

毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机的分析*

彭树生 李兴国

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

V218

摘要 利用毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机的基本机理和美国标准大气模型(1976)及 Liebe 毫米波传输模型(1985), 模拟计算了大气和地面等背景引入的天线噪声温度和辐射计天线温度的信杂比。

关键词 毫米波辐射计, 涂层隐身飞机, 天线温度信杂比。

引言

隐身技术是现代战争和未来战争的重要技术之一, 在军用飞行器上已得到广泛的应用。现代隐身技术主要着力于研究减小雷达的后向散射面积—雷达截面积(RCS), 采用的有效途径主要有三种^[1,2]: (1)外形技术, 采用后向散射小的外形结构; (2)表面涂层技术, 将吸收材料涂在飞行器的表面上; (3)加复数负载技术。针对隐身技术, 现有的反隐身技术主要分成两大类^[3]: (1)抑制隐身技术, 如采用雷达网和低载频等技术, 提高隐身目标的雷达截面积; (2)提高雷达的探测能力, 如加大雷达发射功率增大隐身目标的回波信号。本文分析了利用毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机这一新技术。

1 基本机理

毫米波(微波)吸收材料(非透明体)与它周围环境的相互作用是: (1)本身辐射电磁波; (2)吸收部分外界电磁波; (3)反射其余的电磁波。它的吸收系数 α 和反射系数 ρ 的关系式为^[4]: $\alpha + \rho = 1$, 当雷达照射到涂层吸收材料时, 雷达信号一部分被吸收转换为热能, 一部分被反射。涂层隐身的目的就是增大吸收系数 α , 减小反射系数 ρ 。根据黑体辐射理论, 涂层吸收材料在吸收的同时, 它本身也在向外辐射噪声电磁波信号, 它的辐射系数 ϵ 等于吸收系数 α (即: $\epsilon = \alpha$)。在天空冷背景下, 对辐射计来说涂层飞机成为明显的热目标, 涂层吸收材料的回波损耗越大, 反射信号就越小, 而它本身的辐射信号就越大。

涂层飞机的辐射信号透过大气被辐射计天线接收, 辐射计的天线温度 T_A 为:

$$T_A = \frac{\iint_{4\pi - \Omega_A} T_{BB}(\theta, \varphi) P(\theta, \varphi) d\Omega + \iint_{\Omega_A} T_{AB}(\theta, \varphi) P(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega} = T_{BA} + T_{AA} \quad (1)$$

式(1)中 $P(\theta, \varphi)$ 为天线方向图, $T_{BB}(\theta, \varphi)$ 为背景噪声温度, $T_{AB}(\theta, \varphi)$ 为目标噪声温度, Ω_A 为

* 中国博士后科学基金(编号中博基[1996] 2号)资助项目
稿件收到日期 1998-02-13, 修改稿收到日期 1998-08-14

目标的立体角, T_{AB} 和 T_{BB} 分别是背景和目标引入的天线温度, 表达式为:

$$T_{BA} = \iint_{4\pi-\Omega_A} T_{BB}(\theta, \varphi) P(\theta, \varphi) d\Omega / \iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (2)$$

$$T_{AA} = \iint_{\Omega_A} T_{AB}(\theta, \varphi) P(\theta, \varphi) d\Omega / \iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega. \quad (3)$$

由式(2)和(3), 得到辐射计天线温度的信杂比: $SCR = T_{AA}/T_{BA}$.

2 背景天线温度

背景的辐射噪声主要来自大气的辐射和地面的辐射, 图 1 给出了背景辐射噪声温度对天线温度贡献的示意图. 辐射计天线放置在高度为 H 的地方, 以天线的位置为球坐标原点, 天顶方向为 Z 轴方向, 则背景的辐射噪声温度为:

$$T_{BB}(\theta, \varphi) = \begin{cases} T_{\omega m}(\theta, \varphi), & 0 < \theta < \frac{\pi}{2}; \\ [\epsilon_s T_s + (1 - \epsilon_s) T_{\omega m}(\pi - \theta, \varphi)] e^{-\tau_D} + T_D(\theta, \varphi), & \frac{\pi}{2} < \theta < \pi; \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 $T_{\omega m}(\theta, \varphi)$ 是大气向下辐射的噪声温度, ϵ_s 和 T_s 分别是地面的辐射率和物理温度, τ_D 为从反射点 D 到天线点 O 之间的大气光学厚度, $T_D(\theta, \varphi)$ 是从 D 到 O 的大气辐射温度.

