

Q/V 频段电磁波在等离子体鞘套下的传输特性

王显煜^{1,2}, 孔 哲¹, 杨 敏¹

(1 西安电子科技大学空间科学与技术学院 西安 710100;

2 西安空间无线电技术研究所 西安 710100)

摘要: 高超声速飞行器再入地面时, 由于飞行器表面等离子体电子密度分布不均匀, 因此从背风面向天基中继卫星传输, 可避开迎风面的高电子密度, 并以 Q/V 频段为测控频段, 经中继卫星转发至地面测控站。本文以波阻抗方法为基础, 分析了 Q/V 频段在不同等离子体参数下的传输特性, 并仿真了等离子体对 Q/V 频段天线波束指向的影响。结果表明: Q/V 频段在等离子体中穿透性更好, 可在更高的等离子体电子密度和碰撞频率下保持较低的衰减。但 Q/V 频段下的天线波束指向偏差较大, 随着频段的提高和入射角度的减小, 偏差值逐渐减小。因此, 应用 Q/V 频段, 通过中继卫星转发实现实时通信, 有利于缓解再入飞行器“黑障”现象。

关键词: 中继转发; Q/V 频段; 波阻抗; 传输特性; 波束偏差

中图分类号: TN011; V443+.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)01-0022-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220413001

引用格式: 王显煜, 孔哲, 杨敏. Q/V 频段电磁波在等离子体鞘套下的传输特性[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 22-29.

Q/V band waves propagation characteristics in plasma sheath

WANG Xianyu^{1,2}, KONG Zhe¹, YANG Min¹

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an, 710100, China;

2. Academy of Space Electronic Information Technology, Xi'an, 710100, China)

Abstract: When the hypersonic aircraft re-enters the ground, due to the uneven distribution of the plasma electron density on the surface of the aircraft, the transmission from the leeward side to the space-based relay satellite can avoid the high electron density on the windward side, using the Q/V band waves as the communication band, the signal is forwarded to the ground communication station through the relay satellite. Based on the wave impedance method, this paper analyzes the transmission characteristics of the Q/V band under different plasma parameters and simulates the effect of the plasma on the antenna beam pointing in the Q/V band. The results show that the Q/V band has better penetration in the plasma and can maintain a lower attenuation value at higher plasma electron density and collision frequency. However, the antenna beam pointing deviation in the Q/V frequency band is relatively large, and the deviation value gradually decreases with the increase of the frequency band and the decrease of the incident angle. Therefore, using the Q/V band to realize real-time communication through relay satellite forwarding is conducive to alleviating the "blackout" phenomenon of re-entry aircraft.

Keywords: Communications relay; Q/V band; Wave impedance; Transmission characteristics; Beam deviation

Citation: WANG Xianyu, KONG Zhe, YANG Min. Q/V band waves propagation characteristics in plasma sheath [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 22-29.

引 言

当飞行器以高于十马赫的速度在临近空间飞行时, 前方空气被严重压缩, 产生激波, 空气分

子被部分电离, 附着在飞行器的外表面, 形成等离子体鞘套^[1], 造成通信中断, 形成“黑障”。飞行器的飞行姿态及内部流场的变化导致鞘套参数动态变化, 使得飞行器表面等离子体电子密度分

基金项目: 国家自然科学基金 (62071355)

通信作者: 孔哲 (kyroskong@163.com.)

