

文章编号: 1672-8785(2017)02-0039-07

黑障对通信安全的影响及 几种可能的解决方案

于哲峰 孙良奎 马 平 杨益兼 张志成 黄 洁

(中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000)

摘 要: 当飞行器以超高速在大气层中飞行时, 由于气动加热或烧蚀, 在飞行器周围会形成等离子体鞘套。这将影响飞行器的通信特性, 严重时会使通信中断, 从而威胁飞行器的安全。我国新一代航天航空飞行器在大气层中飞行的时间长、速度快, 而且弹道复杂, 需要实时通信和控制, 因此需要彻底解决通信中断问题。针对新一代航天飞行器面临的通信中断问题, 研究了利用天线位置和地面遥测设备的布站优化、毫米波和太赫兹波通信、外加强磁场和激光通信等方法解决黑障问题的可能性及存在的问题。

关键词: 黑障; 通信安全; 气动; 太赫兹; 外加强磁场; 激光通信

中图分类号: TN949 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.02.007

Influence of Blackout on Communication Security and Several Possible Solutions

YU Zhe-feng, SUN Liang-kui, MA Ping, YANG Yi-jian, ZHANG Zhi-cheng, HUANG Jie

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: When a space vehicle is flying at ultra-high speed in the atmosphere, a plasma sheath may form around it due to aerodynamic heating or ablation. This will affect the communication characteristics of the space vehicle. Further, it will result in serious communication disruption and hence threaten the safety of the space vehicle. The new generation of space vehicles of our country will fly in the atmosphere for longer time at higher speed. Moreover, because of their complex trajectory, real-time communication and control are needed. Therefore, the problem of communication disruption should be solved thoroughly. The possibility of using the methods such as distribution optimization of antenna location and ground telemetry equipment, millimeter-wave and terahertz wave communication, external magnetic field and laser communication to solve blackout and the problems to be faced are studied.

Key words: blackout; communication security; aerodynamics; terahertz wave; applied strong magnet; laser communication

0 引言

高超声速飞行器再入大气层和在临近空间飞行时, 其表面会形成等离子鞘套。电磁波在通过

等离子体鞘套传播的过程中会被等离子体鞘套反射和吸收, 使得波束强度发生衰减, 并出现偏折、延时和相移等现象。电磁波传输甚至可能完全中断, 即“通信中断”, 严重影响高超声速飞行器的飞行

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(109020120, 11272336), 国家重点基础研究发展计划(2014CB3402)

作者简介: 于哲峰(1977-), 男, 吉林大安人, 博士, 研究员, 主要从事气动电磁学研究。

E-mail: yuzf1997@sina.cn

控制和安全。“黑障”是航空与航天技术发展中继“声障”和“热障”之后的又一著名难题。上世纪五十年代末期，人们在研究解决再入防热问题时发现和提出了这一问题，该问题立即受到了广泛重视^[1,2]。

从上世纪六十年代起，美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与美空军协作开展了一系列有关高超声速飞行器等离子体鞘套的研究计划^[3-5]：

(1) Fire 计划(“火”计划)：该飞行计划由 NASA 发起，主要目的是确定钝头体以 11 km/s 的速度在大气层中飞行时的辐射和气动加热特性，同时获得通信中断数据。通过对飞行和理论预测结果进行分析比较，完善了预测空气等离子体鞘套的化学反应模型。

(2) Asset 计划：该飞行计划由空军与俄亥俄州立大学、麦克唐纳飞机公司合作实施，其主要目的之一是为了研究高超声速飞行器等离子体鞘套对通信系统的影响。在多次飞行试验中，测量了 U 形狭缝甚高频天线和 X 波段开口波导天线的阻抗，成功获取了甚高频、C 波段与 X 波段通信信号的衰减测量结果。

(3) RAM(无线电衰减测量)计划：该计划是 NASA 在兰利中心开展的一个通信中断研究计划，其目的是通过理论预测和飞行试验来研究等离子体鞘套对通信中断的影响和减缓方法。在多次飞行试验中，研究了气动外形与磁场窗口对减轻通信中断的有效性，验证了根据天线阻抗计算等离子体特性的可靠性。

