

中继法解决临近空间 Ka 波段通信黑障问题

文志军, 陈长兴, 凌云飞, 周天翔

(空军工程大学理学院, 西安, 710051)

摘要 为解决航天器在临近空间的通信黑障问题,根据 ARD 等实测数据,分别建立再入航天器迎风面、背风面均匀等离子鞘套模型,分析再入航天器迎风面、背风面的等离子鞘套厚度、电子密度、等离子体碰撞频率等参数对 Ka 波段的传输透射率、反射率和衰减值的影 响。分析结果表明:Ka 波段工作信号在航天器背风面传输显著优越于在航天器迎风面传输,在航天器再入过程中,提高信号通信频段以及 Ka 波段工作信号从背风面传输的透射率相比从迎风面传输的透射率至少提高 88%,衰减 值至少降低 19 dB,为研究再入航天器通信问题提供了理论参考。

关键词 再入;通信黑障;中继法;透射率;衰减 值

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.004

中图分类号 V271;TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0018-05

A Research on Communications Blackout Problem in Ka-Band by Relay Method

WEN Zhijun, CHEN Changxing, LING Yunfei, ZHOU Tianxiang

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To solve the reentry spacecraft communications blackout problem, this paper establishes a uniform plasma sheath model of reentry spacecraft on windward and leeward respectively in light of experiment data like ARD, and analyzes the effects of frequency parameters such as the thickness, electron density and plasma collision of plasma sheath of reentry spacecraft on windward and leeward to the transmission of Ka-band. The result shows that the transmission of Ka-band signals on leeward is significantly superior to that on windward, and the transmission of Ka-band signals on leeward increases by at least 88%, and the attenuation value decreases by at least 19 dB, compared to that on windward. This provides a theoretical reference for researching the reentry spacecraft in communication problems.

Key words: re-entry; communications blackout; relay method; transmission; attenuation

当航天器以高超声速再入大气层时,其头部周围由于摩擦产生高温,形成冲击层、熵层以及边界层,同时由于驻点区的化学平衡,流体扩散到圆锥形飞行器前部导致处于非平衡态的电离过程化学冻结,化学反应表面增强等物理和化学过程^[1],在航天器表面形成一层等离子体鞘套,反射或衰减信号的

传输,甚至导致信号中断,该现象称为“通信黑障”^[2-5]。哥伦比亚号再入大气层时发生“通信黑障”导致失事;我国“神州九号”载人飞船、美国“双子星座”载人飞船及“阿波罗”号载人飞船返回地面时,都曾出现 3~4 min 的通信中断。至今,都没有很好的解决方法,因此,解决“黑障”问题迫在眉睫。

收稿日期: 2016-04-26

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM8344)

作者简介: 文志军(1993—),男,甘肃定西人,硕士生,主要从事再入航天器通信黑障研究。E-mail: Tojoinarmy@163.com

引用格式: 文志军,陈长兴,凌云飞,等.中继法解决临近空间 Ka 波段通信黑障问题[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):18-22. WEN Zhijun, CHEN Changxing, LING Yunfei, et al. A Research on Communications Blackout Problem in Ka-Band by Relay Method [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 18-22.

现今,国内外解决通信黑障的方法主要有以下几种^[6-13]:改变飞行器气动结构、改善耐热材料、喷射液体亲电子物质以及引入交叉电磁场、磁开窗、利用 Raman 散射通信、采用高频通信等。欧空局 IRDT 飞行试验使用 Ka 频率,整个返回过程信号只中断了几秒钟,其实验数据表明,提高电磁波的频率可以有效降低电磁波的衰减^[14]。Tran P 等人研究发现由于航天器返回舱的外形、速度、攻角和弹道等因素,等离子鞘套会呈现不均匀的空间分布,即黑障效应较强的迎风面和黑障效应较弱的背风面^[15]。文献^[16]表明中继卫星系统具有全球覆盖、无地面测控条件限制、传输路径没有雨衰及大气损耗、工作频率高等优势。文献^[17]表明将高频段电磁波从黑障效应较弱的背风面进行传输,可避免直接传输产生的巨大信号衰减,也可由卫星转发,迂回抵达地球站。但是目前大多数文献并未对使用中继法解决“通信黑障问题”做出具体参数分析。

