

基于被动干涉微波亮温图像的海面目标探测算法研究

卢海梁^① 王志强^② 高 超^② 李一楠^① 胡泰洋^{*③}
王佳坤^① 杨小娇^① 吕容川^① 李 浩^①

^①(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

^②(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

^③(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘 要: 为利用被动干涉微波技术作为我国天基预警体系的重要补充以实现对面海目标的有效探测, 该文提出一种基于被动干涉微波图像的海面目标探测算法。首先, 建立了海面背景和海面目标的被动干涉微波图像数学模型; 其次, 详细地介绍了海面目标的探测算法, 并仿真验证了算法的可行性; 最后, 开展了机载实验。理论分析和实验验证均表明: 该探测算法是可行性的, 能有效地探测到海面目标, 且具有较好的探测性能; 海面航行的金属目标在被动干涉微波图像中呈现“一高一低”的特征, 可利用该特征提高海面目标探测概率。该探测算法可为天基被动干涉微波技术探测海面目标提供参考。

关键词: 海面目标探测; 微波图像; 被动干涉

中图分类号: TN959.72; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0563-10

DOI: [10.11999/JEIT190256](https://doi.org/10.11999/JEIT190256)

Research on the Detection Algorithm for Sea Surface Targets Based on Passive Interferometric Microwave Images

LU Hailiang^① WANG Zhiqiang^② GAO Chao^② LI Yinan^① HU Taiyang^③
WANG Jiakun^① YANG Xiaojiao^① LÜ Rongchuan^① LI Hao^①

^①(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

^②(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

^③(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To effectively detect sea surface targets by the passive interferometric microwave technology considered as an important complement for the space-based early warning system of China, a detection algorithm is proposed based on the Passive Interferometric Microwave Images (PIMI). First, the mathematical model of PIMI is established for the sea background and sea surface target. Second, the detection algorithm is introduced in detail, and numerical simulations are performed to demonstrate the feasibility of the proposed algorithm. Finally, the air-borne experiments are also carried out. Both theoretical and experimental results demonstrate that the proposed algorithm is feasible, can effectively detect sea surface targets, and show good performance. That also exhibits that the moving metal vessels on the sea surface show a “hot” and “low” characteristic in PIMI, which can be used to improve the detection probability. The proposed detection algorithm can provide a reference for space-based PIMI to detect sea surface targets.

Key words: Sea surface target detection; Microwave image; Passive interferometric

收稿日期: 2019-04-12; 改回日期: 2019-06-20; 网络出版: 2019-10-30

*通信作者: 胡泰洋 sun1983hu@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(41706204), 钱学森青年创新基金(QXSCXJJ2017-504), 中国空间技术研究院西安分院自主研发课题(Y17-KJCX-04)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41706204), The Qian Xuesen Young Innovation Foundation (QXSCXJJ2017-504), The Independent Investigate Project of Xi'an Institute of China Academy of Space Technology (Y17-KJCX-04)

1 引言

被动微波辐射无源探测技术主要是利用目标与背景的微波热辐射信号强度的差异来探测目标的,其主要设备是微波辐射计,属于无源雷达的范畴^[1]。被动微波辐射无源探测手段与传统雷达相比,不发射任何信号,具有功耗低、隐蔽性强、受海杂波干扰小等优点;同时对隐身目标也具有较好的探测能力。国内外相关机构一直在开展其在军事侦察方面的应用研究^[2-9]。在国内,华中科技大学、南京理工大学等单位均开展了被动微波无源探测技术方面的相关研究^[10-16]。华中科技大学主要针对被动干涉微波无源探测应用于空中目标和末端制导等方面开展了相关研究^[6,10,16],南京理工大学主要针对被动实孔径微波无源探测应用于地面军事目标方面开展了相关的研究^[12,14,15]。目前,中国空间技术研究院西安分院在国内外首次提出了将天基/空基被动干涉微波无源探测技术作为我国天基预警体系的重要补充部分应用于海面目标的全天时、全天候、隐蔽性探测^[17]。但由于探测距离远或受限于被动干涉微波无源探测系统的空间分辨率,海面目标在被动干涉微波图像中只占据少数几个像素点,甚至一个像素点。因此,海面目标在被动干涉微波图像中信噪比较低,且呈现出弱小的特点。

针对天基/空基被动干涉微波技术探测海面目标探测的问题,本文提出了一种基于被动干涉微波图像的海面目标的探测算法。该算法主要是利用海面背景被动干涉微波图像特征以及海面背景与海面目标的被动干涉微波图像的差异来实现对海面目标的探测。

2 被动干涉微波图像的数学模型

首先,为研究海面背景的被动干涉微波图像的特征,建立了海面背景和海面目标的被动干涉微波图像的数学模型。在天基或空基被动干涉微波无源探测系统中,海面背景的被动干涉微波图像 $T_b(\theta, \varphi, t)$ 可表示为

$$T_b(\theta, \varphi, t) = T_s(\theta, \varphi, t) + T_n(\theta, \varphi, t) \quad (1)$$

其中, θ 和 φ 分别表示入射角和方位角, $T_s(\theta, \varphi, t)$ 表示时刻 t 的理想海面表面的被动干涉微波图像, $T_n(\theta, \varphi, t)$ 表示时刻 t 的被动干涉微波图像噪声,其主要由3部分组成:海杂波引起的噪声(波动),大气传输过程中引入的噪声和被动干涉微波无源探测系统的本底噪声。

当探测距离较远时,目标在被动干涉微波图像中只占一个或几个像素点。假设海面目标只占据1个像素点 (θ_0, φ_0) 时,其被动干涉微波图像 $\tilde{T}_b(\theta, \varphi, t)$ 可表示为

$$\tilde{T}_b(\theta, \varphi, t) = T_s(\theta, \varphi, t) + (T_t(\theta, \varphi, t) - T_s(\theta, \varphi, t)) \cdot \delta(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0) + T_n(\theta, \varphi, t) \quad (2)$$