(4) MA-6 与 GT-3 计划(水星计划与双子座计划)：在该项载人空间计划中，跟踪和记录了载人飞船的大量通信数据，分析了引起通信信号衰减的机制。研究表明，由于防热罩含有易电离物质，在低空严酷的气动热环境下，大量烧蚀产物将造成极复杂的流体动力学与化学动力学耦合问题。因此，对信号衰减的正确预测，不仅要考虑纯空气等离子体的影响，还必须考虑防热罩烧蚀产物的影响。

(5) Trailblazer II 计划(开路先锋 II 计划)：该飞行计划由美国空军与俄亥俄州立大学协作开展。在各种雷达工作频率下(C 波段与 S 波段)测量了各种波导式天线的阻抗，探索了喷射液体对减轻通信中断问题的有效性。分析了等离子体鞘套对 S 波段狭缝天线的方向图、信号衰减与阻抗失配的影响。

(6) 现象学计划：其核心是研究上升段、中段和再入段导弹目标的光电特性，进一步分析了等离子体鞘套对电磁波传播特性的影响。

上世纪八十年代后，美国空军宇航和导弹局在制定再入系统计划时，仍旧将通信中断的进一步研究作为一项重要课题。上世纪九十年代，美国发展了经验能精确预测高速飞行器电磁波在等离子体中传输效应的计算程序，并将其应用于不同的飞行器。马里兰大学在美国空军的资助下开展了高超声速飞行器等离子体流场对通信的影响研究，探讨了新一代高超声速飞行器气动外形减缓通信中断问题的可能性。加利福尼亚大学伯克利电子研究实验室于 1993 年~1997 年开展了等离子体鞘和边界层内电磁波传输特性的理论和实验研究工作。1994 年~1996 年，在美国空军的资助下，Kenneth M. Chadwick 等人利用卡尔斯本 96 in 高超声速激波风洞提供的电离流场，开展了高超声速飞行器等离子体鞘对射频电磁波传输特性影响的地面模拟实验研究，获得了电磁波的相位移和功率损耗。同时，兰利研究中心的 Melvin C. Gilreath 等人利用电弧风洞提供的高焓超声速射流，开展了飞行器天线窗烧蚀材料透波特性的实验研究，对两种不同热载荷条件下火星探测器天线窗材料的介电参数和天线窗对电磁波传输特性的影响进行了实时测量。

2004 年发表的一篇研究论文报导了美国的一项计划，该计划的目的是为安装在再入体上的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收器建造一个半实物仿真试验平台。这个试验平台的核心之一是模拟再入等离子体对弹载 GPS 接收器信号的衰减和延时效应系统。近几年，美国空军加大了高温等离子体对电磁波通信影响研究领域的资助力度，如美国空军 2007 财

年的试验与评估研究计划列出了开展高超声速飞行器等离子体对通信传输的影响研究的项目。

欧洲也在积极开展相关研究,例如,欧洲制定的 2008 年~2010 年基础技术研究计划(The Basic Technology Research Program, TRP)中,列出了开展再入飞行器通信技术研究的内容,其目的是为了巩固和扩展电磁波与等离子体相互作用的机理模型,为弹道再入飞行器和无动力升力体再入飞行器通信系统的发展和天线辐射模式的预测提供依据。

近几年,因我国政府对临近空间高速飞行器的高度重视,国内又掀起了等离子鞘套下信息传输研究的热潮。国家自然科学基金、国家重大基础研究项目(973)和相关型号任务加大了对该领域的支持力度。中国航天科技集团、西安电子科技大学、中国空气动力研究与发展中心和电子科技大学等单位在高超声速等离子体流场特性、电磁波与等离子体相互作用机理和黑障减缓方法等方面取得了长足的进步,但与国外在理论分析方法、飞行试验、地面实验等方面相比,还存在较大差距。

1 黑障对通信安全的影响

电磁波在通过等离子鞘套传播的过程中,因被等离子鞘套反射、吸收,波束强度会衰减,并会出现偏折、延时、相移等效应,情况严重时电磁波的传输将会完全中断。

我国新一代航天航空飞行器在大气层中飞行的时间长、速度快,为了保障飞行器的飞行安全以及落点的精确,迫切需要开展电磁波在薄层等离子体流场中的传输特性研究,给出能有效减缓“通信中断”问题的途径和方法。黑障对通信安全的影响主要包括:

(1) 无法及时获得飞行器的状态信息,如飞行姿态、内部各分系统的工作状态和关键参数、当前位置的坐标等信息;

(2) 无法及时对飞行器实施有效控制。一旦偏离目标,将导致任务失败;

(3) 如果是空天载人飞行,可能会导致更加严重的后果。

即使在未发生黑障的情况下,电磁波穿过动态变化的随机介质时也会引起信号质量的降低。而等离子鞘套随着飞行轨迹、飞行速度、姿态攻角、绕流流场、耐热材料烧蚀以及大气环境等随机因素的变化,将会呈现出复杂的动态特性。等离子介质的动态特性会导致通信信号发生剧烈的幅度抖动(幅噪)和相位抖动(相噪),从而降低信号质量,严重时会引起接收系统中的捕获与跟踪环路失效。这同样会使信息传输中断,从而导致类似黑障的后果。对于此问题,目前国内外的研究还不够深入。

2 减缓措施及效果

为了减缓或消除气动-电磁波传输效应,研究人员采用过很多方法和措施。这些方法有些已经进入高级发展阶段,有些还在继续探索,它们各有优缺点:

(1) 高频率。根据电磁波与等离子体相互作用的规律,电磁波的频率高于等离子体的频率可以明显减轻等离子体对电磁波的影响。已有实验结果表明,毫米波能够压缩“黑障”区。但是由于目前弹载无线电遥测系统和地面接收站的工作频率大都采用厘米波,如果采用毫米波,除需要新型化的弹上遥测系统外,还需要改建相当数量的地面接收站。此外,大功率器件研制、大气窗口及天候问题亦有待解决。

(2) 改善气动外形和优化再入弹道。改善飞行器气动外形可以促使临近空间飞行器周围的等离子体鞘套变得薄一些。尖头飞行器等离子体鞘套要比钝头飞行器的薄得多,电子密度也低得多。但是尖头飞行器比钝头飞行器的装载容量少,气动热问题更严重。通过优化弹道也可以减轻等离子体鞘套对通信的影响,但这往往意味着更长的再入时间。

(3) 亲电子物质。在飞行器的前部或天线窗的前部开孔,喷射亲电子液体,可以降低温度和减小等离子体鞘套的电子密度,国外对这一方案进行了大量工作。不足之处是喷射装置增加了系统的复杂性。

(4) 强磁场。若在天线附近适当地产生一个强磁场,能在等离子体鞘套中创造“窗口”,减

缓气动—电磁波传输效应。但是,即使采用现代的超导技术产生磁场,其设备的重量也太大。

除上述措施外,合理改变天线的位置、把烧蚀端头改为发汗冷却端头、减少耐热材料的杂质含量等方法也可以减缓黑障的影响。这些方法各有优缺点。

3 开展的通信问题研究工作介绍

课题组前期通过天线位置和地面遥测设备布站优化、毫米波和太赫兹波、天线和强永磁体一体化设计、激光通信等方式开展了减缓再入/临近空间飞行器黑障研究,下面分别加以简单介绍。

3.1 天线位置和地面遥测设备布站优化

通过数值仿真对天线位置和地面遥测设备布站等进行优化。建立不同飞行条件下的等离子体鞘套模型,探讨等离子体鞘套对不同频段电磁信号传输特性的影响,掌握飞行器在大气层内高超声速飞行过程中的黑障特性;分析典型高超声速飞行器在大气层内高速飞行过程中等离子体鞘套的形成机理,从定性与定量两方面对黑障特性进行分析;提出基于数值仿真和机理分析的材料改进、外形设计、天线布局、频段选择和布站优化等技术应用准则,为遥测系统的设置以及遥测设备布站的优化提供依据。图 1 为某滑翔式飞行器天线窗口位于不同位置时的电

