

文章编号: 2095-4980(2017)06-0898-05

## THz 隐身目标无源遥感建模及仿真分析

苏兴华, 贺 平

(中国航天科技集团公司 上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 隐身目标由于其雷达目标反射截面太小, 仅靠主动探测手段, 其有效性受到限制, 主被动联合探测是一个有效尝试。本文就被动探测方向的特征问题进行论证分析, 采用“am”大气模型, 就地基、空基隐身飞机目标的辐射探测任务要求进行 THz 无源遥感建模和仿真, 并结合遥感系统进行综合指标论证, 给出实现其任务目标的基本要求(包括频点、天线口面以及平台要求)。

**关键词:** “am”大气模型; 隐身飞机; 地基、空基无源遥感; 仿真分析

**中图分类号:** TN015

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201706.0898

## Modeling and simulation of stealth target with THz passive sensing

SU Xinghua, HE Ping

(Shanghai Institute of Electronic Commutation Instrument, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Because the reflection cross section of stealth target is too small, the detection effectiveness by active detection method is limited. Active and passive joint detection is an effective way. The characteristics of passive detection is analyzed. Based on “am”(atmospheric model), a modeling and simulation method for stealth target with THz passive sensing is established according to the requirements of detecting hiding aircraft from ground-based and space-based. The analysis of comprehensive indexes is conducted combined with remote sensing system. The basic technical requirements of this task are concluded.

**Keywords:** “am” atmospheric model; hiding aircraft; ground-based and space-based passive sensing; simulation analysis

隐身和反隐身技术一直是现代军事领域中的关键技术。一方面隐身技术改变了攻防战略的平衡, 尤其是隐身飞机与精确制导武器相结合大幅度提高了作战性能; 另一方面, 隐身总有其相对性, 有效地探测隐身目标及其手段则成为国防急需解决的问题。隐身飞机为实现其雷达隐身性能要求, 主要采取特殊结构设计和表面涂覆方法以着力减少雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS), 同时为实现其红外隐身性能而改进气道以降低尾焰温度<sup>[1]</sup>。因此基于多方面考虑, 国内外许多学者<sup>[2-6]</sup>提出了利用微波辐射计来对隐身飞机、隐身导弹等进行探测和识别的方法, 以实现全天候、全天时探测目的。然而, 真正能实现对其有效探测有很多限制条件, 必须通过其机理进行分析。

利用辐射计的隐身目标探测主要是基于其机体表面的自身辐射或其他特征谱线与周围背景辐射亮温的差别来识别, 因而决定任务实现的途径必须考虑 3 个方面: a) 传输途径中大气衰减和大气辐射的影响; b) 目标本体或特征身份物体在空域中的面积对比度; c) 接收机的灵敏度。建立适应性大气路径模型并进行相关仿真计算是其任务目标实现的前提, 本文从地基、空基(如飞艇平台)遥感辐射传输建模入手, 系统分析计算了其任务实现的技术指标, 并指出 THz 实现的参考频点及平台高度要求。

### 1 “am”大气模型简介

“am”<sup>[7]</sup>是由史密森星表(Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO)亚毫米波接收实验室编制的一款计算大气传输辐射的专用工具, 适用于微波、毫米波、亚毫米波以及 THz 波段的谱分析以及路径辐射、吸收、饱和深度等参数计算。“am”首先是作为空间天文观察应用来计算地球大气的影响, 在 Mauna Kea(美夏威夷)等多个

项目中得到很好的应用。“am”基于静态大气分层理论进行 C 语言编程,并结合 HITRAN 数据库<sup>[8]</sup>谱线参数进行逐线、逐层计算仿真,具有高的分辨力和精确度。图 1 反映“am”的基本结构。

