

基于地基综合孔径微波辐射计的空中目标无源探测技术研究

李一楠^{①②} 张林让^① 卢海梁^{*②} 李鹏飞^② 吕容川^{①②} 李 浩^② 付庸杰^③
邱尔雅^③ 唐世阳^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

^③(武汉凡谷电子技术股份有限公司 武汉 430200)

摘 要: 针对空中目标的探测与跟踪的问题, 该文探讨了地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测理论及其技术的可行性。概述了地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测原理; 建立了空中目标探测概率方程, 并从探测概率的角度详细分析了系统探测性能与相关影响因素的关系, 同时分析了地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测技术的可行性; 并开展了地基综合孔径微波辐射计的空中目标无源探测技术的验证实验。理论和实验均表明地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测技术是可行性的。

关键词: 无源探测; 地基; 综合孔径; 微波辐射; 空中目标

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1243-08

DOI: 10.11999/JEIT200166

Research on the Aerial Target Detection by Ground-based Synthesis Aperture Microwave Radiometers

LI Yinan^{①②} ZHANG Linrang^① LU Hailiang^② LI Pengfei^② LÜ Rongchuan^{①②}
LI Hao^② FU Yongjie^③ QIU Erya^③ TANG Shiyang^①

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

^③(Wuhan Fangu Electronic Technology Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract: In view of the detection and tracking of aerial targets, the theory of the aerial targets detected by ground-based synthetic aperture microwave measurement technology and the feasibility are discussed. The detection principle of aerial targets by ground-based synthetic aperture microwave is outlined. The target detection probability is estimated, and the relationship between the systematic performance and related factors is analyzed in terms of the detection probability. Meanwhile, the feasibility of the aerial targets detected by ground-based synthetic aperture microwave measurement technology is analyzed. The experiments are performed that aerial targets are detected by a ground-based synthetic aperture microwave radiometer. Both theoretical and experimental results show that aerial targets are detected by a ground-based synthetic aperture microwave radiometer is feasibility.

Key words: Passive detection; Ground-based; Synthesis aperture; Microwave radiation; Aerial target

1 引言

在现代国防建设中, 实现空中目标的探测与跟踪

一直以来都是各军事强国发展的重点之一^[1]。空中目标的探测常见手段主要有可见光、红外和主动雷达。然而, 这些探测手段均存在各自的优缺点^[2]。当前, 被动微波无源探测技术作为一种全被动探测技术, 而备受关注^[3]。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亮温差异来探测目标的, 其主要设备是微波辐射计, 属于无源雷达的范畴^[3]。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。国内外相关学者一直在开展其在军事侦察等方面应用研究^[4-6]。

收稿日期: 2020-03-08; 改回日期: 2020-07-20; 网络出版: 2020-07-27

*通信作者: 卢海梁 3966891hl@163.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)

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等人^[7]借鉴了射电天文“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。20世纪90年代,欧空局开始了地球低轨道的星载2维综合孔径微波辐射计MIRAS,MIRAS是一个L波段的“Y”型69单元的2维综合孔径辐射计,于2009年11月2日成功发射升空,MIRAS是世界上首个且唯一在轨的星载综合孔径微波辐射计系统^[8]。综合孔径微波辐射计在高分辨率静止轨道大气探测的应用也备受关注,2002年,美国航天局提出了静止轨道星载综合孔径微波辐射计项目GeoSTAR^[9];2005年,欧空局于提出了地球静止轨道星载综合孔径微波辐射计项目GAS^[10];2009年,中国科学院空间中心提出了一种旋转圆形的综合孔径微波辐射计项目GIMS^[11]。

与此同时,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。1998年,南京理工大学提出采用毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机的方法^[1];2001年,中科院空间中心提出利用微波辐射计探测隐身目标;2002年,德国航天中心展示了机载综合孔径微波辐射计对地军事目标进行侦察的研究工作^[12]。2004年,波兰华沙技术大学提出利用多基辐射计相关测量来探测运动目标的方法^[13];同年,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^[14]。2005年,华中科技大学成功研制了国内首台一维综合孔径微波辐射计,并利用该系统在微波辐射无源探测方面展开一系列研究^[15,16]。2015年,中国空间技术研究院西安分院开展了高分辨率综合孔径微波辐射无源探测技术用于全天时、全天候、隐蔽性探测海面大型舰船目标的相关研究,于2018年开展了机载验证试验^[2,3,17]。