本文参考欧航局(ESA)开展的返回和降落飞行试验(IRDT)以及 ARD 实测数据,设置再入航天器迎风面与背风面的等离子鞘套各参数,研究参数变化对 Ka 波段信号在迎风面、背风面等离子鞘套中传输情况的影响,对“中继法”优势做出具体参数分析。为解决再入航天器通信黑障问题的研究提供理论参考。

1 电磁波在等离子体中的传输原理

航天器再入大气层过程中,由于摩擦使得航天器周围空气温度迅速升高产生激波,导致航天器周围形成一层高温等离子体鞘套。通过航天器再入过程中等离子鞘套分为黑障效应较强的迎风面和黑障效应较弱的背风面,如图 1 所示,使中继卫星发射高频的 Ka 波段作为信号频段从黑障效应较弱的背风面进行传输称为“中继法”。

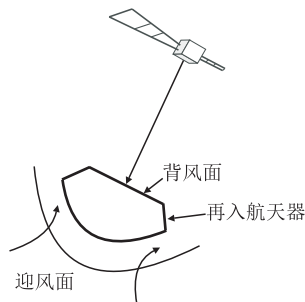


图 1 “中继法”传输模型

Fig.1 The transmission model of relay method

电磁波在等离子鞘套中传输模型如图 2 所示,等离子鞘套对电磁波信号具有与反射、吸收和衰减

的影响。

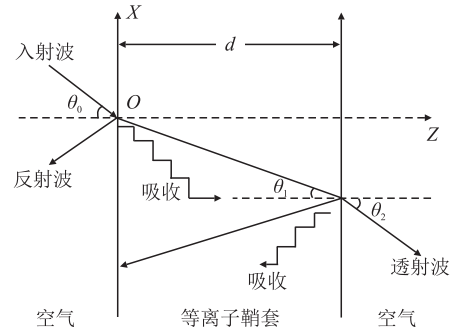


图 2 电磁波在等离子体鞘套中传输模型

Fig.2 Transmission model of electromagnetic wave in plasma sheath

Maxwell 方程组可推出在空间中的电磁波为:

$$\begin{cases} E_{0x} = \frac{b_z}{\omega \epsilon} I_0 (e^{-jb_z z} - r e^{jb_z z}) e^{-jb_z z} \\ E_{0z} = \frac{b_x}{\omega \epsilon} I_0 (e^{-jb_z z} + r e^{jb_z z}) e^{-jb_z z} \\ I_{0y} = I_0 (e^{-jb_z z} + r e^{jb_z z}) e^{-jb_z z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为电磁波的反射系数; I_0 为入射电磁波的振幅; $b_x = b_0 \sin \theta_0$ 为 b_0 在 x 轴方向的分量; $b_z = b_0 \cos \theta_0$ 为 b_0 在 z 轴方向的分量; θ_0 为电磁波入射角; $b_0 = \omega/c$ 为空气中电磁波的波数; ω 为电磁波角频率, c 为光速。

等离子体中电磁波为:

$$\begin{cases} E_{1x} = \frac{b_{1z}}{\omega \epsilon} (I_{1r} e^{-jb_{1z} z} - I_{1t} r e^{jb_{1z} z}) e^{-jb_{1z} z} \\ E_{1z} = \frac{b_{1x}}{\omega \epsilon} ((I_{1r} e^{-jb_{1z} z} + (I_{1t} r e^{jb_{1z} z})) e^{-jb_{1z} z} \\ I_{1y} = ((I_{1r} e^{-jb_{1z} z} + (I_{1t} r e^{jb_{1z} z})) e^{-jb_{1z} z} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{1r} 和 I_{1t} 分别为等离子体中反射波、透射波磁场的振幅; $b_1 = b_0 \sqrt{\epsilon_r}$ 为等离子体中电磁波波数; b_{1x} 为 b_1 在 x 轴上的分量; b_{1z} 为 b_1 在 z 轴上的分量; ϵ_r 为非磁化等离子体的相对介电常数,其中:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + f_{en}^2} - \frac{f}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + f_{en}^2} \quad (3)$$