作为基础性的模型分析工具,只要知道目标特性,以及路径中的大气参数,利用“am”仿真工具,则可分析出各种状态下的大气以及目标特性。“am”分析工具虽在国内应用时间不长,但在分析计算中有其独特之处,临边计算准确度与微波临边探测器(Microwave Limb Sounder, MLS)非常一致<sup>[9]</sup>,其结构分层<sup>[10]</sup>、THz 传输特性、扩展频谱及算法特别适合高分辨力 THz 谱计算分析。

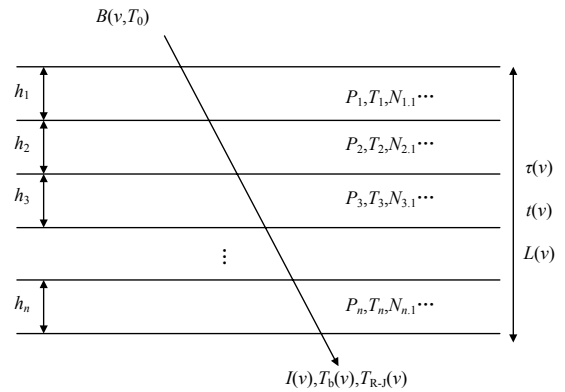


Fig.1 “am” layer model  
图 1 “am”基本结构图

### 2 地、空基辐射遥感结构与任务目标分析

为实现对空间隐身飞机的遥感探测,必须考虑有效预警时间,因而假定任务目标处于 100 km 以外,距离相对指标从另一方面决定遥感空域中的面积对比度。图 2 显示出任务结构。

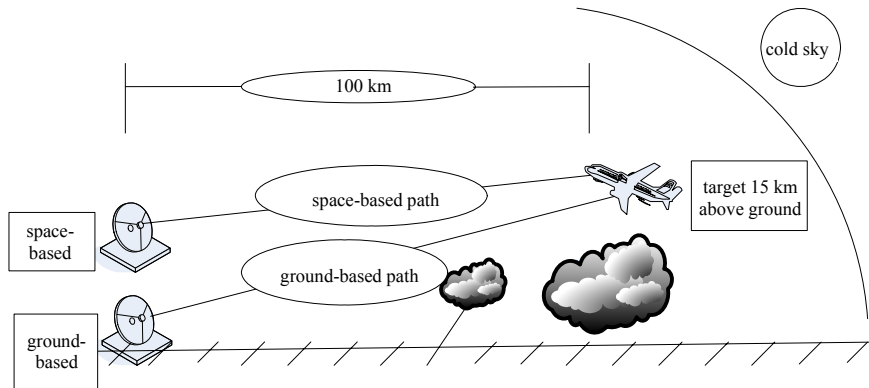


Fig.2 Geometry of ground-based and space-based remote sensing  
图 2 地、空基辐射遥感任务结构

基于图 2 的任务结构,可以认为 100 km 远的辐射计天线波束所覆盖面积比隐身飞机大很多,因而实现任务探测的基本条件可简化成公式<sup>[11]</sup>形式:

$$|T_t - T_b| > \frac{\Omega_{ant}}{\Omega_t} \Delta T \tag{1}$$

式中:  $T_t$  和  $T_b$  分别为目标辐射亮温和背景辐射亮温;  $\Omega_{ant}$  和  $\Omega_t$  为目标处辐射计天线所覆盖面积和隐身飞机目标的视在面积;  $\Delta T$  为辐射计接收机灵敏度。在辐射计接收天线波束范围内的目标所表现与背景亮温差值必须优于接收机灵敏度所反映的水平

### 3 地基辐射遥感仿真分析

根据图 2 地基链路,结合“am”结构进行编程并计算,将计算的结果进行 Matlab 后处理,得到地基条件下的全天候背景亮温以及窗口频点下的目标亮温,分别见图 3 和图 4。