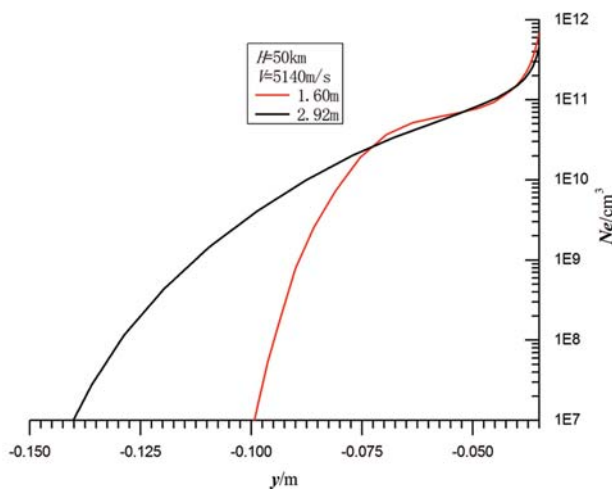


图 1 天线窗口位于不同位置时的电子密度

子密度。由图 1 可见,选择合适的位置设置天线,在等离子体对信号影响比较小的方向上布置遥测设备,可以在一定程度上减缓黑障。图 2 给出了典型状态下等离子体鞘套对喇叭天线方向图的影响。由图 2 可知,天线增益和电磁波衰减在不同方向上的传播特性具有很大的不同。合理地选择天线位置和优化地面遥测设备布站能够在一定程度上减缓黑障的发生^[6-14]。

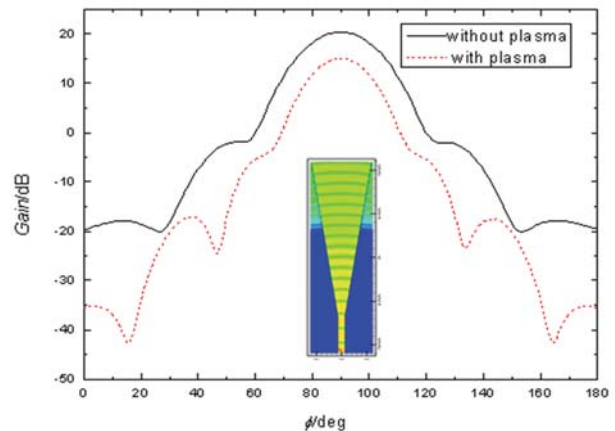


图 2 等离子体对喇叭天线方向图的影响

3.2 毫米波和太赫兹波

目前,高超声速飞行器遥测和遥控设备主要工作在微波频段,Ka 频段毫米波的利用才刚刚开始。更高频率的毫米波和太赫兹频段在高空中的衰减很小,对地、对空通信或空对天感测可以达到很远的距离。因此,采用远高于等离子体鞘套截止频率的毫米波和太赫兹波来实现黑障区飞行器与外界的通信制导,是解决黑障问题较有效的技术途径^[15-17]。

在理论分析的基础上,以激波管为实验平台来模拟产生高速飞行器等离子体,开展 220 GHz 太赫兹波在等离子体中传播特性研究实验。等离子体的厚度为 80 mm,选取的实验状态及参数见表 1。

图 3 为等离子体中太赫兹信号传播衰减量测量值与理论计算值的对比。由图可见,在给定的等离子体实验条件下,太赫兹波衰减量随电子密度变化的实验测量值与理论计算值吻合较好。太赫兹波在有天线窗口的等离子体 ($n_e=2.0 \times 10^{13} / \text{cm}^3$, $f_{en}=1.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$, $d=80 \text{ mm}$) 中的衰减量小

表 1 电子密度变化对太赫兹波传播特性影响实验的状态参数

实验状态参数			2 区气体参数		
M_{as}	$P_1(Pa)$	$P_2(Pa)$	$T_2(K)$	$n_e(cm^{-3})$	$f_{en}(s^{-1})$
10.2	760	9.61×10^4	3507.9	9.0×10^{11}	9.4×10^{10}
11.1	700	1.06×10^5	3818.8	3.2×10^{12}	1.0×10^{11}
11.7	660	1.10×10^5	4055.7	7.3×10^{12}	1.0×10^{11}
12.2	600	1.15×10^5	4506.7	2.4×10^{13}	1.0×10^{11}