2.1 大气辐射噪声

大气向下的辐射包含: 大气中各种成分的辐射和宇宙背景的辐射, 其表达式为:

$$T_{\omega m}(\theta, \varphi) = \int_0^{\infty} T(l) \alpha(l) \exp(-\int_0^l \alpha(l') dl') dl + T_{\omega m} \exp(-\int_0^{\infty} \alpha(l) dl), \quad (5)$$

其中 $l = z \sec \theta$,

$$T_{\omega m} = \int_0^{\infty} T(l) \alpha(l) \exp(-\int_0^l \alpha(l') dl') dl / \int_0^{\infty} \alpha(l) \exp(-\int_0^l \alpha(l') dl') dl, \quad (6)$$

$$\tau_A = \int_0^{\infty} \alpha(l) dl = \int_0^{\infty} \alpha(z) \sec \theta dz = \tau_0 \sec \theta; \quad (7)$$

式中 $T(l)$ 是在距离 l 处的大气物理温度, $\alpha(l)$ 是大气的吸收系数, $T_{\omega m}$ 是宇宙背景辐射噪声温度 ($= 2.7\text{K}$), $T_{\omega m}$ 是大气的平均温度, z 是垂直高度, τ_A 是大气在 θ 方向的总光学厚度, τ_0 是大气在天顶方向的总光学厚度.

在厘米波和毫米波波段, 大气中主要吸收成分是与气象参数有密切关系的氧分子、水蒸汽分子和液态水(如: 雾和雨)等. 本文采用 1976 年版的美国标准大气模型^[5]气象参数, 氧分子、水蒸汽和液态水吸收系数的计算采用 Liebe 模型^[6]. 大气向下辐射温度的计算结果如图 2 所示.

2.2 背景噪声

在毫米波波段, 可以把地面看成是随机极化的噪声源. 本文中地面辐射系数 ϵ 取 0.9, 物理温度取 288.15K (美国标准大气模型的海平面温度), 这样地面辐射温度约为 259K. 图

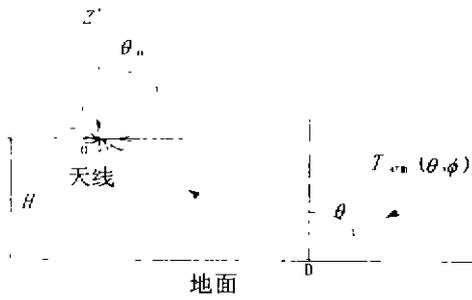


图1 背景噪声对天线温度的贡献
Fig. 1 Noise contribution to antenna temperature from background

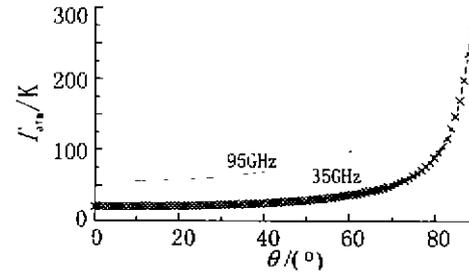


图2 大气向下辐射温度
Fig. 2 Atmospheric downward radiating temperature

3 给出了当辐射计天线放置在距地面 10m 高处时的背景噪声温度.

2.3 背景天线温度

模拟计算中天线方向图采用一阶余弦幂函数分布激励的辐射场,且方向图与方位角 phi 无关[7]. 天线方向图的表达式为:

$$P(\theta, \varphi) = (1 + \cos\theta)^2 \{ \cos u / [1 - (2u/\pi)^2] \}^2 / 4, \tag{8}$$

其中, $u = a\pi \sin\theta/\lambda$, a/λ 是以波长为单位的相对天线口径, 计算中分别取 50, 100, 200. 图 4 给出了天线的电轴对着不同方向利用式(3)得到的背景天线温度.

