

中继法解决再入航天器通信黑障问题优化研究

文志军, 陈长兴, 凌云飞

(空军工程大学理学院, 西安, 710051)

摘要 中继法是目前解决航天器再入通信黑障问题的一种可行方案,建立了背风面等离子鞘套模型,分析航天器再入俯仰角对信号在鞘套中的传输影响,并在航天器再入初始俯仰角下对比了 S 频段和 Ka 频段信号在背风面等离子鞘套的传输情况。结果表明:俯仰角越大,信号电磁波在等离子鞘套中的衰减越小;相同俯仰角下 Ka 频段传输性能明显优越于 S 频段信号,Ka 频段信号相比于 S 频段信号,在背风面的透射率至少提高 55%、衰减值至少降低 33.69 dB,建议选用 Ka 频段信号作为中继卫星与再入航天器之间的通信频段并提出中继优化方案,为进一步解决航天器再入过程中的通信黑障问题提供思路。

关键词 再入;通信黑障;等离子鞘套;背风面;俯仰角;中继法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.007

中图分类号 V271;TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)06-0040-07

Study on Solution about Re-entry Spacecraft Communications Blackout Problem by Relay Optimum Proposal

WEN Zhijun, CHEN Changxing, LING Yunfei

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

Abstract: Currently, relay approach is a feasible scheme in solving the communication blackout problem when spacecraft reentries. This paper builds up a model of plasma sheath at leeward, analyzes influence of reentry spacecraft pitch angle on signal transmission in sheath, and contrasts the transmission of Ka-band signals with S-band signals in the leeward plasma sheath under initial pitch angle of the spacecraft reentry atmosphere. The result shows that the attenuation of signal electromagnetic wave in plasma sheath decreases with increase of pitch angle; under condition of the same pitch angle, the transmission of Ka-band signal is significantly superior to the transmission of S-band signal. Compared to S-band signal, Ka-band signal's the transmissivity on leeward increases by at least 55%, with decrease on the attenuation by at least 33.69 dB. It's suggested that Ka-band signal can be chosen as the communication frequency between reentry spacecraft and relay satellite. Relay approach is Proposed by relay optimum proposal, providing ideas to solve the reentry spacecraft communication blackout problems.

Key words: reentry; communications blackout; plasma sheath; leeward; pitch angle; relay approach

航天器以高超声速再入大气层时,由于大气浓度的增大,航天器与大气会发生剧烈的摩擦,电离产

收稿日期: 2016-12-25

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. 中继法解决再入航天器通信黑障问题优化研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 40-46. WEN Zhijun, CHEN Changxing, LING Yunfei. Study on Solution about Re-entry Spacecraft Communications Blackout Problem by Relay Optimum Proposal [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 40-46.

生大量电子与离子,导致航天器表面形成一层高温、强电离的等离子鞘套。等离子鞘套对电磁波具有吸收、反射和散射的作用,对航天器再入时的通信电磁波会造成衰减,甚至造成通信传输中断,该现象被称为通信“黑障”^[1-5]。我国的“神州九号”、美国的“双子座”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^[6-7],至今,都没有很好的解决方法。随着航天事业的快速发展,解决“黑障”问题迫在眉睫。

当前,国内外解决通信黑障的方法主要有以下几种^[8-13]:改善气动外形、改进烧蚀材料、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。我国神舟飞船再入大气层时,通信黑障的影响从 80 km 高度开始,到 40 km 结束,整个过程 S 测控信号中断了 5 min 左右。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^[14]。Tran, P 等人研究发现由于航天器返回舱的外形、速度、俯仰角和攻角等因素,等离子鞘套会呈现不均匀的空间分布^[15]。文献^[16]提出“二次中继法”方案,从技术角度分析了解决再入“黑障”问题的可行性。文献^[17]对使用中继法解决通信“黑障”问题做出具体参数分析,得到将高频段电磁波从背风面进行传输,可避免直接传输产生的巨大信号衰减的结论。

