

文章编号: 2095-4980(2013)02-0199-04

用于飞船返回舱再入段测量的太赫兹雷达

韦 震, 龙 方, 韩中生, 冷加旭

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 为解决飞船返回舱再入段过程中由于等离子体引起的雷达目标丢失难题, 利用太赫兹电磁波可以穿透等离子体的特点, 设计了用于飞船返回舱再入段测量的太赫兹雷达。根据太赫兹发射机功率较低的现状, 以及太赫兹电磁波大气传输损耗大的特性, 采用机载太赫兹雷达进行飞船返回舱测量。分析结果表明, 机载太赫兹雷达具有较好的工程可实现性。

关键词: 太赫兹电磁波; 再入段测量; 雷达; 机载

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

Terahertz radar for the measurement of the spacecraft reentry capsule

WEI Zhen, LONG Fang, HAN Zhong-sheng, LENG Jia-xu

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: A Terahertz radar for the measurement of the spacecraft reentry capsule is designed to solve the missing problem of the radar target caused by the plasma during the reentering process of the spacecraft reentry capsule, by using the characteristics that THz waves can penetrate the plasma. Due to the low power of THz transmitter, and the high loss of THz waves in the atmosphere, the airborne THz radar is adopted to measure the spacecraft reentry capsule. The analysis results show that the airborne THz radar is easy to be realized in engineering applications.

Key words: Terahertz electromagnetic waves; measurement of the reentry capsule; radar; airborne

飞船返回舱在再入过程中以高超音速进入大气层时, 随着大气密度的增加, 强烈的激波压缩和粘性摩擦作用使返回舱表面温度迅速升高, 极高的温度使大气分子产生离解、电离, 导致返回舱附近空气呈离子状态存在; 同时, 返回舱表面的耐热材料在高温、高热流作用下烧蚀, 将烧蚀产物释放到流场中去, 在返回舱周围形成十分复杂的再入等离子体层, 即等离子体鞘套。再入等离子体层中的高密度电子吸收、反射和散射电磁波, 造成电磁波信号急剧衰减, 极易引起返回舱与地面测控站之间的无线电通信中断和雷达目标丢失, 即“黑障”问题。文献[1]指出, 等离子体的吸收衰减是造成再入段雷达目标丢失的最主要原因, 当雷达频率为 5 GHz, 雷达波入射到等离子体内的距离为 20 cm 时, 在一定的碰撞频率条件下, 等离子体的双程吸收衰减可达 50 dB 以上。

“黑障”问题对飞船返回舱的连续测量控制造成不利影响, 解决“黑障”的技术措施主要包括: 减少等离子体电子密度, 提高电磁波频率与发射功率等。根据太赫兹(Terahertz, THz)电磁波可穿透等离子体但大气传输衰减严重的特点, 以及当前太赫兹技术的发展现状, 设计了一种用于飞船返回舱再入段测量的机载太赫兹雷达, 并分析了其工程可行性。

1 太赫兹雷达设计

1.1 工作方式

太赫兹波在大气中传输时受水汽引起的吸收衰减十分严重, 工作频率为 300 GHz 左右的太赫兹波每千米传输损耗高达几个 dB 以上, 在雷达领域主要用于近距离成像和探测^[2]。如采用地基太赫兹雷达, 所需发射功率将很大, 采用应答技术可降低发射功率, 但飞船返回舱必须附带一套太赫兹波段应答机, 其体积和质量有严格的限制, 目前的技术水平均难以支持。

文献[3]对 37 GHz 和 94 GHz 电磁波的大气传输衰减进行了比较分析,结果表明,大气中对电磁波有吸收作用的主要是氧气和水汽分子。在近地面,主要是水汽的吸收衰减作用;在离地面 6 km 以上时,水汽含量随高度增加急剧递减,主要是氧气的吸收衰减作用。该文的研究结果还指出,大气衰减系数随高度增加而快速减小,10 km~50 km 的衰减与 0 km~10 km 的衰减相比,相差好几个数量级,因而 10 km 以上的贡献一般可忽略不计。因此,采用机载平台可以避开大气传输衰减的严重影响,同时太赫兹天线可以做得很小,适合安装到飞机上。

