

海面目标星载微波辐射无源探测技术研究

卢海梁¹, 李一楠^{1*}, 宋广南¹, 李淑婧², 李鹏飞¹, 王佳坤¹, 杨小娇¹, 杨东¹

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100;

2. 空军工程大学 综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 陕西 西安 710051)

摘要:为了全天时、全天候、隐蔽性探测海面舰船目标,提出将高分辨率综合孔径微波辐射计作为星载微波辐射无源探测系统,用于探测海面舰船目标.提出一种新方法用于定量化评估微波辐射无源探测系统探测目标的能力;建立系统关键指标、目标微波辐射截面和探测距离间的关系,分别推导微波辐射无源探测系统的探测概率方程和探测距离方程;开展仿真分析和机载验证实验,其结果均表明高分辨率星载综合孔径微波辐射无源探测技术探测海面舰船目标是可行的.高分辨率星载微波辐射无源探测系统可作为我国天基预警体系的重要补充.

关键词:舰船目标;无源探测;微波;辐射计

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

Research on the passive detection technology using space-borne synthesis aperture microwave radiometers for the sea surface target

LU Hai-Liang¹, LI Yi-Nan^{1*}, SONG Guang-Nan¹, LI Shu-Jing², LI Peng-Fei¹,
WANG Jia-Kun, YANG Xiao-Jiao¹, YANG Dong¹

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

2. Synthetic Electronic Information System and Electronic Countermeasure Technology Research,
Air Force Engineering University, Xi'an 710051)

Abstract: To detect the large-scale vessel targets in the whole day, all-weather and concealed, the synthesis aperture microwave radiometers with high resolution are proposed for the first time as a space-borne microwave thermal radiation passive detection system, which is used to detect the vessel targets on the sea. A novel method is proposed to quantitatively evaluate the detection capability of a space-borne microwave passive detection system. The relationship between system's main specifications, the microwave radiation cross section of the target and the detection distance is established. The detection probability and the detection distance are derived, respectively. Simulation analysis and air-borne experiments are also carried out. Both simulation and experimental results demonstrate the feasibility of the space-borne synthesis aperture microwave thermal radiation passive detection technology with high resolution to detect the large-scale vessel targets. The synthesis aperture microwave radiometers with high resolution can be used as an important complementary system for space-based warning.

Key words: vessel target, passive detection, microwave, radiometer

PACS: 42.30.-d

收稿日期:2018-11-17,修回日期:2018-12-23

Received date: 2018-11-17, revised date: 2018-12-23

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和Y18-KJCX-11)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41706204), the Qian Xuesen Young Innovation Foundation (QX-SCXJJ2017-504), the Independent Investigate Project of China Academy of Space Technology (Xi'an) (Y17-KJCX-04 and (Y18-KJCX-11)

作者简介 (Biography): 卢海梁(1986-),男,湖北黄冈人,博士,高级工程师,主要研究领域为被动微波遥感、射频干扰检测、毫米波辐射无源探测. E-mail:396689lhl@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail:liyinan_cast@126.com

引言

被动微波辐射无源探测技术主要是利用目标自身的微波热辐射信号来探测目标,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.国内外相关学者也一直在开展其在军事侦察方面应用研究^[2-4].

然而,被动微波辐射无源探测技术一直受制于微波辐射计空间分辨率较低的限制,无法实现对目标的远距离探测.20世纪80年代,Ruf. C. S 借鉴了射电天文中的“孔径综合”的思想,提出了综合孔径微波辐射计,以提高其空间分辨率^[5];随后,综合孔径微波辐射计在军事方面的应用也逐渐引起了国内外学者的关注^[6-14].2002年,德国航天中心展示了机载综合孔径微波辐射计对地面军事目标进行侦察的研究工作^[6].2004年,中国电子科技集团公司第十研究所指出使用综合孔径微波辐射计可观察到1.5 km外地面上3 m×3 m大小的金属目标^[7].2005年,华中科技大学成功研制了国内首台一维抛物柱面综合孔径微波辐射计^[8],并利用该系统在微波辐射无源探测方面展开一系列研究^[9-11],近年来,在目标微波辐射特性研究方面也取得了一定进展^[12,13].当前,尽管国内外学者在综合孔径微波辐射计应用于军事侦察方面开展了相关研究^[14],但均是基于地基平台或机载平台等,尚未针对天基平台及其应用的可行性开展相关研究.

提出将高分辨率综合孔径微波辐射计作为星载微波辐射无源探测系统用于探测海面大型舰船目标;提出一种量化评估的微波辐射无源探测系统探测目标能力的方法;建立系统关键指标、目标微波辐射截面和探测距离间的关系,推导系统探测概率计算方程和探测距离计算方程;通过理论仿真和机载实验均验证高分辨率星载微波辐射无源探测技术探测海面大型舰面目标的可行性.

1 星载被动微波辐射探测海面大型舰船目标

目前,海面舰船目标的全天时、全天候、隐蔽性探测与跟踪是目标探测领域的一个重要研究方向,也是迫切需要解决的问题.而天基平台具有“站得高、看得远”等优点而备受关注.天基探测手段主要有红外、光学、雷达等,而这些探测手段都存在各自的优缺点^[15].相对于红外和光学手段,被动微波辐射无源探

测技术能实现全天时、全天候探测,且具有受云、雾、烟尘等因素干扰小等优点;相对于主动雷达探测手段,被动微波辐射无源探测技术不发射任何信号,具有功耗低、隐蔽性强、刈幅宽、受海杂波干扰小等优点,对隐身目标也具有较好的探测能力^[9,10].

