

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.009

基于相对马氏距离的非均匀杂波抑制方法

温和,段崇棣,王伟伟,万贝,梁家乐,席子瑞

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘要:由于天基雷达覆盖范围广、探测背景复杂,雷达回波会呈现出明显的非均匀特性,从而导致杂波协方差矩阵(clutter covariance matrix, CCM)估计与实际情况出现偏差,从而恶化天基雷达对空中动目标的检测性能。针对上述问题,提出了一种基于相对马氏距离的非均匀样本抑制方法,该方法首先计算所有样本的广义内积(generalized inner product, GIP),在此基础上选取一个合适的样本作为参考。通过比较场景中所有样本与参考样本的马氏距离,将相对马氏距离大于判定门限的样本作为非均匀样本剔除。用筛选后的样本进行杂波协方差矩阵估计,从而提高天基雷达在复杂环境下对空中动目标的检测性能。理论分析和实测数据结果表明,所提算法能够在非均匀环境下有效检测出空中动目标。

关键词:空时自适应处理;非均匀样本;广义内积;马氏距离

中图分类号:TN95;V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)01-0053-05

A heterogeneous clutter suppression method based on relative Mahalanobis distance

WEN He, DUAN Chongdi, WANG Weiwei, WAN Bei, LIANG Jiale, XI Zirui

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: The radar echoes of space-based radars show obvious inhomogeneous characteristics due to the wide coverage and complex detection background. It leads to the deviation between the clutter covariance matrix (CCM) estimation and the actual situation, which reduces detection performance for air moving targets. To solve the above problem, a heterogeneous sample screening method based on relative Mahalanobis distance is proposed. Firstly, the generalized inner product (GIP) of all samples are calculated, and an appropriate sample is chosen as the reference sample. By comparing the Mahalanobis distance between all samples in the scene and the reference sample, the samples whose relative Mahalanobis distance is greater than the decision threshold are eliminated as non-uniform samples. The processed samples are used to estimate the clutter covariance matrix, so as to improve the detection performance of SBR in complex environment. Theoretical analysis and actual data results show that the proposed algorithm can effectively detect air moving targets in heterogeneous environment.

Key words: space-time adaptive processing (STAP); heterogeneous sample; generalized inner product; mahalanobis distance

收稿日期:2022-09-02; 修回日期:2022-09-26

基金项目:国家自然科学基金青年基金(编号:62107033)

引用格式:温和,段崇棣,王伟伟,等.基于相对马氏距离的非均匀杂波抑制方法[J].空间电子技术,2023,20(1):53-57. WEN H, DUAN C D, WANG W W, et al. A heterogeneous clutter suppression method based on relative Mahalanobis distance [J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(1): 53-57.

0 引言

天基雷达对空中动目标检测时,其波束方向直接指向地面,造成其回波中包含大量的杂波,并且由于天基雷达与地面之间的相对运动造成的杂波频谱展宽,会对低速运动目标的检测造成严重影响。随着相控阵雷达技术的发展,空时自适应处理^[1-2](space time adaptive processing, STAP)通过联合时域和空域信息可以有效解决此类问题,并已经应用在部分天基雷达、空基雷达的杂波抑制方面。然而当地面环境复杂时,不同散射单元之间的反射特性差异会使杂波的非均匀性加剧,造成杂波协方差矩阵估计值与真实值存在较大的差异,导致 STAP 的杂波抑制性能下降,此时难以对空中运动目标进行有效检测^[3-4]。

