

文章编号: 2095-4980(2019)06-0988-06

基于杂波特征评估的雷达目标点迹过滤方法

史建涛^{a,b}, 杨予昊^{a,b}, 孙俊^{a,b}, 王宁^{a,b}

(中国电子科技集团公司 a.第十四研究所; b.智能感知技术重点实验室, 江苏 南京 210039)

摘要: 雷达在目标检测和跟踪时常面临地杂波、海杂波、气象杂波等复杂强杂波的干扰, 而雷达回波信号经过传统的动目标显示(MTI)和恒虚警(CFAR)检测处理后的剩余杂波, 在距离-时间(脉冲)上的二维分布与目标非常相似, 无法区分。对此, 提出一种基于杂波综合特征评估的雷达目标点迹过滤方法, 综合考虑目标与杂波在幅度起伏、距离/俯仰/方位相关性、相位变化等多维特征的不同, 利用综合特征因子评估区分目标和杂波。最后, 利用雷达实测数据对所提方法进行验证。结果表明, 杂波有效抑制率较传统方法有显著提升。

关键词: 杂波抑制; 特征因子; 特征评估; 点迹过滤

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0988

A plots filtering method for radar targets based on clutter feature evaluation

SHI Jiantao^{a,b}, YANG Yuhao^{a,b}, SUN Jun^{a,b}, WANG Ning^{a,b}

(a.The 14 Research Institute; b.Key Laboratory of Intelligence Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: The detection and tracking process of radar targets are often interfered by ground clutters, sea clutters and whether clutters. After the traditional Moving Target Indication(MTI) filtering and Constant False Alarm Rate(CFAR) detection, the residual clutters have almost the same two-dimensional distribution(range-time) as the target, and it is difficult to distinguish them. To solve this problem, a plots filtering method for radar targets based on clutter feature evaluation is proposed. Synthetically considering the difference of features in amplitude fluctuation, distance/pitch/orientation correlation and phase shifts, comprehensive feature factors are evaluated to distinguish radar targets from clutters. Finally, the proposed method is verified by using the real radar measured data, which indicates that the effective suppression rate of clutters is significantly higher than that of traditional methods.

Keywords: clutter suppression; characteristic factor; feature evaluation; plots filtering

雷达的工作原理是基于目标对电磁波的散射效应实现对目标的定位和跟踪^[1], 然而目标周围不可避免会存在各种背景干扰, 如地物、山脉、楼宇、云雨、海浪以及金属箔条等, 上述物体所产生的雷达回波通称为杂波^[2]。雷达杂波的种类很多, 大致可以分为地杂波、海杂波、气象杂波和箔条杂波等^[3]。对于绝大多数雷达而言, 各类杂波不但是无用的回波信号, 而且会严重干扰雷达的正常工作。当杂波和雷达目标回波信号同时显示在终端显示器上时, 会出现如下两种情形: 目标信号和杂波同时在终端显示会使目标不易观察; 过强的杂波导致雷达接收机过载, 无法发现目标信号。另外, 如果雷达接收端采用自动检测装置, 则大量杂波的存在会给终端处理带来极高的运算负载, 引起许多虚警^[4]。

对于大多数雷达而言, 杂波通常情况下比目标信号强得多, 杂波的存在会严重影响雷达对目标的检测与跟踪, 尤其是在处理强杂波背景中的微弱目标时, 弱目标信号可能会被杂波完全淹没, 从而造成目标丢失, 严重影响雷达探测效能。即使没有处在强杂波环境中, 要在成片杂波中检测到目标也很困难^[5-6]。因此, 杂波抑制已成为雷达信号处理关键技术。

目前, 比较成熟的雷达杂波抑制技术有很多, 可以在发射机、天线、接收机和信号处理机分别采取不同的措施来抑制雷达杂波信号。而与雷达信号处理相关的杂波抑制技术主要包括动目标显示(MTI)、动目标检测(Moving

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61973288); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20191133); 装备发展部领域基金资助项目(61404130210)