收稿日期: 2022-04-13 修回日期: 2022-05-03

布不均匀。

针对“黑障”问题，目前可通过数据存储转发手段部分解决^[2,3]。但随着临近空间高超声速飞行器的发展，飞行全程都可能会遇到“黑障”问题，对全程实时可靠抗黑障高速测控通信的需求越来越迫切，现有设备能力和技术条件已很难满足要求。在飞行器各面处，背风面的等离子体电子密度远低于迎风面，发射天线放置在背风面通信的可靠性大于迎风面，且通过天基卫星进行中继转发，地面测控站可实时、准确地收到信号，为扩展信道资源研究提供一个方向^[4-7]。Q/V频段被认为是下一代甚高通量通信系统(Very High-Throughput Satellite, VHTS)的首选频段，其具有容量大、速率高、频段宽以及终端更加小型化的优势，相同的天线孔径可生成更小的卫星波束，穿透性更好^[8-10]。文献[11]通过阿尔法卫星 Aldo Paraboni 在 Q/V 频段执行了一项重要的科学实验活动，给出了信噪比的初步实验结果，从实验结果看出：Q/V 频段可得到更有效的利用。文献[12]演示了用于 Q/V 频段和 Ka 频段传播的有效载荷，探索了卫星通信的未来应用场景，并研究了地球大气如何影响电磁波传播。在国内，Q/V 波段测控通信方法已经通过搭载在实践二十号卫星上^[13]，实验验证了星地传输的可行性。若飞行器在测控频段处于 Q/V 频段时进行信息传输，需进一步分析 Q/V 频段在等离子体鞘套中的传输特性。同时随着频段提高，天线波束进一步集中，等离子体鞘套引起 Q/V 频段下天线波束指向偏差将不可忽视。文献[14]以“联盟号”飞船返回舱周围的流场分布为例，分析了飞行器在不同飞行速度、不同入射角度下的太赫兹波传输特性。文献[15]以 NASA 的 RAM C-III 再入飞行器试验结果为例，分析了外加磁场的作用下对太赫兹波传输特性的影响。文献[16]研究了不同电子密度分布的太赫兹波在八个飞行器再入高度的传播特性，结果表明：不同电子密度的变化形式和分布对太赫兹波的传播特性有着明显影响。文献[17]分析了在 S 频段下等离子体鞘套对相控阵天线入射波束的指向误差和对天线指向性的影响。文献[18]分析了 X 频段天线辐射对等离子体参数变化的敏感性低于 C 频段天线辐射，X 频段下波束指向性更准确。

综上所述，本文深入分析 Q/V 频段在不同等离子体密度、不同碰撞频率下的传输特性，并与

Ka 频段进行对比，对 Q/V 高频段带来的天线波束指向误差进行了分析。可为天基中继卫星来实现飞行器超远距离测控与通信提供理论支持。

1 传输机理

如图 1 所示，电磁波沿 xoz 平面斜入射到非均匀等离子体中，将厚层等离子体分为 n 层均匀等离子体薄片，在每层介质分界面处，电磁波都会产生透射反射效果，通过计算、叠加各个介质层的等效波阻抗，进而得到等离子体下的一系列特性。

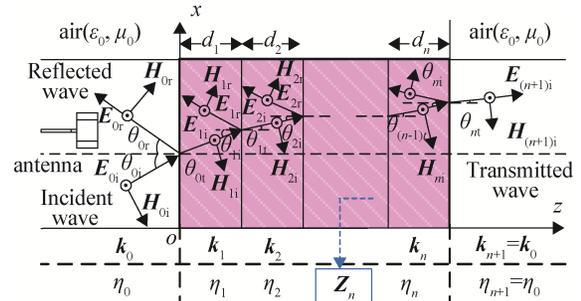


图 1 电磁波在非均匀等离子体中传播模型图

Fig. 1 Model diagram of electromagnetic wave propagation in inhomogeneous plasma

图 1 中， ϵ_0 与 μ_0 为真空介电常数和真空磁导率，对于每层的均匀等离子体薄片来说， $\omega_{p,n}$ 为第 n 层等离子体特征频率，则每层等离子体薄片下的复介电常数和传播矢量分别为^[19]：

$$\epsilon_r^{(n)} = \left(1 - \frac{\omega_{p,n}^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \cdot \frac{\nu}{\omega} \cdot \frac{\omega_{p,n}^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) \epsilon_0 \quad (1)$$

$$k_n = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r^{(n)}} \quad (2)$$

式中， ω 为入射电磁波角频率， c 为真空中的光速。图 1 中， θ_i 为入射角， θ_r 为反射角， θ_t 为透射角，由斯涅尔 (snell) 定律可知：