1.2 工作频率

等离子体主要有 3 个电特性参数,即电子密度、等离子体频率和碰撞频率。碰撞频率对电磁波在等离子体中传输的影响较小,只有当碰撞频率增加到与等离子体频率接近或大于等离子体频率时,才会对电磁波的衰减产生较明显的影响。因此电磁波在等离子体中传输时,主要受等离子体频率的影响^[4]。

通常情况下,等离子体频率 ω_p 接近等离子体内部的电子振荡频率 ω_{pe} , 即:

$$\omega_p = \omega_{pe} = 5.641 \times 10^4 \sqrt{n_e} \quad (1)$$

式中 n_e 为电子密度,与飞行器的速度、飞行器的外形(用飞行器前缘的楔角来表征)以及飞行高度(不同高度的空气密度不同)有关^[5]。由于返回舱周围电离层的峰值电子数密度在 $10^{13}/\text{cm}^3 \sim 10^{16}/\text{cm}^3$ 之间^[1],因此对应的等离子体频率 ω_p 在 18 GHz~5.6 THz 之间。

理论研究和工程实践表明,提高 ω ,使 $\omega/\omega_p > 1$ 是减小“黑障”的一个重要措施。为实现雷达对飞船返回舱目标的连续测量,理论上要求雷达的 ω 大于 5.6 THz,即工作频率 f 大于 897.9 GHz。考虑目前太赫兹发射机和相关器件的技术水平,本文选取太赫兹雷达的工作频率为 345 GHz,该频段器件相对成熟,工程上容易实现。该频段虽不能完全避免“黑障”问题,但相对现有雷达频段,“黑障”的影响可大幅度降低。

1.3 天线尺寸

天线尺寸要综合考虑天线增益和波束宽度 2 个方面的要求,高的天线增益有利于降低发射功率,但不利于对目标的捕获和稳定跟踪。在返回舱再入等离子体形成之前,雷达根据其他测量设备提供的引导数据完成目标的捕获,载机的姿态测量精确度将引入额外的误差。对机载太赫兹雷达总的引导精确度 σ 由式(2)给出:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2)$$

式中: σ_1 为其他测量设备提供的引导精确度,取 0.1° ; σ_2 为载机的姿态测量精确度,取 0.1° ,则 σ 为 0.14° 。当天线的波束宽度与引导精确度相当时,能保证对返回舱目标的快速捕获。考虑由于各种原因可能引起目标丢失需要重新捕获,而此时没有其他测量设备提供引导数据的情况,取天线的波束宽度 θ 为 0.3° ,以提高重新捕获的可靠性。

雷达天线采用抛物面天线,其天线孔径尺寸 D 由式(3)给出:

$$\theta = \kappa \frac{\lambda}{D} \quad (3)$$

式中: κ 为常系数,一般取 $75^\circ \sim 80^\circ$,本文取中间值 78° ; λ 为工作波长。计算得到 D 为 0.23 m。天线增益 G 由式(4)给出:

$$G = \eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (4)$$

式中: η 为效率系数,微波频段可达到 0.5 左右,考虑太赫兹频段的损耗会变大,本文取 0.15; A 为天线面积。计算得到 G 为 55 dB。

1.4 系统组成

太赫兹雷达系统组成如图 1 所示,选择扩展相互作用振荡器(Extended Interaction Oscillator, EIO)作为 THz 功率源,耿氏锁相振荡器作为 THz 频率源^[6],频率综合器为 THz 发射组合、脉冲调制器、耿氏锁相振荡器和中频接收机提供相参本振信号,以保证全系统的相参性;超导混频器将太赫兹频段的电磁信号变换到微波频段,同时保证接收系统有足够的灵敏度。

系统接收处理过程为:从返回舱反射回来的太赫兹脉冲信号,经天线接收,由波束形成网络生成 1 路和信号与 2 路差信号(方位和俯仰),这 3 路信号与 THz 频率源信号经超导混频器混频后,变换为几 GHz 的微波信号,再由中频接收机变换为合适的中频信号,经高速 A/D 采样后,由信号处理机完成回波检测和角误差信号提取,

