

复杂天气及海风对天基被动干涉微波辐射无源探测系统性能的影响

宋广南^① 卢海梁*^① 李浩^① 李一楠^① 郎量^②
董思乔^③ 李鹏飞^① 吕容川^①

^①(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

^②(华中科技大学电子信息与通信学院 武汉 430074)

^③(国家无线电监测中心 北京 100037)

摘要: 基于微波辐射无源探测系统的目标探测方程, 该文探讨了云、雾和雨等复杂天气以及海风对天基被动干涉微波辐射无源探测系统的影响, 量化仿真分析了这些因素对系统探测能力的影响, 实验验证了被动干涉微波辐射无源探测系统对云层的穿透能力。研究表明: 云、雾和雨等复杂天气对被动干涉微波辐射无源探测系统对海面目标的探测有一定的影响, 但在低频段云雾影响较小, 可忽略不计; 而降雨会对系统的目标探测能力影响较大; 海风对海面金属目标的探测是有利的, 而海风对隐身目标探测是不利的, 会降低系统的探测能力。

关键词: 无源探测; 复杂天气; 海风

中图分类号: TN24; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)11-2607-08

DOI: 10.11999/JEIT190534

The Effects of Complex Weather and Sea Wind on the Performance of Space-borne Passive Interferometric Microwave Detection System

SONG Guangnan^① LU Hailiang^① LI Hao^① LI Yinan^① LANG Liang^②
DONG Siqiao^③ LI Pengfei^① LÜ Rongchuan^①

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

^②(School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

^③(State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on the target detection equation of the passive interferometric microwave system, the effects of complex weather on the detection ability of the passive interferometric microwave system are discussed for the sea surface target, such as clouds, fog and rain, and sea winds. Quantitative simulations are also performed to assess the effects of these previous mentioned factors. The experiments are also performed to demonstrate the passive interferometric microwave system penetrating the clouds. Both theoretical and simulation results show that complex weather has a negative impact on the passive interferometric microwave systems in the sea target detection, such as clouds, fog and rain. However, the impacts can be neglected in low frequency, since the impacts of clouds in low frequency is very small. On the other hand, rainfall will seriously degrade the system's target detection capability. Sea winds have a positive impact in the metallic target detection. However, sea winds have a negative impact and reduce the system's detection capability for the stealthy target detection.

Key words: Passive detection; Complex weather; Sea wind

1 引言

近年来, 被动干涉微波辐射测量技术在军事方面的应用也逐渐引起了国内外学者的关注。2002年, 德国航天中心展示了机载被动干涉微波辐射计对地军事目标进行侦察的研究工作。2004年, 中国电子

科技集团公司第十研究所指出使用被动干涉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^[1]。2005年, 华中科技大学成功研制了一台1维被动干涉微波辐射计^[2], 并利用该系统在目标探测方面展开一系列研究^[3-5], 其他相关单位也开展了一定的研究^[6-8]。2016年, 中国空间技术研究院西安分院提出将综合孔径微波辐射计作为星载被动干涉微波辐射无源探测系统用于全天时、全天

收稿日期: 2019-07-16; 改回日期: 2020-06-08; 网络出版: 2020-07-11

*通信作者: 卢海梁 396689lhl@163.com

候、隐蔽性探测海面大型舰船目标,随后开展了机载验证试验,取得了较好的效果^[9-11]。

但是,由于海面出现云、雾和雨等复杂天气较为常见,云、雾和雨中含有大量的水汽和液水^[12,13]。海面目标的微波热辐射信号在穿过大气的过程中会受到大气中的水汽、液水和降雨等因素的衰减^[14],降低天基被动干涉微波探测系统的目标与海洋背景的视在亮温差值,从而降低天基被动干涉微波图像中目标与海面背景的对比度,最终会对天基被动干涉微波系统的目标探测性能产生不利影响。此外,受到海风等因素的影响,海面背景的被动干涉微波图像会发现变化,造成天基被动干涉微波图像中目标与海面背景的对比度发生改变,其同样会影响天基被动干涉微波系统对海面目标的探测性能。

文献^[9,10]尚未针对云、雾和雨等复杂天气以及海风对天基被动干涉微波无源探测系统的目标探测性能的影响开展研究。针对这一问题,本文详细探讨了云、雾和雨等复杂天气以及海风对于天基被动干涉微波辐射无源探测系统探测海面目标时系统目标探测性能的影响。