相对于陆地背景而言,海面背景的微波热辐射亮温图像较为平坦;相对于空中目标而言,海面舰船目标“大”而“慢”.相对于实孔径微波辐射计而言,综合孔径微波辐射计可实现更高的空间分辨率,且无需机械扫描、瞬时成像.因此,可利用高分辨率综合孔径微波辐射计作为星载微波辐射无源探测技术实现对海面大型舰船目标的全天时、全天候、隐蔽性探测.图1给出了高分辨率综合孔径微波辐射计作为星载微波辐射无源探测系统用于探测海面大型舰船目标示意图.

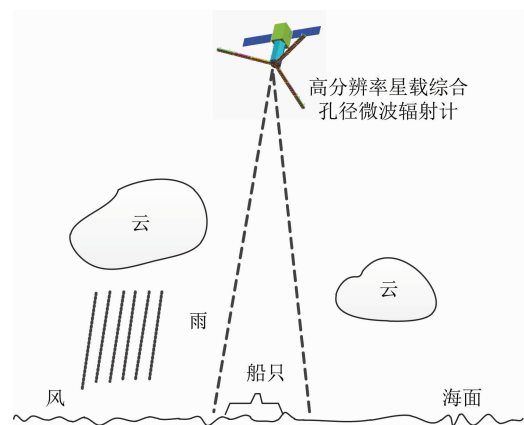


图1 高分辨率星载综合孔径微波辐射无源探测系统探测海面大型舰船目标示意图

Fig. 1 The diagrammatic sketch of space-borne aperture synthesis microwave radiometric system with high resolution to detection large vessel targets

在探测海面目标时,星载综合孔径微波辐射无源探测技术主要是利用海面目标与海洋背景的微波热辐射亮温图像的差异来实现对目标的探测^[15],其探测原理与红外探测类似.具体而言,从天基平台观测海面目标时,海面金属舰船目标相对于海洋背景呈现低亮温特征;海面隐身舰船目标相对于海洋背景呈现高亮温特征,其均是利用目标与背景的微波辐射亮温图像的差异来实现对目标的探测^[15].

2 关键性能指标

在地球被动微波遥感中,系统灵敏度和空间分辨率是微波辐射计系统的两个关键指标^[16].在目标探测中,系统灵敏度和空间分辨率在一定程度上亦

可衡量系统探测目标的能力,但不能直接衡量微波辐射无源探测系统探测目标的能力.因此,需要研究一种直观合理的评估指标用于定量化评估微波辐射无源探测系统探测目标的能力,用以指导系统的论证和设计.

2.1 系统探测度和目标可测度

在星载微波辐射无源探测系统探测海面目标时,由于作用距离远,可认为海面目标尺寸均小于其亮温图像的单个像素点.在微波辐射无源探测系统中,空间分辨率(R_x 和 R_y)与角分辨率($\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_y$)和探测距离(L)的关系分别如下

$$R_x = L \cdot \Delta\theta_x \quad , \quad (1)$$

$$R_y = L \cdot \Delta\theta_y \quad , \quad (2)$$

那么,由于目标的出现在像素点内所引起的亮温变化 ΔT_{B_eff}

$$\Delta T_{B_eff} = \frac{\Delta T_{target} \cdot S_{eff}}{R_x \cdot R_y} \quad , \quad (3)$$

其中 ΔT_{target} 表示目标亮温与海洋背景亮温的差值, S_{eff} 表示目标微波辐射截面.

将式(1)(2)代入式(3)整理可得:

$$\Delta T_{B_eff} = \frac{\Delta T_{target} \cdot S_{eff}}{L^2 \cdot \Delta\theta_x \cdot \Delta\theta_y} \quad , \quad (4)$$

如果目标所引起的亮温变化不小于系统灵敏度 ΔT_B ,则认为目标是可探测的^[10],即

$$\frac{\Delta T_{B_eff}}{\Delta T_B} \geq 1 \quad , \quad (5)$$

将式(4)代入不等式(5)整理可得

$$\frac{\Delta T_{target} \cdot S_{eff}}{L^2} \geq \Delta T_B \cdot \Delta\theta_x \cdot \Delta\theta_y \quad . \quad (6)$$

由式(6)可知:微波辐射无源探测系统探测目标的能力可用系统灵敏度与角分辨率的乘积来定量化衡量,乘积越小、系统探测能力越强;反之,则其探测能力越弱.不难看出,用系统灵敏度与角分辨率乘积的倒数表示则更为方便,倒数值越大、系统探测能力越强;倒数值越小、系统探测能力越弱.因此,定义“系统探测度(DC_{system})”来定量化衡量微波辐射无源探测系统探测目标的能力,即

$$DC_{system} = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta\theta_x \cdot \Delta\theta_y} \quad , \quad (7)$$

由式(6)和(7)联合可知:系统探测度值越大,探测目标的能力越强;反之,系统探测度值越小,探测目标的能力越弱.