Target Detection, MTD)、脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)等^[7]。这些杂波抑制技术主要是基于运动目标回波和杂波在频谱上的差异,通过滤波方法抑制杂波并提取目标信号^[8]。MTI 技术利用构造的滤波器凹口来滤除杂波,主要用于抑制固定杂波;MTD 通常由一组窄带滤波器构成,可以提供目标的运动速度和距离数据,并利用多普勒滤波器组从固定杂波或低速运动背景中获取运动目标^[9]。此外,目前常用的杂波抑制方法还有参差周期技术、杂波图检测技术、恒虚警(CFAR)检测技术、非相干动目标显示技术,以及为适应环境而改进的自适应动目标显示(Adaptive MTI, AMTI)技术等^[10]。在上述杂波抑制技术中,应用最广泛的是 MTI 方法。

然而,传统的 MTI 技术基于频域对消、恒虚警检测和杂波图的处理存在明显不足^[10-11]:首先,海杂波和气象杂波均具有一定的速度,从而使得 MTI 的改善因子受限,难以完全满足杂波抑制要求。例如,MTI 通过对消方法来抑制固定杂波,其改善因子可以达到 60 dB 以上;但是,恶劣海况下的海浪杂波速度甚至可能超过 10 m/s,此时 MTI 难以进行杂波对消。另外,在检测过程中,仅仅利用了雷达回波信号的幅度信息,对微弱杂波环境能够很好地控制虚警率,都是在复杂强杂波环境中,在幅度上杂波和目标不易区分,仅仅通过控制幅度门限抑制杂波极易导致目标点迹损失。因此,常规雷达杂波抑制技术在面对海面、山区、城市等复杂环境强杂波时会产生严重的杂波剩余,严重影响雷达的目标检测性能。

针对上述问题,考虑到雷达回波信号经过传统的 MTI 滤波和 CFAR 检测等处理后的剩余杂波,在距离-时间(脉冲)上的二维分布与目标非常相似,已经无法区分。本文提出一种基于杂波综合特征评估的杂波抑制和雷达目标点迹过滤方法,综合考虑雷达目标与杂波在幅度起伏、距离相关性、俯仰相关性、方位相关性、相位变化规律等多维特征的差别,利用综合特征因子评估区分目标和杂波。雷达实测数据表明,该方法可以有效抑制各类复杂杂波,显著提高目标检测效率。

1 雷达杂波特征提取

雷达经 MTI 和 CFAR 检测后的剩余杂波,在距离-时间(脉冲)上的二维分布与目标一样,已无法区分,可以从一次扫描或连续若干次扫描的回波特征来提取杂波的特征^[12-13]。经大量实录回波数据分析,可用于杂波抑制和雷达目标点迹滤波的杂波特征主要有幅度特征、相位特征和空间相关性等。

1.1 幅度起伏因子

雷达回波信号的幅度特征主要包括幅度分布与幅度起伏特征,由于杂波回波的高可变性,杂波回波幅度通常可用概率密度函数来描述。常用的概率密度函数有瑞利分布、对数-正态分布、韦布尔分布以及 K 分布等。在此,不考虑幅度分布特征,仅考虑幅度起伏特征。

幅度起伏特征可以用幅度起伏因子 β_{am} 来表示,其计算公式如下:

$$\beta_{am} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(A_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k \right)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k} \quad (1)$$

式中: N 为脉冲总数; A_k 为第 k 个脉冲的幅度。式(1)表明, β_{am} 是一个相对量,其值越大,幅度起伏越大。

1.2 距离相关因子

杂波如气团等体目标,占据的空间单元相对要大一些,由于大尺度,内部运动相对均匀,表现为在空间分布的特征差别较小,即相关性较大;目标与杂波相比为小尺度物体,在空间分布的相关性较小^[14]。通过提取空间的相关性,可以分析杂波与目标的特征差别。