于 20 dB。因此, 用太赫兹波实现黑障区飞行器与外界的通信是解决黑障问题的有效途径。

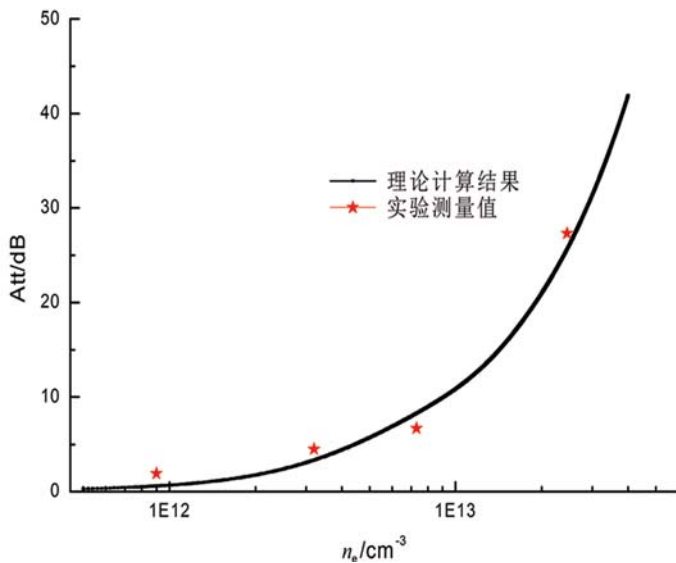


图 3 等离子体中太赫兹波传播衰减计算值与测量值的对比

3.3 天线和强永磁体一体化的设计

理论计算和试验研究证明, 利用外加强磁场减缓飞行器在大气层飞行过程中的通信中断问题是可行的, 但是在产生“磁窗”的过程中有一系列的问题需要克服。为解决这一问题, 我们改变了磁体和天线分开设计的传统思路, 提出了天线和强永磁体一体化综合设计的新方案, 即利用某些磁体的导电性, 把磁体既作为磁场发生装置来产生强磁场, 又作为天线的一部分来发射电磁波。这样既可以利用强磁场增强电磁波在等离子体鞘套中的透波特性, 又可以不显著地增加系统的重量和复杂性^[18-19]。

磁窗天线的设计可应用于 GPS。磁窗天线由永磁体和圆极化微带天线组成, 如图 4 所示。

永磁体选用 100 mm×100 mm×75 mm 的烧结钕铁硼轴向充磁, 其剩磁大小为 1.4 T, 在加工永磁体时留出天线馈电同轴线的孔。在永磁体上覆盖微带天线, 如图 4 和图 5 所示。微带天线的参数: 圆介质板的半径为 43 mm, 相对介电常数为 2.65, 厚度为 2 mm; 正面铜贴片的半径为 33 mm, $d_1=8$ mm, $d_2=2.3$ mm, $d_3=12$ mm; 馈电点在 (9 mm, 9 mm) 处。根据这些参数研制样品。

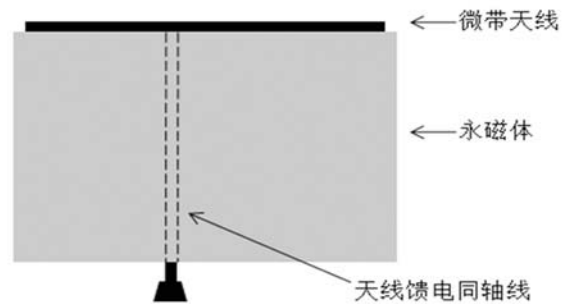


图 4 磁窗天线的轴向剖面

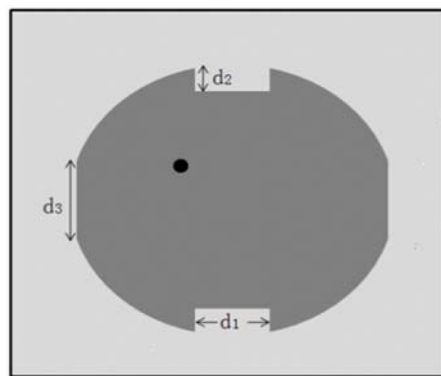


图 5 磁窗天线平面

采用微波透射法测量天线的透射系数, 在静态实验中初步验证磁窗天线对等离子体中通

信中断的减缓作用。

使用图 6 所示的测量系统。由日光灯产生的等离子体的电子密度在 $6 \times 10^{10} / \text{m}^3$ 到 $1 \times 10^{11} / \text{m}^3$ 之间，6 根 T8 日光灯管并排构成等离子体平板。磁窗天线作为发射天线被放置于等离子体平板的一侧，微带天线作为接收天线被放置于另一侧。为减小电磁波绕射产生的影响，两天线到等离子体平板的距离均为 5 mm；用矢量网络分析仪产生发射信号和进行数据处理分析。