$$\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e} \quad (4)$$

穿透等离子体鞘套后的空气中电磁波为:

$$\begin{cases} E_{2x} = \frac{b_z}{\omega \epsilon} I_0 t e^{-jb_z z} e^{jb_x x} \\ E_{2z} = \frac{b_x}{\omega \epsilon} I_0 t e^{-jb_z z} e^{jb_x x} \\ I_{2y} = I_0 t e^{-jb_z z} e^{-jb_x x} \end{cases} \quad (5)$$

式中: t 为电磁波的透射系数。

由介质分界面上电磁波的切向分量满足连续性边界条件:

$$\begin{cases} E_{0x} = E_{1x}, E_{0z} = E_{1z}, E_{0z} = E_{1z} (z = 0) \\ E_{2x} = E_{1x}, E_{1z} = E_{2z}, E_{2z} = E_{1z} (z = d) \end{cases} \quad (6)$$

由式(1)、式(2)、式(5) 联合式(6) 可得电磁波的反射系数 r 和透射系数 t 的表达式:

$$\begin{cases} r = \frac{b_z^2 - b_{1z}^2}{b_z^2 + b_{1z}^2 + 2b_z b_{1z} \coth(jb_{1z}d)} \\ t = \frac{b_z^2 - b_{1z}^2}{(b_z^2 + b_{1z}^2) \sinh(jb_{1z}d) + 2b_z b_{1z} \cosh(jb_{1z}d)} \end{cases} \quad (7)$$

电磁波的反射率 R 、透射率 T 和衰减值 Att 分别为:

$$R = |r|^2, T = |t|^2, Att = -10\lg T \quad (8)$$

2 Ka 频段波在迎风面和背风面等离子鞘套传输分析

电磁波在等离子鞘套中传输发生透射、反射和衰减受到等离子鞘套厚度 d 、电子密度 n_e 和碰撞频率 f_{en} 等影响。选定 26~36 GHz 的 Ka 波段,参考欧航局 ARD 飞行试验^[18] 及我国载人飞船再入过程^[19] 提供的实测数据见表 1。再入高度 85 km、65 km 和 45 km 迎风面等离子鞘套厚度 d 、电子密度 n_e 和碰撞频率 f_{en} 数据参数。

表 1 不同再入高度迎风面的等离子鞘套数据参数

Tab.1 The parameters of plasma sheath on windward of different heights

再入高度/km	d /m	f_{en} /Hz	n_e / m^{-3}
85	0.08	2.24×10^{10}	2×10^{18}
65	0.10	3.6×10^{10}	6×10^{19}
45	0.09	6.4×10^9	5×10^{18}

2.1 迎风面 Ka 波段等离子鞘套中的传输仿真分析

根据表 1 中 3 组再入高度迎风面的等离子鞘套数据参数,建立均匀等离子鞘套模型,对 Ka 波段在等离子鞘套中的传输进行数值分析,得到传输透射、反射和衰减情况见图 3。

由图 3(a)可知,当再入航天器在 65 km 时,等离子鞘套厚度最大,透射率几乎为零;当航天器在 85 km 时,相比高度为 45 km、65 km,电磁波在鞘套传输中的透射率最大,在 36 GHz 处,透射率为 3%。

由图 3(b)得到迎风面 3 组参数下的反射情况,在 Ka 波段工作频段内,反射率均在 4% 以下;其中电磁波工作频段位于毫米波内 35 GHz 大气窗口时,再入高度 85 km、65 km 和 45 km 处的反射率为 0.08%、1.7% 和 1%。