其中, $T_t(\theta, \varphi, t)$ 表示目标时刻 t 的被动微波图像, δ 表示狄拉克冲激函数。

3 海面目标探测算法及仿真分析

基于海面背景的被动干涉微波图像的数学模型及其特征,本节提出了一种基于被动干涉微波图像的海面目标探测算法。

3.1 探测算法理论与介绍

该海面目标探测算法包括4个步骤:(1)差分检测;(2)背景对消检测;(3)目标标识;(4)目标跟踪。如图1所示,下面将详细介绍探测算法的每一个步骤。

3.1.1 差分检测

假设 t_0 时刻目标位于像素点 (θ_0, φ_0) , 其被动干涉微波图像为

$$\tilde{T}_b(\theta, \varphi, t_0) = T_s(\theta, \varphi, t_0) + (T_t(\theta, \varphi, t_0) - T_s(\theta, \varphi, t_0)) \cdot \delta(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0) + T_n(\theta, \varphi, t_0) \quad (3)$$

假设 t_1 时刻目标位于像素点 (θ_1, φ_1) , 其被动干涉微波图像为

$$\tilde{T}_b(\theta, \varphi, t_1) = T_s(\theta, \varphi, t_1) + (T_t(\theta, \varphi, t_1) - T_s(\theta, \varphi, t_1)) \cdot \delta(\theta - \theta_1, \varphi - \varphi_1) + T_n(\theta, \varphi, t_1) \quad (4)$$

当 t_0 时刻与 t_1 时刻相差较大且观测的海面区域存在较大变化时,两时刻获得的海面背景被动干涉

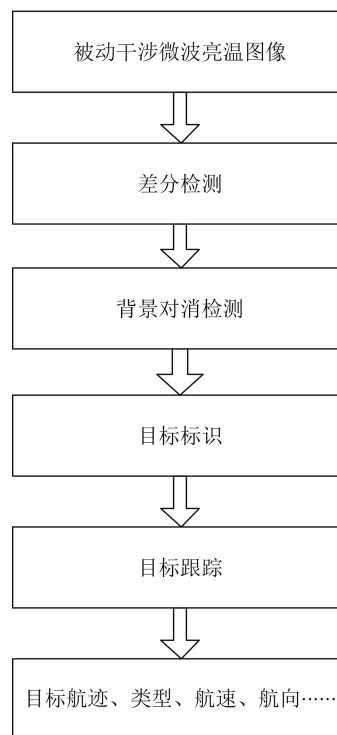


图 1 基于被动干涉微波图像的海面舰船目标探测算法流程图

微波图像差异较大, 即 $T_s(\theta, \varphi, t_0) \neq T_s(\theta, \varphi, t_1)$; 此外, 当探测系统与海面相对观测角(方位角和入射角)发生变化时, 也会造成两时刻的被动干涉微波图像的较大差异^[18]。

而当 t_0 时刻与 t_1 时刻只差几个积分周期、且单帧积分时间较短时, 系统所观测的区域几乎是相同的^[18], 获得的海面背景被动干涉微波图像基本是相同的

$$T_s(\theta, \varphi, t_0) \approx T_s(\theta, \varphi, t_1) \quad (5)$$

因此, 可将 t_0 时刻获得的被动干涉微波图像减去 t_1 时刻获得的被动干涉微波图像, 得到前后两个时刻的被动干涉微波差分检测图像

$$\begin{aligned} \Delta T(\theta, \varphi, t_0) &= \tilde{T}_b(\theta, \varphi, t_0) - \tilde{T}_b(\theta, \varphi, t_1) \\ &= (T_t(\theta, \varphi, t_0) - T_s(\theta, \varphi, t_0)) \\ &\quad \cdot \delta(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0) - (T_t(\theta, \varphi, t_1) \\ &\quad - T_s(\theta, \varphi, t_1)) \cdot \delta(\theta - \theta_1, \varphi - \varphi_1) \\ &\quad + \sqrt{2} \cdot T_n(\theta, \varphi, t_0) \end{aligned} \quad (6)$$

其中图像噪声相减是不能抵消, 而是叠加效应的。

3.1.2 背景对消检测

而对于平坦的开阔海域而言, 海面背景的被动干涉微波辐射图像只与入射角相关^[18], 即

$$\begin{aligned} T_s(\theta, \varphi, t-n) &= \dots = T_s(\theta, \varphi, t) = \dots \\ &= T_s(\theta, \varphi, t+n) = T_s(\theta, \varphi, t_0) \end{aligned} \quad (7)$$

此时, 可将 t 时刻含有目标的被动干涉微波图像 $\tilde{T}_b(\theta, \varphi, t)$ 减去 t_0 时刻海面背景的被动干涉微波图像 $T_b(\theta, \varphi, t_0)$, 得到目标与海面背景的被动干涉微波背景对消检测图像

$$\begin{aligned} \Delta T_t(\theta, \varphi, t) &= (T_t(\theta, \varphi, t) - T_s(\theta, \varphi, t)) \\ &\quad \cdot \delta(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0) + \sqrt{2} T_n(\theta, \varphi, t) \end{aligned} \quad (8)$$

在式(6)和式(8)中, 当目标 $T_t(\theta, \varphi, t)$ 与海面背景 $T_s(\theta, \varphi, t)$ 在像素点 (θ_0, φ_0) 或 (θ_1, φ_1) 的亮温差值大于差分检测图像或背景对消检测图像的噪声时, 则可认为该目标是可探测的^[6]。由式(6)可知: 在差分检测图像, 若存在可探测目标, 图像中将出现一“高”一“低”两个亮温点。根据此特征可确定场景是否存在目标及其范围。由式(8)可知: 若目标是亮温小于海洋背景的可探测目标, 即 $T_t(\theta_0, \varphi_0, t) < T_s(\theta_0, \varphi_0, t)$, 则目标在对消检测图像中是一个“低”亮温点, 比如金属舰船; 相反, 目标是亮温大于海洋背景的可探测目标, 即 $T_t(\theta_0, \varphi_0, t) > T_s(\theta_0, \varphi_0, t)$, 目标在对消检测图像中是一个“高”亮温点, 比如岛屿或隐身舰船。由于海面目标的理想被动干涉微波背景对消检测图像可认为是海面目标的相对被动干涉微波图像, 因此, 上述图像目标