从图 3 仿真结果可以看出,地基路径中,即便是最好的天气条件,THz 频段几乎达到不可用的亮温饱和状态,亮温差值为零。毫米波、亚毫米波仅可以适用于 3 个窗口进行遥感探测: 30 GHz, 90 GHz 和 130 GHz; 同时针对 130 GHz 在地表水汽浓度很高时与饱和温差不足 10 K, 同样可排除这个频点。因而,计算地基辐射计接收机天线及接收机灵敏度时折中选择 30 GHz 和 90 GHz 频段进行遥感探测分析。图 4 基于相同路径仿真得出在有隐身飞机目标(隐身飞机假定是理想的以表面温度所发射的黑体,飞行速度为 1 Ma(马赫),离地面高度 10 km(巡航高度),相对辐射探测直线距离仍然为 100 km 的平时飞行状态)与背景亮温差,在上述 2 个窗口频点时的温差分别达到 120 K 和 40 K(最好情况)。

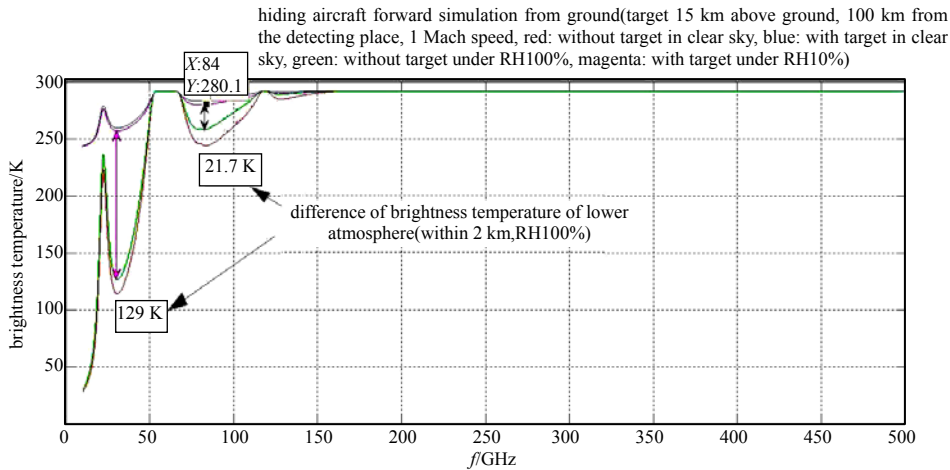


Fig.3 Background brightness temperatures with ground-based detection(red: standard atmosphere; green: lower atmosphere with RH100%)  
图 3 地基全天候背景亮温(红: 标准大气; 绿: 底层大气 RH100%)

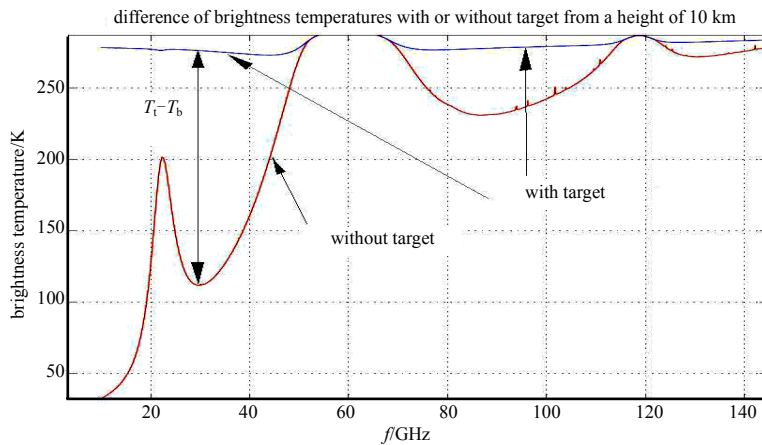


Fig.4 Brightness temperatures of background and invisible plane with ground-based detection(red: without target; blue: with target)  
图 4 地基隐身飞机目标与背景亮温(红: 无目标标准大气; 蓝: 有目标)

基于图 4 的仿真结果, 结合表 1 中的隐身飞机结构参数<sup>[12]</sup>(以 F22 为例, 可假定隐身飞机目标视在面积 50 m<sup>2</sup>左右), 就二窗口 100 km 外实现目标遥感而计算的辐射计接收机需达到的灵敏度指标综合分析见表 2。