由图 3(c)可看出,在 Ka 波段内,衰减值均在 330 dB 以下;其中电磁波工作频率位于大气窗口 35 GHz 时,再入高度 85 km、65 km 和 45 km 处的衰减值约为 20 dB、279 dB 和 22 dB;电磁波频段在 26~36 GHz 内,传输衰减值均大于 19 dB。

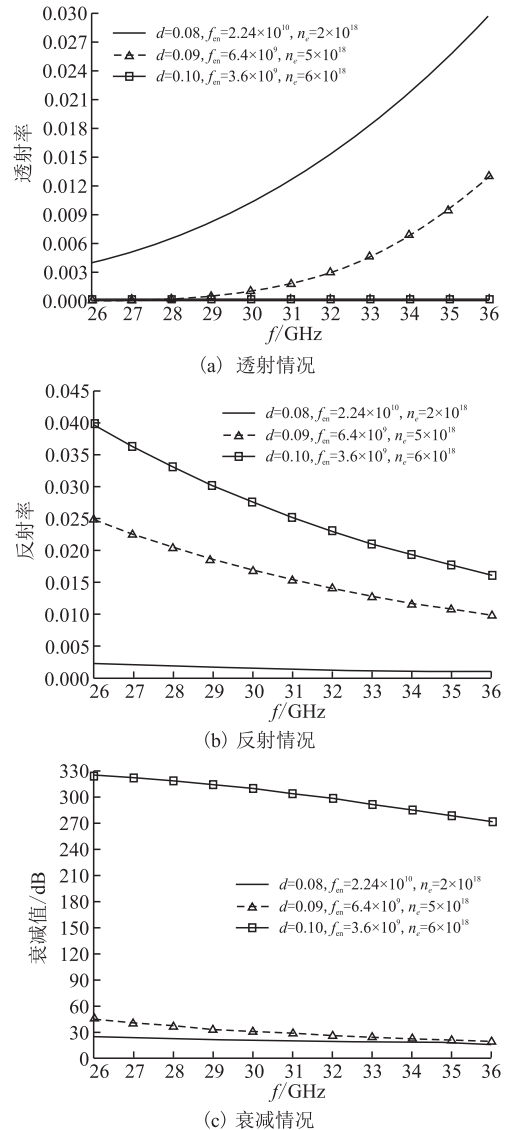


图 3 迎风面 3 组参数对 Ka 波段电磁波传输性能的影响
Fig.3 The effect of three sets of parameters on windward to the electromagnetic wave transmission performance of Ka-band

由表 1 的实测数据可以看出,再入高度为 65 km 时,等离子鞘套厚度、电子密度最大;再入高度为 85 km 时,等离子鞘套厚度、电子密度最小。由图 3 中(a)~(c)可得,随着电磁波工作频率的上升,电磁波信号在迎风面等离子鞘套中传输的透射率增大,反射率减小,衰减值减小。这是由于电磁波频率升高,电磁波中电子获得更多的能量,更容易穿过等离子体鞘套,且产生快速变化的电场,使得等离子鞘套中的电子几乎没有发生极化作用,鞘套电子从电磁波中吸收的能量减小,从而电磁波在等离子鞘套传输反射率下降,透射率增加,衰减值减小。因此,在范围波段内,提高信号工作频率可以有效缓解通信中断问题。