特征和后续算法步骤同样适用于海面目标的相对被动干涉微波图像。

3.1.3 目标标识

基于被动干涉微波背景对消检测图像, 可实现对目标的标识。若目标是亮温低于海面背景的可探测的目标, 则有

$$F(\theta, \varphi, t) = \begin{cases} 1, & \Delta T_t(\theta, \varphi, t) \leq -N \cdot \sigma \\ 0, & \Delta T_t(\theta, \varphi, t) > -N \cdot \sigma \end{cases} \quad (9)$$

其中, $F(\theta, \varphi, t)$ 表示基于被动干涉微波图像 $\tilde{T}_b(\theta, \varphi, t)$ 的目标标识图; “1”表示在该像素点存在目标, “0”表示在该像素点不存在目标; σ 表示被动干涉微波背景对消检测图像的标准差; N 表示的是一个尺度因子, 当 N 较大时, 虚警率较低、探测概率亦较低, 相反, 虚警率较高、探测概率亦较高。因此, 需要折中考虑虚警概率和探测概率, 选择合适的 N 值。

若目标是亮温大于海面背景亮温的可探目标, 则有

$$F(\theta, \varphi, t) = \begin{cases} 1, & \Delta T_t(\theta, \varphi, t) \geq N \cdot \sigma \\ 0, & \Delta T_t(\theta, \varphi, t) < N \cdot \sigma \end{cases} \quad (10)$$

同样, 基于被动干涉微波差分检测图像也可对目标进行目标标识, 只是稍复杂一些。

3.1.4 目标跟踪

由于目标观测是一个连续过程, 因此可绘制目标在视场内的相对航迹图 $Tra(\theta, \varphi)$

$$Tra(\theta, \varphi) = \sum_{t=t_1}^{t_m} F(\theta, \varphi, t) \quad (11)$$

其中 $t_1, t_2, \dots, t_m$ 是由“差分检测”确定目标所在的帧范围。由于相对航迹图是基于连续多帧的目标标识图得到的, 若存在虚警, 则不可能形成连续的航迹图。因此, 通过绘制目标相对航迹图可提高目标的检测概率、降低虚警率。

最后, 综合分析差分检测图像、背景对消检测图像和相对航迹图可确定海面舰船目标的位置、航迹和航向等目标信息。

需要指出的是: (1) 尽管该算法中假设目标是点目标, 但是对于占据几个像素点的线目标或面目标而言, 该算法同样适用; (2) 对于海面高速航行的大型舰船目标而言, 会产生较大范围内的尾浪, 由于尾浪区域的粗糙度较大、且含有大量的泡沫, 其亮温相对于平静海面的亮温要高十几K, 甚至更高, 是一个高亮温目标, 尽管此时与未考虑尾浪的被动干涉微波图像稍有不同, 但提出的目标探测算法同样适用, 且舰船尾浪更有利于目标的探测。

3.2 仿真分析

假设海面背景是平坦开阔海域,海表温度为300 K,海表盐度为32 psu,仿真得到该平坦开阔海域的被动微波图像,如图2(a)所示,由于是平坦开阔海域,其被动微波图像只与入射角有关。假设 t_0 时刻在像素点(70, 110)处有一金属目标;同时,考虑海杂波、大气传输路径和接收机本底因素等引入的噪声时,系统获得的被动微波图像如图2(b)所示;假设该目标 t_1 时刻运动到像素点(76, 110)处,系统获得的被动微波图像如图2(c)所示;采用探测算法步骤1得到差分检测图像,如图2(d)所示,其中出现“一高一低”两个点;采用探测算法步骤2得到背景对消检测图像,如图2(e)所示,其中出现“一个低亮温点”。采用探测算法步骤3对获得基于背景对消检测图像(图2(e))进行标识,得到目

标标识图,如图2(f)所示。对比由图2(c)和图2(f)可知:探测算法标识出目标的位置与目标的真实位置是一致的。仿真结果表明提出的目标探测算法是可行的、能够有效地标识出目标位置。

4 目标探测算法实验验证与结果讨论

为了验证基于被动干涉微波像的海面目标探测算法的可行性及其性能,开展了机载验证实验。

4.1 实验情况简介

实验所用设备是一台单臂6单元“Y”型的被动干涉微波无源探测系统。图3(a)给出了被动干涉微波无源探测系统实物图,图3(b)给出了被动干涉微波无源探测系统机载安装图。同时,试验飞机还安装了光学摄像头,且其视场与系统的视场基本一致,便于后续数据分析和比对。