本文根据相关文献,设置了再入航天器背风面的等离子鞘套各参数,通过分析再入航天器飞行俯仰角对鞘套中信号传输的影响,研究了“二次中继法”中 Ka 频段信号、S 频段信号在具有一定俯仰角的航天器背风面等离子鞘套中的传输情况。在“二次中继法”的基础上提出更为有效的“中继优化方案”,为解决再入航天器通信黑障问题的研究提供了理论参考。

1 电磁波传输原理及中继法介绍

1.1 中继法介绍

中继法是利用航天器再入过程中等离子鞘套厚度不同以及等离子电子密度、碰撞频率分布不均匀,将其分为黑障效应较强的迎风面和黑障效应较弱的背风面,设法将信号从背风面方向传出,通过卫星转发,绕道致地球站。这样就避开了直接对地传输的巨大信号衰减,可有效地减缓甚至解决航天器再入过程中的通信黑障问题^[15-16]。二次中继法见图 1,中继卫星与地球站之间使用 Ka 频段信号作为星地链路,而中继站与航天器背风面选用的频率为 S 频段。

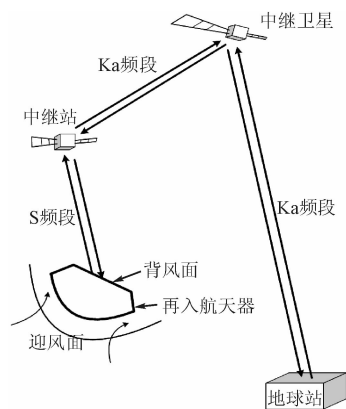


图 1 二次中继示意图

Fig. 1 The transmission model of ‘two relays’ approach

1.2 电磁波在等离子鞘套中的传输原理

信号电磁波在等离子鞘套中传输时发生反射、折射、吸收和衰减见图 2。以 TM 波建立入射模型,模型中的电磁波沿 z 轴方向传播,电场平行于 xoz 面,磁场沿 y 轴方向。

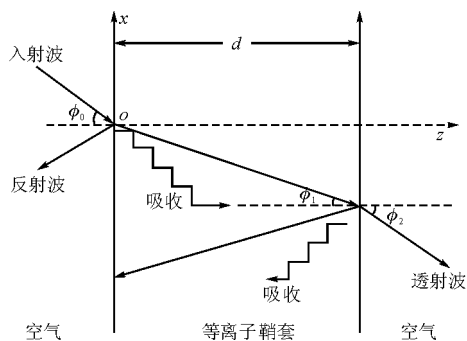


图 2 电磁波在等离子体鞘套中传输模型

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:

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

式中: r 为电磁波的反射系数; I_0 为入射电磁波的振幅; $b_x = b_0 \sin\phi_0$ 为 b_0 在 x 轴方向的分量; $b_z = b_0 \cos\phi_0$ 为 b_0 在 z 轴方向的分量; ϕ_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:

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

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; $b_1 = b\sqrt{\epsilon_r}$ 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:

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

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

穿透等离子体鞘套后的空气中电磁波为:

$$\begin{cases} E_{2x} = \frac{b_x}{\omega \epsilon} I_0 t e^{-j b_z z} e^{-j b_{1x} x} \\ E_{2z} = -\frac{b_z}{\omega \epsilon} I_0 t e^{-j b_z z} e^{-j b_{1x} x} \\ I_{2y} = I_0 t e^{-j b_z z} e^{-j b_{1x} x} \end{cases} \quad (5)$$

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:

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

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:

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

电磁波的反射率 R 和透射率 T 和衰减值 Att 为:

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

2 仿真与分析

2.1 中继法中俯仰角对通信电磁波的影响分析

航天器再入返回时尾部朝前上方, 在过渡段由姿态控制系统将自身调头, 保持头部朝前形成一定的俯仰角, 由于航天器再入速度、气动力的不稳定, 俯仰角会有一定范围的变化。研究航天器再入通信“黑障”问题时, 俯仰角直接影响通信电磁波在等离子鞘套中传输的入射角。参考相关文献^[18], 选取高空、中空、低空特定再入高度 85 km、65 km 和 45 km, 得 3 组背风面等离子鞘套厚度 d 、电子密度 n_e 和碰撞频率 f_{en} 数据参数见表 1。

表 1 不同再入高度背风面的等离子鞘套参数

Tab. 1 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	0.23	2.8×10^8	1×10^{17}
65	0.3	7.4×10^8	1×10^{18}
45	0.25	7.8×10^7	3×10^{17}

根据中继法模型, 利用表 1 数据参数, 分析通信频段为 Ka 频段 (26 ~ 36 GHz) 和 S 频段 (2 ~ 4

GHz) 分别在背风面等离子鞘套俯仰角 θ_0 为 30°、45° 和 70° 的传输衰减情况, 见图 3、图 4。

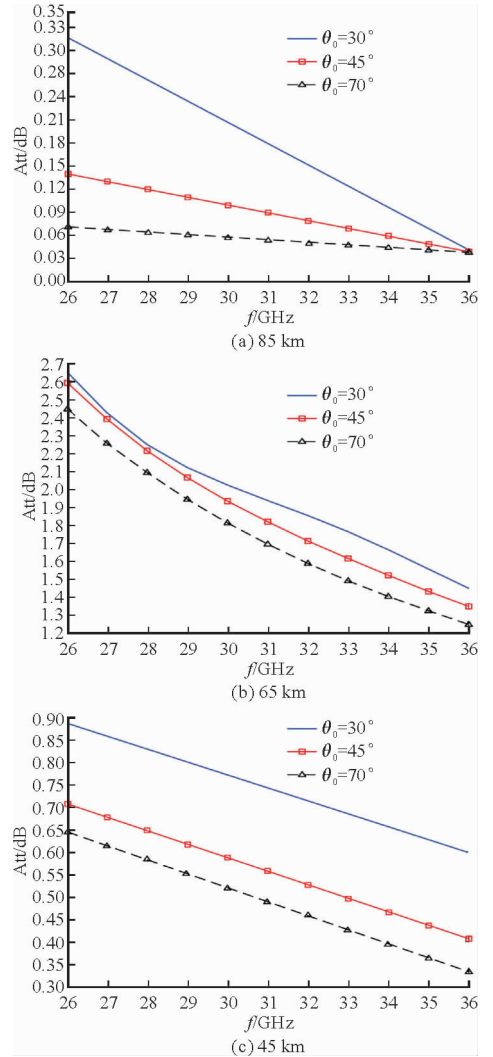


图 3 不同俯仰角对 Ka 频段信号传输衰减影响
Fig. 3 The effect of different pitch angle on the attenuation of Ka-band signal

由图 3(a) 可知, 当再入航天器在 85 km 时, Ka 频段通信信号在背风面等离子鞘套中的衰减均低于 0.31 dB, 且相同俯仰角下衰减值随着信号频率的增大而减小; 俯仰角为 30° 的衰减曲线明显在另外 2 条曲线上部, 45° 衰减曲线明显在 70° 曲线上部。

由图 3(b) 可知, 当再入航天器在 65 km 时, Ka 频段通信信号在背风面等离子鞘套中的衰减均低于 2.6 dB, 且相同俯仰角下衰减值随着信号频率的增大而减小; 俯仰角为 30° 的衰减曲线明显在另外 2 条曲线上部, 其中电磁波工作频段位于毫米波内 35 GHz 大气窗口时, 俯仰角为 30°、45° 和 70° 的衰减值分别为 1.5 dB、1.4 dB 和 1.2 dB。