空间相关性特征反映目标或杂波单元间的相关性,其实反映的是目标的尺寸大小(相对于雷达分辨单元)及其内部的相对运动情况。空间的分布主要表现在距离、俯仰和方位这 3 个维度。距离相关因子 β_R 定义为待判别距离单元的若干脉冲序列与周围距离单元脉冲序列的相关系数,其计算式如下:

$$\beta_R = \frac{|E\{s_{k,i} s_{k,i,\Delta r}^*\}|}{\sqrt{E\{s_{k,i} s_{k,i}^*\} \cdot |E\{s_{k,(i,\Delta r)} s_{k,(i,\Delta r)}^*\}|}} \quad (2)$$

式中: $s_{k,i}$ 为第 k 个脉冲在第 i 个距离单元的回波; $s_{k,(i,\Delta r)}$ 为第 k 个脉冲在第 i 个距离单元的周围距离单元的回波。 $E\{s_{k,i} s_{k,i,\Delta r}^*\}$ 为互相关函数, $E\{s_{k,i} s_{k,i}^*\}$ 和 $E\{s_{k,(i,\Delta r)} s_{k,(i,\Delta r)}^*\}$ 为自相关函数。

1.3 俯仰相关因子

俯仰相关因子 β_E 定义为待判别通道的若干脉冲序列与相邻通道、相同距离单元上脉冲序列的相关系数，其计算式如下：

$$\beta_E = \frac{|E\{\eta_{k,i}\eta_{k,(i,\Delta e)}^*\}|}{\sqrt{|E\{\eta_{k,i}\eta_{k,i}^*\}| \cdot |E\{\eta_{k,(i,\Delta e)}\eta_{k,(i,\Delta e)}^*\}|}} \quad (3)$$

式中： $\eta_{k,i}$ 为第 k 个脉冲在第 i 个俯仰通道回波信号； $\eta_{k,(i,\Delta e)}$ 为第 k 个脉冲在第 i 个通道相邻通道回波信号。 $E\{\eta_{k,i}\eta_{k,(i,\Delta e)}^*\}$ 为互相关函数； $E\{\eta_{k,i}\eta_{k,i}^*\}$ 、 $E\{\eta_{k,(i,\Delta e)}\eta_{k,(i,\Delta e)}^*\}$ 均为自相关函数。

1.4 方位相关因子

方位相关因子 β_A 定义为待判别方位的若干脉冲序列与相邻方位、相同波位、相同通道、相同距离单元上脉冲序列的相关系数，其计算式如下：

$$\beta_A = \frac{|E\{f_{k,i}f_{k,(i,\Delta a)}^*\}|}{\sqrt{|E\{f_{k,i}f_{k,i}^*\}| \cdot |E\{f_{k,(i,\Delta a)}f_{k,(i,\Delta a)}^*\}|}} \quad (4)$$

式中： $f_{k,i}$ 为第 k 个脉冲在第 i 个方位通道回波信号； $f_{k,(i,\Delta a)}$ 为第 k 个脉冲在第 i 个通道相邻通道回波信号。 $E\{f_{k,i}f_{k,(i,\Delta a)}^*\}$ 为互相关函数； $E\{f_{k,i}f_{k,i}^*\}$ 和 $E\{f_{k,(i,\Delta a)}f_{k,(i,\Delta a)}^*\}$ 均为自相关函数。

1.5 相位变化因子

对于包含旋转部件的目标而言，如飞机等，其旋转部件(桨叶)相对于雷达发射频率仍然在光学区，故每一个桨可视为一个等效的散射中心，旋转部件所有桨的散射回波依相位求和法线性叠加构成了调制散射回波，它和机身散射分量叠加共同合成飞机回波。若飞机旋转部件由 N 个散射中心(单桨)组成，则合成的调制散射回波复矢量为：

$$z(t) = a(t)\exp(j\varphi(t)) = \sum_{k=1}^N s_k \exp(j\theta_k(t)) \quad (5)$$

式中： $\theta_k(t) = 4\pi r_k(t)/\lambda$ 为第 k 个散射中心回波复包络的相位函数， $r_k(t)$ 为 k 个散射中心对应的距离。

$$a(t) = \sqrt{\left\{ \left(\sum_{k=1}^N s_k \cos[\theta_k(t)] \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N s_k \sin[\theta_k(t)] \right)^2 \right\}} \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \arctan \left(\frac{\sum_{k=1}^N s_k \sin[\theta_k(t)]}{\sum_{k=1}^N s_k \cos[\theta_k(t)]} \right) \quad (7)$$