针对空中目标的探测与跟踪的问题,本文提出了利用地基综合孔径微波辐射计作为一种无源探测技术以实现对空中目标的探测。本文详细阐述了地基综合孔径微波辐射计空中目标无源探测理论;建立了地对空场景下的空中目标探测概率方程,并基于探测概率方程讨论系统关键性能指标和可行性;最后开展了实验以验证地基综合孔径微波辐射计的空中目标无源探测技术的可行性。

2 地基综合孔径微波辐射计空中目标无源探测理论

微波辐射无源探测技术主要是利用目标与背景的微波辐射亮温差来实现对目标的有效探测。当地基综合孔径微波辐射计观测空中目标时,其背景

是天空,而天空是典型的低亮温场景^[18,19]。对于空中金属目标而言,由于其自身辐射和地表高辐射亮温的反射使得其在微波辐射亮温图像中成为明显的高亮温目标;对于空中隐身目标而言,由于隐身目标自身的高辐射率产生高的微波辐射亮温同样使其在微波辐射亮温图像中成为明显的高亮温目标。基于空中金属目标和隐身目标在微波辐射亮温图像中的高亮温特征,则可实现对空中目标的探测。如图1所示,给出了空中目标探测模型示意图。微波辐射计观测的亮温主要有3部分:目标自身辐射亮温、地表总辐射经目标反射亮温和目标与辐射计之间的大气下行辐射亮温。

在目标参考面,空中目标的微波辐射亮温图像可表示

$$T_t = T_{\text{ty}} \cdot e + T_{\text{up}} \cdot (1 - e) \quad (1)$$

其中, T_{ty} 表示空中目标的物理温度, e 表示空中目标的辐射率, T_{up} 表示地表或海表在目标参考面的总亮温 T_{e}^{up} 和地表或海表与空中目标之间大气的向上辐射亮温 T_{a}^{up} 之和,即

$$T_{\text{up}} = T_{\text{e}}^{\text{up}} + T_{\text{a}}^{\text{up}} \quad (2)$$

考虑到地表或海表到空中目标之间路径的衰减,地表或海表在空中目标参考面的亮温可表示为

$$T_{\text{e}}^{\text{up}} = T_{\text{e}}^{\text{up}} \cdot \tau^{\text{up}} \quad (3)$$

其中, T_{e}^{up} 表示地表或海表包含下行大气反射的总的辐射亮温, τ^{up} 表示地表或海表到空中目标之间路径的衰减。

将式(2)和式(3)代入式(1)中,可得

$$T_t = T_{\text{ty}} \cdot e + (T_{\text{e}}^{\text{up}} \cdot \tau^{\text{up}} + T_{\text{a}}^{\text{up}}) \cdot (1 - e) \quad (4)$$

在地基综合孔径微波辐射计观测空中目标时,其是以天空为背景的,此时空中目标与天空背景在目标参考面辐射亮温差值为

$$\Delta T_t = |T_t - T_s| \quad (5)$$

其中, T_s 表示天空背景的微波辐射亮温。假设空中目标物理温度为300 K,天空背景的微波辐射亮温为3 K,地表向上辐射亮温为250 K。若空中目标为金属目标,工作频率在100 GHz以内时其辐射率 e 不超过0.1,则该空中金属目标的亮温约为255 K,此时空中金属目标与天空背景的亮温差值 $\Delta T_t = 252$ K;若空中目标为隐身目标,且辐射率 e 为0.8时,则该空中隐身目标的亮温约为290 K,此时空中金属目标与天空背景的亮温差值 $\Delta T_t = 287$ K。由此可知,空中金属目标或空中隐身目标在天空背景下均呈现出高亮温特征。