由图 3(c) 可看出, 高度为 45 km, 在 Ka 频段内, 3 个角度下衰减值均在 0.9 dB 以下; 其中电磁波工作频率位于 Ka 频段通用下行频率 26.5 GHz

时,俯仰角为 30° 、 45° 和 70° 的衰减值分别为 0.87 dB、0.68 dB 和 0.63 dB。

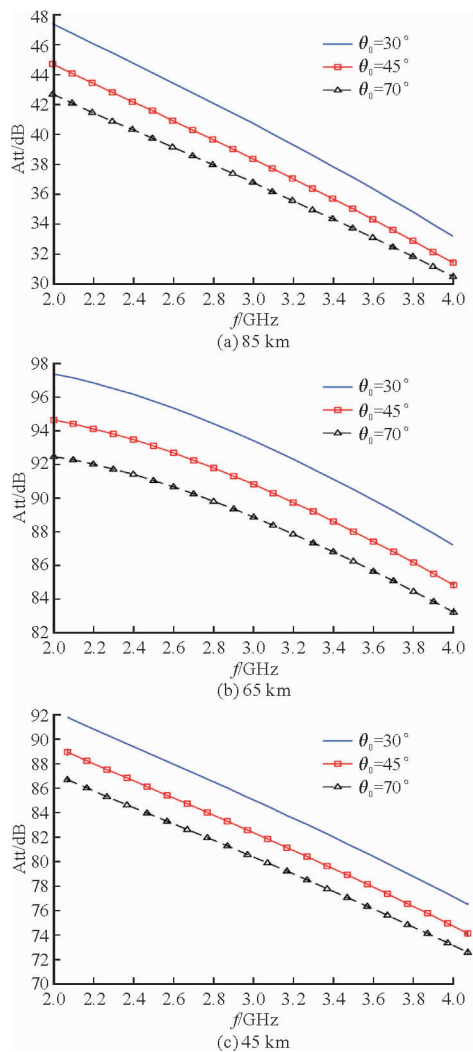


图 4 不同俯仰角对 S 频段信号传输衰减影响
Fig. 4 The effect of different pitch angle on the attenuation of S-band signal

由图 4(a)可知,当再入航天器在 85 km 时,S 频段通信信号在背风面等离子鞘套中的衰减均高于 30 dB,且在导航信号通用上行频率 2.7 GHz 处,航天器俯仰角为 70° 的信号衰减值为 38.5 dB,相比于俯仰角为 30° 的衰减值 42.7 dB 降低了 4.2 dB。

由图 4(b)可知,当再入航天器在 65 km 时,S 频段通信信号在背风面等离子鞘套中的衰减均高于 83.2 dB,且相同俯仰角下衰减值随着信号频率的增大而减小;S 频段上行频率 4 GHz 在俯仰角为 30° 、 45° 和 70° 的衰减值分别为 87.1 dB、84.8 dB、83.2 dB。

由图 4(c)可看出,高度为 45 km,在 S 频段内,3 个角度下衰减值均大于 71.5 dB;S 波段下行频率 2 GHz 在在俯仰角为 30° 、 45° 和 70° 的衰减值分别为 90.7 dB、87.8 dB、85.6 dB,且由所得数据和斜率公式得,航天器再入俯仰角角度越大衰减曲线的陡峭程度越小。

综合分析可得,在 S 频段、Ka 频段工作频率范围内,在同一俯仰角下,信号电磁波在等离子鞘套中的传输衰减随着电磁波频率的增大而减小;在同一信号频率下,衰减随着俯仰角增加而减小,这是由于俯仰角 θ_0 越大,通信电磁波在等离子鞘套中的传输入射角 ϕ_0 越小,电磁波在等离子鞘套中传播的波程也越小,则鞘套吸收通信电磁波的能量越小,衰减值越小;且俯仰角度数越小衰减曲线的陡峭程度越大,因此可通过姿态控制系统调整,适量增大航天器再入大气层的俯仰角,对降低通信电磁波在鞘套中传输的衰减值有一定的帮助。