2 综合孔径微波辐射成像原理

综合孔径辐射成像原理是干涉测量,综合孔径微波辐射计是利用稀疏天线阵列将阵列的单元天线成对组成许多具有不同基线的二元干涉仪。二元干涉仪通过复相关接收机测量可见度函数采样 $V(u, v)$,最后通过校正和反演算法重构出原始的场景亮温图像分布图 $T_B(\xi, \eta)$,其原理示意图如图1所示。

假设在所有单元天线的方向图特性理想情况下,综合孔径微波辐射计测量的可见度函数 $V(u, v)$ 与场景亮修正亮温 T_Ω 满足近似傅里叶关系

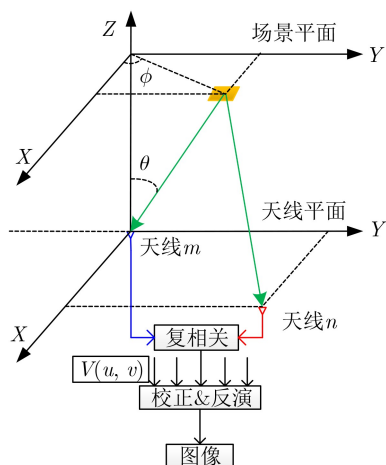


图1 综合孔径微波辐射测量原理示意图

$$V(u, v) = \int_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} \frac{T_\Omega(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta \quad (1)$$

而在理想情况下,场景的修正亮温与视在亮温 $T_B(\xi, \eta)$ 的关系如式(2)

$$T_\Omega(\xi, \eta) = \frac{G_0}{4\pi} \cdot T_B(\xi, \eta) \cdot F_n^2(\xi, \eta) \quad (2)$$

其中, G_0 和 $F_n(\xi, \eta)$ 分别表示理想单元天线的最大方向性和归一化电压方向图。

根据式(1),可见度函数亮温重构得到场景的修正亮温

$$\frac{T_\Omega(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} V(u, v) \cdot e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv \quad (3)$$

在实际中,综合孔径微波辐射计系统中由于天线阵列单元是有限的,测得场景的可见度函数 $V(u, v)$ 同样是有限的。但将式(2)离散化,再通过对有限可见度函数 $V(u, v)$ 采样求和,可得场景修正亮温的近似值

$$\frac{\hat{T}_\Omega(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} = \frac{1}{\Delta u \Delta v} \sum_{p=-P}^P \sum_{q=-Q}^Q V(u, v) \cdot e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} \quad (4)$$

最终,根据式(2)由反演的场景修正亮温 \hat{T}_Ω 得到场景的视在亮温 $T_B(\xi, \eta)$ 。

3 云、雾和雨以及海风对系统探测性能影响机理分析

在探测海面目标时,天基微波辐射无源探测系统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探测的。

根据文献^[9]推导的微波辐射无源探测的目标检测概率、虚警率计算方程为

$$\text{ROC}(P_F, P_D) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y} \cdot \frac{\Delta T_t \cdot S_{\text{eff}}}{L^2} \quad (5)$$

其中, P_F 表示虚警率, P_D 表示探测概率, ΔT_B 表示系统的灵敏度, $\Delta \theta_X$ 和 $\Delta \theta_Y$ 分别表示两维方向的角分辨率, ΔT_t 表示目标与海洋背景的视在亮温差值; S_{eff} 表示海面目标的有效微波辐射截面, L 表示目标与系统的距离。

海面目标与海洋背景的视在亮温差值也可表达为

$$\Delta T_t = |T_t - T_{\text{sea}}| \cdot \tau \quad (6)$$

其中, T_t 表示海面目标的辐射亮温, T_{sea} 表示海面背景的辐射亮温, τ 表示大气的透射率。

将式(6)代入式(5),得到与传播路径相关的目标检测概率和虚警率方程

$$\text{ROC}(P_F, P_D) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y} \cdot \frac{S_{\text{eff}} \cdot |T_t - T_{\text{sea}}| \cdot \tau}{L^2} \quad (7)$$

由式(7)可知: 在恒定的虚警率下, 式(7)的右边的值越大, 检测概率越高; 相反, 检测概率越低。

当海面目标或海面辐射的微波热辐射信号传输至天基微波辐射无源探测系统的天线口面时, 微波热辐射信号主要会受到大汽传输路径中水汽、液水等因素的衰减^[12]。而在云、雨和雾等复杂天气时, 传输路径中的水汽含量或液水含量相对晴朗天气会显著增加, 从而增加了对微波热辐射信号的衰减, 使透射率 τ 变小, 视在亮温差值随之也变小, 即式(7)右边的值会变小, 最终降低目标的检测概率, 恶化系统的探测性能。