最后由数字处理机完成目标捕获、跟踪和参数测量。

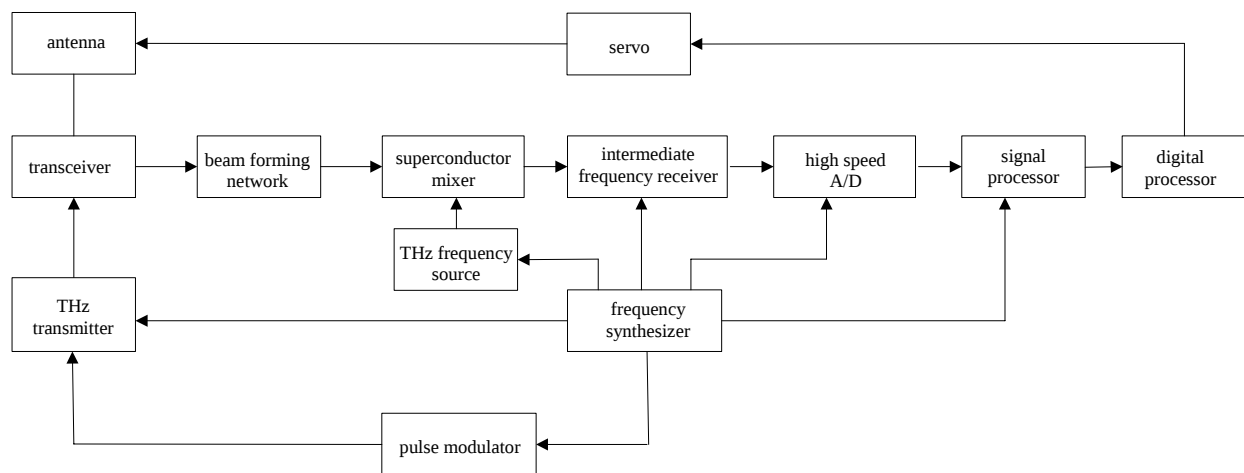


Fig.1 Block diagram of the Terahertz radar system

图1 太赫兹雷达系统组成框图

系统主要技术指标为:工作频率 345 GHz, 天线波束宽度 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$, 发射功率 150 W, 脉冲宽度 50 ns, 脉冲重复频率 1 000 Hz。

2 技术指标分析

雷达最大作用距离方程^[7]为:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_{\text{av}} G^2 \delta \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s B_n F_n (S/N)_{\min} L_s L_d^2 L_p^2} \right]^{1/4} = \left[\frac{P_t \tau f_p G^2 \delta \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s B_n F_n (S/N)_{\min} L_s L_d^2 L_p^2} \right]^{1/4} \quad (5)$$

式中: P_{av} 为发射机的平均功率; δ 为雷达散射截面, 按保守估算, 取 50 m^2 ; k 为玻尔兹曼常数; T_s 为开尔文温度; B_n 为雷达接收机带宽, 约为脉冲宽度 τ 的倒数; F_n 为接收机噪声系数, 采用超导混频器时, 工作温度 $T_s = 190 \text{ K}$; 噪声系数 F_n 为 6 dB; $(S/N)_{\min}$ 为最小检测信噪比, 通常取 12 dB; L_s 为系统损耗, 取 6 dB; L_d 为大气传输衰减, 由于大气衰减随高度快速减少, 按保守估算, 取 $L_d = 9 \text{ dB}$; L_p 为等离子体引起的衰减, 由于工作频率未达到最佳值, 取 3 dB^[8]; P_t 为发射机峰值功率; τ 为脉冲宽度; f_p 为脉冲重复频率。计算得到雷达最大作用距离为 257 km, 而返回舱进入黑障区为离地面 90 km~50 km^[9], 通过合理设置载机航线, 可以对返回舱目标在黑障区进行跟踪测量。如果要求更远的跟踪测量距离, 可考虑采用机载相控阵天线, 通过有源相控阵进行功率合成, 解决太赫兹频段发射机功率不高的难题, 实现较远的作用距离。