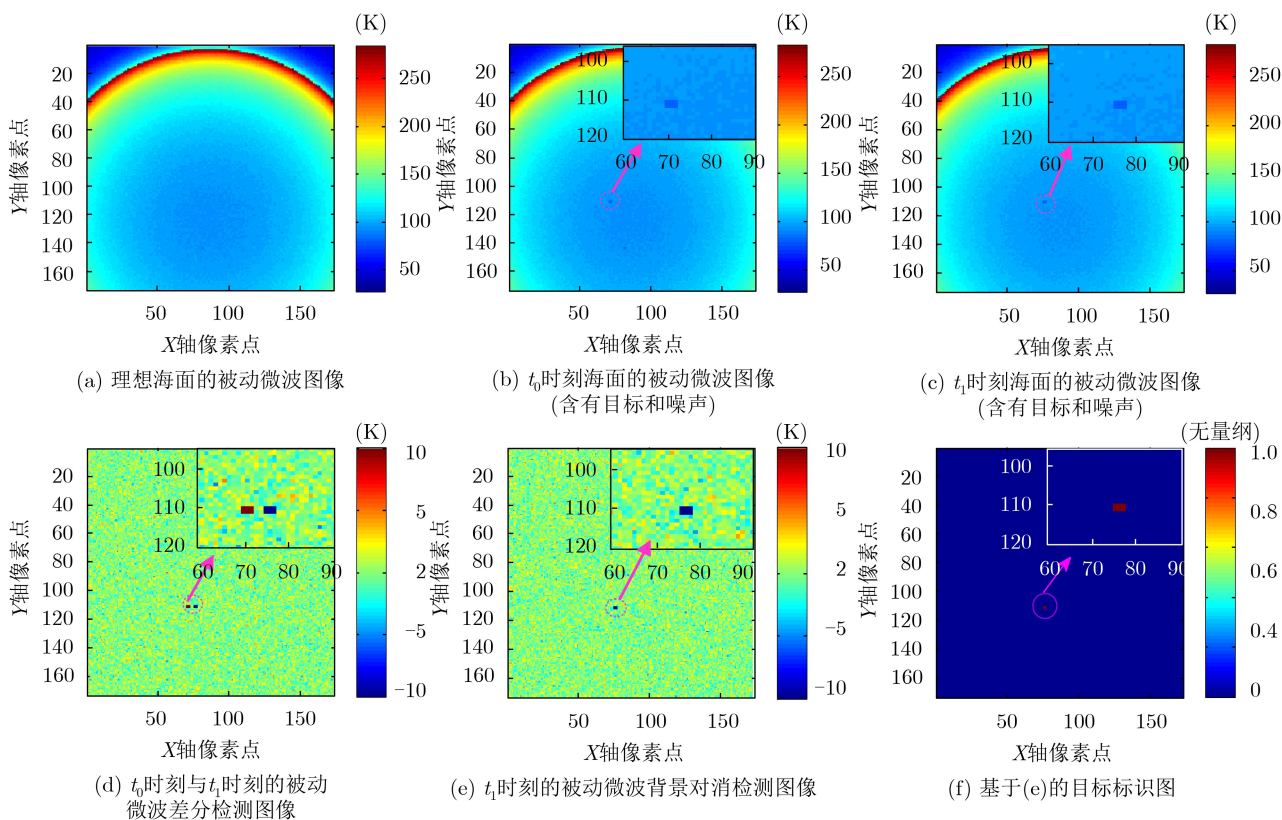


图2 目标探测算法仿真图



(a) 被动干涉微波无源探测系统 (b) 系统机载实验安装示意图

图3 实验设备实物图

在实验中,飞机在实验海域随机寻找路过的船只,采集观测数据;随后,通过对观测数据进行幅相误差校正和亮温图像反演,获得幅相误差校正后观测海域的被动干涉微波图像。需要说明的是,获得的图像是幅相误差校正后的图像,图像中的加性误差尚未校正,但不影响目标探测算法应用及其性能。后续分析的数据和亮温图像均是在飞行高度为900 m高度下获得的。

如图4所示,给出了900 m高度下中心单元绝对定标后一组数据。从图4中可以发现,获得的数据出现了几次较大变化,通过与视频图像对比分析发现:飞机在飞行过程中由于转弯需要横滚,导致探测系统的入射角增大,如图5所示,又由于观测的是H极化数据,从而导致数据值在横滚过程中极速减小;随后,飞机在整个转弯稳定过程中,横滚角基本保持不变,此时观测的数据也基本保持不变,如图4中蓝色虚圈所示;飞机转弯后恢复平飞过程中,值快速上升,恢复正常,如图4中红色虚圈所示。由此可知:尽管观测海域较为平坦,但实验中飞机会姿态发生变化,造成系统观测角度的改变,进而使得观测的海面背景的数据也发生改变。

图6给出了对应图4中飞机在平飞时的4帧被动

干涉微波图像样例(第1300帧、2200帧、3500帧和4600帧);图7给出了对应图4中飞机在转弯时的4帧被动干涉微波图像样例(第1700帧、2900帧、4100帧和5300帧)。由于实验系统的分辨率较差,所有被动干涉微波图像均是3倍补零后的图像。由图6比较可知:在平飞时,获得海面的被动干涉微波图像基本是一致的,说明实验海域较为平坦。由图7比较可知:飞机在转弯时,获得被动干涉微波图像相对于平飞时发生较大变化,亮温值低于平飞时的亮温值,约为10 K左右。上述结果与图4中的分析结果是一致的,均表明由于飞机姿态造成观测场景的变化需要选择合适的海面背景来实现对海面目标的探测。因此,在背景对消检测过程中,需要选择合适的海面对消背景。