2.2 30° 俯仰角下背风面 Ka 频段与 S 频段传输情况

在 2.1 节中提到“二次中继”的方案,即通过使用 S 频段信号与航天器背风面进行通信。航天器再入大气层时具有一定俯仰角,对比 Ka 频段信号与 S 频段信号在背风面等离子鞘套的传输情况,需考虑俯仰角对其的影响,则设定俯仰角 θ_0 为航天器再入大气初始俯仰角 30° 。

本小节参考表 1 的数据,根据作者前期工作^[12]可知,通信信号在航天器背风面传输性能显著优越于在航天器迎风面传输性能,因此只进行仿真分析 S 频段信号与 Ka 频段信号在不同高度下航天器背风面等离子鞘套的传输情况见图 5、图 6,比较结果见表 2。

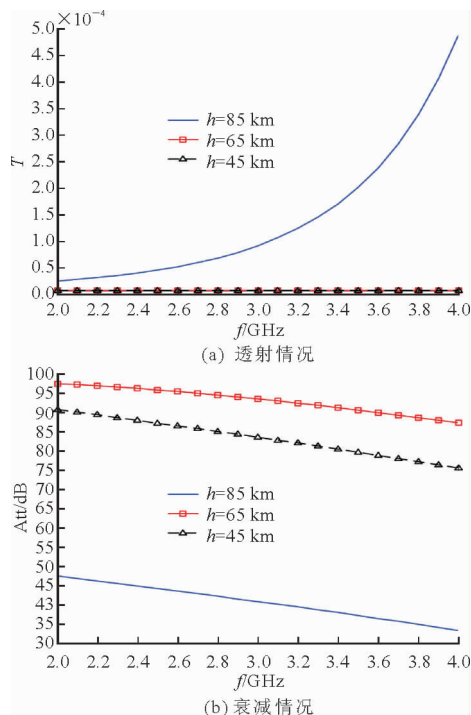


图 5 30° 俯仰角下 S 频段信号在不同高度背风面的传输情况
Fig. 5 The transmission situation of S-band signal in the leeward of different heights under pitch angle of 30°

由图 5(a)可知,S 频段信号在高度 65 km 和 45 km 处的背风面透射率几乎为零,在高度 85 km 时,背风面的传输透射率随着信号频率的增大而增大,相比高度 45 km 和 65 km,电磁波信号在背风面鞘套的传输透射率最大,且在 S 频段范围最大频率 4 GHz 处为 0.048%。

由图 5(b)可得,背风面的传输衰减随着频率的增大而减小,且在 S 频段范围内均大于 30 dB;导航信号通用上行频率 2.7 GHz 在再入高度 85 km、65 km 和 45 km 处的衰减值为 42.8 dB、94.9 dB 和 85.6 dB。在高度 65 km 时,相比高度为 85 km、45 km,电磁波信号在背风面鞘套的传输衰减最大,且在 S 频段范围最小频率 2 GHz 处为 97.3 dB。

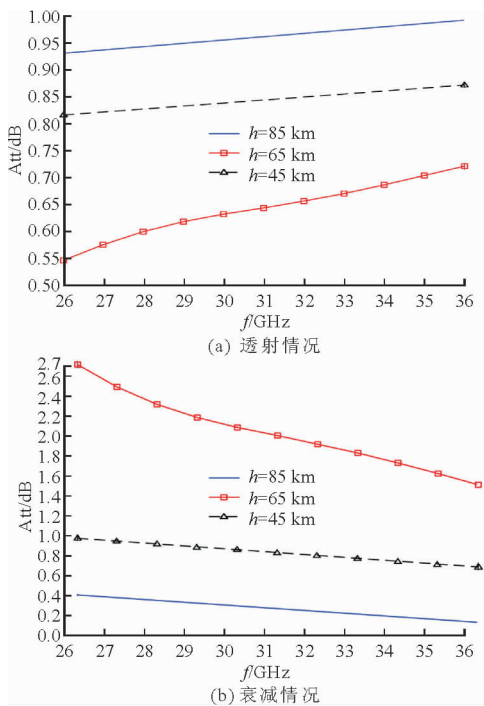


图 6 30°俯仰角下 Ka 频段信号在不同高度背风面的传输情况

Fig. 6 The transmission situation of Ka-band signal in the leeward of different heights under pitch angle of 30°