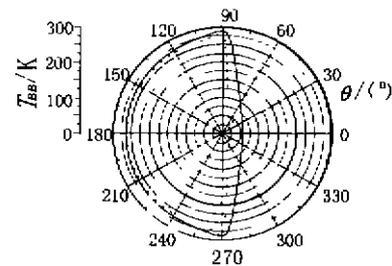


图3 背景噪声温度
(实线—95GHz, 虚线—35GHz)
Fig. 3 Noise temperature of background (solid line: 95GHz, dashed line: 35GHz)

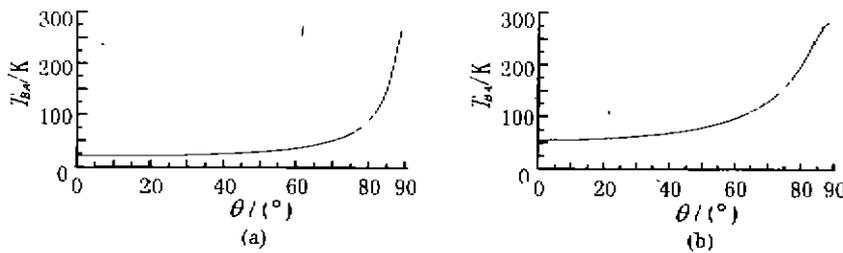


图4 背景天线温度
(a) $f=35\text{GHz}$ (b) $F=95\text{GHz}$
Fig. 4 Antenna temperature introduced by background

3 目标天线温度及信杂比计算

由目标引入的天线温度包括两部分: 目标辐射的噪声温度及目标反射地面和环境辐射的噪声温度. 涂层吸收材料是高损耗的, 而且地面和环境辐射和噪声温度也不高($<300\text{K}$), 在此忽略目标反射的噪声部分, 这样, 涂层飞机的辐射噪声温度为:

$$T_{AB}(\theta, \varphi) = (1 - 1/L)T_P(\theta, \varphi)\exp(-\tau_{ob}), \quad (9)$$

式(9)中 L 为涂层回波损耗, $T_P(\theta, \varphi)$ 为目标物理温度, τ_{ob} 为从目标到天线的光学厚度.

假设目标在天线上波束的最大处(即天线对准目标), 则目标引入的天线温度为:

$$T_{AA} = \Omega_A T_{AB}(\theta, \varphi) / \iint_{4\pi} P(\theta, \varphi) d\Omega. \quad (10)$$

取隐身飞机的辐射面积为 100m^2 [2], 由式(10)可计算出三种天线在三种距离 R (1km、5km、10km) 时得到的天线温度. 图 5 给出目标在不同天顶角度位置时的天线温度信杂比(回波损耗取 20dB, 且目标的物理温度为所处位置大气的温度), 其中图 5(a)、(b)、(c) 对应 35GHz 频率, 对应的距离分别是 1km、5km、10km; 图 5(d)、(e)、(f) 对应 95GHz 频率, 对应的距离分别是 1km、5km、10km. 图 5(a) 和 (d) 中实线和虚线重叠.