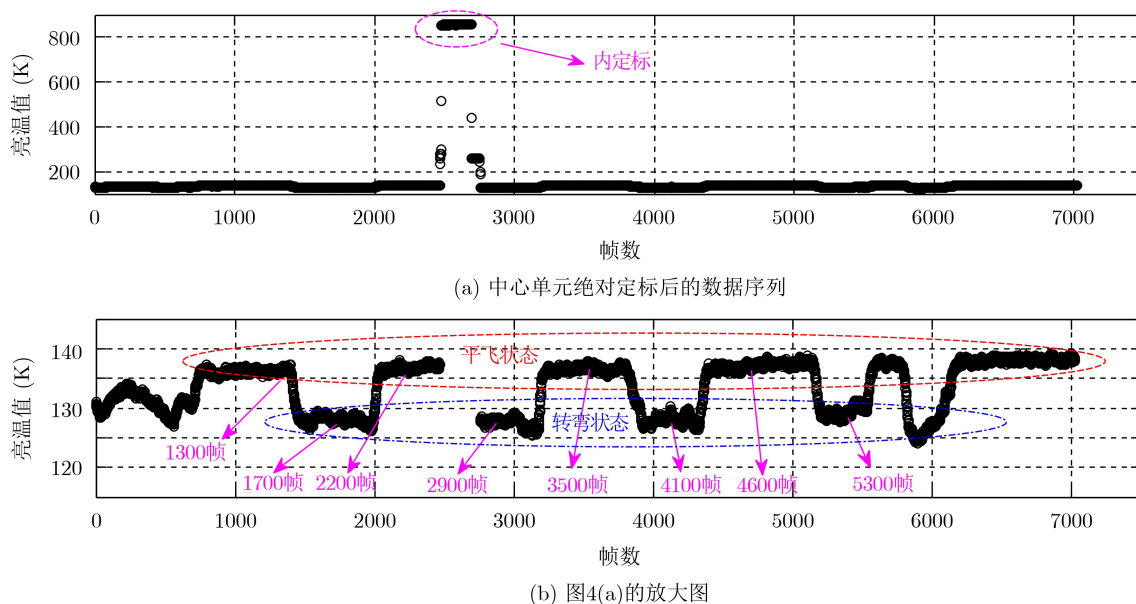


图4 900 m高度下中心单元绝对定标后的一组数据

采用提出的目标探测算法对实验中某一组数据进行处理,结果如图8所示。由步骤1初步确定在第1555~1655帧范围内存在海面目标。图8(a)给出了第1595帧、第1605帧和第1615帧的被动干涉微波图

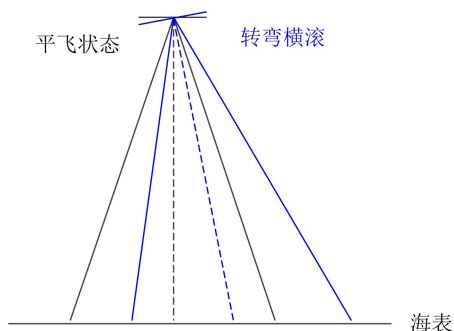


图5 飞机在转弯横滚示意图

像;图8(b)给出了 $t_1 - t_0 = 0.5$ s时图8(a)对应的被动干涉微波差分检测图像;图8(c)给出了第1450帧的被动干涉微波图像作为合适的海面背景,采用步骤2获得的对应图8(a)的被动干涉微波背景对消检测图像;图8(d)给出了 σ 是平坦场景第1400~1480帧的被动干涉微波图像的均方根, N 为6时基于采用步骤3获得对应图8(c)的目标标识图;图8(e)给出了图8(a)对应时刻的光学图像。

由图8综合可知:仅由图8(a)无法直接判断是否存在海面目标。这主要是由于被动干涉微波图像中存在加性误差等因素造成的;而采用步骤1后基本确定了图像中是否存在目标及其所在范围,如图8(b)所示;再根据中心单元绝对定标后的数据序列选择合适的海面对消背景,采用步骤2后能够获