同理,可定义“目标可测度(DC_{target})”:

$$DC_{target} = \frac{L^2}{\Delta T_{target} \cdot S_{eff}} \quad , \quad (8)$$

当要实现目标探测时,则要求 $DC_{system} \geq DC_{target}$.

综上所述:微波辐射无源探测系统探测目标的能力主要取决于其系统灵敏度和角分辨率乘积的倒数,即 DC_{system} , DC_{system} 越大,系统探测能力越强;探测目标与背景的亮温差值越小、目标距离越远、目标微波辐射截面越小, DC_{target} 越大,则对系统的探测能力 DC_{system} 要求越高.利用式(7)和(8)可论证不同应用场景下各类目标探测的可行性;同时,其亦有利于指导微波辐射无源探测系统的设计.

2.2 探测概率与探测距离

在目标探测中,常用探测概率和探测距离来定量化评估系统对目标的探测能力.因此,亦可用探测概率和探测距离来定量化评估星载微波辐射无源探测系统探测海面目标的能力.首先,定义微波辐射亮温图像中目标的信噪比:

$$SNR = \frac{\Delta T_{B_eff}}{\Delta T_B} \quad , \quad (9)$$

同时,由式(4)、(7)、(8)可得:

$$\frac{\Delta T_{B_eff}}{\Delta T_B} = \frac{DC_{system}}{DC_{target}} \quad , \quad (10)$$

在微波辐射亮温图像中,像素点的噪声可认为是服从高斯随机分布的,不同像素点间的噪声可认为是统计独立的.因此,如图2中的红色曲线所示,图像中各像素点亮温服从正态高斯分布:

$$p(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta T_B} \exp\left(-\frac{(T - T_0)^2}{2\Delta T_B^2}\right) \quad , \quad (11)$$

其中, T 表示像素点的亮温值, T_0 表示像素点的均值, ΔT_B 表示像素点的方差(等效于系统灵敏度).

在像素点(θ, φ)中未出现目标和出现目标的亮温均值可分别表示为:

$$T(\theta, \varphi) = \bar{T}(\theta, \varphi) \quad , \quad (12)$$

$$\tilde{T}(\theta, \varphi) = \bar{T}(\theta, \varphi) + \Delta T_{B_eff} \quad . \quad (13)$$

对应的概率密度分布分别如式(14)和(15)所示

$$p(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta T_B} \exp\left(-\frac{(T - \bar{T})^2}{2\Delta T_B^2}\right) \quad , \quad (14)$$

$$p(\tilde{T}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta T_B} \exp\left(-\frac{(T - \bar{T} - \Delta T_{B_eff})^2}{2\Delta T_B^2}\right) \quad , \quad (15)$$

ΔT_{B_eff} 表示目标在图像像素点所引起的亮温变化值. 在海洋背景下,若目标是金属材料,其所引起的亮温变化是负值($\Delta T_{B_eff} < 0$);若目标是微波隐身材料,比如 DDG-1000,其所引起的亮温变化是正值($\Delta T_{B_eff} > 0$). 尽管 ΔT_{B_eff} 是正值或负值时,探测概率和虚警概率的积分区间不一样,但其对应的积分区间是对称的,在上述两种情况下获得的目标探测概率和虚警概率是一样的. 因此,下面仅讨论目标所引起的亮温变化是正值($\Delta T_{B_eff} > 0$)时被动微波辐射无源探测系统的探测概率和虚警概率.

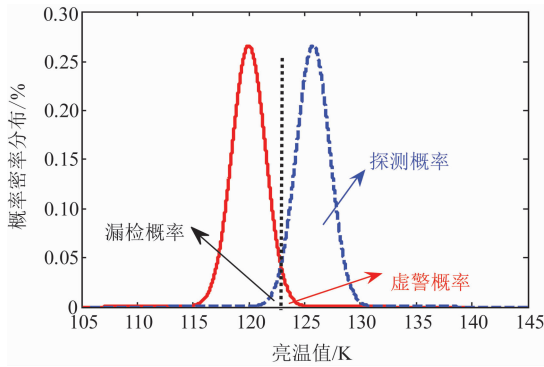


图2 探测概率、虚警概率和漏检概率示意图

Fig.2 The sketch of the detection probability, the false-alarm probability and the misspol detection probability

当探测门限 $T_{threshold} = \bar{T} + \Delta T_{threshold}$ 时,如图2所示,目标的虚警概率为:

$$P_f = \int_{T_{threshold}}^{+\infty} p(T) dT = \int_{\Delta T_{threshold}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta T_B} \exp\left(-\frac{(\Delta T_{threshold})^2}{2\Delta T_B^2}\right) dT \quad (16)$$

如图2中所示,目标探测概率为:

$$P_d = \int_{T_{threshold}}^{+\infty} p(\bar{T}) dT = \int_{\Delta T_{threshold}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta T_B} \exp\left(-\frac{(\Delta T_{threshold} - \Delta T_{B_eff})^2}{2\Delta T_B^2}\right) dT \quad (17)$$