当海面风速较大时, 在风的作用下海面会产生较多的杂波, 使得海表会变得较为粗糙, 且风速大于一定值时, 海面会产生较大泡沫, 海杂波和泡沫均会增加海表的亮温^[13], 从而会改变视在亮温差值, 进而影响系统的探测性能。

当海面目标是金属目标时, 金属目标辐射率较低, 且反射的是较低亮温的冷空, 此时 $|T_t - T_{\text{sea}}| = T_{\text{sea}} - T_t$, 由于风的作用使得 T_{sea} 变大, 而 T_t 几乎不变, 使得式(7)右边的值变大。而在恒定虚警率的情况下, 式(7)右边的值越大, 检测概率越高。因此, 由于风的作用使得金属目标与海洋背景的亮温差值增大, 从而导致式(7)右边的值变大, 从而最终提高了对金属目标的检测概率, 由此可知: 风对海面金属目标的探测是有利的。

当海面目标是隐身目标时, 隐身目标辐射率较高, 反射的是较低亮温的冷空, 此时 $|T_t - T_{\text{sea}}| = T_t - T_{\text{sea}}$, 由于风的作用使得 T_{sea} 变大, 而 T_t 几乎不变, 使得式(7)右边的值变小。而在恒定虚警率的情况下, 式(7)右边的值越小, 检测概率越低。因此, 由于风的作用使得隐身目标与海洋背景的亮温差值减小, 从而导致式(7)右边的值变小, 从而最终降低了隐身目标的检测概率, 由此可知: 风对海面隐身目标的探测是不利的。

综上所述: 云、雾和雨等复杂天气不利于天基微波无源探测系统海面目标的探测, 会降低对海面目标的检测概率, 恶化系统性能; 而海风有利于海面金属舰船目标的探测, 其可提高对海面金属舰船目标的检测概率; 但海风不利于海面隐身目标的探测, 其会降低对海面隐身目标的检测概率。

4 仿真分析

4.1 云、雾和雨以及海风对系统影响的仿真基础

云、雾主要由悬浮在大气中的液态水滴和冰晶

体组成。在微波波段, 信号的衰减主要受液态水滴的影响, 相对而言, 冰晶体的影响则基本可以忽略不计。因此, 云雾的微波衰减由悬浮的液态水滴造成。鉴于云、雾中悬浮液态水滴的尺寸要远小于微波波长, 可依据Rayleigh近似来计算悬浮液态水滴的消光截面, 并进而求得云、雾天气的大气衰减系数。根据电磁波传输理论, 云、雾的特征衰减系数可表示为^[15]

$$k_c = k_1 M \quad (\text{dB/km}) \quad (8)$$

其中, M 表征云、雾中的液态水滴的质量密度, 单位为 g/m^3 。 k_1 表征云雾的微波衰减因子, 单位为 $(\text{dB/km})/(\text{g/m}^3)$, 其数学表达式可依据Rayleigh散射模型给出

$$k_1 = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (9)$$

其中, $\eta = (2 + \varepsilon)/\varepsilon''$, ε 为水的复介电常数的实部, ε'' 为水的复介电常数的虚部。

与云雾的衰减系数的求解方法不同, 计算雨的消光系数需要同时考虑雨滴的吸收和散射的作用, 不可忽略雨滴的散射影响。根据ITU-R P838建议, 雨的衰减系数 k_R dB/km可由式(10)给出

$$k_R = k \cdot R^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (10)$$

式中, R 为降雨率, 单位为 mm/h , k 和 α 均为与频率 f 相关的量。

大气的透射率与大气云、雾和降雨总的衰减关系如式(11)

$$\tau = 10^{-(k_c+k_R)/10} \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)可得

$$\text{ROC}(P_F, P_D) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y} \cdot \frac{S_{\text{eff}} \cdot |T_t - T_{\text{sea}}|}{L^2} 10^{-(k_c+k_R)/10} \quad (12)$$