杂波协方差的估计值影响着自适应滤波器的性能,因而准确估计杂波协方差矩阵对于天基雷达的杂波抑制起着关键作用。GIP 法^[5-6]是一种常见非均匀样本筛选方法,其可以在非均匀杂波背景下获取均匀样本,从而估计杂波协方差矩阵;然而当非均匀杂波中存在强功率背景时,GIP 法的性能会大大的下降。文献[7]提出了一种不敏空时自适应算法,其利用不敏变换(unscented transformation, UT)对非均匀数据进行非线性变化,对处理后的数据进行协方差矩阵估计,降低了杂波的非均匀性,但其同样容易受到强杂波点的干扰。文献[8]提出了一种基于扁长球波函数(prolate spheroidal wave functions, PSWF)的 GIP 法,该方法可以有效地去除非均匀样本中的强功率值,提高非均匀杂波环境下的目标检测性能;然而该方法中的 PSWF 需要提前存储,且其基向量的确定较为复杂,难以进行实时处理。文献[9]提出了一种知识辅助的空时自适应算法,通过对探测区域的先验信息来进行杂波的估计,该方法效果良好,然而感兴趣区域的背景信息在实际应用中难以准确获得,故其在实际应用中存在很大挑战。

考虑到上述问题,本文提出了一种基于相对马氏距离^[10]的非均匀杂波样本抑制方法。该方法通过比较目标场景中各杂波单元与参考样本之间的马氏距离,筛选出估计杂波协方差所需的均匀样本,进而估算出杂波协方差矩阵,从而构造最优滤波器对地杂波进行抑制并对目标实现检测。通过与传统的方法比较,理论分析和仿真结果验证了该

算法具有良好的检测性能。

1 杂波抑制基本原理

假设天基雷达天线是一个平面阵列天线,雷达平台与目标场景的几何关系如图 1 所示。其中天基雷达平台的高度为 H ,速度与地面平行,天线阵面轴向与速度方向的夹角为偏航角 α 。雷达与目标场景 S 之间的瞬时距离为 R ,方位角和俯仰角分别为 θ 和 φ , Ψ 是对应天线的空间锥角。

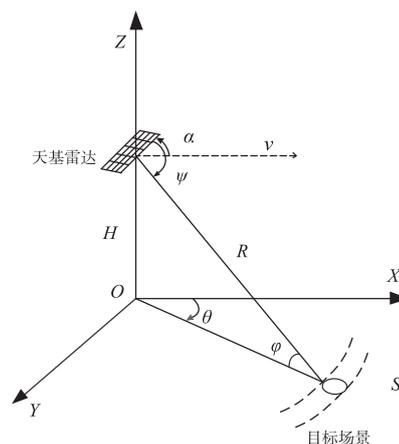


图 1 天基雷达工作几何图

Fig. 1 The diagram of space-based radar

图 1 中天基雷达采用的平面阵列经过俯仰维的加权处理后可以等效为一个 N 元阵列,各个阵元之间的距离为 d 。当雷达一个相干处理间隔(coherent process interval, CPI)的脉冲数目为 K 时,第 l 个距离门接收到的空时二维数据 \mathbf{x} 可以表示为:

$$\mathbf{x} = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{N1}, \dots, x_{1K}, x_{2K}, \dots, x_{NK}]^T \quad (1)$$

与之相对应的空时二维滤波器自适应权值 \mathbf{w} 可表示为 $NK \times 1$ 维向量:

$$\mathbf{w} = [w_{11}, w_{21}, \dots, w_{N1}, \dots, w_{1K}, w_{2K}, \dots, w_{NK}]^T \quad (2)$$

在输出最大信噪比条件下,STAP 权值 \mathbf{w} 的求解可以表示为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^H \mathbf{s} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$ 为当前距离单元的杂波加噪声协方差矩阵, \mathbf{s} 为目标二维导向向量,表示为:

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_t \otimes \mathbf{s}_s \quad (4)$$

其中 \mathbf{s}_t 和 \mathbf{s}_s 分别表示运动目标的时域导向向量和空域导向向量,其表达式如下:

$$\mathbf{s}_t = [1 \quad \exp(j2\pi f_t) \cdots \exp(j2\pi(K-1)f_t)] \quad (5)$$

$$\mathbf{s}_s = [1 \quad \exp(j2\pi f_s) \cdots \exp(j2\pi(N-1)f_s)] \quad (6)$$

这里 f_t, f_s 分别表示目标的归一化多普勒频率和归一化空间频率。对式(3)求解,可以得到最优权值为:

$$\mathbf{w}_{opt} = \mu \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{s} \quad (7)$$