式中 s_k 为 k 个散射中心回波的幅度。显然飞机旋转部件的任一散射中心的微小相对运动，都能造成相位的波动。散射中心的相位变化又会引起多个散射中心合成回波复包络幅、相分量的变化。这就是带有旋转部件相对运动使回波复包络产生由幅、相波动的物理机理^[15]。

实际上，不仅带有旋转部件目标具有相位变化特性，杂波由于内部的相对运动，如湍流的旋转，同样具有相位变化特性，故提取相位变化因子可以对杂波与目标进行区分。相位变化因子 β_p 计算式如下：

$$\beta_p = \arctan \left(\frac{\sqrt{1-\delta^2}}{\delta} \right) = \arctan \left(\frac{\sqrt{1 - \frac{1}{(N-1)^2} \left[\left(\sum_{k=2}^N \cos(\Delta\varphi_k) \right)^2 + \left(\sum_{k=2}^N \sin(\Delta\varphi_k) \right)^2 \right]}}{\frac{1}{N-1} \sqrt{\left(\sum_{k=2}^N \cos(\Delta\varphi_k) \right)^2 + \left(\sum_{k=2}^N \sin(\Delta\varphi_k) \right)^2}} \right) \quad (8)$$

式中： $\delta = \frac{1}{N-1} \sqrt{\left(\sum_{k=2}^N \cos(\Delta\varphi_k) \right)^2 + \left(\sum_{k=2}^N \sin(\Delta\varphi_k) \right)^2}$ ； $\Delta\varphi_k$ 为相邻脉冲间的相位差。

1.6 综合特征因子

对上述 5 种特征因子进行标准化和归一化处理, 为方便起见, 这里仍用原来的符号表示。

$$\beta = w_{am}\beta_{am} + w_R\beta_R + w_E\beta_E + w_A\beta_A \tag{9}$$

式中 w_{am}, w_R, w_E, w_A 为对应特征因子的加权因子, 根据不同杂波和目标类型选取不同的加权值。如, 对于气象杂波, 由于分布范围广且比较均匀, 因此, 距离相关因子和俯仰相关因子的加权值可以取的大一些; 对于地杂波, 基本为固定杂波, 因此幅度起伏因子和方位相关因子的加权值可以取的大一些; 对于海杂波, 为运动杂波, 相位变化因子的加权值可以取的大一些。

2 特性分析

利用含有多种杂波信息的某型雷达实测数据对上述特征因子进行分析, 因为运动目标回波与杂波在多维特征空间上存在差异性, 此处分析了两者在幅度起伏、距离相关、相位变化等三方面的区别, 如图 1 所示, 目标与杂波在幅度、距离和相位三维空间分布存在明显差异。