当考虑风速的影响时, 海面背景的微波辐射亮温可以表示为

$$T_{\text{sea}} = T_{\text{sea}}^{\text{claim}} + \Delta T(w) \quad (13)$$

其中, $T_{\text{sea}}^{\text{claim}}$ 表示平静海面背景的微波辐射亮温, $\Delta T(w)$ 表示是由于海风的影响造成海面背景的变化量, 其是风速 w 的函数。将式(13)代入式(12)可得

$$\text{ROC}(P_F, P_D) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y} \cdot \frac{S_{\text{eff}} \cdot |T_t - (T_{\text{sea}}^{\text{claim}} + \Delta T(w))|}{L^2} \cdot 10^{-(k_c+k_R)/10} \quad (14)$$

因此, 根据式(14)可计算和定量化分析云、雾

和雨等复杂天气以及海风对天基微波辐射无源探测系统的影响。

4.2 水汽与液水的影响

下面通过仿真分析量化评估云、雾和雨等复杂天气以及海风对天基微波辐射无源探测系统的影响

假设海表温度为300 K，海表盐度为32 psu；海面目标为某一典型金属目标，其星下点的微波辐射截面为333 m×77 m；轨道高度为500 km，对应的空间分辨率为1 km，系统灵敏度为0.4 K。图2给出了工作频率37 GHz、虚警率 10^{-5} 时，不同水汽含量下星下点探测距离与探测概率的关系曲线。由图2可知：水汽含量越高、相同探测距离下探测概率越低，对系统的目标探测能力影响越大。根据式(11)和式(14)可知，这主要是由于水汽含量越高，对信号的衰减越大，即大气透射率 τ 越小。

图3给出了水汽含量20 mm，虚警率 10^{-5} ，工作频率分别为6.8 GHz, 10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz和37 GHz时星下点探测距离与探测概率的关系曲线。由图3可知：当水汽含量相同时，工作频率越高、相同探测距离下探测概率越低，对系统的探测能力的影响越大、越不利于目标的探测。但水汽对23.8 GHz的影响大于对37 GHz的影响，这主要是由于23.8 GHz是水汽吸收峰，其衰减大于37 GHz的衰减。因此，水汽对于系统目标探测能力的不良影响，23.8 GHz时的影响要大于37 GHz时的影响。

图4给出了工作频率37 GHz，虚警率 10^{-5} 时，不同液水含量的星下点探测距离与探测概率的关系曲线。由图4可知：液水含量越高、相同探测距离下探测概率越低，对系统的目标探测能力影响越大。同样，这主要是由于液水含量越高，对信号的

衰减越大，即大气透射率 τ 越小。图5给出了液水含量0.2 mm，虚警率 10^{-5} 时，不同工作频段下星下点探测距离与探测概率的关系曲线。由图5可知：工作频率越高、相同探测距离下系统的探测能力越低，对系统的目标探测能力影响越大。

4.3 典型天气

对于海面目标而言，典型复杂天气主要包括云、雾和降雨等。海面雾是典型的平流雾，根据雾的大小可分为：重雾、浓雾、中雾和轻雾；云分为4种类型：晴空积云、卷积云、低层云和浓积云；降雨按照大小可分为微雨、小雨、中雨和大雨。根据Liebe建立的大气微波辐射传输模型MPM93模型^[15]，分析了雾、云和降雨在不同工作频率星下点的衰减。表1、表2和表3分别给出了不同类型的雾、云和降雨下10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 37 GHz和94 GHz时的衰减。由表1、表2和表3可知：云、雾和降雨均会衰减热辐射信号，且频率越高、衰减越大，含水量和降雨量越大、衰减越大，