表 1 3 款隐身飞机外形结构参数

Table1 Shape structural parameters of three invisible planes

| parameter                | invisible aircrafts        |                          |                           |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                          | the first generation:F117A | the second generation:B2 | the third generation:F22A |
| length/m                 | 20.09                      | 21.03                    | 18.90                     |
| height/m                 | 3.78                       | 5.18                     | 5.08                      |
| wing span/m              | 13.21                      | 52.40                    | 13.56                     |
| wing area/m <sup>2</sup> | 105                        | —                        | 78                        |

表 2 窗口频率下地基遥感特性分析

Table2 Remote sensing characteristics of window frequency with ground-based detection

|  | aperture (antenna)/m | beamwidth estimation/(°) | $\Omega_r/\Omega_{ant}$ | $\Delta T/K$          | conclusion              |
|--|----------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 30 GHz: T <sub>r</sub> -T <sub>b</sub>  =120 K | 1                    | 0.70                     | $4.27 \times 10^{-5}$   | $5.12 \times 10^{-3}$ | failure                 |
|  | 10                   | 0.07                     | 0.004 3                 | 0.51                  | success                 |
| 90 GHz: T <sub>r</sub> -T <sub>b</sub>  =40 K  | 1                    | 0.231                    | $3.92 \times 10^{-4}$   | 0.015 7               | failure                 |
|  | 3                    | 0.077                    | 0.003 55                | 0.142                 | need cryogenic receiver |

经过分析, 在目前工艺技术基础上, 理想情况下(未考虑天线副瓣及其他因素), 针对 30 GHz 窗口辐射计的隐身飞机目标探测需建立大于 10 m 口径的大天线, 对于 90 GHz 窗口辐射计其接收天线口径同样需达到 3 m 以上, 并且保证其接收前端的适当制冷才可实现有效探测。综合仿真分析表明: THz 频段地基探测无法实现对隐身飞机目标有效探测, 毫米波频段 2 个窗口虽可实现, 但需要指出的是, 近距离空中各飞行器以及飞禽都对隐身目标遥感探测影响很大, 虚警概率同样相对较高, 需谨慎选择地基平台手段。

### 4 空基辐射遥感仿真分析

地基由于地表大气中水汽影响很大,无更高的窗口频率可供选择,以减少对辐射计接收机天线口径要求,但对于空基环境,地表水汽急骤下降,背景辐射亮温更低,可供选择的窗口频点增多。图 5 和图 6 分别仿真了针对置空平台(离地 5 km)或机载、平流层飞艇等平台的目标背景亮温差值。

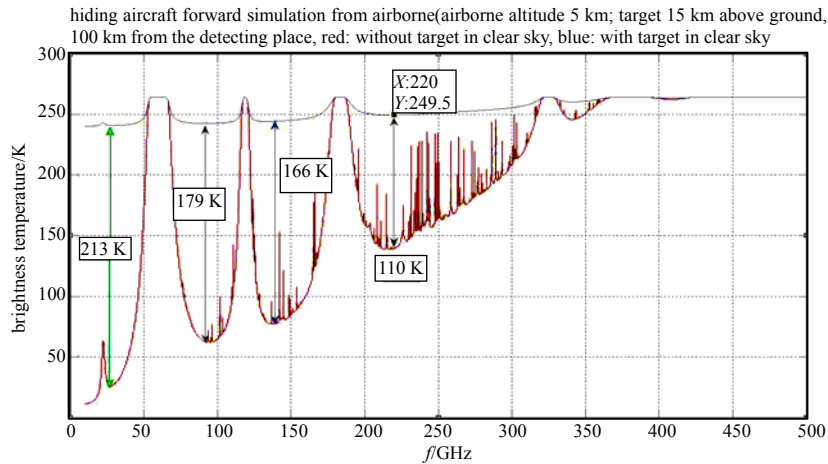


Fig.5 Difference of the brightness temperature with limb detection on 5 km high-altitude platform  
图 5 5 km 高空平台临边情况下窗口目标背景亮温差