由图 6(a)可知,3 个高度下,Ka 频段信号在背风面的传输透射率随着信号频率的增大而增大,且均在 54.6% 以上;Ka 频段信号在高度为 85 km 处的航天器背风面传输时,透射率均大于 93%。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 处的透射率为 98.9%、71% 和 87%。

由图 6(a)可看出,Ka 频段信号在 3 个高度下航天器背风面的传输衰减随着信号频率的增大而减小,且均小于 2.7 dB;Ka 频段信号在 85 km 处航天器背风面的衰减均小于 0.3 dB,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 处的衰减值为 0.07 dB、1.53 dB 和 0.73 dB。

综合图 5、图 6 分析可得,在 2 种信号频段下,入射频率越大,信号电磁波在背风面等离子鞘套中的透射率越大,衰减越小。由表 2 可得,S 频段信号在背风面鞘套传输透射率几乎为零,而衰减仅在高空 85 km 处相对较小仍大于 34 dB,在中高空 65 km 和 45 km 处衰减大于 75 dB。Ka 频段在 3 个高度下的传输透射率均在 55% 以上,而在 65 km 处的衰减最大仍小于 2.6 dB,Ka 频段信号相比于 S 频段信号在背风面的透射率至少提高 55%、衰减至少降低 33.69 dB。因此 S 频段信号从电磁波在鞘套传输角度来说,尽管具有节约返回舱资源的优势,仍不适合作为中继星间通信信号;相比之下,Ka 频段在传输性能方面明显优越于 S 频段信号,且具有频带宽、干扰小、终端设备体积小等优点。综合分析建议选用 Ka 频段作为中继卫星与再入航天器之间的通信频段。

表 2 2 种频段信号在不同高度背风面的传输情况

Tab. 2 The transmission situation of two-band signals in the leeward of different heights

再入高度/km	透射率/%		衰减/dB	
	S 频段/%	Ka 频段/%	S 频段/%	Ka 频段/%
85	0.01~0.05	93~99.2	34~48	0.04~0.31
65	0~0.0001	55~72	87~97	1.4~2.6
45	0~0.001	82~87.8	75~91	0.59~0.88

2.3 中继法优化方案

由 2.2 节可知,在一次中继法和二次中继法中卫星与地球站之间的星地通信频段是 Ka 频段信号,但由相关文献可知^[19-22],对流层的气象环境会对通信电磁波造成的一定程度的衰减,例如云、雨、雪、雾等水凝物以及沙尘暴产生的衰减效应,其中雨衰尤为严重,且随着通信频率的增加衰减越来越大,与 C、X、Ku 频段相比,Ka 波段卫星通信系统的雨衰更严重,在大于 0.1% 的时间内对于 30 GHz 的上行频率雨衰可超过 40 dB,对于 20 GHz 的下行频率雨衰也将超过 20 dB^[23]。而 C 频段信号因波长远大于雨滴直径,所以降雨衰减弱,在通信的中断高度持续时间及最大衰减等方面的表现均优于 L、S、X 以及 Ka 等频段,且作为现行卫星通信的重要使用频段,在系统兼容性和频段拓展性方面都有良好的表现^[19]。

为降低整个中继系统的通信衰减情况,要尽可能减小各中继链路的衰减。根据上述研究,可选用 Ka 频段和 C 频段分别作为中继卫星与再入航天器、地球站之间通信频段,如图 7 所示,得到“中继优化方案”,为进一步解决航天器再入过程中的通信黑