在地基综合孔径微波辐射计参考面,获得的空中目标和天空的背景的分别表示为

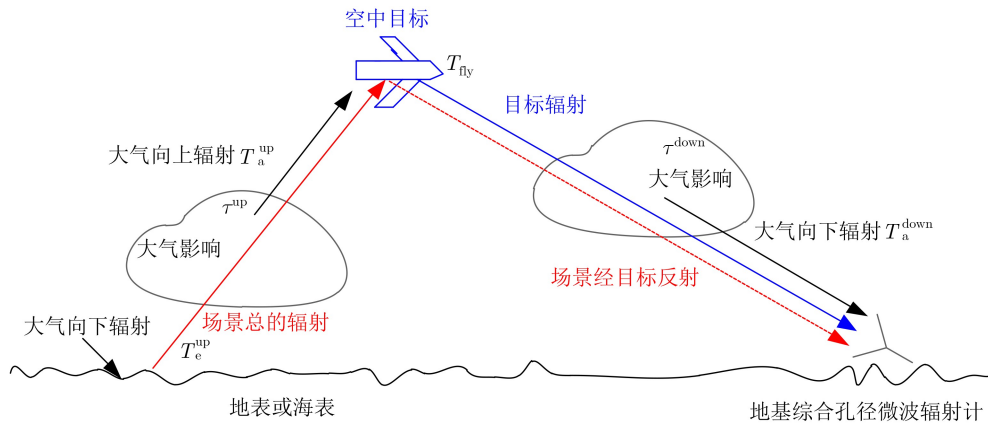


图1 空中目标探测模型示意图

$$T_t^{down} = T_t \cdot \tau^{down} + T_a^{down} \quad (6)$$

$$T_s^{down} = T_s \cdot \tau^{down} + T_a^{down} \quad (7)$$

其中， τ^{down} 和 T_a^{down} 表示空中目标到地基综合孔径微波辐射计间大气的透射率和下行大气亮温。

由式(6)和式(7)可得，空中目标在辐射计参考面的亮温差值为

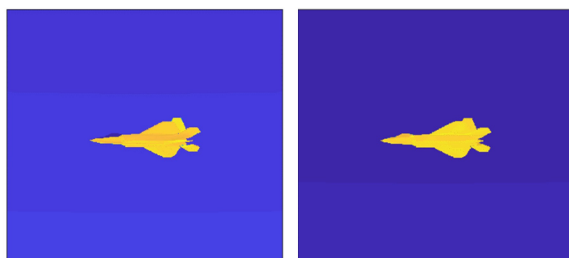
$$\Delta T_t^{down} = |T_t - T_s| \cdot \tau^{down} \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)可得

$$\Delta T_t^{down} = (T_t \cdot e + (T_e^{up} \cdot \tau^{up} + T_a^{up}) \cdot (1 - e) - T_s) \tau^{down} \quad (9)$$

根据上述假设条件，当在晴朗和250 K的地表背景下，假设空中目标到地基综合孔径微波辐射计的大气透射率为0.9，则在辐射计参考面空中金属目标与天空背景的亮温差值 ΔT_t^{down} 分别为227 K和287 K。

如图2所示，分别给出了10.7 GHz时地表背景下空中金属目标和空中隐身目标的微波辐射亮温图。由图2可知：空中金属目标或隐身目标在天空背景下均呈现出高亮温特征，在微波辐射亮温图像中呈现出高对比度，这与上述理论分析是一致的。综上所述：基于空中目标与天空背景的微波辐射亮温差异，即空中金属目标或隐身目标在微波辐射亮温图像中呈现高亮温特征可实现对空中目标的有效探测。



(a) 空中金属目标

(b) 隐身目标

图2 空中金属目标和隐身目标的微波辐射亮温图

3 系统探测性能与可行性分析

文献[3]中，定义了“系统探测度”来量化衡量微波辐射无源探测系统的目标探测能力，推导了目标探测方程。本节借鉴了文献[3]的方法探讨了空中目标微波辐射无源探测系统的探测性能与可行性。

在目标微波辐射无源探测系统中，利用系统探测度来量化衡量系统的探测能力^[2,3]，其定义为

$$DC_s = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y} \quad (10)$$

其中， ΔT_B 表示系统的灵敏度， $\Delta \theta_X$ 和 $\Delta \theta_Y$ 分别表示的是X方向和Y方向的角分辨率。系统探测度越大，系统探测能力越强。

在目标微波辐射无源探测系统中，也可利用探测概率来量化衡量系统对目标的探测性能^[2,3]。根据相关理论^[2,3]和空中目标探测模型，可推导基于恒虚警率的空中目标探测概率方程

$$ROC(P_f, P_d) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y \cdot \frac{S_{eff} \cdot |T_t - T_s| \cdot \tau^{down}}{L^2}} \quad (11)$$

其中， P_f 表示虚警率， P_d 表示探测概率， S_{eff} 表示空中目标的微波辐射有效辐射截面， L 表示探测系统与目标的距离。在式(11)中，一旦确定虚警概率，则可计算空中目标的探测概率。

在式(11)中，大气下行透射率 τ^{down} 可表示为

$$\tau^{down} = 10^{-k/10} \quad (12)$$

其中， k 表示空中目标到地基综合孔径微波辐射计间大气衰减。

空中目标到地基综合孔径微波辐射计间大气的衰减又与大气、云、雾中水汽含量和液水含量以及降雨量有关^[16]。因此，大气下行衰减可表示为

$$k = f(v, w, R) \quad (13)$$

其中, v 和 w 分别表示水汽和液水含量, R 表示降雨率。

将式(12)和式(13)代入式(11)可得

$$\text{ROC}(P_f, P_d) = \frac{1}{\Delta T_B \cdot \Delta \theta_X \cdot \Delta \theta_Y} \cdot \frac{S_{\text{eff}} \cdot |T_t - T_s| \cdot 10^{-f(v, w, R)/10}}{L^2} \quad (14)$$