定义为标准正态分布的右尾函数,目标的虚警概率可写成:

$$P_f = Q\left(\frac{\Delta T_{threshold}}{\Delta T_B}\right) \quad (18)$$

像素点的探测概率为:

$$P_d = Q\left(\frac{\Delta T_{threshold} - \Delta T_{B_eff}}{\Delta T_B}\right) = Q\left(\frac{\Delta T_{threshold}}{\Delta T_B} - SNR\right) \quad (19)$$

由式(18)虚警概率可知:

$$\frac{\Delta T_{threshold}}{\Delta T_B} = Q^{-1}(P_f) \quad (20)$$

由式(19)探测概率可知:

$$\frac{\Delta T_{threshold}}{\Delta T_B} - SNR = Q^{-1}(P_d) \quad (21)$$

将式(20)代入式(21)整理可得:

$$SNR = Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d) \quad (22)$$

由式(22)可知,信噪比是探测概率和虚警概率的函数,因此亦可表示为:

$$ROC(P_f, P_d) = Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d) \quad (23)$$

由式(7)、(8)、(9)、(10)、(22)和式(23)可得到探测概率的计算方程:

$$ROC(P_f, P_d) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_x \cdot \Delta \theta_y} \cdot \frac{\Delta T_{target} \cdot S_{eff}}{L^2} \quad (24)$$

由式(24)可得探测距离的计算方程

$$L^2 = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_x \cdot \Delta \theta_y} \cdot \frac{\Delta T_{target} \cdot S_{eff}}{ROC(P_f, P_d)} \quad (25)$$

式(24)、(25)建立了系统关键性能指标、目标微波辐射截面和探测距离间的关系,同时也隐含了探测概率和虚警概率的关系. 当系统关键指标、目标微波辐射截面和虚警概率一旦确定,则可确定探测概率与探测距离的关系. 在综合孔径微波辐射无源探测系统中,系统灵敏度和角分辨率是方位角(θ, φ)的函数,目标微波辐射截面、目标与背景的亮温差值也是方位角的(θ, φ)函数. 因此,将各个参量的方位函数代入(24)或(25),则可得到在不同方位角下系统关键性能指标、目标微波辐射截面和探测距离间的关系,具体过程在此则不再赘述. 需要指出的是,式(24)、(25)建立的系统关键性能指标、目标微波辐射截面和探测距离间的关系同样适用于实孔径微波辐射无源探测系统. 此外,由于要实现对目标的精确定位,系统空间分辨率应与目标的尺寸可比拟.

3 仿真实验

下面将通过仿真验证系统关键性能指标、目标微波辐射截面、探测距离和探测概率的关系. 假设海洋表面盐度32psu,海洋表面温度300K,目标为海

面金属舰船目标. 假设星载综合孔径微波辐射无源探测系统的轨道高度为 600 km 时星下点的空间分辨率为 1 km, 中心频率 10.65 GHz, 带宽 100 MHz. 由金属和海洋背景的辐射模型计算得到金属目标与海洋背景的星下点视在亮温差值约为 80 K^[17].

假设海面某一典型目标的物理尺寸为 333 m × 77 m, 可认为星下点目标的正下视物理面积等于其目标微波辐射截面, 天气晴朗. 图 3 给出了星下点虚警概率为 1E-5, 系统灵敏度分别为 0.2 K、0.3 K、0.4 K 和 0.5 K 时探测概率与探测距离的关系. 由图 3 可知: 在相同的探测距离下, 系统灵敏度越高, DC_{system} 越大, 目标的探测概率越高; 系统灵敏度相同时, 探测距离越远, 目标的探测概率越低.

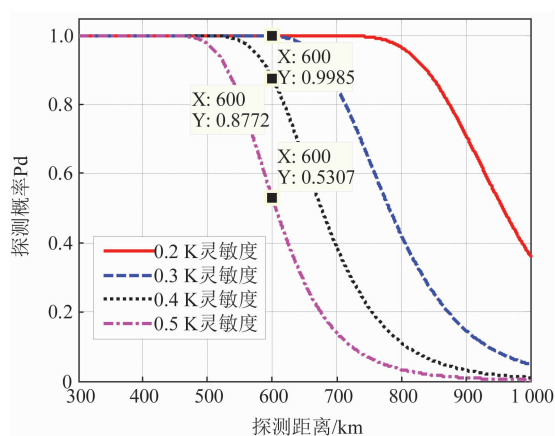


图3 星下点虚警概率为 1E-5, 灵敏度分别为 0.2 K、0.3 K、0.4 K 和 0.5 K 时探测概率与探测距离的关系曲线
Fig. 3 The detection probability as a function of the detection distance when the false-alarm probability is 1E-5, and sensitivity is 0.2 K、0.3 K、0.4 K, and 0.5 K, respectively

图 4 给出了轨道高度为 600 km、星下点空间分辨率为 1 km、虚警概率 1E-5, 系统灵敏度分别为 0.2 K、0.3 K、0.4 K 和 0.5 K 时探测概率随目标微波辐射截面的关系. 由图 4 可知: 当系统灵敏度相同时, 目标微波辐射截面越大, 系统的目标探测概率越高; 当系统的灵敏度越高, 探测概率达到 90% 时, 目标微波辐射截面越小, 说明系统探测能力越强.