此处 \mathbf{R}_x 的取值通常利用最大似然估计进行计算,其估计值 $\hat{\mathbf{R}}_x$ 可以表示为:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{x}_m \mathbf{x}_m^H \quad (8)$$

其中 \mathbf{x}_m 表示第 m 个参考样本的数据矢量,为待测距离单元附近的独立同分布样本, M 表示参考样本的总数。在实际应用中,由于全维 STAP 的计算量太大,需要对空时二维数据 \mathbf{x} 进行降维处理,以便于进行实时计算。

由于杂波的协方差距离需要大量的独立同分布样本,在实际情况中,杂波在空间上的分布很难满足独立同分布条件(如在城乡结合区域、山区和平原交汇处、草地与林地过渡区域以及水陆交界处等场景);同时,目标场景中一些强散射点(如铁塔、高大建筑物和海中孤岛等)会增大此方向的杂波功率,加剧回波数据中杂波的非均匀特性,从而使杂波的协方差矩阵估计与实际情况出现偏差,如式(9)所列:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^{M_1} \mathbf{x}_m \mathbf{x}_m^H + \sum_{n=M_1+1}^M \mathbf{x}_n \mathbf{x}_n^H \right) \quad (9)$$

其中, $\hat{\mathbf{R}}_x$ 表示实际情况中非均匀样本场景估计出来的杂波协方差矩阵, M_1 表示均匀参考样本的个数,非均匀样本的个数可以表示为 $M - M_1$ 。在非均匀场景中估计的杂波协方差矩阵会影响空时滤波器的自适应权值,从而减弱天基雷达的杂波抑制以及对空中动目标检测能力。

2 基于相对马氏距离的杂波抑制方法

由以上的理论分析可知,在复杂环境下剔除非均匀样本对于杂波抑制起着重要作用。在复杂背景下的目标检测中,恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)检测方法^[11-12]一种常见的信号处理方法。受有序统计类 OS-CFAR^[13]的启发,本文对所有样本的 GIP 进行排序,并根据 GIP 值挑选合适的样本作为参考样本,并以此进行样本的筛选。结合参考样本,本文提出了一种基于相对马氏距离的非均匀样本抑制方法。

马氏距离是一种表示数据的协方差距离,它可以有效地计算出两个样本之间的相似度。对于参

考单元 \mathbf{x}_{ref} 和其他样本数据 \mathbf{x}_0 之间的马氏距离^[14]表示如式(10)所列:

$$D(\mathbf{x}_{ref}, \mathbf{x}_0) = (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_0)^H \hat{\mathbf{R}}_x^{-1} (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_0) \quad (10)$$

其中 $\hat{\mathbf{R}}_x$ 是合成协方差矩阵,可以根据所有统计数据中的样本得到。

当目标场景中存在强噪声、干扰时以及其它非均匀区域时,需要将此部分样本数据剔除,否则其会影响杂波协方差的估计。因此,需要根据 GIP 值得到参考样本,比较所有样本与参考样本之间的马氏距离,剔除马氏距离较大的一部分样本,将剩余的样本作为均匀样本来估计杂波协方差矩阵。

相对马氏距离的非均匀样本杂波抑制方法主要步骤如下:

(1) 计算样本 GIP 值。

根据雷达回波得到目标场景里面所有距离单元的样本数据集 \mathbf{X}_0 , 并计算所有样本的广义内积值。

对于第 l 个距离单元的杂波数据,其 GIP^[15] 可以表示为:

$$Z_l = \mathbf{x}_l^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{x}_l \quad (11)$$

由于 \mathbf{R}_x 是厄米特矩阵,并且可知其为正定的,因此式(11)可以写为:

$$Z_l = (\mathbf{R}_x^{-1/2} \mathbf{x}_l)^H \mathbf{R}_x^{-1/2} \mathbf{x}_l \quad (12)$$