联合式(11)和式(14)可知: (1)在恒虚警概率下, 目标的探测概率与系统探测度、目标有效辐射截面、目标与背景的辐射亮温差、探测距离和大气透射率密切相关; (2)在恒虚警概率下, 当目标有效辐射截面越大、目标与背景的辐射亮温差值越大、探测距离越小、大气透射率的越高(衰减越小), 则目标的探测概率越高, 反之, 目标探测概率越低。下面将详细地分析系统探测性能与工作频率、飞行高度、天气因素、探测距离和目标有效辐射截面的关系。

3.1 工作频率

根据式(11)和式(14)可知: 大气的透射率与系统的探测性能相关, 即大气的衰减与系统的探测性能密切相关, 大气衰减越大, 辐射计的视在亮温差值越小, 系统的探测能力越弱。而大气的衰减又与频率有关, 根据Liebe建立的大气微波辐射传输模型——MPM93模型^[16], 图3给出了晴朗天气(标准大气压1013 hPa, 大气温度288 K, 水汽含量7.5 g/cm)下大气衰减系数与工作频率的曲线关系。在被动微波遥感中, 常选择大气窗口作为被动微波遥感的工作频率, 比如6.8 GHz, 10.6 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 37 GHz和94 GHz等。

同样, 根据Liebe建立的大气微波辐射传输模型——MPM93模型^[16], 图4给出大气温度288 K时10.7 GHz和37.0 GHz信号分别在夏季中纬和冬季中纬地区的大气衰减率与高度(海拔)的变化曲线。由图4可知: 大气的衰减系数随海拔高度的上升呈现出近似负指数递减的变化趋势, 且夏季中纬地区的大气衰减率高于冬季中纬地区的大气衰减率。这主要是由于大气中的水汽含量随海拔高度升高而急剧下降导致的, 且夏季的大气水汽含量高于冬季的大气水汽含量。由图4亦可知: 当海拔高度高于10 km(高出对流层), 可近似忽略大气衰减。由此不难预测: 当探测距离相同时, 目标飞行高度越低, 路径的大气衰减累积越大, 对系统的性能影响亦越大。

3.2 飞行高度

假设探测目标为某一典型空中隐身目标, 其翼展面积为478 m², 且认为翼展面积等于仰角为90°时的有效辐射截面, 且有效辐射截面随仰角变

化而变化, 可近似等于翼展面积乘以仰角的正弦函数, 探测距离为200 km, 虚警率为10⁻⁵。图5给出了在夏季中纬度晴空大气条件下, 工作频率在10.7 GHz, 海表盐度32 psu和海表温度300 K海洋背景下, 不同高度时系统探测度与目标探测概率的曲线关系。由图5可知: 在探测距离相同时, 飞行高度越低, 目标的探测概率越低, 对系统的探测能力要求越高。这之前分析是一致的, 在相同的探测距离下, 飞行高度越低, 由于底层大气的衰减系数较大, 使得整个传输路径对信号的衰减增大, 从而降低了系统的探测能力和目标的探测概率。

3.3 天气因素

根据Liebe建立的大气微波辐射传输模型, 大气的透射率与天气是密切相关。根据式(11)和式(14)综合可知: 系统的探测能力也容易受到天气因素的影响, 包括云、雾和降雨等^[3]。假设探测目标同为图5中海洋背景下的典型空中隐身目标, 工作频率在10.7 GHz, 飞行高度为10 km, 探测距离为200 km, 虚警率为10⁻⁵。图6分别给出了晴空大气、浓积云、浓雾、重雾、微雨(0.5 mm/h)、小雨(1 mm/h)和中雨(4 mm/h)下系统探测度与探测概率的关系曲线。需要说明的是, 由于晴空大气、浓积云和浓雾的衰减非常小, 图6中晴空大气、浓积云和浓雾的曲线几乎重合了。由图6综合分析可知: 晴空大气、浓积云和浓雾等对系统的探测能力影响几乎可