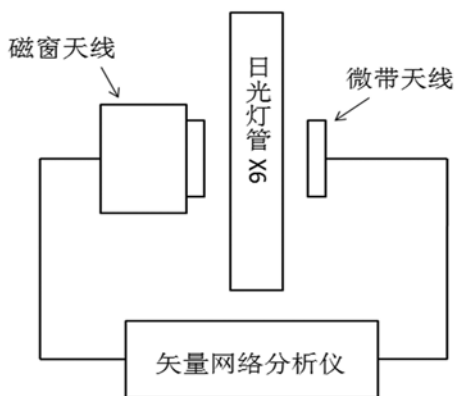


图 6 测量系统的示意图

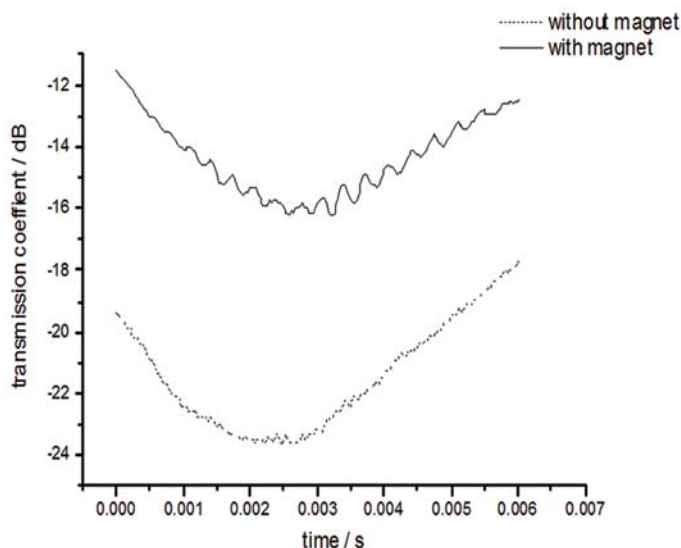


图 7 加磁窗前后透射系数的对比曲线

通过以下 2 种实验状态验证磁窗天线对通信中断的减缓作用：

状态 1：两端用普通微带天线在日光灯管未通电和通电时测量；

状态 2：一端用磁窗天线，另一端用普通微带天线，在日光灯管未通电和通电时测量。

在试验状态 1 下，日光灯管通电时电磁波能量与未通电时相比衰减 $-19 \sim -23.5$ dB。在试验状态 2 下，日光灯管通电时电磁波能量比未通电时衰减 $-11 \sim -16$ dB。由图 7 对比状态 1 和状态 2 的结果可以看出，使用磁窗天线时透射系数衰减了近 8 dB，起到了减缓通信中断的作用，达到了预期效果。

下一步将加强稀土永磁体的优化设计，在确保 GPS 信号顺利通过等离子体鞘套的前提下，尽量减少强永磁体的体积和重量。

3.4 激光通信

激光是一种新型光源，具有亮度高、方向性强、单色性好和相干性强等特征。激光通信实际上指的是自由空间无线光通信。它利用激光作为载体，将信息加载到激光上发射出去；携带了信息的光信号在自由空间进行传输，到接收端再将发生畸变的光信号收集到光电探测器上，进行光电转换；根据信息的加载方式就可以还原出发送信息，实现双方的通信。激光通信具有通信容量大、保密性强、结构轻便和设备经济等特点。2011 年 11 月，我国开展的世界上首次星地直接探测高速激光通信链路新技术试验取得圆满成功。这标志着我国卫星激光通信技术应用取得了重大突破。但是，激光只能够直线传播，为了使制导、遥控或遥测信号传播到更远的距离需采用卫星进行中继，即飞行器上装载的激光通信系统首先与卫星之间进行通信，将激光信号转换成遥测遥控常用的 S 频段信号，再由卫星和地面之间进行通信，最终完成飞行器和地面之间的通信。中国工程院院士吕跃广的课题组与我部开展了利用激光通信克服黑障粉末激波管的试验研究，初步证明了利用激光通信解决黑障问题的可行性。相关研究请参看吕院士课题组后续发表的相关论文。