障问题提供思路。

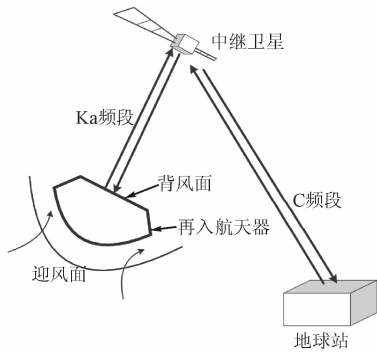


图7 中继法优化方案示意图

Fig. 7 The transmission model of 'low frequency relay' approach

3 结语

本文在作者前期工作的基础上,主要完成了以下工作:

1)考虑到航天器再入时的俯仰角是影响信号在等离子鞘套中传输的重要因素,仿真分析了Ka频段信号和S频段信号在航天器不同高度、不同俯仰角时的鞘套传输情况,结果表明俯仰角越大,信号在等离子鞘套中的衰减越小。

2)对比了“二次中继法”中Ka频段信号、S频段信号在俯仰角为 30° 的背风面鞘套的传输情况,得到Ka频段信号相比于S频段信号在背风面的透射率至少提高55%、衰减至少降低33.69 dB,因此在传输性能方面,Ka频段信号明显优越于S频段信号,且Ka频段具有频带宽、干扰小、终端设备体积小等优点,综合分析认为可选用Ka频段作为中继卫星与再入航天器之间的通信频段。

3)由于“中继法”中第1段路径具有严重的大气衰减,提出“中继优化方案”即选用Ka频段和C频段分别作为中继卫星与再入航天器、地球站之间的通信频段,为进一步解决航天器再入过程中的通信黑障问题提供思路。

参考文献(References):

[1] BAI B W, LI X P, XU J, et al. Effects of Reentry Plasma Sheath on Mutual-Coupling Property of Array Antenna [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015, 2015(5): 1-9.

[2] 薄勇,赵青,罗先刚,等. 电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究 [J]. 物理学报, 2016, 65(3): 035201.

BO Y, ZHAO Q, LUO X G, et al. Study on Transmission Characteristics of Electromagnetic Waves in

Homogeneously Magnetized Plasma Sheath [J]. Acta Phys Sin, 2016, 65(3): 035201. (in Chinese)

- [3] 凌云飞,陈长兴,蒋金. 磁化等离子鞘套中毫米波大气窗口的衰减 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(2): 10-14.
- LING Y F, CHEN C X, JIANG J. Research on Attenuation of Millimeter Wave Atmospheric Window Magnetized Plasma Sheath [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 17(2): 10-14. (in Chinese)
- [4] 李拴涛,李军,朱忠博,等. 等离子体鞘套中太赫兹波传输特性研究 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(2): 203-207.
- LI S T, LI J, ZHU Z B, et al. Studies on Terahertz Wave Propagation in Plasma Sheath [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(2): 203-207. (in Chinese)
- [5] 高平,李小平,谢楷. GPS导航系统再入黑障现象地面再现实验 [J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(2): 77-82.
- GAO P, LI X P, XIE K. Experiment on Reproducing the Continuous Blackout of The GPS System [J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(2): 77-82. (in Chinese)
- [6] 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 Z Y, ZHAO L, LIU X X. Influence of Reentry Plasma Sheath on TT&C Signals Transmission [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9): 1265-1269. (in Chinese)
- [7] 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 H. Research on the Simulation & Modeling of Reentry Spacecraft Plasma Sheath to Communication Attenuation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [8] HARTUNIAN R A, STEWART G E, FERGAON S D, et al. Cause and Mitigations Radio Frequency (RF) Blackout during Reentry of Reusable Vehicles [R]. ATR 2007(5309)-1.
- [9] KEIDAR M, KIM M, BOYD I D. Electromagnetic Reduction of Plasma Density during Atmospheric Reentry and Hypersonic Flights [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(3): 445-453.
- [10] 李伟,邱景辉,索莹,等. 降低电磁波在再入等离子体中衰减的仿真分析 [J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 825-829.
- LI W, QIU J H, SUO Y, et al. Simulation Analysis of Reducing Electromagnetic Wave Attenuation through Reentry Plasma [J]. Journal of Astronau-