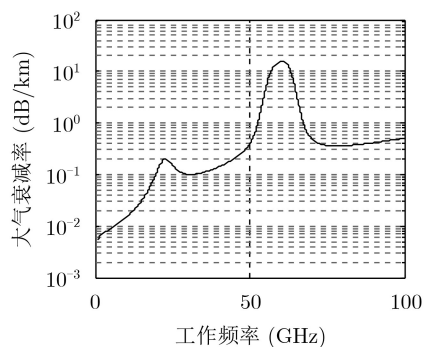


图3 晴朗天气下不同工作频率下的衰减图

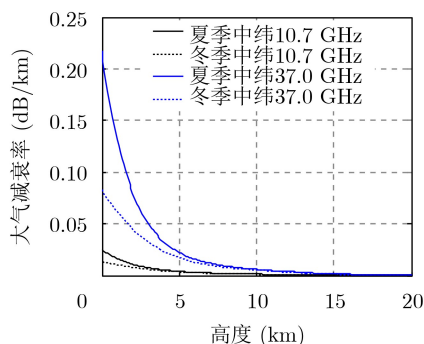


图4 10.7 GHz和37 GHz信号的衰减系数随海拔高度的变化曲线

以忽略,重雾、微雨和小雨对系统探测能力有一定的影响,而中雨对系统的探测能力影响较大。

3.4 探测距离

根据式(14)可知:目标探测概率与目标探测距离密切相关。假设探测的目标同样为图5中海洋背景下的典型空中隐身目标,飞行高度为10 km,系统工作频率为10.7 GHz,系统探测度为 $5 \times 10^6 \text{ K}^{-1}\text{rad}^{-2}$,目标虚警率为 10^{-5} 。图7给出了晴空大气下探测距离与探测概率的关系曲线。由图7可知:目标的探测概率随着探测距离的增加而降低。图7的结果表明:当探测距离小于235 km时,系统能够实现对该典型隐身目标的探测概率优于90%,此时系统探测度 $5 \times 10^6 \text{ K}^{-1}\text{rad}^{-2}$ 。此时对应的典型的系统灵敏度和角分辨率分别为1.1 K, 0.029° 。

3.5 目标有效辐射截面

根据式(14)可知,目标的探测概率与目标有效辐射截面密切相关。图8给出了飞行高度为10 km,系统工作频率为10.7 GHz,系统探测度为 $5 \times 10^6 \text{ K}^{-1}\text{rad}^{-2}$,目标虚警率为 10^{-5} ,探测距离200 km时,晴空大气目标有效辐射截面与探测概率的关系曲线。由图8可知:目标有效辐射截面与系统的探测性能正相关,目标有效辐射截面越大,目标的探测概率越大。

由上述分析可知:当系统工作在10.7 GHz、系统探测度为 $5 \times 10^6 \text{ K}^{-1}\text{rad}^{-2}$ 时,可实现对距离

220 km、高度10 km的某一典型军事目标的有效探测。式(10)又可以表示为

$$\text{DC}_s = \frac{L^2}{\Delta T_B \cdot \Delta R_X \cdot \Delta R_Y} \quad (15)$$

其中, ΔR_X 和 ΔR_Y 分别表示X轴方向和Y轴方向的空间分辨率。一般认为 $\Delta R_X = \Delta R_Y = \Delta R$,根据式(15)计算当系统探测度为 $5 \times 10^6 \text{ K}^{-1}\text{rad}^{-2}$ 、探测距离为220 km时,系统的灵敏度与空间分辨率的曲线关系,如图9所示。由图9可知:当系统探测度一定时,空间分辨率与系统灵敏度之间呈反比。当系统角分辨率为 0.029° 、系统灵敏度为0.97 K、工作频率为10.7 GHz时,系统规模在60~70 m的量级,阵元数目接近10000个,这在工程上也是可以实现。当工作频率越高,系统规模越小,但是受大气影响越大。因此,在实际中应该综合考虑大气影响和系统规模两个因素选择合适的工作频率。

综上所述:地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测技术探测空中目标是可行的;其探测性能主要与探测距离、目标有效辐射截面、目标飞行高度等密切相关;探测距离越近、目标有效辐射截面越大、目标飞行高度越高,对目标的探测概率越高;同时,天气因素对目标的探测性能也有一定的影响,云和雾对探测性能的影响较小,而中雨以上的降雨对系统探测性能影响较大,其将严重恶化系统的探测能力。