观察上式,广义内积的可以看作数据 \mathbf{x}_l 经过 $\mathbf{R}_x^{-1/2}$ 白化后的内积,表示数据白化后的能量。

(2) 获取相对马氏距离的参考样本。

将样本数据集 \mathbf{X}_0 按照 GIP 值进行从小到大的排序,根据 GIP 的值选取参考样本 \mathbf{x}_{ref} , 此样本作为后续非均匀杂波数据处理的参考样本。参考样本 \mathbf{x}_{ref} 的选取比较重要,其影响着后续样本的筛选以及所估计 CCM 的准确性。与中值滤波法的思想类似,本文根据样本数据集中 GIP 中位数所对应的样本设置为 \mathbf{x}_{ref} , 能在剔除非均匀样本的同时尽可能的保留均匀样本的数量,从而利于 CCM 的估计。

(3) 获取新的样本集合

计算有序初筛数据集 \mathbf{X}_1 中所有样本 \mathbf{x}_1 与参考样本 \mathbf{x}_{ref} 之间的马氏距离,即比较 \mathbf{x}_1 与 \mathbf{x}_{ref} 它们之间的样本相似度,根据结果进行如下处理:

$$\begin{cases} (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_0)^H \hat{\mathbf{R}}_x^{-1} (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_0) > \eta & \text{剔除} \\ (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_0)^H \hat{\mathbf{R}}_x^{-1} (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_0) \leq \eta & \text{保留} \end{cases} \quad (13)$$

其中, η 是相似度门限,用来判断当前样本是否为均匀样本。从上式可以看到,若当前样本的相对马氏距离小于门限 η 时,则认为其为均匀样本;反之,则

视为非均匀样本。

(4)求得杂波协方差估计值

将筛选后的样本集合记为 X_{rem} , 则进行非均匀样本筛选后的杂波协方差矩阵可以表示为:

$$\hat{R}'_x = \frac{1}{M'} \sum_{x_{m'} \in X_{rem}} x_{m'} x_{m'}^H \quad (14)$$

其中, $x_{m'}$ 表示经过挑选后的剩余杂波样本, M' 表示剩余样本数量。

根据式(14)得到最终筛选后杂波的协方差矩阵, 可以根据式(7)得到空时二维滤波器的权系数, 从而进行当前距离单元的杂波抑制, 完成对非均匀杂波场景下的运动目标实现检测。该算法的实现流程如图 2 所示。

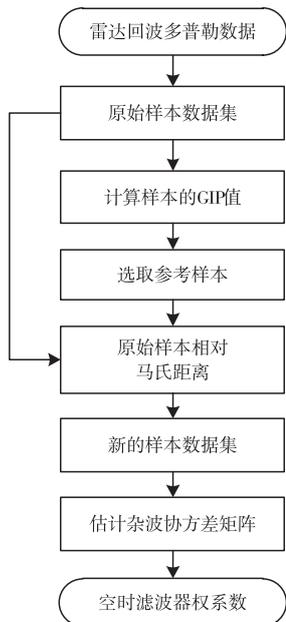


图 2 相对马氏距离杂波抑制算法流程

Fig. 2 The algorithm flow of relative Mahalanobis distance clutter suppression

3 实测数据处理结果

为验证所提方法的有效性, 对所提方法进行对比验证, 所采用数据是某次机载校飞试验实测数据, 试验参数如下: 雷达工作在 L 波段, 采用相控阵体制, 8 个天线子阵分别接收数据, 相干处理间隔内脉冲数为 250, 脉冲重复频率为 2 500 Hz。雷达平台高度为 3 000 m, 配合目标飞机的飞行高度为 300 m。由于全维 STAP 仅适用于理论分析, 本文以 3 通道的扩展因子法^[16] (extended factored approach, EFA) 作为处理数据的降维 STAP 方法。