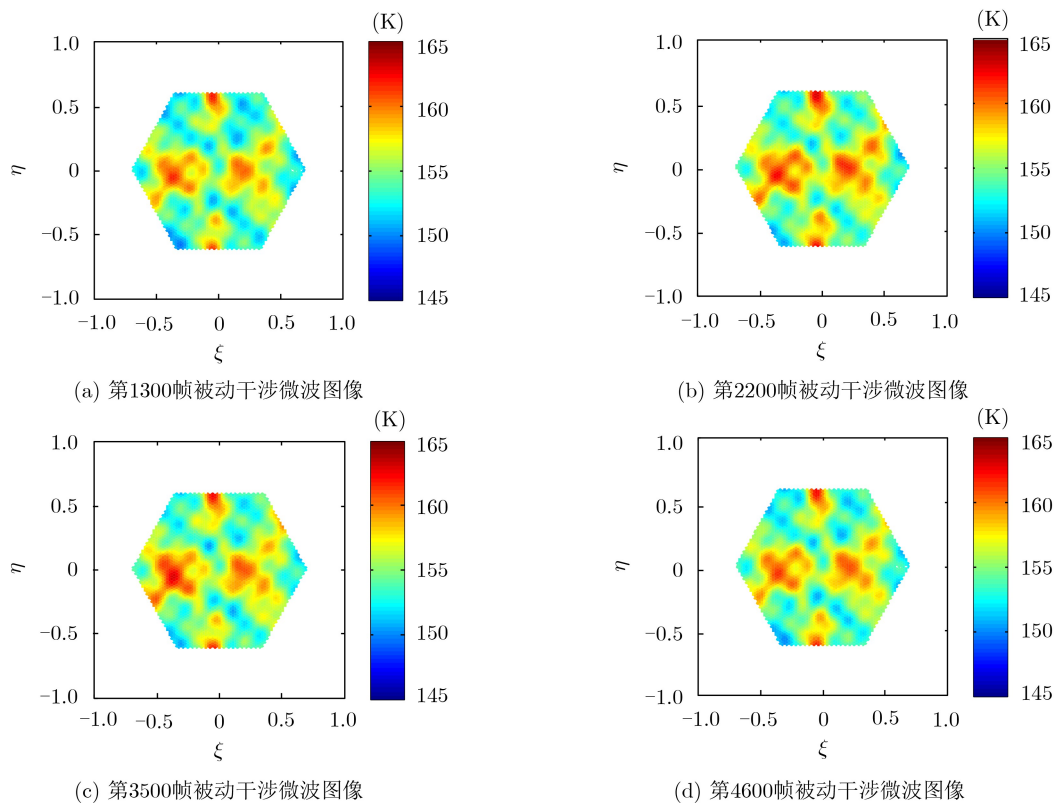


图6 图4中飞机平时4个被动干涉微波图像样例

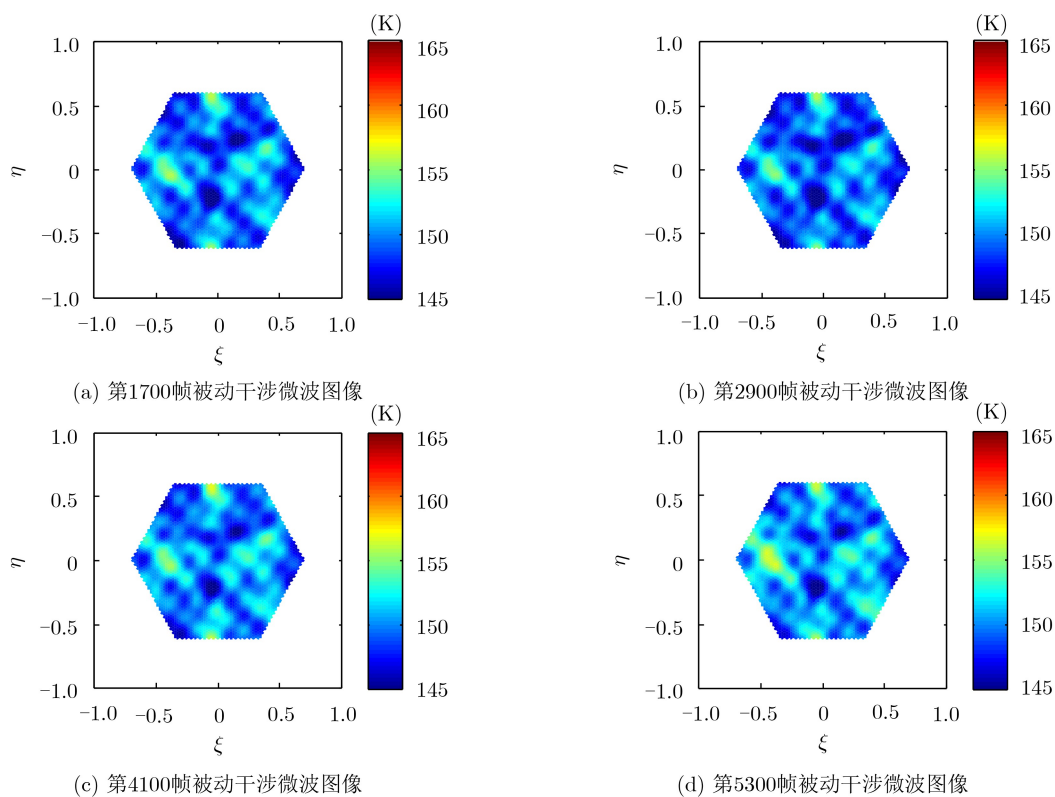


图7 图4中飞机转弯时4个被动干涉微波图像样例(第1700帧、2900帧、4100帧和5300帧)