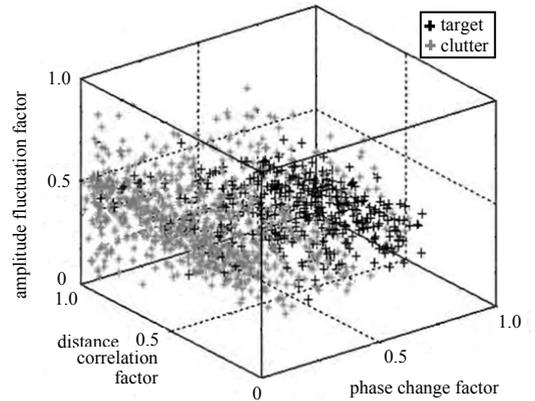


Fig.1 Feature distribution of the target and clutters
图 1 目标与杂波综合特征分布

3 点迹过滤处理流程

根据目标和杂波在幅度起伏、距离相关、方位相关、俯仰相关、相位变化等多维特征的差异性分析, 针对山区、海面和城市复杂强杂波抑制问题, 设计了基于杂波综合特征评估的杂波抑制与点迹过滤处理流程。如图 2 所示, 在进行常规的 MTI、杂波图和 CFAR 处理后, 利用回波信号点迹和杂波综合特征评估解决在幅度域杂波与目标难以区分的问题, 提取包括幅度起伏、距离相关、方位相关、俯仰相关以及相位变化等多维特征, 在多维空间实现强杂波抑制与目标点迹过滤。

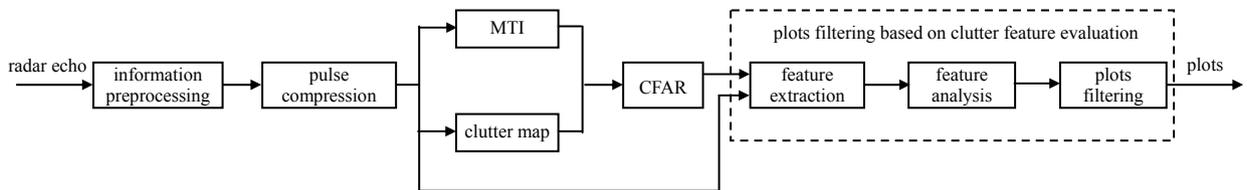
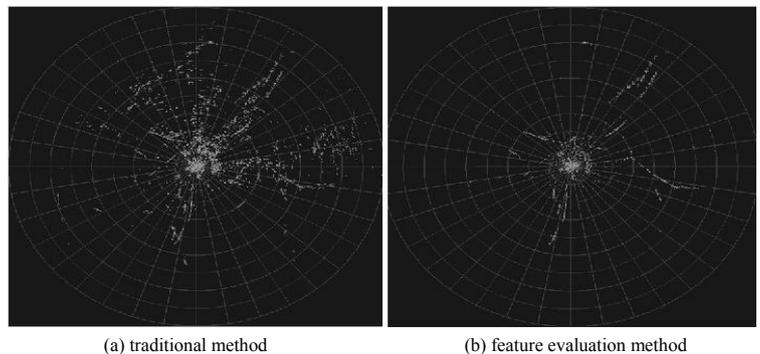


Fig.2 Flow diagram of plots filtering and clutter suppression based on clutter feature evaluation
图 2 基于杂波综合特征评估的杂波抑制与点迹过滤流程

4 雷达实测数据分析

利用某型雷达实测数据对本文所提出的杂波抑制和目标点迹过滤方法进行验证分析, 图 3 为气象杂波中目标点迹过滤结果, 图 4 为海杂波中目标点迹过滤结果, 图 5 为地杂波中目标点迹过滤结果。可以看出, 利用 MTI 常规滤波和杂波图检测等方法处理后, 出现大量杂波剩余, 造成很多虚假航迹, 并导致目标丢失。而杂波采用基于多维综合特征评估的杂波抑制与点迹过滤后, 在真实目标航迹被保留的同时实现了杂波的有效抑制, 目标航迹清晰、连续, 虚假航迹率和点迹损失率都得到了显著降低。杂波抑制和目标点迹过滤方法的杂波抑制率比较见表 1。