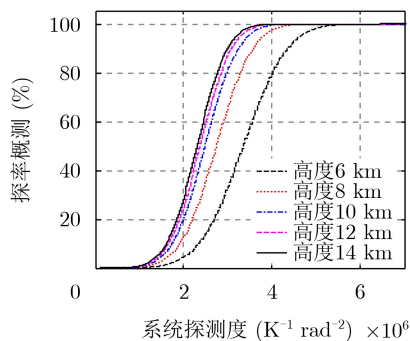


图5 晴空大气条件下,不同飞行高度下,系统探测度与目标探测概率的曲线关系

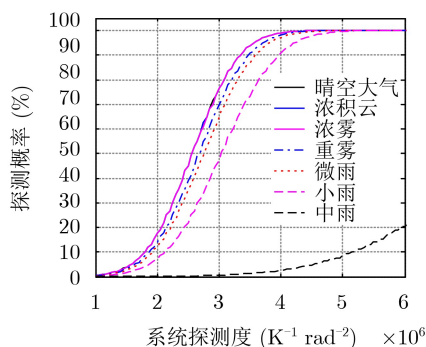


图6 不同天气因素下系统探测度与探测概率曲线关系

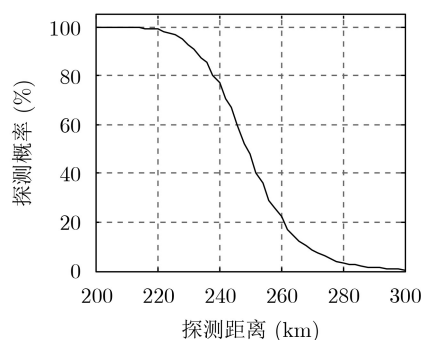


图7 探测距离与探测概率的曲线关系

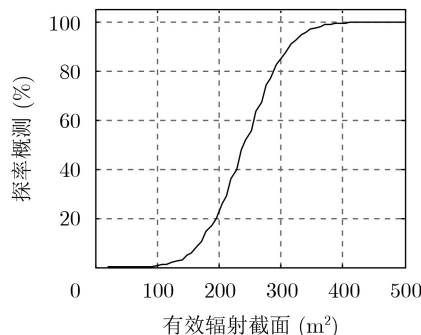


图8 探测概率与有效辐射截面的曲线关系

4 实验验证

为了验证地基综合孔径微波辐射无源探测技术探测空中目标的可行性,开展了空中目标验证实验。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计系统,如图10(a)所示,其关键指标如表1所示。

在实验中,主要是利用该X波段综合孔径微波辐射计对机场内起飞过程中的运12飞机进行探测,如图10(b)所示,由于系统空间分辨率较低,反演图像均采取了3倍补0。实验中,首先,利用X波段综合孔径微波辐射计对运12飞机整个起飞过程进行探测,采集探测数据;随后,对探测数据进行误差校正和亮温反演,获得探测目标的微波辐射亮温图像;最后,利用目标探测算法对微波辐射亮温图像进行目标标识、探测与跟踪。如图11(a)所示给出运12飞机在起飞整个过程中3个不同时刻的光学图像,图11(b)给出了对应时刻的获得微波辐射亮温图像,图11(c)给出了对应的目标标识图像。

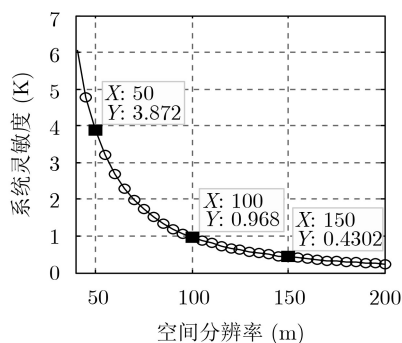
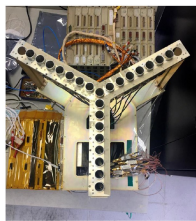


图9 系统灵敏度与空间分辨率的曲线关系



(a) X波段综合孔径微波辐射计



(b) 运12飞机

图10 X波段综合孔径微波辐射计和运12飞机

表1 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	20 ms
天线类型	Y形
天线个数	19
单元间距	0.95波长

运12飞机由金属材料组成的,根据第2节中空中目标的微波辐射特性可知:运12飞机将反射地表的微波辐射亮温,使得X波段综合孔径微波辐射计系统接收飞机总的亮温远大于天空背景亮温,其在微波辐射亮温图像中将呈现出高亮温的特征。观察图11可发现:在亮温图像中,与光学图像中运12飞机对应的位置上出现了一个高温区,3个时刻的亮温图像均呈现出上述特征,这与上述理论情况是基本吻合的。由此可断定亮温图中高亮温区域是实际光学图像中该运12飞机的亮温图像,且其与天空背景的亮温图像对比较为明显。再根据这一特征,则可实现对空中目标的探测与跟踪。上述实验充分表明地基综合孔径微波辐射计作为一种地基微波无源探测技术探测空中目标是可行性的。