$$k_{n-1} \theta_{(n-1)i} = k_n \theta_{(n-1)t} \quad (3)$$

左边空气区域 ($z \leq 0$) 的电场和磁场为：

$$E_0 = e_y \left(E_{0i} \exp(-jk_0(\sin \theta_{0i}x + \cos \theta_{0iz}z)) + E_{0r} \exp(-jk_0(\sin \theta_{0r}x - \cos \theta_{0r}z)) \right) \quad (4)$$

$$H_0 = e_x \frac{\cos \theta_{0i}}{\eta_0} \left(-E_{0i} \exp(-jk_0(\sin \theta_{0i}x + \cos \theta_{0iz}z)) + E_{0r} \exp(-jk_0(\sin \theta_{0r}x - \cos \theta_{0r}z)) \right) + e_z \frac{\sin \theta_{0i}}{\eta_0} \left(E_{0i} \exp(-jk_0(\sin \theta_{0i}x + \cos \theta_{0iz}z)) + E_{0r} \exp(-jk_0(\sin \theta_{0r}x - \cos \theta_{0r}z)) \right) \quad (5)$$

式中, η_0 与 k_0 分别为真空中的波阻抗和传播矢量, 分别为:

第 n 层等离子体薄片内的电磁波电场 E_n 和磁场 H_n

$$E_n = e_y \left(E_{ni} \exp \left(-jk_n \left(\sin \theta_{ni} x + \cos \theta_{ni} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) + E_{nr} \exp \left(-jk_n \left(\sin \theta_{nr} x - \cos \theta_{nr} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) \right) \quad (6)$$

$$H_n = e_x \frac{\cos \theta_{ni}}{\eta_n} \left(-E_{ni} \exp \left(-jk_n \left(\sin \theta_{ni} x + \cos \theta_{ni} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) + E_{nr} \exp \left(-jk_n \left(\sin \theta_{nr} x - \cos \theta_{nr} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) \right) + \quad (7)$$

$$e_z \frac{\sin \theta_{ni}}{\eta_n} \left(E_{ni} \exp \left(-jk_n \left(\sin \theta_{ni} x + \cos \theta_{ni} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) + E_{nr} \exp \left(-jk_n \left(\sin \theta_{nr} x - \cos \theta_{nr} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) \right)$$

右边空气区域 ($z \geq d$) 中的电场 E_{n+1} 和磁场 H_{n+1} 分别为:

$$E_{n+1} = e_y E_{(n+1)i} \exp \left(-jk_{n+1} \left(\sin \theta_{(n+1)i} x + \cos \theta_{(n+1)i} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) \quad (8)$$

$$H_{n+1} = -e_x \frac{\cos \theta_{nt}}{\eta_{n+1}} E_{(n+1)i} \exp \left(-jk_{n+1} \left(\sin \theta_{nt} x + \cos \theta_{nt} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right) + \quad (9)$$

$$e_z \frac{\sin \theta_{ni}}{\eta_{n+1}} E_{(n+1)i} \exp \left(-jk_{n+1} \left(\sin \theta_{ni} x + \cos \theta_{ni} \left(z - \sum_{m=1}^n d_m \right) \right) \right)$$

在 $z=0$ 和 $z=d$ 的边界上应用连续性条件, 由式(3)~式(9)可得到 $z=d$ 分界面的反射与透射系数如下所示:

$$\Gamma_{n+1} = \frac{\eta_{n+1} \cos \theta_{ni} - \eta_n \cos \theta_{nt}}{\eta_{n+1} \cos \theta_{ni} + \eta_n \cos \theta_{nt}} \quad (10)$$

$$T_{n+1} = \frac{\eta_{n+1}}{\eta_n} (1 + \Gamma_n) \quad (11)$$

通过式(10)、式(11)迭代出各层的等效波阻抗与反射系数、透射系数分别为:

$$Z_m = \eta_m \frac{1 + \Gamma_{m+1} \exp(-j2k_m d_m \cos \theta_{mi})}{1 - \Gamma_{m+1} \exp(-j2k_m d_m \cos \theta_{mi})} \quad (12)$$

$$\Gamma_m = \frac{Z_m \cos \theta_{(m-1)i} - \eta_{m-1} \cos \theta_{mi}}{Z_m \cos \theta_{(m-1)i} + \eta_{m-1} \cos \theta_{mi}} \quad (13)$$

$$T_m = \frac{(1 + \Gamma_m) \exp(-j2k_m d_m \sec \theta_{mi})}{1 + \Gamma_{m+1} \exp(-j2k_m d_m \sec \theta_{mi})} \quad (14)$$

式中, $m=n, n-1, \dots, 1$ 。故总的反射系数、透射系数和衰减值分别如下:

$$\Gamma = \Gamma_1 \quad (15)$$

$$T = \prod_{m=1}^{n+1} T_m \quad (16)$$

$$Att = -10 \lg T^2 \quad (17)$$

2 仿真模型与结果分析

2.1 仿真模型

图 2 为 NASA 测量的不同高度下 RAM-C 飞行器表面覆盖等离子体鞘套厚度与电子密度的分布曲线。由图可知: 不同高度下二者均有着较大差

异。图 3 为 RAM-C 再入飞行器在 53 km 时电子密度实测值和双高斯分布的拟合值, 可以看到: 曲线吻合度较高, 故以下仿真皆采用双高斯曲线来模拟等离子体鞘套密度分布。

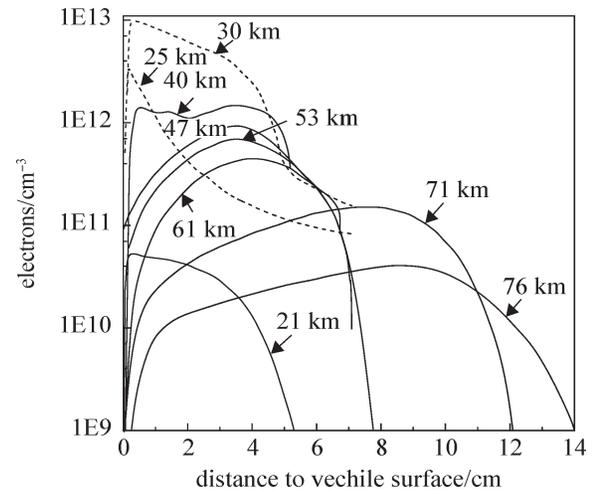


图 2 RAM-C 飞行试验下的等离子体鞘套密度分布

Fig. 2 The density distribution of plasma sheath under the RAM-C flight test

双高斯分布模型如下:

$$N_e(z) = \begin{cases} n_{e \max} e^{-\alpha_1(z-z_0)^2}, & 0 \leq z \leq z_0 \\ n_{e \max} e^{-\alpha_2(z-z_0)^2}, & z_0 \leq z \leq z_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中, $n_{e \max}$ 为等离子体鞘套最大电子密度, z 为鞘套到飞行器表面的距离, α_1 和 α_2 是描述双高斯分布形