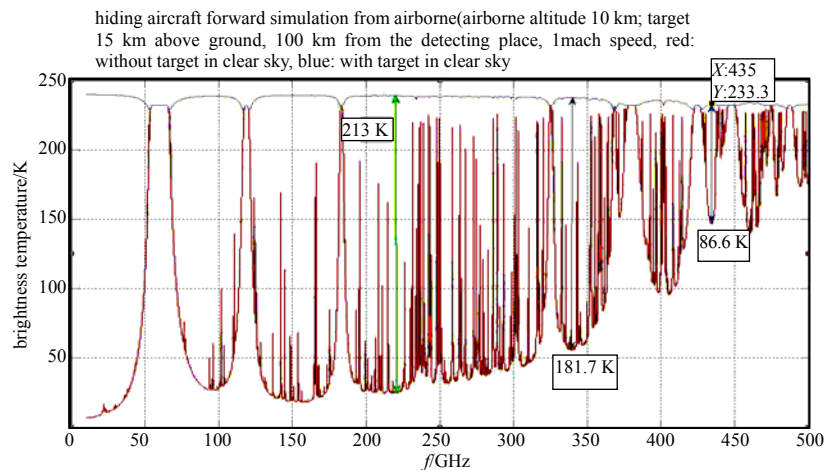


Fig.6 Difference of the brightness temperature with limb detection on 10 km high-altitude platform  
图 6 10 km 空中飞行器平台临边情况下窗口目标背景亮温差

通过仿真可以看出,在高空中 THz 对任务目标的实现优势立即显现出来,可选择多个窗口频率进行遥感探测,从而大大减小接收机天线口径。表 3 给出了 2 种平台所要求的,在其选择窗口下,以探测 100 km 外目标遥感而计算的辐射计接收机需达到的灵敏度指标综合分析结果。

表 3 天基窗口频率下遥感特性分析

Table3 Remote sensing characteristics of window frequency with space-based detection

| aperture (antenna)/m    | frequency window                    | beamwidth estimation/(°) | $\Omega_r/\Omega_{ant}$ | $\Delta T/K$ | conclusion |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------|------------|
| airborne altitude 5 km  | 140 GHz: $ T_r - T_{bl}  = 166$ K   | 0.074 9                  | 0.003 73                | 0.618        | success    |
|                         | 220 GHz: $ T_r - T_{bl}  = 110$ K   | 0.048                    | 0.009 2                 | 1.01         | success    |
| airborne altitude 10 km | 220 GHz: $ T_r - T_{bl}  = 213$ K   | 0.048                    | 0.009 2                 | 1.96         | success    |
|                         | 340 GHz: $ T_r - T_{bl}  = 181.7$ K | 0.030 8                  | 0.021 9                 | 3.98         | success    |

综合仿真分析表明:基于天基平台(无人飞艇或有无人飞机),无论是基于 5 km 高空平台还是 10 km 高空平台,针对典型隐身飞机,均可在 THz 窗口频带内实现有效探测。采取 2 m 口径天线结构,如只采取 220 GHz 窗口,相同的隐身飞机目标探测所需的接收机灵敏度均为 1K 以上,系统实现相对简单,同时天基平台避免了近地飞禽及低空飞行器的干扰,虚警概率低,可优先考虑。

