.1983.309350.
- [12] 胡勤振, 苏洪涛, 周生华, 等. 多基地雷达中双门限 CFAR 检测算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2430–2436. doi: 10.11999/JEIT151163.
- HU Qinzhen, SU Hongtao, ZHOU Shenghua, *et al.* Double threshold CFAR detection for multisite radar[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2016, 38(10): 2430–2436. doi: 10.11999/JEIT151163.
- [13] 赵兴刚, 王首勇. 一种基于 KL 分离度的改进矩阵 CFAR 检测方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 934–940. doi: 10.11999/JEIT150711.
- ZHAO Xinggang and WANG Shouyong. An improved matrix CFAR detection method base on KL divergence[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2016, 38(4): 934–940. doi: 10.11999/JEIT150711.
- [14] ANITORI L, ROSSUM W V, OTTEN M, *et al.* Compressive sensing radar: Simulations and experiments for target detection[C]. Signal Processing Conference, Marrakech, Morocco, 2014: 1–5.
- [15] ANITORI L, ROSSUM W V, OTTEN M, *et al.* Compressive CFAR radar processing[C]. Compressive CFAR Radar Processing Tno, Repository, Bremen, Germany, 2013: 57–60.
- [16] RAZAVI A, VALKAMA M, and CABRIC D. Compressive detection of random subspace signals[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(16): 4166–4179. doi: 10.1109/TSP.2016.256.0132.
- [17] HARIRI A and BABAIE M. Compressive detection of sparse signals in additive white gaussian noise without signal reconstruction[J]. *Signal Processing*, 2016, 131: 376–385. doi: 10.1016/j.sigpro.2016.08.020.
- [18] 理查兹, 邢孟道, 王彤, 等. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 117–147.
- MARK A. RICHARDS, XING Mengdao, WANG Tong, *et al.* Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 117–147.
- [19] DAVENPORT M A, WAKIN M B, and BARANIUK R G. The compressive matched filter[R]. Rice University, Technical Report TREE-0610, 2006.
- 马俊虎: 男, 1992 年生, 博士生, 研究方向为压缩感知信号检测.
- 刘长远: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为压缩感知信号处理.
- 甘露: 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为高速实时信号处理技术、非合作信号处理技术.