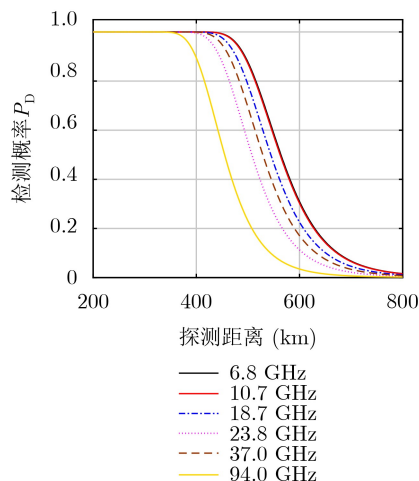


图3 星下点目标探测距离与探测概率的关系曲线

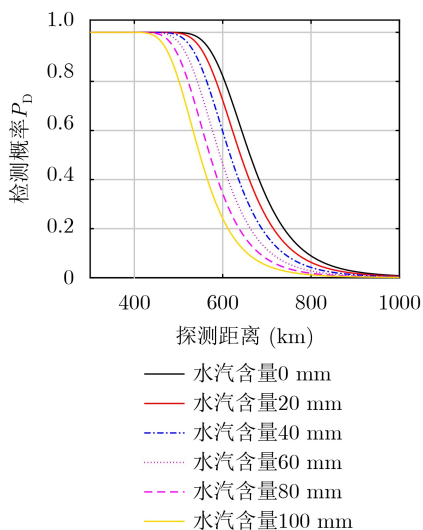


图2 不同水汽含量的星下点目标探测距离与探测概率的关系曲线

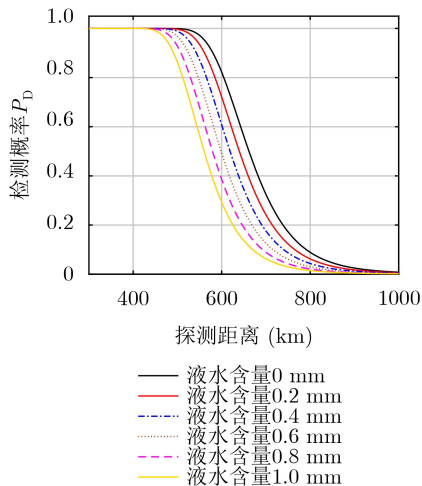


图4 不同液水含量的星下点目标探测距离与探测概率的关系曲线

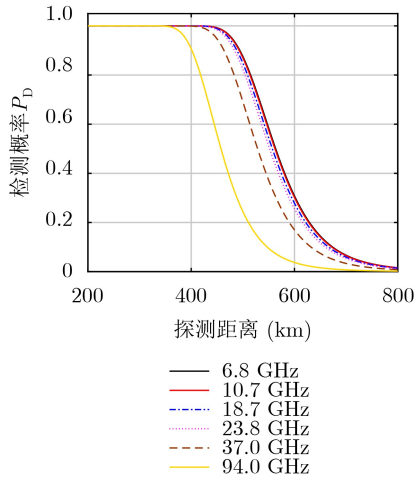


图 5 星下点目标探测距离与探测概率的关系曲线

越不利于目标的探测；但云、雾对于低于 37 GHz 的频段信号的衰减较小，基本可以忽略，因此可认为其不影响系统的探测性能；而降雨对不同频段的微波信号衰减较大，小雨在 37 GHz 的衰减超过 5 dB，其将严重影响系统的探测能力。

4.4 海风的影响

当海风较大时，相对于平静海面而言，由于粗糙度和泡沫的出现，增加了海洋表面的辐射率，海洋表面亮温增加；而此时海面目标的辐射率几乎不受海风的影响，因此会改变海洋表面与目标的亮温差值，从而影响系统的探测性能。

图 6 给出了工作频率 37 GHz，虚警率 10^{-5} 时，

不同风速下金属目标星下点探测距离与探测概率的关系曲线。由图 6 可知：在相同的探测距离下，风速越大、系统对金属目标的探测概率越高。由此可知：海风对于海面金属目标的探测是有利的，且风速越大，越有利于对金属目标的探测。图 7 给出了工作频率 37 GHz，虚警率 10^{-5} 时，不同风速下隐身目标星下点探测距离与探测概率的关系曲线。由图 7 可知：在相同的探测距离下，风速越大、系统对隐身目标的探测概率越低。由此可知：海风对于海面隐身目标的探测是不利的，且风速越大，越不利于对隐身目标的探测。

综上所述：对于云、雾和降雨而言，工作频率越高，其对信号的衰减越大，对系统影响越大，越不利于目标的探测；相对于降雨而言，云和雾的衰减较小，从而对系统的目标探测能力影响较小，且在低频段 (<37 GHz) 基本可以忽略；而当出现小雨、中雨和大雨时，将严重地衰减大汽路径中的微波热辐射信号，极大地降低系统的目标探测能力；此外，海风对于海面金属目标的探测是有利的，且风速越大，系统的探测能力越强；相反，海风对于海面隐身目标的探测是不利的，且风速越大，对系统的影响越大，系统的探测能力越弱。

5 实验验证

为了验证天基综合孔径微波辐射无源探测系统穿透云层的能力，开展了机载实验。实验所用设备

表 1 温度 10°、星下点，雾高 100 m 的衰减 (dB)