得被动干涉微波背景对消检测图像的质量较好, 如图8(c)所示; 采用步骤3可标识出目标的位置, 如

图8(d)所示。比较图8(e)对应的光学图像可发现: 在海面上真实存在一海面金属目标(油轮), 且其位

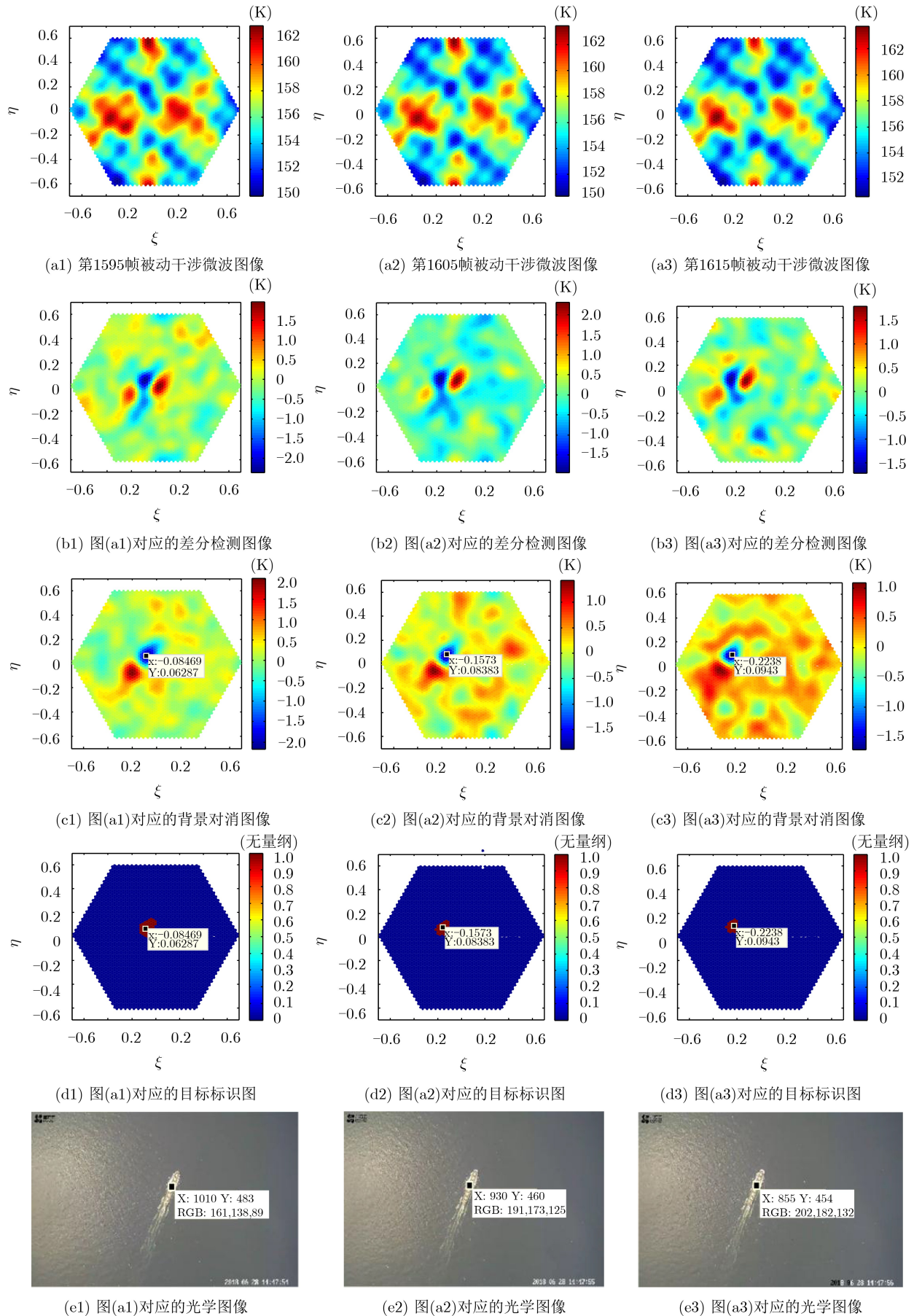


图8 目标探测算法样例

置与算法标识的位置基本是一致的。实验结果表明提出的目标探测算法是可行的,且能够很好地探测和标识出海面目标。

在图8(c)中还发现:在3帧图像中均有一个“高”亮温点,且与目标的“低”亮温点相对位置保持不变。结合图8(e)的光学图像基本可断定:对应的高亮温区域应该是目标尾浪区域,且目标在前、尾浪在后,与目标的航向基本吻合。分析发现目标所在的第1555~1655帧对应的背景对消图像均呈现出上述特征,这与2.1节中对尾浪的分析基本是一致的。由此可知:(1)根据目标自身“低”亮温特征和尾浪“高”亮温特征均可实现对目标的探

测;(2)根据背景对消检测图像可确定海面目标的航向;(3)综合目标自身“低”亮温特征和尾浪“高”亮温特征可提高对目标的探测概率。

4.2 目标探测算法验证

最后,采用步骤4可获得目标的相对运动轨迹图,如图9所示。在图9中给出了实验中探测到的3个目标的相对运动轨迹图样例。在图9中,获得相对运动轨迹基本上是连续的,通过与光学图像的比对,均证实探测到的3个海面目标是真实存在的,且光学相对运动轨迹与绘制的相对运动轨迹基本是一致的。实验结果表明探测算法获得目标的相对运动轨迹和航向与目标实际的相对运动轨迹和航向也是一致。

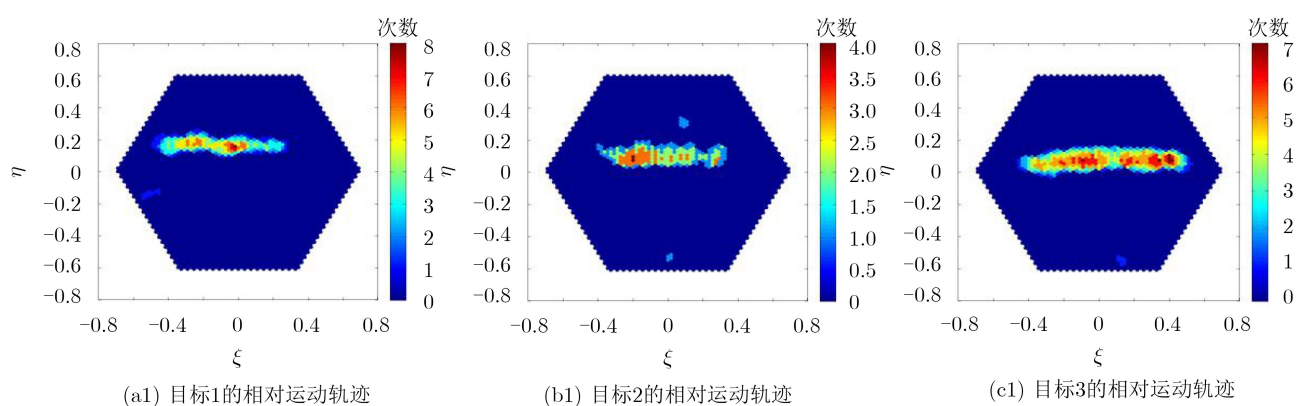


图9 采用提出的目标探测算法获得3个目标的相对运动轨迹图样例

综上所述:实验结果均表明提出的目标探测算法能够很好地标识出目标的位置,绘制出目标的相对运动轨迹、确定目标的航向,充分表明该目标探测算法是可行性的、且具有较好的探测能力。

5 结束语

针对利用天基/空基被动干涉微波技术作为我国天基预警体系的重要补充部分探测海面目标的问题,本文提出了一种基于被动干涉微波图像的海面目标探测算法。该算法利用了海面背景相对平坦和微波辐射亮温只与入射角有关的特点,通过差分检测、背景对消检测、目标标识和目标跟踪等4个步骤实现对目标的探测与跟踪,确定目标的航向等信息。差分检测主要是确定是否存在目标以及目标所在的帧范围;背景对消检测主要是获得目标的被动干涉微波背景对消检测图像;目标标识主要是基于目标的差分检测图像或背景对消检测图像标识出目标的位置;目标跟踪主要是绘制目标的相对运动轨迹。同时,也开展了仿真分析和机载实验验证,其结果均表明该被动干涉微波海面目标探测算法能有效地探测和跟踪海面目标,且具有良好的探测性能。此外,理论分析与实验结果均表明在航行中的

海面金属船只在被动干涉背景对消图像中呈现出“一高一低”的特征,“低亮温”特征是由目标自身造成,“高亮温”特征是由尾浪造成的。因此,利用船只“一高一低”的特征可提高海面目标的探测概率,确定目标的航向和航速等。

参考文献

- [1] 张祖荫, 林士杰. 微波辐射测量技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
ZHANG Zuyin and LIN Shijie. Microwave Radiation Measurement Technology and Application[M]. Beijing: Electronic Industry Book Concern, 1995.
- [2] YUJIRI L, SHOUERI M, and MOFFA P. Passive millimeter wave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, 4(3): 39–50. doi: [10.1109/MMW.2003.1237476](https://doi.org/10.1109/MMW.2003.1237476).
- [3] JACOBS E L and FURXHI O. Target identification and navigation performance modeling of a passive millimeter wave imager[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): E94–E105. doi: [10.1364/AO.49.000E94](https://doi.org/10.1364/AO.49.000E94).
- [4] 彭树生, 李兴国. 毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机的分析[J]. *红外与毫米波学报*, 1998, 17(6): 454–458.
PENG Shusheng and LI Xingguo. Analysis of anti-coating-stealth-airplane with a millimeter wave radiometer[J].

- Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1998, 17(6): 454–458.
- [5] 董晓龙, 吴季, 姜景山. 微波辐射计用于隐身目标探测的性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3): 54–57. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2001.03.016](#).
DONG Xiaolong, WU Ji, and JIANG Jingshan. The performance of the detection of stealthy targets by microwave radiometer[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(3): 54–57. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2001.03.016](#).
- [6] 吴露露, 胡飞, 朱耀庭, 等. 毫米波热辐射阵列的空间谱估计误差模型研究[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(2): 123–127.
WU Lulu, HU Fei, ZHU Yaoting, *et al.* Error model for spatial spectrum estimation of millimeter-wave thermal radiation array[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(2): 123–127.
- [7] 牛立杰, 刘浩, 吴季. 高灵敏度、高稳定度微波辐射计技术研究实验验证[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 2028–2032. doi: [10.11999/JEIT161112](#).
NIU Lijie, LIU Hao, and WU Ji. Research and experimental verification on high sensitivity and high stability microwave radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 2028–2032. doi: [10.11999/JEIT161112](#).
- [8] 牛立杰, 刘浩, 武林, 等. 面向星载海洋盐度探测应用的L波段综合孔径辐射计原理样机研制与试验研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1841–1847. doi: [10.11999/JEIT161233](#).
NIU Lijie, LIU Hao, WU Lin, *et al.* Development and experimental study on L-band synthetic aperture radiometer prototype for ocean salinity measurement[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1841–1847. doi: [10.11999/JEIT161233](#).
- [9] SHAO Xuanmin, JUNOR W, ZENICK R, *et al.* Passive interferometric millimeter-wave imaging: achieving big results with a constellation of small satellites[J]. *SPIE*, 2004, 5410: 270–277. doi: [10.1117/12.542448](#).
- [10] 杨宏. 基于机器学习的SAIR图像反演和目标检测方法研究[D]. [博士学位论文], 华中科技大学, 2012.
YANG Hong. Research on brightness temperature reconstruction method and target detection algorithm of Synthetic Aperture Interferometric Radiometers based on machine learning[D]. [Ph.D. dissertation], Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [11] 胡泰洋, 肖泽龙, 陈磊, 等. 隐匿违禁物品探测的毫米波辐射图像融合方法[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(1): 106–111. doi: [10.3969/j.issn.1005-9830.2012.01.019](#).
HU Taiyang, XIAO Zelong, CHEN Lei, *et al.* Millimeter-wave radiometric image fusion for concealed contraband detection[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2012, 36(1): 106–111. doi: [10.3969/j.issn.1005-9830.2012.01.019](#).
- [12] 刘静, 张光锋, 褚庆国, 等. 基于被动毫米波图像的金属目标特征提取方法[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(5): 169–172. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2017.05.047](#).
LIU Jing, ZHANG Guangfeng, CHU Qingguo, *et al.* Feature extraction of metal targets based on millimeter wave radiation image[J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(5): 169–172. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2017.05.047](#).
- [13] 苏兴华, 贺平. THz隐身目标无源遥感建模及仿真分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6): 898–902. doi: [10.11805/TKYDA201706.0898](#).
SU Xinghua and HE Ping. Modeling and simulation of stealth target with THz passive sensing[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(6): 898–902. doi: [10.11805/TKYDA201706.0898](#).
- [14] 李小辉, 朱莉, 陈建飞. 基于毫米波辐射截面特征的装甲目标识别方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(3): 80–83. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.017](#).
LI Xiaohui, ZHU Li, and CHEN Jianfei. Armored target recognition based on cross section features of millimeter wave radiation[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(3): 80–83. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.017](#).
- [15] 高远, 张光锋, 于畅畅, 等. 典型金属立体目标的毫米波辐射特性研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(1): 233–236. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2019.01.048](#).
GAO Yuan, ZHANG Guangfeng, YU Changchang, *et al.* Research on MMW radiation characteristic of typical mental targets[J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(1): 233–236. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2019.01.048](#).
- [16] CHENG Yayun, HU Fei, WU Hongfei, *et al.* Multi-polarization passive millimeter-wave imager and outdoor scene imaging analysis for remote sensing applications[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20145–20159. doi: [10.1364/OE.26.020145](#).
- [17] 卢海梁, 李一楠, 宋广南, 等. 海面目标星载微波辐射无源探测技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(5): 674–682.
LU Hailiang, LI Yinan, SONG Guangnan, *et al.* Research on the passive detection technology using space-borne synthesis aperture microwave radiometers for the sea surface target[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(5): 674–682.
- [18] GOURRION J, SABIA R, PORTABELLA M, *et al.* Characterization of the SMOS instrumental error pattern correction over the ocean[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 793–797. doi: [10.1109/lgrs.](#)

2011.2181990.

卢海梁: 男, 1986年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为被动微波辐射无源探测、被动微波遥感、射频干扰检测等.

王志强: 男, 1979年生, 高级工程师, 研究方向为大气海洋环境遥感、海洋复杂背景下微弱环境探测等.

高 超: 男, 1980年生, 高级工程师, 研究方向为大气海洋环境天基遥感探测等.

李一楠: 男, 1985年生, 高级工程师, 研究方向为被动微波遥感、综合孔径微波辐射计系统设计等.

胡泰洋: 男, 1983年生, 副研究员, 研究方向为微波毫米波辐射测量技术、大气遥感等.

王佳坤: 女, 1992年生, 工程师, 研究方向为被动微波遥感、被动微波辐射无源探测等.

杨小娇: 女, 1988年生, 工程师, 研究方向为被动微波遥感、海洋遥感等.

吕容川: 女, 1983年生, 研究员, 研究方向为全极化微波辐射计、被动微波遥感、大气探测等.

李 浩: 1980年生, 研究员, 研究方向为全极化微波辐射计、综合孔径微波辐射计系统设计等.