如图 3 所示, 显示了通道 1 的雷达原始回波数据经距离脉压及多普勒处理后的结果, 可以看出地

杂波出现了频谱扩展, 此时空中动目标完全被强杂波所覆盖, 同时杂波整体上呈现出分布不均匀的特性, 从原始的距离多普勒图中无法观测到目标信息。

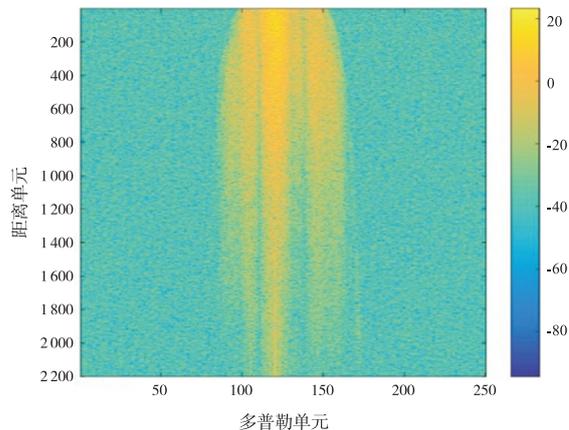


图 3 雷达通道 1 的距离多普勒域实测数据

Fig. 3 The range Doppler domain measured data of radar channel 1

通过传统的 GIP 杂波抑制方法和用所提方法对实测数据进行处理, 分别得到处理后的距离多普勒域二维结果和距离多普勒域三维, 如图 4 和图 5 所示。

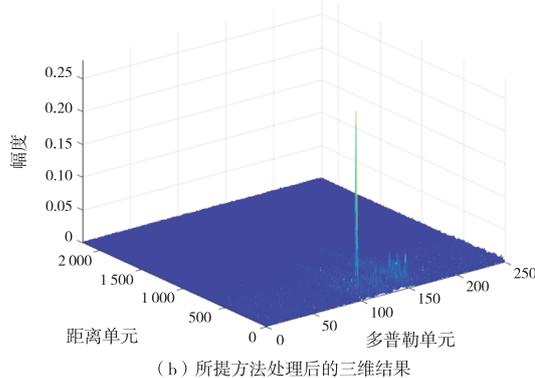
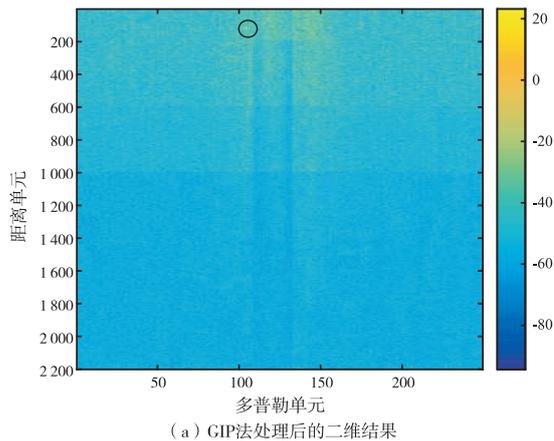