4 总结

我国新一代航天航空飞行器在大气层中飞行的时间长、速度快, 为了保障飞行器的飞行安全以及落点的精确, 迫切需要开展电磁波在等离子体流场中传输特性的研究, 给出能有效减缓“通信中断”问题的途径和方法。下一步将在前期工作的基础上, 开展理论分析和地面试验验证工作, 进一步研究利用天线位置和地面遥测设备布站优化、毫米波和太赫兹波、外加强磁场、激光通信等方法解决黑障问题的可能性及存在的问题。

致谢

感谢中国科学院包为民院士、中国工程院吕跃广院士、西安电子科技大学李小平教授给予的关心和帮助, 感谢国家重点基础研究发展计划和自然科学基金委给予的支持。

参考文献

- [1] Hartunian R A, Stewart G. E, Ferguson S D. Cause and Mitigation of Radio Frequency (RF) Black-out during Reentry of Reusable Launch Vehicles[R]. Aerospace Report, ATR-5309-1, 2007.
- [2] 乐嘉陵. 再入物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] Starkey R P. Electromagnetic wave/magneto active plasma sheath interaction for hypersonic vehicle telemetry blackout analysis[C].34th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, 2003, 7: 23-26.
- [4] Chapman J N, Ruoff R S, Litchford R J. Flightweight magnets for space application using carbon nanotubes [C]. 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.
- [5] 张志成. 气动物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] Zhefeng Yu, Shaoqing Bu, et al. The Decrease of the Radar Cross Section of Hypersonic Model[C].IEEE 2007 International symposium on MAPE,2007.
- [7] 于哲峰, 刘佳琪, 刘连元, 等. 临近空间高超声速飞行器 RCS 特性研究 [J].*宇航学报*,2014,35(6):13-719.
- [8] 马平, 石安华, 杨益兼, 等. 再入体缩比模型湍流等离子体 RCS 测量研究 [J].*强激光与粒子束*, 2015, 27(7):139-144.
- [9] 于哲峰, 梁世昌, 部绍清, 等. 超高速飞行器及绕流 RCS 特性模拟 [J].*电波科学学报*,2013, 28(6):51-57.
- [10] 曾学军, 于哲峰, 部绍清, 等. Research on the RCS of Hypervelocity Model and Its Plasma Sheath[J].*空气动力学学报*, 2010,28(6):645-649.
- [11] 马平, 部绍清, 石安华, 等. 高超声速锥模型及其尾迹电磁散射试验研究 [J].*实验流体力学*,2010,24(4):56-59.
- [12] 马平, 石安华, 部绍清, 等. 高超声速球模型及其尾迹电磁散射试验研究 [J].*实验流体力学*, 2008,22(4):5-10.
- [13] 于哲峰, 部绍清, 石安华, 等. 高超声速飞行体亚密湍流尾迹 RCS 特性的相似规律研究 [J].*空气动力学学报*, 2014,32(13):57-61.
- [14] 梁世昌, 于哲峰, 张志成, 等. 开槽钝锥体及等离子体鞘套的 RCS 特性研究 [J].*实验流体力学*,2013,27(7):62-66.
- [15] 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):51-54.
- [16] 于哲峰, 马平, 张志成, 等. 微波在薄层等离子体中传输效应研究 [J].*实验流体力学*,2013,27(3):60-64.
- [17] 马平, 秦龙, 石安华, 等. 毫米波与太赫兹波在等离子体中传输特性试验研究 [C]. 第十六届全国高超声速气动 / 气动热学术交流会, 绵阳, 2012.
- [18] 于哲峰, 刘佳琪, 任爱民, 等. 磁窗天线增强等离子体鞘套透波特性研究 [J].*宇航学报*,2011,32(7):1564-1568.
- [19] 杨益兼, 于哲峰, 马平, 等. 一种 GPS 磁窗天线的设计与实验研究 [J].*强激光与粒子束*,2015,27(5):172-176.