雾型	能见度(km)	雾含水量(g/m ³)	94 GHz	37 GHz	23.8 GHz	18.7 GHz	10.7 GHz
平流雾	重雾 0.05	11.3135	4.8569	1.0016	0.4305	0.2686	0.0890
	浓雾 0.20	1.5583	0.6690	0.1380	0.0593	0.0370	0.0123
	中雾 0.50	0.4203	0.1805	0.0372	0.0160	0.0100	0.0033
	轻雾 1.00	0.1560	0.0670	0.0138	0.0059	0.0037	0.0012

表 2 温度 10°、星下点、不同云型的衰减 (dB)

云型	云底层(km)	云底层(km)	含水量(g/m ³)	94 GHz	37 GHz	23.8 GHz	18.7 GHz	10.7 GHz
晴空积云	0.5	1	0.50	1.0732	0.2213	0.0951	0.0594	0.0197
卷积云	5.0	7	0.10	0.8586	0.1771	0.0761	0.0475	0.0157
低层云	0.5	1	0.25	0.5366	0.1107	0.0476	0.0297	0.0098
浓积云	1.6	2	0.80	1.3738	0.2833	0.1238	0.0760	0.0252

表 3 温度 10°、星下点、不同雨型衰减 (dB)

雨型	降雨率(mm/h)	94 GHz	37 GHz	23.8 GHz	18.7 GHz	10.7 GHz
微雨	0.25	12.9574	1.5068	0.4642	0.2235	0.0281
小雨	1.00	36.7631	5.1375	1.8805	1.0317	0.1604
中雨	4.00	96.5170	17.5168	7.6177	4.6378	0.9154
大雨	16.00	219.3243	59.7251	30.8595	20.5155	5.2244

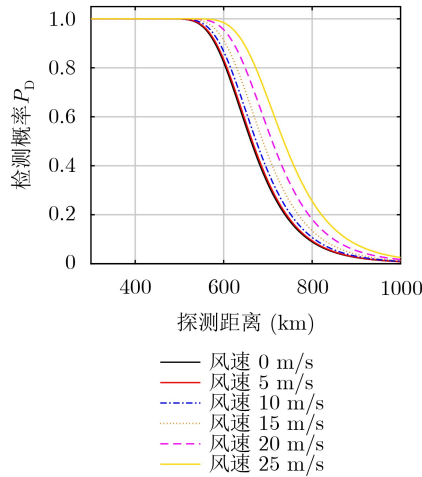


图6 不同风速的金属目标星下点探测距离与探测概率的关系曲线

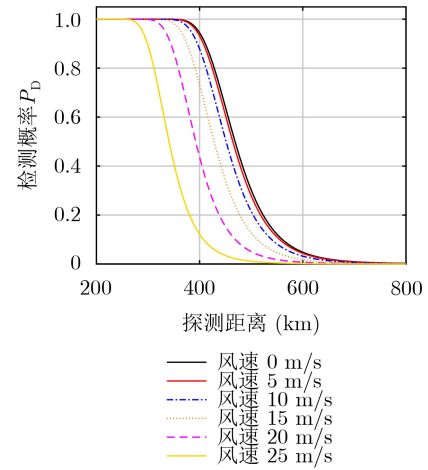


图7 不同风速的隐身目标星下点探测距离与探测概率的关系曲线

是一台单臂6单元“Y”型的X波段综合孔径辐射计系统，其关键指标如表4所示。

飞机飞行在1800 km的高度，在飞机下方有较厚浓积云，且海面风速较大，达到6~7 m/s。通过对实验数据分析：X波段综合孔径微波辐射计无源探测系统透过浓积云发现了海面一金属目标。图8(a)给出了两个时刻的光学图像，图8(b)给出了对应时刻的微波辐射亮温图像，图8(c)给出了对应的目标标识图。在图8(b)中，均出现了一个低温区和一个伴随的高温区。根据文献[14]的结论可知：低亮温