在实验中,由于系统积分时间为20 ms,此时系统星下点灵敏度约为3.35 K,星下点角分辨率为 7.2° (加Blackman窗),飞机距离X波段综合孔径微波辐射计的距离大约300 m,飞机是由涂层金属组成,侧视有效辐射截面约为 20 m^2 ,10.65 GHz时辐射率接近为0,由于探测距离较近,可忽略大气的衰减,基于上述参量再根据式(11)可以计算得到在实验中运12飞机的探测概率在虚警率为 10^{-5} 时理论上应该为100%。在实验中,目标探测概率定义为飞机在系统视场内被探测到的帧数与飞机在系统视场内总帧数的百分比,通过对所有探测图像的分析 and 统计,得到实验中飞机的探测概率为100%、虚警率为0,这与上述理论结果是吻合的。

5 结束语

针对现代国防建设中空中目标的探测与跟踪的问题,本文提出了利用地基综合孔径微波辐射计作为一种无源探测技术以实现空中目标的探测。地基综合孔径微波辐射计空中目标无源探测理论主要是利用天空背景下的空中目标的高亮温特征来实现对空中目标的探测。基于建立的空中目标探测模型,推导了空中目标探测概率方程,详细地分析了地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测技术探测空中目标的可行性,同时从探测概率的角度讨论了系统探测性能与系统探测度、目标有效辐射截面、探测距离和天气等因素之间的关系。理论推导和仿真分析均表明:(1)地基综合孔径空中目标微波辐射无源探测技术探测空中目标是可行的;(2)系统探测性能主要与探测距离、目标有效辐射截面、目标飞行高度等密切相关;(3)探测距离越近、目标有效辐射截面越大、目标飞行高度越高,对目标的探测概率越高;(4)天气与目标的探测性能也有一定的影响,云和雾对探测性能的影响较小,而中雨