图 4 GIP 杂波抑制方法的处理结果

Fig. 4 The processing results of the GIP method

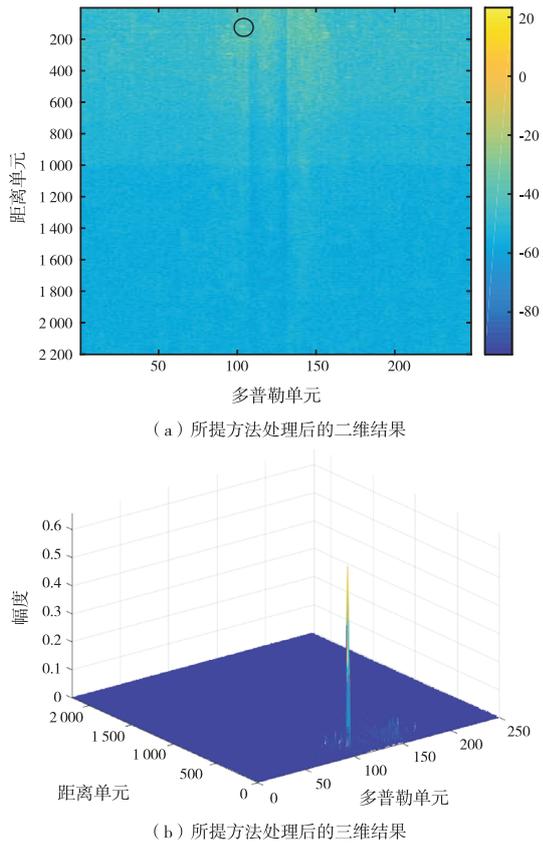


图 5 本文所提方法处理结果

Fig. 5 The processing results of the proposed method

通过上图可以看出,两种方法经过杂波抑制处理后,均能对地面杂波进行抑制,进而检测到空中目标,目标在场景中清楚地显现出来并且得到目标的距离信息和多普勒信息。其中,目标的距离单元数为 127,多普勒单元数是 105,GIP 方法抑制杂波后的目标幅度为 0.28 dB,所提算法抑制杂波后的目标幅度为 0.65 dB,因此,所提算法对非均匀样本的筛选更加精准,对杂波的抑制更加有效,仿真结果表明了所提算法对于非均匀环境下的空中目标有着良好的检测能力。

4 结论

本文针对天基预警雷达在探测空中目标时存在的非均匀杂波问题,提出了一种基于相对马氏距离的非均匀杂波抑制方法。该方法利用场景中样本与参考样本的马氏距离,剔除样本集中的非均匀样本数据,根据筛选后的样本进行杂波协方差估计,通过对实测数据处理结果比较,该方法优于传统的 GIP 杂波抑制方法。因此,理论分析和实测数

据处理结果验证了所提方法在非均匀场景下的有效性。

参考文献:

- [1] 谢文冲,段克清,王永良. 机载雷达空时自适应处理技术研究综述[J]. 雷达学报,2017,6(6):575-586.
- [2] 刘明鑫. 无人机载预警雷达空时自适应处理研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [3] 陈洪猛,刘京,李明,等. 一种新的无人机载雷达非均匀杂波抑制方法[J]. 深圳大学学报(理工版),2019,36(5):489-496.
- [4] 刘宝泉,刘春静,代泽洋. 机载预警雷达 KA-STAP 杂波抑制方法研究[J]. 雷达科学与技术,2019,17(4):396-400+408.
- [5] WANG W,ZOU L,WANG X G, et al. Deterministic-aided single dataset STAP method based on sparse recovery in heterogeneous clutter environments[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing,2018,2018(1):24.
- [6] 郭佳佳,廖桂生,杨志伟,等. 利用广义内积值迭代加权的空时协方差矩阵估计方法[J]. 电子与信息学报,2014,36(2):422-427.
- [7] 刘聪锋,廖桂生. 不敏空时自适应处理算法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(2):251-255.
- [8] YANG X P,LIU Y X,HU X N, et al. Robust generalized inner products algorithm using prolate spheroidal wave functions [C]//2012 IEEE Radar Conference, 2012: 581-584.
- [9] TAO F Y,WANG T,WU J X, et al. A novel KA-STAP method based on Mahalanobis distance metric learning [J]. Digital Signal Processing,2020,97:102613.
- [10] ROIZMAN V,JONCKHEERE M,PASCAL F. Robust clustering and outlier rejection using the Mahalanobis distance distribution [C]//2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2020:2448-2452.
- [11] 张明友,汪学刚. 雷达系统[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社,2011.
- [12] 李渝,吴涛,杨文海,等. 一种分布式目标滑窗检测方法[J]. 空间电子技术,2022,19(2):64-68.
- [13] 詹世豪. 复杂背景下的自适应恒虚警算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
- [14] 李玉榕,项国波. 一种基于马氏距离的线性判别分析分类算法[J]. 计算机仿真,2006,23(8):86-88.
- [15] 刘红亮. 机载雷达非均匀检测和杂波抑制方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2016.
- [16] TONG Y L,WANG T,WU J X. Improving EFA-STAP performance using persymmetric covariance matrix estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2015,51(2):924-936.

作者简介:温和(1994—),陕西铜川人,硕士,工程师。主要研究方向为雷达信号处理。E-mail:276815216@qq.com

通讯作者:段崇棣(1972—),陕西西安人,博士,研究员。主要研究方向为雷达系统设计和微波遥感技术。

E-mail:duanced@cast504.com