- tics, 201, 31(3): 825-829. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 吕殿君, 王小辉, 詹景坤, 等. 飞行器通信黑障的原理与消除方法 [J]. 电子测试, 2016, 15(16): 33-35. LYU D J, WANG X H, ZHAN J K, et al. The Principle of the Aircraft Communication Blackout and Method of Elimination [J]. Electronic Test, 2016, 15(16): 33-35. (in Chinese)
- [13] STARKEY R P. Hypersonic Vehicle Telemetry Blackout Analysis [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(2): 426-438.
- [14] 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 Y H, LUO B, GUO W G, et al. Feasibility Analysis of Using Ka-band of TRDS to Support Wireless Communication for Spacecraft Reentry [J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(6): 582-588. (in Chinese)
- [15] 王家胜, 杨显强, 经姚翔, 等. 钝头型航天器再入通信黑障及对策研究 [J]. 航天器工程, 2014, 23(1): 6-16. WANG J S, YANG X Q, JING Y X, et al. on the Communication Blackout during Reentry of Blunt Nosed Spacecraft and Its Eliminating Approaches [J]. Spacecraft Engineering 2014, 23(1): 6-16. (in Chinese)
- [16] 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]. 航天器工程, 2015, 24(3): 1-8. WANG J S, JING Y X, YANG X Q, et al. on Approaches to Overcome Spacecraft Reentry Communication Blackout Using Satellite Relay [J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(3): 1-8. (in Chinese)
- [17] 文志军, 陈长兴, 凌云飞, 等. 中继法解决临近空间 Ka 波段通信黑障问题研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(6): 18-22. WEN Z J, CHEN C X, LING Y F, et al. The Research on Solution about Communications Blackout Problem in Ka-Band by Relay Method [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016, 17(6): 18-22. (in Chinese)
- [18] 方圆. 再入等离子鞘层中的电磁波传输特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. FANG Y. The Study on Transmission Properties of Electromagnetic Wave in Re-Entry Plasma Sheath [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [19] 康健, 王宇飞. 中国 Ka 波段卫星通信线路的雨衰分布特性 [J]. 通信学报, 2006, 27(8): 78-81. KANG J, WANG Y F. Rain Attenuation Distribution Characteristic of Ka-band Satellite Communication [J]. Journal on Communications, 2006, 27(8): 78-81. (in Chinese)
- [20] 梅妍玘, 傅荣. Ka 波段卫星通信雨衰问题的研究 [J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(3): 49-53. MEI Y P, FU R. Research into The Rain Attenuation of Satellite Communication in Ka Band [J]. Ship-board Electronic Countermeasure, 2016, 39(3): 49-53. (in Chinese)
- [21] 郑灵. 飞行器等离子鞘套对电磁波传输特性的影响研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013. ZHENG L. Study of Electromagnetic Wave Propagation in Spacecraft Plasma Sheath [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [22] 林淑鲜, 朱立东. Ka 波段雨衰减时间序列的合成及性能仿真 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(3): 188-191. LIN S X, ZHU L D. Generation of Rain Attenuation Time Series and Performance Simulations at Ka-Band [J]. Computer Simulation, 2013, 30(3): 188-191. (in Chinese)
- [23] 柳长源, 杨龙, 卢迪. 降雨衰减对移动卫星系统通信的影响及补偿 [J]. 信息技术, 2004, 28(6): 19-20. LIU C Y, YANG L, LU D. Rainfall Attenuation Effect to MSS Communication and compensation [J]. Information Technology, 2004, 28(6): 19-20. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)