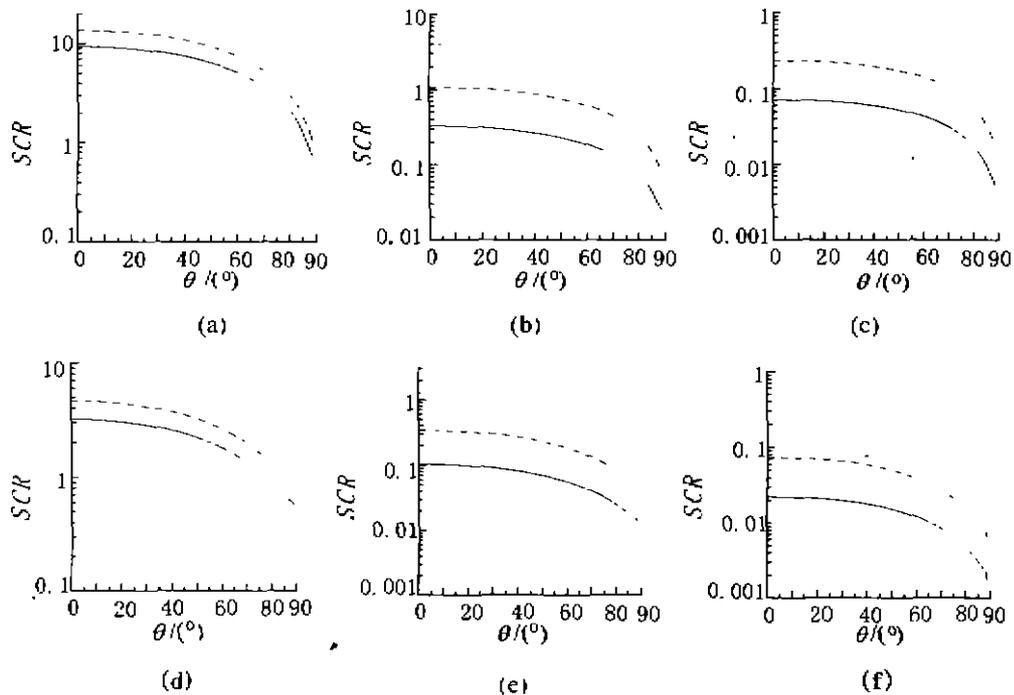


图 5 天线温度信杂比

(实线: $a/\lambda=50$, 虚线: $a/\lambda=100$, 点线: $a/\lambda=200$)

Fig. 5 Antenna temperature signal-to-clutter ratio;

(solid line: $a/\lambda=50$, dashed line: $a/\lambda=100$, dotted line: $a/\lambda=200$)

5 结语

采用毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机是一种新的方法. 从图 5 可得到以下几点结论: (1) 采用大口径天线可得到大的信杂比 SCR; (2) 在相对口径 (a/λ) 相同时, 采用 35GHz 频率 SCR 比采用 95GHz 时高, 这是由于大气对 35GHz 的衰减减小; (3) 在前面假定的参数情况下, 隐身飞机在 1km 距离(各个方向)时, 三种天线使用两种频率都可得到较好的信杂比, 在

5km 距离,只有大口径天线信杂比较好,在 10km 距离,三种天线得到的信杂比都较小;(4)信杂比随天顶角的增大而减小,从上面分析可见,天线口径越大探测距离越远,采用合适口径的天线可探测到几公里之内的空中隐身飞机,如果采用大口径的天线和超低副瓣的激励源,或采用合成孔径天线,使天线的主波束更窄和旁瓣更低,会得到更好的天线温度信杂比。

REFERENCES

- 1 Knott E F, *et al. Radar Cross Section*, Norwood Artech House, 1985 (陈颖铮等译, **雷达散射截面**, 北京: 电子工业出版社, 1988)
- 2 Jones J. *Stealth Technology-The Art of Black of Magic*, TAB Book Corp. LTD. ,1989. (洪 旗, 魏海滨编译, **隐身技术—黑色魔力的艺术**, 北京: 航空工业出版社, 1991)
- 3 Li Neng-Jing. *Acta Electromi Sinica* (酆能敬, **电子学报**), 1987, (2), 98~104
- 4 Ulaby F T, *et al. Microwave Remote Sensing*, Vol. 1, Reading, Massachusetts: Addison-Wosley Publishing Company, 1981
- 5 NOAA, NASA, USAF. *U. S. Standard Atmosphere*, 1976, Washington, D. C. October 1976 (任现森, 钱志民译, **美国标准大气** (1976), 北京: 科学出版社, 1982)
- 6 Liebe H J. *Radio Sci.* ,1985, 20(5), 1069~1089
- 7 Jiang Xian-Zuo. *Antenna Principles*, Beijing: Publishing House of Beijing Univ. of Aero. & Astro. (江贤祚, **天线原理**, 北京: 北京航空航天大学出版社), 1993, 213

ANALYSIS OF ANTI-COATING-STEALTH-AIRPLANE WITH A MILLIMETER WAVE RADIOMETER*

PENG Shu-Sheng LI Xing-Guo

(Inst. of MMW & Lightwave Near-Sensing Tech., Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In view of coating-stealth, this paper presented a new method to use a millimeter wave radiometer for anti-coating-stealth-airplane. The background noise temperature of atmosphere and terrestrial surface was calculated with American standard atmospheric model (1976) and Liebe model (1985) for millimeter wave propagation. Antenna temperature of coating-stealth airplane in air was analyzed and its signal-to-clutter ratio (SCR) was achieved.

Key words millimeter wave radiometer, coating-stealth airplane, antenna temperature signal-to-clutter ratio.

* The project supported by the Postdoctoral Science Foundation of China
Received 1998-02-13, revised 1998-08-14