表4 X波段综合孔径微波辐射计系统相关参量

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型
天线个数	19
单元间距	0.95倍波长

区对应的船体自身，而高亮温区对应的是该目标的

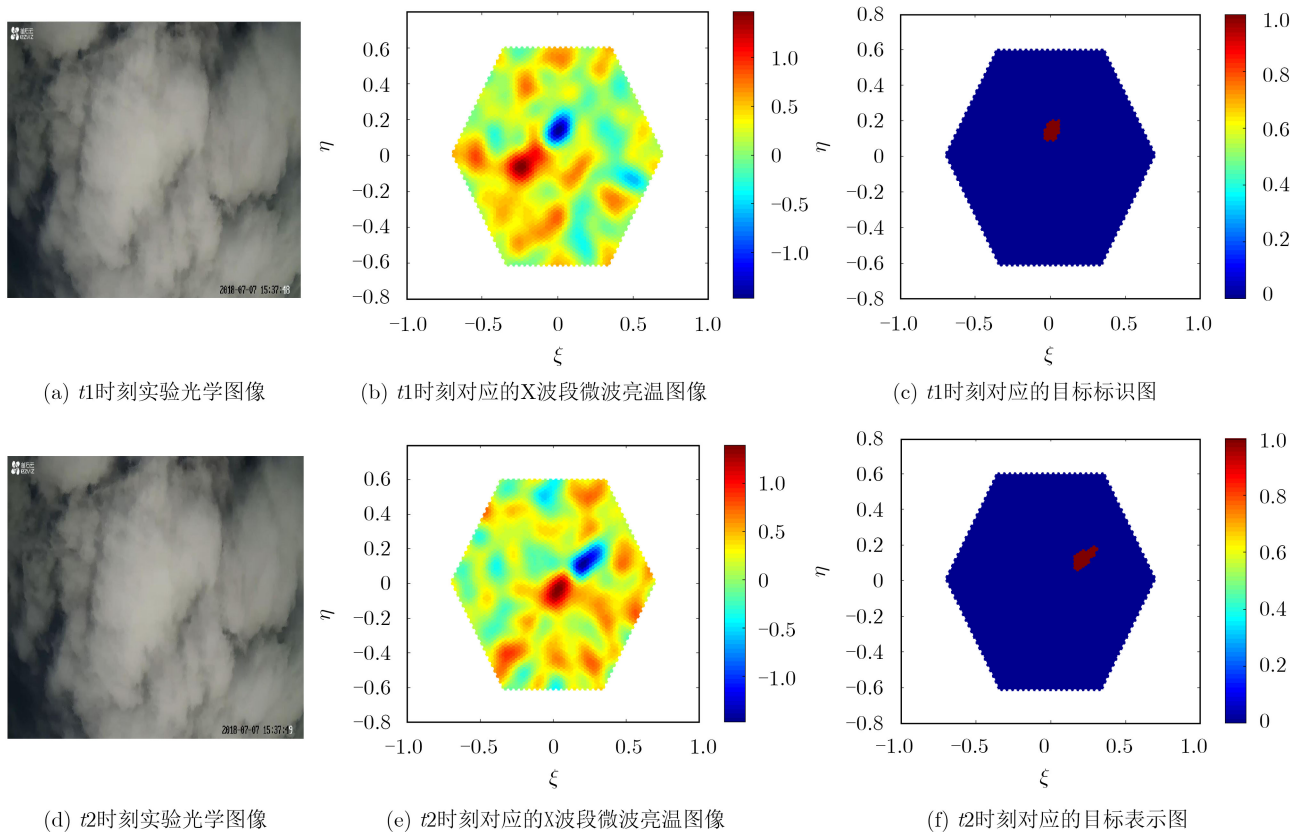


图8 浓云条件下海面目标探测

尾浪。由此可断定该X波段综合孔径微波辐射无源探测系统透过云层探测到海面上一金属目标。在4种类型的层云中, 浓积云的衰减最大, 由此可知: X波段综合孔径微波辐射无源探测系统具备穿透云层探测海面目标的能力。

6 结束语

针对云、雾和雨等复杂天气以及海风对天基微波辐射无源探测系统探测性能影响, 本文基于微波辐射无源探测系统的目标探测方程分析研究可知: 云、雾和雨等复杂天气会改变大气的透射率 τ , 而海风会改变海洋背景亮温值 T_{sea} , 这些因素均会改变目标与海洋背景的视在亮温差值, 进而影响系统的目标探测性能。同时, 通过数值仿真分析了云、雾和雨等复杂天气以及海风的影响。理论与仿真均得到如下结论: (1)云、雾、微雨, 其对不高于37 GHz的热辐射信号的衰减较小, 基本可以忽略; (2)对于94 GHz的重雾、大于等于23.8 GHz的小雨、大于等于10.7 GHz的中雨和全频段的大雨, 其均会严重衰减热辐射信号, 从而严重影响系统的探测能力; (3)海风有利于海面金属舰船目标的探测, 且风速越大, 越有利于目标的探测; (4)海风不利于海面隐身目标的探测, 且风速越大, 目标的检测概率越低, 越不利于目标的探测。同时开展了实验, 实验验证了X波段辐射无源探测系统具备穿透云层探测海面目标的能力。