由图 3 可知: 1 km 空间分辨率、0.4 K 灵敏度的高分辨率星载综合孔径微波辐射无源探测系统对海面某一典型目标 333 m × 77 m 星下点目标虚警概率为 1E-5 时的探测概率约为 0.88. 假设天线采用十字形, 工作频率分别为 10.7 GHz 和 37.6 GHz 时, 天线单臂长度分别约为 14.3 m 和 4.1 m, 现有的航天技术和能力是可以实现的. 海面大型舰船目标微波

辐射截面在数千平米至数万平米不等. 因此, 若进一步提高系统的空间分辨率和灵敏度, 即可实现对海面大型舰船目标的有效探测. 由此可知: 高分辨率星载综合孔径微波辐射无源探测技术探测海面大型舰面目标是可行的.

此外, 微波热辐射信号在传输过程中, 受到大气、风、云、雨、雾等环境因素的影响, 在一定程度上降低了星载综合孔径微波辐射无源探测系统的探测能力^[18-21]. 因此, 需要选择合适的频段作为系统工作频段, 在系统规模和系统探测能力两者之间权重选择.

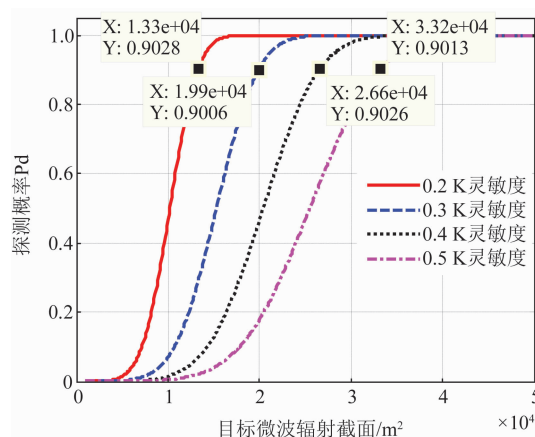


图4 星下点虚警概率为 1E-5, 灵敏度分别为 0.2 K、0.3 K、0.4 K 和 0.5 K 时探测概率与目标微波辐射截面的关系曲线
Fig. 4 The detection probability as a function of the target microwave radiation cross section when the false-alarm probability is 1E-5, and sensitivity is 0.2 K、0.3 K、0.4 K, and 0.5 K, respectively

4 实验验证

此外, 为了实验验证星载综合孔径微波辐射无源探测技术探测海面舰船目标的可行性, 开展了机载实验. 实验所用设备是一台单臂 6 单元“Y”型的 X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统, 其关键指标如表 1 所示. 图 5(a) 给出了 X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统实物图, 图 5(b) 给出了 X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统机载安装图. 同时, 实验飞机还安装了光学摄像头, 其观测视场与微波辐射无源探测观测视场基本一致, 主要用来记录试验光学图像, 以便于后续数据分析和比对.

实验中, 飞机在实验海域随机飞越路过的船只, 采集观测数据; 随后, 通过对观测数据进行误差校正和亮温反演, 获得观测海域的相对亮温图像; 最后,

表 1 X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统相关参量

Table 1 The specifications of the X-band aperture synthesis microwave radiometric system

指标	参量
中心频率	10.65 GHz
带宽	100 MHz
积分时间	100 ms
天线类型	Y 形
天线个数	19
单元间距	0.95 波长

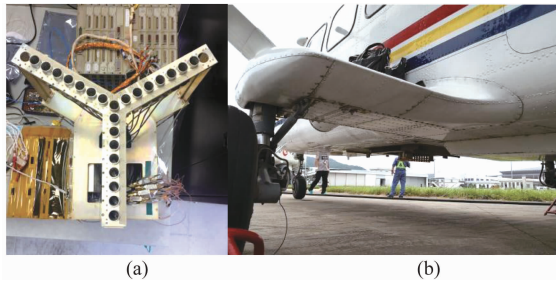


图 5 (a) X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统, (b) 系统机载实验安装示意图

Fig. 5 (a) the X-band aperture synthesis microwave radiometric system, (b) the sketch of the system mounted on an aircraft

利用目标探测算法对相对亮温图像进行目标探测与跟踪。如图 6 和图 7 所示,分别给出了实验飞机在高度 900 m 时两次观测同一船只的实验结果,此时其星下点空间分辨率约为 110 m。图 6 (a) 和图 7 (a) 均是探测目标船只的光学图片,图 6 和图 7 的(b)、(c)、(d)是其对应 3 个不同时刻的相对亮温图像(3 倍补零)。由于光学摄像头与实验 X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统安装的问题,亮温图像相对于光学图像中心位置顺时针偏离一个小角度,但不影响后续数据分析和结论。

根据目标的微波辐射特性可知:1、由于该船只只是散装货船(图 6 (a)和图 7 (a)),其甲板主要是由金属材料组成的,其亮温应小于海面亮温,呈现低亮温特征。2、船只在航行过程中产生了较大范围的尾浪,尾浪增加了海表的粗糙度,会造成尾浪区域亮温上升;同时,尾浪中含有大量的泡沫和气泡,其增加了海表的辐射率,进一步增加了尾浪区域的亮温,最终共同造成尾浪区域亮温明显高于海面亮温,呈现高亮温特征。