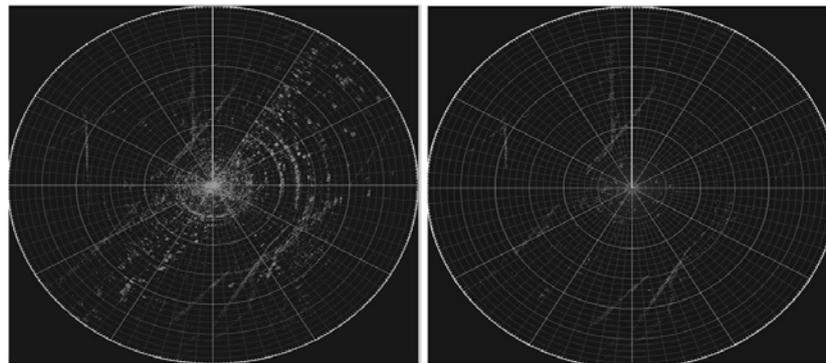


(a) traditional method (b) feature evaluation method
Fig.3 Plots filtering results(weather clutter background)
图 3 点迹过滤结果(气象杂波背景)

表 1 杂波抑制率比较(单位: %)

Table1 Clutter suppression rate comparison(unit:%)

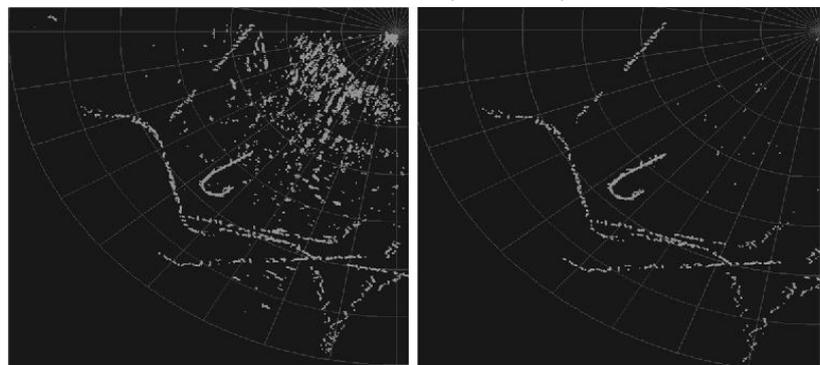
	weather clutter	sea clutter	ground clutter
traditional method	2.5	0.8	7.9
feature evaluation method	6.4	0.1	2.5



(a) traditional method (b) feature evaluation method

Fig.4 Plots filtering results(sea clutter background)

图 4 点迹过滤结果(海杂波背景)



(a) traditional method (b) feature evaluation method

Fig.5 Plots filtering results (ground clutter background)

图 5 点迹过滤结果(地杂波背景)

5 结论

针对雷达在目标检测和跟踪时常面临地杂波、海杂波、气象杂波等复杂强杂波的干扰,但雷达回波信号经过传统的 MTI 滤波和 CFAR 检测等处理后的剩余杂波,在距离-时间(脉冲)上的二维分布与目标非常相似难以区分的问题,考虑到目标与杂波在幅度起伏、距离/俯仰/方位相关性、相位变化等多维特征的不同,提出一种基于杂波综合特征评估的雷达目标点迹过滤方法,利用综合特征因子评估区分目标和杂波。雷达实测数据验证表明,利用本文方法杂波可以得到有效抑制,真实目标航迹被保留,目标航迹清晰、连续,虚假航迹率和点迹损失率都得到显著降低。但本文所提方法中综合特征因子求取过程中加权因子的确定需要依赖于经验值,需要经过多次选择比较,确定较理想的取值,在一定程度上会影响算法的运算效率和杂波抑制性能。下一步将研究加权因子的在线自适应求解方法,以期进一步提高此方法的杂波抑制与目标点迹过滤效能。

参考文献:

- [1] 王军,林强. 雷达手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2003. (WANG Jun,LIN Qiang. Radar handbook[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2003.)
- [2] RICHARDS M A. 雷达信号处理基础[M]. 2 版. 邢孟道,王彤,译. 北京:电子工业出版社, 2017. (RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing[M]. 2nd ed. Translate by XING Mengdao,WANG Tong. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2017.)
- [3] 刑远见,陈翼,祝欢,等. 基于支撑向量机的地杂波虚警抑制技术[J]. 现代雷达, 2016,38(8):24-38. (XING Yuanjian, CHEN Yi,ZHU Huan,et al. Filtering ground-clutter-false-alarms using supported vector machine[J]. Modern Radar, 2016, 38(8):24-38.)
- [4] 何友,关键,孟祥伟. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2011. (HE You,GUAN Jian,MENG Xiangwei. Radar target detection and CFAR processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2011.)
- [5] 汤成霞,徐晓群,张荣涛. 雷达杂波抑制的新方法研究[J]. 现代雷达, 2012,34(9):63-65. (TANG Chengxia,XU Xiaoqun, ZHANG Rongtao. A study on new method of radar clutter suppression[J]. Modern Radar, 2012,34(9):63-65.)

- [6] 罗兴旺,张伯彦,刘嘉,等. 雷达数据处理中的杂波抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016,38(1):37-44. (LUO Xingwang, ZHANG Boyan, LIU Jia, et al. Researches on the method of clutter suppression in radar data processing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016,38(1):37-44.)
- [7] HE Jian, FENG Dong, MA Liming. Reduced-dimension clutter suppression method for airborne multiple-input multiple output radar based on three iterations[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015,9(3):249-254.
- [8] 师浩斌. 雷达信号杂波抑制方法的研究及其实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (SHI Haobin. Research and implementation of radar clutter suppression method[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [9] 刘泽龙,杨威,苗楠楠,等. 时间反转技术在LFMCW雷达目标检测中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(3):409-414. (LIU Zelong, YANG Wei, MIAO Nannan, et al. Application of time reversal technology in target detection of linear frequency modulation continuous wave radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):409-414.)
- [10] 桂佑林,张冰瑞. 防空雷达复杂强杂波抑制[J]. 现代雷达, 2016,38(6):18-26. (GUI Youlin, ZHANG Bingrui. Complex strong clutter suppression in surveillance radar[J]. Modern Radar, 2016,38(6):18-26.)
- [11] 刘长远,马俊虎,甘露. 基于压缩感知的CFAR目标检测在机会雷达中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(4):630-636. (LIU Changyuan, MA Junhu, GAN Lu. Application of CA-CFAR with compressive sensing in opportunistic radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):630-636.)
- [12] GUAN Jian, LIU Ningbin, HUANG Yong. Fractal characteristic in frequency domain for target detection within sea clutter[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2012,6(5):293-306.
- [13] 郭丽华,邢文革,董扬. 海杂波数据的多重分形谱分析[J]. 现代雷达, 2015,37(2):20-24. (GUO Lihua, XING Wenge, DONG Yang. Multifractal analysis of measured sea clutter data[J]. Modern Radar, 2015,37(2):20-24.)
- [14] 丁昊,薛永华,黄勇,等. 均匀和部分均匀杂波中子空间目标的斜对称自适应检测方法[J]. 雷达学报, 2015,4(4):418-430. (DING Hao, XUE Yonghua, HUANG Yong, et al. Persymmetric adaptive detectors of subspace signals homogeneous and partially homogeneous clutter[J]. Journal of Radars, 2015,4(4):418-430.)
- [15] 郑作虎,王首勇. 基于Alpha稳定分布杂波模型的雷达目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2014,36(2):2963-2968. (ZHENG Zuohu, WANG Shouyong. Radar target detection method based on the alpha-stable distribution clutter model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014,36(2):2963-2968.)

作者简介:



史建涛(1982-),男,河南省开封市人,博士,工程师,主要研究方向为雷达信号处理、新体制雷达探测等 .email:chgsjiantao@126.com.

杨予昊(1983-),男,江苏省南通市人,博士,高级工程师,主要研究方向为电磁场与微波技术.

孙俊(1973-),男,云南省安宁市人,博士,研究员,主要研究方向为雷达系统设计、雷达信号处理.

王宁(1985-),男,山东省聊城市人,博士,高级工程师,主要研究方向为雷达抗干扰、雷达信号处理.