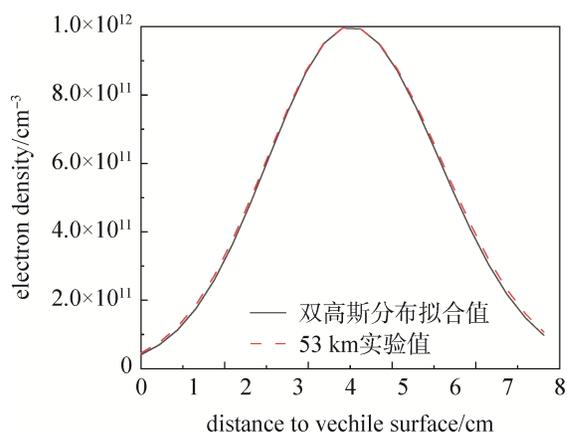


图3 RAM-C试验中电子密度实测值与拟合值

Fig. 3 Measured and fitted values of electron density in RAM-C experiment

状的参量, 本文仿真等离子体薄片共分100层。

2.2 不同等离子体电子密度下的传输特性

本节分析了Q/V频段(30 GHz~80 GHz)电磁波垂直入射不同等离子体电子密度的传输特性, 并与Ka频段(20 GHz~40 GHz)对比。根据图2中

RAM-C飞行试验数据, 选取等离子体峰值电子密度 $10^{10} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 之间, 等离子体碰撞频率10 GHz, 鞘套厚8 cm。图4(a)和图4(d)给出了Ka频段和Q/V频段的反射系数对比图。随着入射波频率的增大, 反射系数随之减小, 同一等离子体电子密度情况下, Q/V频段的反射系数相较Ka频段约减小10 dB; 随着等离子体电子密度的增大, 反射系数逐渐增大。图4(b)和图4(e)为Ka频段和Q/V频段的透射系数对比图, 可以看出, 电磁波入射频率和透射系数成正比, 等离子体电子密度的逐渐增大使得透射系数减小, 原因是较大的电子密度使入射波能量被大量吸收和反射, 故透射率变小。由图4(e)可得, 当等离子体峰值电子密度达到 10^{13} cm^{-3} , Q/V频段透射系数可达到-5 dB以上, 透射效果明显好于Ka频段。

图4(c)和图4(f)给出了Ka与Q/V频段的透射相位曲线, 可以看出, 透射系数相位随频段的提高而增大, 这是由于电磁波传播一个周期内的个数与其频段成正比, 周期内相移变化最大为 360° ,