观察图 6 和图 7 的(b)、(c)、(d)可发现:在相对亮温图像中,与船只对应的位置上出现了一个低温区和一个高温区,低亮温区对应的船体自身,而高亮温区对应的是尾浪,3 个时刻的相对亮温图像均

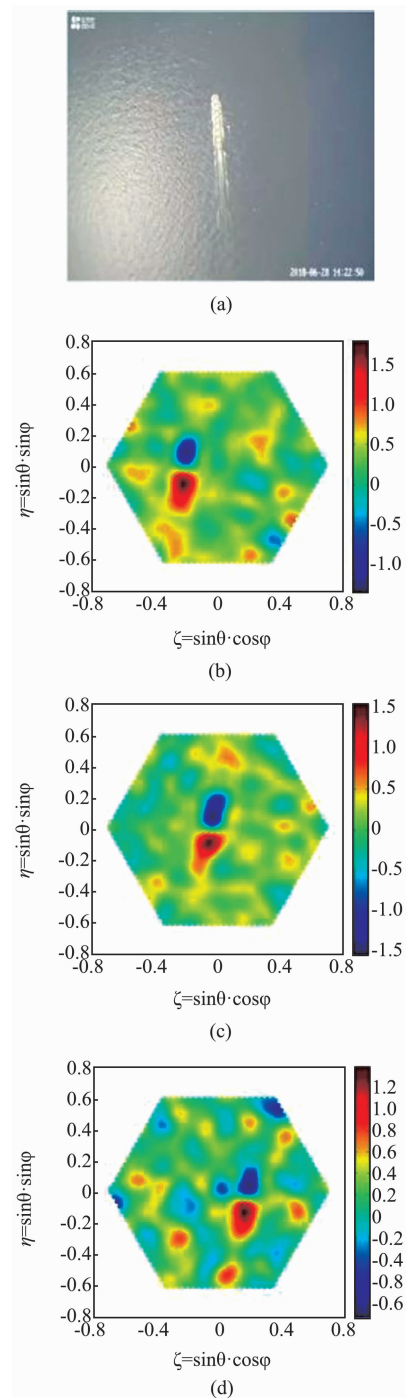


图 6 (a) 船只的光学图片, (b) 时刻 1 的相对亮温图像, (c) 时刻 2 的相对亮温图像, (d) 时刻 3 的相对亮温图像

Fig. 6 (a) the optical image of a vessel (b) the relative microwave brightness temperature map on time 1 (c) the relative microwave brightness temperature map on time 2 (d) the relative microwave brightness temperature map on time 3

呈现出上述特征,这与上述理论情况是基本吻合的。由此可断定相对亮温图中的“一高一低”亮温区域是实际光学图像中该船只的亮温图像,且其与海洋背景的亮温图像对比较为明显。因此,根据这一特

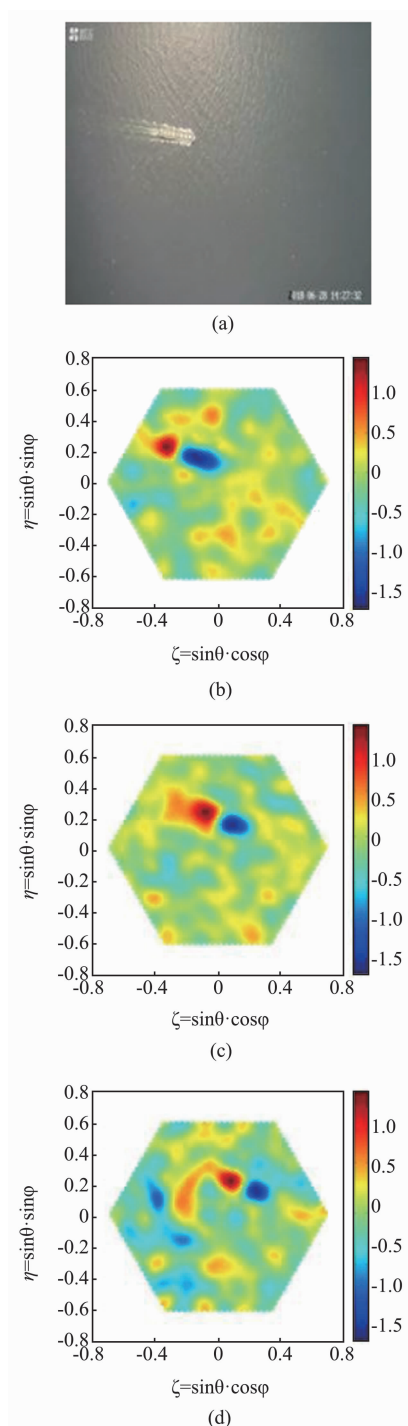


图7 (a) 船只的光学图片, (b) 时刻1的相对亮温图像, (c) 时刻2的相对亮温图像, (d) 时刻3的相对亮温图像
Fig.7 (a) the optical image of a vessel (b) the relative microwave brightness temperature map on time 1 (c) the relative microwave brightness temperature map on time 2 (d) the relative microwave brightness temperature map on time 3

征,则可实现对海面舰船目标的探测与跟踪. 实验中,多次飞越不同海面舰船目标,均能实现对船只的有效探测. 综上所述,机载实验结果表明高分辨率星载综合孔径微波辐射计作为星载微波辐射无源探测