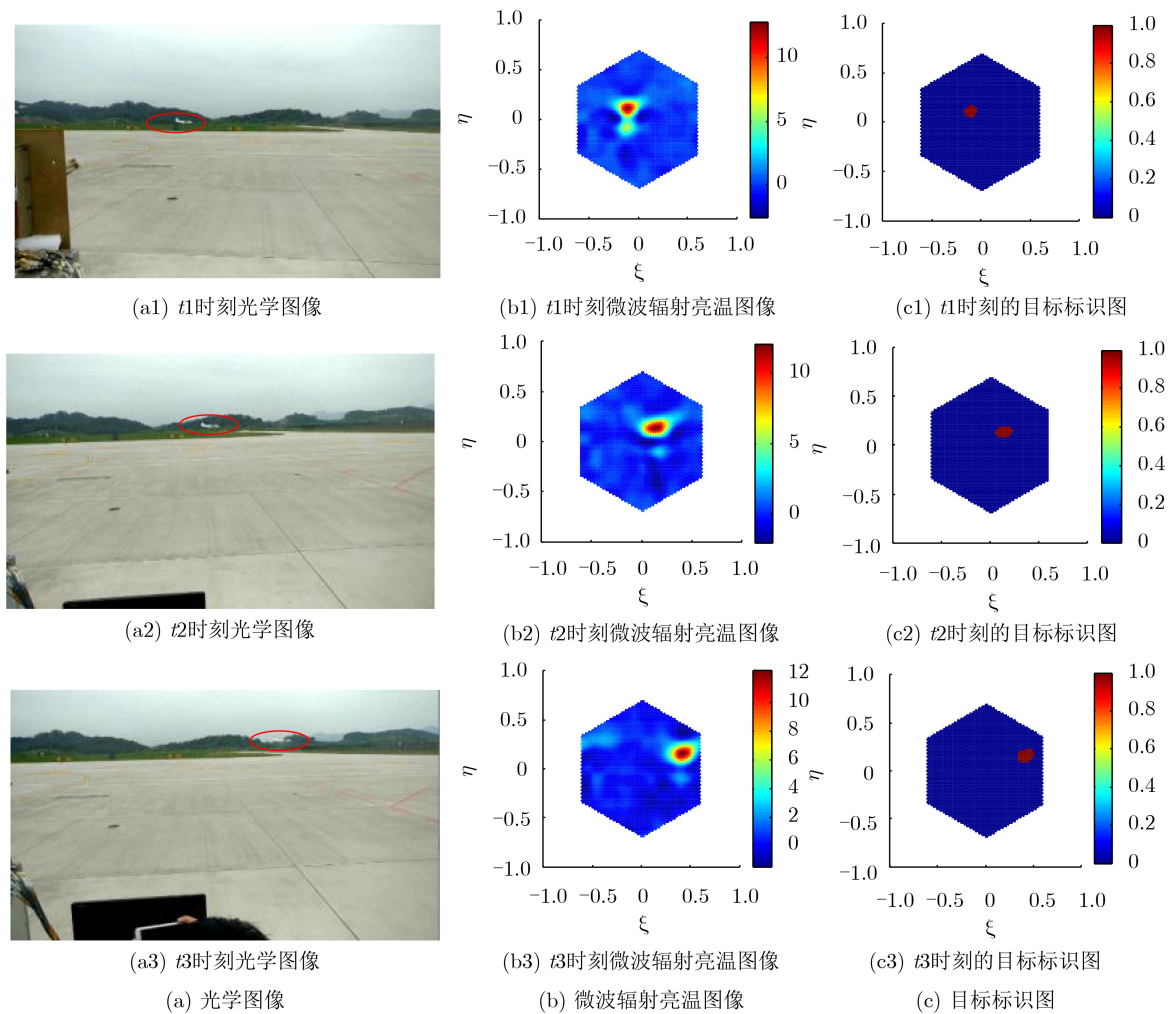


图 11 3个不同时刻的实验结果

以上的降雨对系统探测性能影响较大，将严重恶化系统的探测能力。为了验证技术的可行性，开展了空中运动目标的验证实验。实验结果也表明地基综合孔径微波辐射计的空中目标无源探测技术探测空中目标是可行的。在后续研究中，将深入开展验证实验，从量化的角度充分地验证相关理论的正确性和合理性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] YUJIRI L, SHOUCRI 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).
- [5] SHAO Xuanmin, JUNOR WI, 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](https://doi.org/10.1117/12.542448).
- [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. 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](#).
- [7] 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*, 1998, 26(5): 597–611. doi: [10.1109/36.7685](#).
- [8] 李浩, 卢海梁, 余锐, 等. 一种L波段相控阵微波辐射计射频频干扰检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(1): 172–179. doi: [10.11999/JEIT180203](#).
- LI Hao, LU Hailiang, YU Rui, *et al.* Radio-frequency interference detection algorithm for L-band phased array microwave radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 172–179. doi: [10.11999/JEIT180203](#).
- [9] GAIER T, KANGASLAHTI P, LAMBRIGTSEN B, *et al.* A 180 GHz prototype for a geostationary microwave imager/sounder-GeoSTAR-III[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 2021–2023. doi: [10.1109/IGARSS.2016.7729521](#).
- [10] CARLSTROM A, CHRISTENSEN J, INGVARSON P, *et al.* Geostationary Atmospheric Sounder (GAS) demonstrator development[C]. The 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009: 2036–2040.
- [11] ZHANG Cheng, LIU Hao, WU Ji, *et al.* Imaging analysis and first results of the geostationary interferometric microwave sounder demonstrator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 207–218. doi: [10.1109/TGRS.2014.2320983](#).
- [12] PEICHL M, SUSS H, and DILL S. High resolution passive millimeter-wave imaging technologies for reconnaissance and surveillance[J]. *SPIE*, 2003, 5077: 77–86. doi: [10.1117/12.484872](#).
- [13] KULPA K S. Passive multi-static radiometric detection of moving targets[C]. The 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Warsaw, Poland, 2004: 92–96. doi: [10.1109/MIKON.2004.1356865](#).
- [14] HUANG Jian and GAN Tigu. A novel millimeter wave synthetic aperture radiometer passive imaging system[C]. The 4th ICMMT International Conference on, Proceedings Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, China, 2004: 414–417. doi: [10.1109/ICMMT.2004.1411554](#).
- [15] 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](#).
- [16] 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.
- [17] 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](#).
- 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](#).
- [18] SALMON N A. Outdoor passive millimeter-wave imaging: Phenomenology and scene simulation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(2): 897–908. doi: [10.1109/TAP.2017.2781742](#).
- [19] 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](#).
- 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.
- 张林让: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达系统建模、仿真与评估等.
- 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、射频频干扰检测等.
- 李鹏飞: 男, 1989年生, 工程师, 研究方向为被动微波遥感、误差校正与定标等.
- 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: 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.
- 付庸杰: 男, 1984年生, 工程师, 研究方向为天线设计、射频电路设计和工程电磁学等.
- 邱尔雅: 女, 1990年生, 工程师, 研究方向为天线设计、数字电路设计等.
- 唐世阳: 男, 1987年生, 副教授, 博士, 研究方向为雷达成像技术、雷达信号处理等.

责任编辑: 余蓉