## 5 结论及展望

实现毫米波、亚毫米波以及 THz 频段对隐身飞机的地基、空基遥感探测, 工程设计的先决条件是获取相关任务的基本特性: 即目标特性的普朗克亮温 and 相应背景亮温。本文从工程应用出发, 利用“am”模型仿真工具, 将大气模型、频谱学与空基、地基探测任务相结合, 编制多项仿真任务参数, 初步再现和计算了相关技术指标, 可为相应任务设计提供相应的数据支持。然而, 辐射计探测仅能感知路径的温差, 路径中的任何物体变化(如飞禽)均能引起亮温变化, 如真正实现对隐身飞机目标的探测, 必须进行多项探测手段的融合, 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)中的辐射计与雷达一体化技术可能是一个好的方向。表 2、表 3 仅假定目标 100 km 远, 这只是对防空的最低要求, 如需更远距离, 则需更大的天线口径, 难度将更大。“am”模型仿真工具最早于 2006 年 AER(解释)工程进行了报告, 在工程应用中取得了良好的效果, “am”模型还专门设置了边带辐射计接收仿真分析, 并能很好地切入 HITRAN 数据库文件, 因而适用于特征谱能量探测, 再现了辐射亮温特性。本文仅对正向建模设计做了前期工作, 并将设计方法和结果进行展示, 其方法仍需验证和完善。作为系统设计及技术指标分解, 完成模型化的参数仿真仅仅是一个开始, 还需结合任务平台进行综合考虑。

### 参考文献:

- [1] 侯振宁. 飞机的光电特征抑制技术[J]. 航天电子对抗, 2003(2):24–28. (HOU Zhenning. Suppression for photoelectric performance of aircraft[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2003(2):24–28.)
- [2] 邢业新, 娄国伟, 李兴国. 毫米波辐射计在探测空中涂层隐身目标中的应用研究[J]. 红外技术, 2010, 32(12):727–730. (XING Yexin, LOU Guowei, LI Xingguo. Application study on detecting coating stealth aerial target with millimeter wave radiometer[J]. Infrared Technology, 2010, 32(12):727–730.)
- [3] 余辉. 空中目标微波辐射特性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012. (YU Hui. Research on the microwave radiation characteristics of aerial targets[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2012.)
- [4] 时翔. 毫米波段目标辐射及散射特性测量方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004. (SHI Xiang. Study on measurement of radiation and scattering characteristics of target with millimeter wave[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2004.)
- [5] 缪晨. 隐身目标毫米波辐射特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004. (MIAO Chen. Study on millimeter wave radiation characteristics of stealth objects[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2004.)
- [6] 刘艳艳. 太赫兹时域光谱技术与隐身材料[D]. 北京:首都师范大学, 2009. (LIU Yanyan. Terahertz time domain spectroscopy technology and stealth materials[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009.)
- [7] SCOTT Paine. The am atmospheric model[R]. Cambridge, Massachusetts, USA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2014.
- [8] ROTHMAN L S, JACQUEMART D, BARBE A, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2004, 96(2):139–204.
- [9] 苏兴华, 任梦飞. “am”大气模型及其临边遥感特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(6):917–920. (SU Xinghua, REN Mengfei. Atmosphere limb remote sensing features with “am” atmosphere model[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(6):917–920.)
- [10] 房艳燕, 王玉文, 董志伟, 等. 太赫兹波大气分层传输特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(1):1–6. (FANG Yanyan, WANG Yuwen, DONG Zhiwei, et al. Atmospheric attenuation characteristics of THz layered propagation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(1):1–6.)
- [11] 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. (DONG Xiaolong, WU Ji, JIANG Jingshan. The performance of the detection of stealthy targets by microwave radiometer[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(3):54–57.)
- [12] 姚立杰. 空空导弹对抗隐身目标的技战术途径分析[J]. 飞航导弹, 2012(4):59–62. (YAO Lijie. Analysis of technical and tactical approaches of air-to-air missile against stealth targets[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(4):59–62.)

### 作者简介:



苏兴华(1966–), 男, 安徽省贵池市人, 硕士, 研究员, 曾在混合集成电路领域进行了多项研究, 获得省部级多项科技进步奖, 现主要研究方向为微波、毫米波、THz 遥感系统工程, 在多种刊物中发表了几十篇科技论文. email: suxinghua698229@sohu.com.

贺平(1959–), 男, 上海市人, 研究员, FY-3 微波成像仪总师, 主要研究方向为微波、毫米波、THz 遥感系统工程.