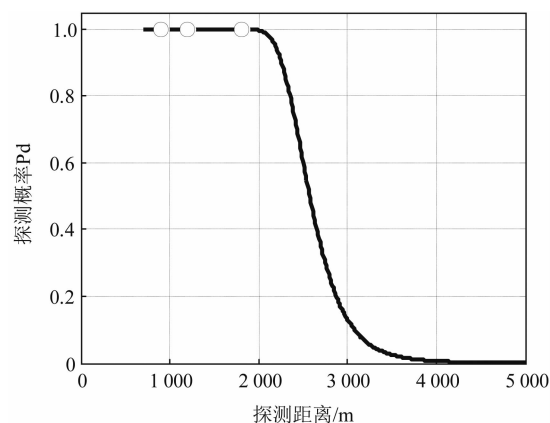


图8 实验中 X 波段综合孔径微波辐射无源探测系统在积分时间 100 ms 时,目标的探测距离与探测概率的曲线关系

Fig.8 The detection probability as a function with the detection distance of the X-band aperture synthesis microwave radiometer when the integrate time is 100 ms

系统探测海面大型舰船目标是可行性的.

由于系统积分时间为 100 ms,此时星下点系统灵敏度约为 1.5 K,星下点角分辨率为 7.2° (加 Blackman 窗),根据式(7)计算得到该系统探测度 DC_{system} 为 $42.2 \text{ K}^{-1} \text{ rad}^{-2}$. 探测目标为散装货船,其甲板均为为较为平坦舾装的金属材料构成,10.65 GHz 时其辐射率可认为近似为 1^[22],根据海洋环境参量计算得到该目标与海洋表面的亮温差值约为 75 K,根据探测概率方程式(1)、(2)、(3)、(4)计算该目标在星下点虚警概率 $1\text{E-}5$ 时探测概率与飞行高度的关系,如图 8 所示. 由图 8 可知:当飞行高度低于 1 900 m 时,该目标的探测概率接近 100%;当飞行高度低于 2 250 m 时,该目标的探测概率高于 90%.

在实验过程中,飞行了三种高度,分别为 900 m、1 200 m 和 1 800 m. 在这三种高度下,星下点空间分辨率分别为 110 m、151 m 和 226 m. 由于传输路径较短,天气良好,可忽略其路径的衰减. 此时,根据式(8)计算得到在三种高度下目标可测度 DC_{target} 分别为 $2.98 \text{ K}^{-1} \text{ rad}^{-2}$ 、 $3.97 \text{ K}^{-1} \text{ rad}^{-2}$ 和 $5.96 \text{ K}^{-1} \text{ rad}^{-2}$,均小于该系统可测度,说明该目标是可探测的. 此时,在这三种高度下的信噪比分别为 14.2、10.6 和 7.1,根据式(24)计算三种高度下虚警概率为 $1\text{E-}5$ 时探测概率均为 100%,如图 8 中黑色圆圈所示. 在实验过程中,在三种高度下多次飞越该目标,飞行速度大约 60 m/s,单帧积分时间为 100 ms,在三种高度下单次观测目标在系统的无混叠视场的

帧数分别为 80 帧、107 帧和 160 帧. 统计不同高度下多次观测该目标的帧数,发现在三种高度下所有目标在无混叠视场的帧数均能实现对该目标的有效探测,即该目标在三种高度下的探测概率均接近 100%,这与探测概率计算方程(式(24))计算的结果是一致的.

5 结论

为了实现全天时、全天候、隐蔽性探测海面舰船目标,首次提出了将高分辨综合孔径微波辐射计作为星载被动微波辐射无源探测技术用于探测海面舰船目标. 随后,提出了将系统灵敏度与角分辨率乘积的倒数定义为“系统探测度”(DC_{system}),用于量化评估微波辐射无源探测系统探测目标的能力, DC_{system} 越大,系统探测目标的能力越强;同时,定义了“目标可测度”(DC_{target}),当 DC_{system} 不小于 DC_{target} 时,则认为目标是可探测的. 基于 DC_{system} 和 DC_{target} ,建立了系统关键指标、目标微波辐射截面和探测距离间的关系,推导了探测概率计算方程和探测距离计算方程;理论仿真结果表明高分辨率星载综合孔径微波辐射无源探测探测海面大型舰面目标是可行的. 同时,开展了机载实验验证,实验结果同样表明高分辨率综合孔径微波辐射计作为星载微波辐射无源探测技术用于探测海面大型舰船目标是可行的.

高分辨率星载综合孔径微波辐射无源探测技术可作为探测海面大型舰船目标的一种新手段,其可作为我国天基预警体系的重要补充部分,与光学、红外、雷达等手段联合,组成我国完善的天基预警体系,实现对海面大型舰船目标的全天时、全天候、隐蔽性和远距离探测. 此外,高分辨综合孔径微波辐射无源探测技术亦可应用于末端精确制导、无人机战场隐蔽侦察等方面.