2.2 背风面 Ka 波段等离子鞘套中的传输仿真分析

由表 2 不同再入高度背风面的等离子鞘套数据参数,建立均匀等离子鞘套模型,对 Ka 频段波在背

风面等离子鞘套传输进行数值分析,得到传输透射、反射和衰减情况见图 4。

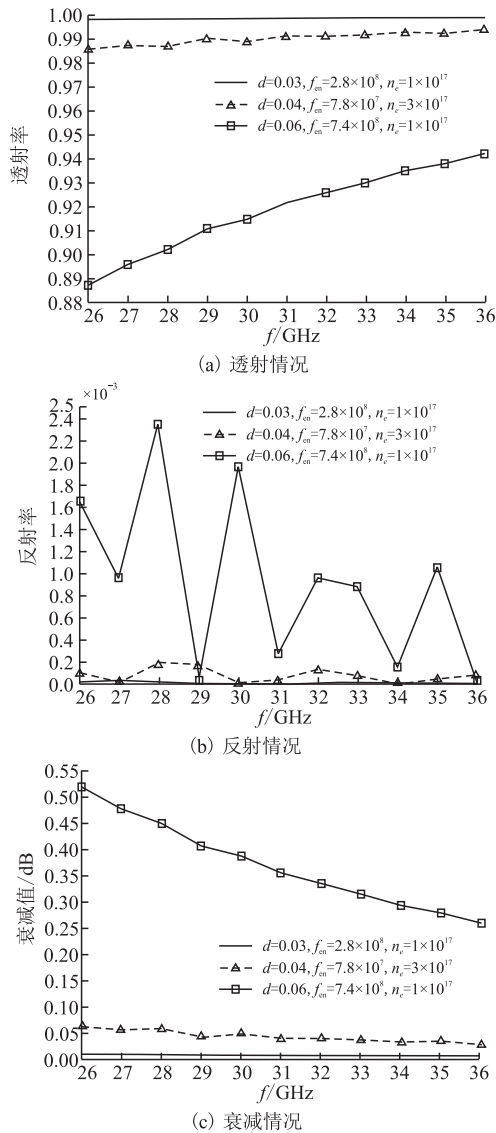


图 4 背风面 3 组参数对 Ka 波段电磁波传输性能的影响
Fig.4 The effect of three sets of parameters on Leeward to the electromagnetic wave transmission performance of Ka-band

表 2 不同再入高度背风面的等离子鞘套数据参数
Tab.2 The parameters of plasma sheath on leeward of different heights

再入高度/km	d / m	f_{en} / Hz	n_e / m^{-3}
85	0.03	2.8×10^8	1×10^{17}
65	0.06	7.4×10^8	1×10^{18}
45	0.04	7.8×10^7	3×10^{17}

由图 4(a)可知,电磁波频段在 26~36 GHz 内,3 组再入高度背风面电磁波传输透射率均大于 88%;其中电磁波工作频率位于毫米波内 35 GHz 大气窗口时,再入高度 85 km、65 km 和 45 km 处的透射率为 99.9%、93.7%和 99.2%;当再入航天器在 85 km 时,电磁波几乎全部透射。

由图 4(b)中可知,背风面振荡的反射曲线,在

26~36 GHz 范围内,3 组参数下的最大反射率低于 2.5×10^{-3} ,这是由于电磁波在界面处多次反射,从而得到图中的振荡曲线。并且随着电磁波工作频率、等离子鞘套电子密度的增加,电磁波中电子透过等离子鞘套的惯性增加,振荡逐渐平缓,反射率逐渐减小。其中电磁波工作频率位于毫米波内 35 GHz 大气窗口时,再入高度 85 km、65 km 和 45 km 处的反射率为 0.1×10^{-3} 和 4.6×10^{-5} 。

由图 4(c)可看出,在 Ka 波段内,背风面衰减均在 0.52 dB 以下;当再入航天器处于高度为 85 km 时,等离子鞘套厚度最小,衰减值几乎为零;其中电磁波工作频率位于毫米波内 35 GHz 大气窗口时,再入高度 85 km、65 km 和 45 km 处的衰减值分别为 5×10^{-3} dB、0.27 dB 和 5.6×10^{-2} dB。

由图 4(a)~(c)可得,随着电磁波工作频段的上升,电磁波信号在背风面等离子鞘套中传输的透射率增大,反射率减小,衰减值减小。当电磁波频率升高时,等离子鞘套电子从电磁波中吸收的能量减小,因此,电磁波在等离子鞘套传输反射率下降,透射率增加,衰减值减小。