3 结论

为解决飞船返回舱再入段过程中由于等离子体引起的雷达目标丢失难题, 实现对返回舱目标黑障区内的连续测量, 本文利用太赫兹电磁波可穿透等离子体的特点, 设计了太赫兹雷达系统, 为避免大气传输对太赫兹波的严重影响, 采用机载方式实现返回舱测量。计算结果表明, 机载太赫兹雷达具有较好的工程可实现性。随着太赫兹器件技术的发展^[10-11]和工作频率的不断提高, 飞船返回舱的“黑障”问题可望得到彻底解决。

参考文献:

- [1] 朱方, 吕琼之. 返回舱再入段雷达散射特性研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(5): 14-16. (ZHU Fang, LV Qiongzi. A Study on Radar Scattering Characteristics of the Reentry Capsule[J]. Modern Radar, 2008, 30(5): 14-16.)
- [2] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4): 373-377. (LIN Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(4): 373-377.)

- [3] 黄芳,陈洪滨,王振会. 37 GHz 和 94 GHz 的大气微波衰减比较分析[J]. 遥感技术与应用, 2003,18(5):269-275. (HUANG Fang,CHEN Hongbin,WANG Zhenhui. Analysis of the Atmospheric Attenuation at 37 GHz and 94 GHz[J]. Remote Sensing Technology And Application, 2003,18(5):269-275.)
- [4] 钟育民,谌明,卢满宏,等. 无线电波在再入等离子体中传输的衰减模型及仿真验证[J]. 遥测遥控, 2010,31(2):1-6. (ZHONG Yumin,CHEN Ming,LU Manhong,et al. Attenuation Model and Simulation Validation of Electromagnetic Wave Transmission in Reentry Plasma[J]. Journal of Telemetry,Tracking and Command, 2010,31(2):1-6.)
- [5] 刘嘉兴. 临近空间飞行器测控系统的特点和主要技术问题[J]. 飞行器测控学报, 2008,27(2):1-7. (LIU Jiarxing. Characteristics of TT& C System for Near Space Spacecraft and Major Technical Challenges[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008,27(2):1-7.)
- [6] 陆继珍,皮亦鸣. 太赫兹频段的近程 ISAR 成像系统[J]. 半导体技术, 2009,34(6):611-614. (LU Jizhen,PI Yiming. Terahertz Near Range ISAR Imaging System[J]. Semiconductor Technology, 2009,34(6):611-614.)
- [7] Merrill I Skolnik. 雷达系统导论[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社, 2010. (Merrill I Skolnik. Introduction to Radar System[M]. 3rd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [8] 马平,曾学军,石安华,等. 电磁波在等离子体高温气体中传输特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2010,24(5):51-56,69. (MA Ping,ZENG Xuejun,SHI Anhua,et al. Experimental investigation on electromagnetic wave transmission characteristic in the plasma high temperature gas[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010,24(5):51-56,69.)
- [9] 汪清,方方,何开锋. 飞船返回舱再入飞行迎角和侧滑角估计[J]. 空气动力学学报, 2005,23(4):437-441. (WANG Qing, FANG Fang,HE Kaifeng. Angle-of-attack and sideslip-angle estimation of reentry capsules of spacecraft in reentry flight[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005,23(4):437-441.)
- [10] 崔旭东,吴卫东,唐永建. 基于合成超构材料的太赫兹调制器设计[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):274-276. (CUI Xudong,WU Weidong,TANG Yongjian. A design of metamaterial-based THz modulator[J]. Information And Electronic Engineering, 2010,9(3):274-276.)
- [11] 洪伟,陈继新,严蘋蘋,等. CMOS 毫米波亚毫米波集成电路研究进展[J]. 微波学报, 2010,26(4):1-6. (HONG Wei,CHEN Jixin,YAN Pinpin,et al. Research Advances in CMOS Millimeter and Submillimeter Wave Integrated circuits[J]. Journal of Microwaves, 2010,26(4):1-6.)

作者简介:



韦 震(1968-),男,广西省容县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为微波技术.
email:wcaoyu@163.com.

龙 方(1972-),女,河北省遵化市人,硕士,研究员,主要研究方向为雷达与对抗信号处理.

韩中生(1978-),男,吉林省榆树市人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达与雷达对抗.

冷家旭(1984-),男,吉林省吉林市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为雷达信号处理.