References

- [1] ZHANG Zu-Yin, LIN Shi-Jie. Microwave Radiation Measurement and Application [M]. Beijing: Electronic Industry Press (张祖荫, 林士杰. 微波辐射测量技术及应用. 北京: 电子工业出版社), 1995.
- [2] PENG Shu-Sheng, LI King-Guo. Analysis of Anti-coating Stealth Airplane with a Millimeter Wave Radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭树生, 李兴国. 毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机的分析. *红外与毫米波学报*), 1998, **17**(6): 454–458.
- [3] DONG Xiao-Long, WU Ji, JIANG Jing-Shan. The Performance of the Detection of Stealthy Targets by Microwave Radiometer [J]. *Systems Engineering and Electronic* (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. *系统工程与电子技术*), 2001, **23**(3): 54–57.
- [4] Xuan-Min Shao, William J, Raymond Z, et al. Passive Interferometric Millimeter-wave Imaging: Achieving Big Results with a Constellation of Small Satellites [C]. *Radar Sensor Technology VIII and Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VII*, 2004: 270–277.
- [5] Ruf C S, Swift C T, Tanner A B, et al. Interferometric Synthetic Aperture Microwave Radiometry for the Remote Sensing of the Earth [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(5): 597–611.
- [6] Markus P, Helmut S, Stephan D. High Resolution Passive Millimeter-wave Imaging Technologies for Reconnaissance and Surveillance [C]. *Proceedings of SPIE, Passive Millimeter Wave Imaging Technology VI and Radar Sensor Technology VII* 5077. Orland: SPIE, 2003: 77–86.
- [7] Jian Huang, Ti-Guo Gan. A Novel Millimeter Wave Synthetic Aperture Radiometer Passive Imaging System [C]. *Proceedings of ICMMT*, 2004: 414–417.
- [8] Li Qing-Xia, Chen Ke, Guo Wei, et al. An Aperture Synthesis Radiometer at Millimeter Wave Band [C]. *Proceedings of IEEE ICMMT*, 2008, **4**: 1699–1701.
- [9] NI Wei, HU Fei, CHEN Ke. Performance Analysis of Synthetic Aperture Radiometer in Aerial Stealthy Targets Detection [J]. *Journal of Microwave* (倪炜, 胡飞, 陈柯. 综合孔径辐射计空中隐身目标探测性能分析. *微波学报*), 2012, **28**(2): 28–31.
- [10] LANG Liang, ZHANG Zu-Ying, GUO Wei, et al. Performance Analysis of Application of Airborne Synthetic Aperture Radiometer to Target Detection [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)* (郎量, 张祖荫, 郭伟, 等. 机载综合孔径辐射计用于目标探测的性能分析. *华中科技大学学报(自然科学版)*), 2008, **36**(10): 59–62.
- [11] WU Lu-Lu, HU Fei, ZHU Yao-Ting, et al. Error Model for Spatial Spectrum Estimation of Millimeter Wave Thermal Radiation Array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(2): 123–127.
- [12] CHENG Ya-Yun, HU Fei, HE Feng, et al. Millimeter-wave emission characteristics of bilayer radar-infrared compound stealth material [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(6): 100–104.
- [13] CHENG Ya-Yun, HU Fei, WU Hong-Fei, et al. Multi-polarization passive millimeter-wave imager and outdoor scene imaging analysis for remote sensing applications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, **16**(26): 20145–20159.
- [14] LI Shu-Guang, YU Shou-Jiang, JIANG Wei, et al. Detection of Aerial Stealthy Targets by Synthetic Aperture Microwave Radiometer [J]. *Radio Engineering* (李曙光, 于守江, 姜伟, 等. 综合孔径辐射计空中隐身目标探测技术. *无线电工程*), 2015, **45**(3): 50–53.
- [15] LI Qing-Xia, CHEN Ke, LIANG Liang, et al. Passive Microwave Remote Sensing with High Spatial Resolution—Imaging with Aperture Synthesis Microwave Radiometers [M]. Beijing: Science Press (李青侠, 陈柯, 郎量, 等. 高分辨率被动微波遥感-综合孔径微波辐射成像(上册). 北京: 科学出版社, 2017: 5–11.
- [16] CHEN Ke. The Research of Key Technologies on Aperture Synthesis Microwave Radiometric Imaging System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (陈柯. 综合孔径微波辐射成像系统关键技术研究. 武汉:

- 华中科技大学), 2010.
- [17] NI Wei. Microwave Radiation Characteristics and Detection Method Research in Aerial Target Detection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (倪炜. 空中目标微波辐射特性及检测方法研究. 武汉: 华中科技大学), 2012.
- [18] Meissner T and Wentz F J. The Emissivity of the Ocean Surface between 6 - 90 GHz over a Large Range of Wind Speeds and Earth Incidence Angles [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(8), 3004 - 3026.
- [19] Yueh S H. Modeling of Wind Direction Signals in Polarimetric Sea Surface Brightness Temperatures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**: 1400 - 1418.
- [20] Payne V H, Mlawer E J, Cady-Pereira K E, *et al.* Water Vapor Continuum Absorption in the Microwave [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(6): 2194 - 2208.
- [21] Wentz F J and Meissner T. Atmospheric Absorption Model for Dry Air and Water Vapor at Microwave Frequencies below 100? GHz Derived from Spaceborne Radiometer Observations [J]. *Radio Science*, 2016, **51**(5): 381 - 391.
- [22] Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive Millimeter-wave Imaging [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, **4**(3): 39 - 50.