2.3 迎风面与背风面传输特性的比较分析

由于等离子鞘套厚度增加使电磁波在等离子鞘套中传输距离增大;等离子鞘套中电子密度增大,等离子鞘套中电子与电磁波碰撞概率增大;等离子鞘套碰撞频率越大,鞘套中的电子与中性粒子相互作用会越剧烈,使得电子从电磁波中吸收的能量越少;因此,等离子鞘套的厚度增加、电子密度增大、碰撞频率减小都使得电磁波在等离子鞘套中传输的透过率减小,反射率增大,衰减值增大。

由图 3(a)、图 4(a)可以看出航天器迎风面、背风面的透射率均随着信号工作频率的上升而增加;在工作频率为 36 GHz,再入高度为 85 km 的迎风面透射率达到最大为 0.03,而航天器背风面最小透射率为 0.888 远大于 0.03,说明航天器背风面透射率明显高于迎风面透射率。

由图 3(c)、图 4(c)中得到航天器迎风面、背风面的衰减值均随着信号工作频段的上升而减小;在工作频率为 36 GHz,再入高度为 85 km 的迎风面衰减值达到最小为 19 dB,而航天器背风面最大衰减值仅为 0.52 dB,说明航天器背风面衰减值明显低于迎风面衰减值。

3 组高度的迎风面与背风面的透射率、衰减值对比情况见表 3,清楚的可以得出:航天器再入过程中,Ka 波段信号从背风面传输的透射率相比从迎风面传输的透射率提高至少 88%,衰减值至少降低 19 dB,说明 Ka 波段工作信号在航天器背风面传输显

著优越于在航天器迎风面传输。

表3 Ka波段信号在不同高度航天器迎风面、背风面的传输对比

Tab.3 The contract of Ka-band signal transmission on spacecraft windward and leeward of different heights

再入高度/km	透射率(%)		衰减值/dB	
	迎风面	背风面	迎风面	背风面
85	0.4%~3%	99.8%~99.9%	19~23	0.005~0.01
65	0~0.001%	88.7%~94%	273~327	0.25~0.52
45	0~1.2%	98.7%~99.3%	21~45	0.02~0.06

3 结语

本文分别建立再入航天器迎风面、背风面均匀等离子鞘套模型,参考ARD等实测数据来设定 d , n_e 和 f_{en} 等参数,通过数值计算仿真,得到Ka波段信号在再入航天器迎风面、背风面等离子鞘套中传输的透射率、反射率和衰减情况。得出如下结论,提高通信频率有助于减轻航天器再入过程中的黑障问题;航天器背风面透射率明显高于迎风面透射率,背风面衰减明显低于迎风面衰减。如果将天线架设在航天器背风面,衰减远小于将天线架设在航天器迎风面,通过MATLAB数值仿真得到了Ka波段工作信号在航天器背风面传输显著优越于在航天器迎风面传输,为研究航天器再入黑障问题提供一定的数据参考。

参考文献(References):

[1] STARKEY R. Nonequilibrium Plasma Effects on Telemetry Considerations for Air-Breathing Hypersonic Vehicle Design[R], AIAA-333, 2004.

[2] 凌云飞,陈长兴,蒋金.飞行器临近空间通信信号传输特性研究[J].计算机仿真,2016,33(2):127-137.
LING Yunfei, CHEN Changxing, JIANG Jin. Research on Propagation Properties of Near Space Vehicle Communication Signals[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 33(2):127-137. (in Chinese)

[3] 张作一,赵良,刘秀祥.再入等离子鞘套对测控信号传输的影响[J].电讯技术,2014,54(9):1265-1269.
ZHANG Zuoyi, ZHAO Liang, LIU Xiuxiang. Influence of Reentry Plasma Sheath on TT&C Signals Transmission[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9):1265-1269. (in Chinese)

[4] HARTURIAN R A, STEWART G E, FERGAON S D, et al. Cause and Mitigations Radio Frequency(RF) Blackout during Re-entry of Reusable Vehicles[R]. ATR 2007(5309)-1, 2007.