而在系统设计时, 工作频率越高, 系统体积越小、重量越轻, 因此, 在具体的系统设计时需要综合考虑系统体积、重量和云、雾和雨等复杂天气以及海风对系统探测性能的影响, 折中选择合适的工作频段。

参考文献

- [1] HUANG Jian and GAN Tiguang. A novel millimeter wave synthetic aperture radiometer passive imaging system[C]. The 4th International Conference on, Proceedings Microwave and Millimeter Wave Technology, Beijing, China, 2004: 414–417. doi: [10.1109/ICMMT.2004.1411554](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2004.1411554).
- [2] LI Qingxia, CHEN Ke, GUO Wei, *et al.* An aperture synthesis radiometer at millimeter wave band[C]. 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, China, 2008: 1699–1701. doi: [10.1109/ICMMT.2008.4540797](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2008.4540797).
- [3] 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[J]. 微波学报, 2012, 28(2): 28–31, 41. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.2012.02.015](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.2012.02.015).
NI Wei, HU Fei, and CHEN Ke. Performance analysis of synthetic aperture radiometer in aerial stealthy targets detection[J]. *Journal of Microwaves*, 2012, 28(2): 28–31, 41. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.2012.02.015](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.2012.02.015).
- [4] 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. doi: [10.3724/SP.J.1010.2010.00123](https://doi.org/10.3724/SP.J.1010.2010.00123).
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. doi: [10.3724/SP.J.1010.2010.00123](https://doi.org/10.3724/SP.J.1010.2010.00123).
- [5] 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](https://doi.org/10.1364/OE.26.020145).
- [6] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11805/TKYDA201706.0898).
- [7] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2019.01.048).
- [8] 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[J]. 无线电工程, 2015, 45(3): 50–53, 61. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2015.03.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2015.03.14).
LI Shuguang, YU Shoujiang, JIANG Wei, *et al.* Detection of aerial stealthy targets by synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Radio Engineering*, 2015, 45(3): 50–53, 61. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2015.03.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2015.03.14).
- [9] 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): 674–681. doi: [10.11972/j.issn.1001-9014.2019.05.020](https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2019.05.020).
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): 674–681. doi: [10.11972/j.issn.1001-9014.2019.05.020](https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2019.05.020).
- [10] 卢海梁, 王志强, 高超, 等. 基于被动干涉微波亮温图像的海面目标探测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 563–572. doi: [10.11999/JEIT190256](https://doi.org/10.11999/JEIT190256).
LU Hailiang, WANG Zhiqiang, GAO Chao, *et al.* Research on the detection algorithm for sea surface targets based on

- passive interferometric microwave images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 563–572. doi: [10.11999/JEIT190256](https://doi.org/10.11999/JEIT190256).
- [11] LU Hailiang, LI Yinan, LI Hao, *et al.* Ship detection by an airborne Passive Interferometric Microwave Sensor (PIMS)[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(4): 2682–2694. doi: [10.1109/TGRS.2019.2953355](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2953355).
- [12] 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. doi: [10.1002/2015RS005858](https://doi.org/10.1002/2015RS005858).
- [13] MEISSNER T and WENTZ F J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 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. doi: [10.1109/TGRS.2011.2179662](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2179662).
- [14] 刘西川, 宋堃, 高太长, 等. 复杂大气条件对微波传播衰减的影响研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(1): 181–188. doi: [10.11999/JEIT170253](https://doi.org/10.11999/JEIT170253).
- LIU Xichuan, SONG Kun, GAO Taichang, *et al.* Research on the effect of complex atmospheric condition on microwave propagation attenuation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 181–188. doi: [10.11999/JEIT170253](https://doi.org/10.11999/JEIT170253).
- [15] 倪炜. 空中目标微波辐射特性及检测方法研究[D]. [博士论文], 华中科技大学, 2012.
- NI Wei. Microwave radiation characteristics and detection method research in aerial target detection[D]. [Ph. D. dissertation], Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- 宋广南: 男, 1988年生, 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.
- 卢海梁: 男, 1986年生, 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.
- 李浩: 男, 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.
- 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.
- 郎量: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为微波遥感理论与微波遥感器等.
- 董思乔: 男, 1984年生, 工程师, 研究方向为无线电管理与检测等.
- 李鹏飞: 男, 1989年生, 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.
- 吕容川: 女, 1982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.

责任编辑: 马秀强