[5] 周天翔,陈长兴,蒋金,等.外加磁场改善临近空间GPS通信研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):56-61.
ZHOU Tianxiang, CHEN Changxing, JIANG Jin, et al. Research on Improving GPS Communication Performance in Near Space by adding Magnetic Field[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural science Edition, 2016, 17(3):56-61. (in Chinese)

[6] STARKEY R, LEWIS R, JONES C. Plasma Telemetry in Hypersonic Flight[C]//International Telemetering Conference, San Diego, CA, 2002-10.

[7] 袁忠才.等离子体鞘套对飞行器再入过程信号传播特性的影响分析[J].航天器环境工程,2014,31(1):79-82.
YUAN Zhongcai. Analysis of Characteristics of Reentry Sheath and Its Effects on Communication[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(1):79-82. (in Chinese)

[8] RYBAK J P, CHURCHILL R J. Progress in Reentry Communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, 7(5):879-894.

[9] KEIDAR M, KIM M, BOYD ID. Electromagnetic Reduction of Plasma Fensity Furing Stmospheric Reentry and Hypersonic Flights[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(3):445-453.

[10] TAKAHASHI Y, YAMADA K, ABE T. Prediction Performance of Blackout and Plasma Attenuation in Atmospheric Reentry Demonstrator Mission[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(6):1954-1964.

[11] STARKEY R P. Hypersonic Vehicle Telemetry Blackout Analysis[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(2):426-438.

[12] KIM M, KEIDAR M, BOYD ID. Analysis of an Electromagnetic Mitigation Scheme for Reentry Telemetry Through Plasma[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(6):1223-1229.

[13] 袁忠才,时家明.飞行器再入大气层通信黑障的消除方法[J].航天器环境工程,2012,29(5):504-507.
YUAN Zhongcai, SHI Jiaming. Mitigation of Reentry Communication Blackout[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5):504-507. (in Chinese)

[14] HARTUNIAN R A, STEWART G E, CURTISS T J, et al. Implications and Mitigation of Radio Frequency Blackout During Reentry of Reusable Launch Vehicles[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 2007:20-23.

[15] 王家胜,经姚翔,杨显强,等.采用卫星中继克服航天器再入通信黑障的途径[J].航天工程,2015,24(3):1-8.
WANG Jiasheng, JING Yaoxiang, YANG Xianqiang, et al. On Approaches to Overcome Spacecraft Reentry Communication Blackout Using Satellite Relay[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(3):1-8. (in Chinese)

[16] 黄惠明.我国第一代中继卫星地面应用系统发展建设的思考[J].飞行器测控学报,2013,31(5):1-5.
HUANG Huiming. Reflections on Development of the Ground System of the First Generation CTDRSS[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 31(5):1-5. (in Chinese)

[17] 李于衡,罗斌,郭文鸽,等.中继卫星Ka频段支持飞船再入返回通信可行性分析[J].载人航天,2015,21(6):582-588.
LI Yuheng, LUO Bin, GUO Wen'ge, et al. Feasibility Analysis of Using Ka-Band of TRDS to Support Wireless Communication for Spacecraft Reentry[J]. 2015, 21(6):582-588. (in Chinese)

[18] PAULAT J C, BOUKHOBZA P. Re-entry Flight Experiments Lesson Learned the Atmospheric Reentry Demonstrator ARD[R], 2007.

[19] 杨欢.再入飞船等离子体鞘套对通信衰减的仿真与建模[D].南京:南京航空航天大学,2010.
YANG Huan. Research on the Simulation & Modeling of Reentry Spacecraft Plasma Sheath to Communication Attenuation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)