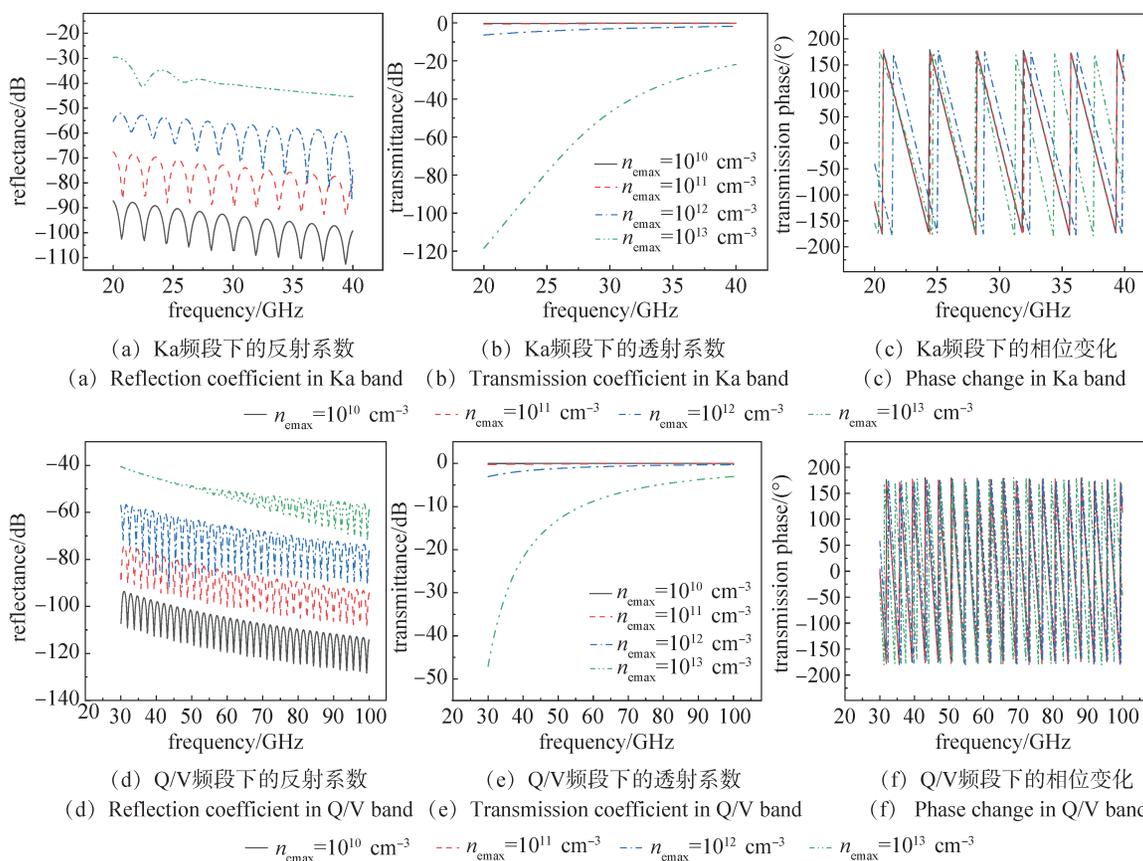


图4 Ka、Q/V频段电磁波在不同等离子体电子密度下的反射系数、透射系数、相位变化

Fig. 4 Reflection coefficient, transmission coefficient, phase change of EM waves in Ka and Q/V bands under different plasma electron densities

故相移正比于电磁波频段。但等离子体电子密度的变化对透射系数相位并无影响。

从图 5 可得, 等离子体电子密度的不断增大使得电磁波在等离子体鞘套中的衰减值逐渐增大。当等离子体电子密度峰值达到 10^{13} cm^{-3} , 等离子体特征频率约为 30 GHz 时, 对于 Ka 波段 (以 30 GHz 为例), 等离子体特征频率等于电磁波入射频率, 电磁波衰减愈加严重; 而 Q/V 频段 (以 70 GHz 为例) 须等离子体电子密度达到 $6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 时, 等离子体特征频率才会大于电磁波的入射频率, 故不会发生截止情况, 且 Q/V 频段电磁波衰减基本在 15 dB 以内。

2.3 不同等离子体碰撞频率下的传输特性

本节分析了 Q/V 频段电磁波垂直入射不同等离子体碰撞频率下的传输特性, 并与 Ka 频段对比。参考图 2 中 RAM-C 飞行试验数据, 等离子体碰撞频率取 0.1 GHz~100 GHz, 等离子体峰值电子密度为 10^{13} cm^{-3} , 此时等离子体特征频率约为 30 GHz, 鞘套厚 8 cm, 电磁波垂直入射等离子体。由图 6(a) 和图 6(d) 可得, 电磁波入射频率小于 30 GHz 时, 反射系数随等离子体碰撞频率增大而减小, 当电

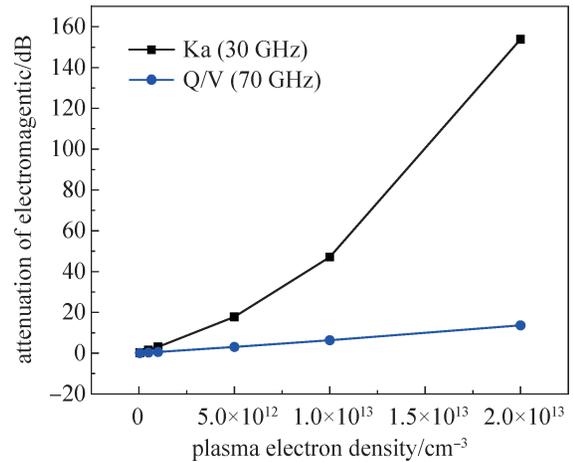


图 5 等离子体电子密度对电磁波的衰减
Fig. 5 Attenuation of electromagnetic waves by plasma electron density

磁波频率大于 30 GHz 时, 反射系数曲线趋向重合, 此时碰撞频率的变化不再对反射系数产生影响。图 6(b)和图 6(e)中, 透射系数与等离子体碰撞频率成反比, 但当等离子体碰撞频率很大时 (图中为 100 GHz), 透射系数反而比低碰撞频率时大, 这

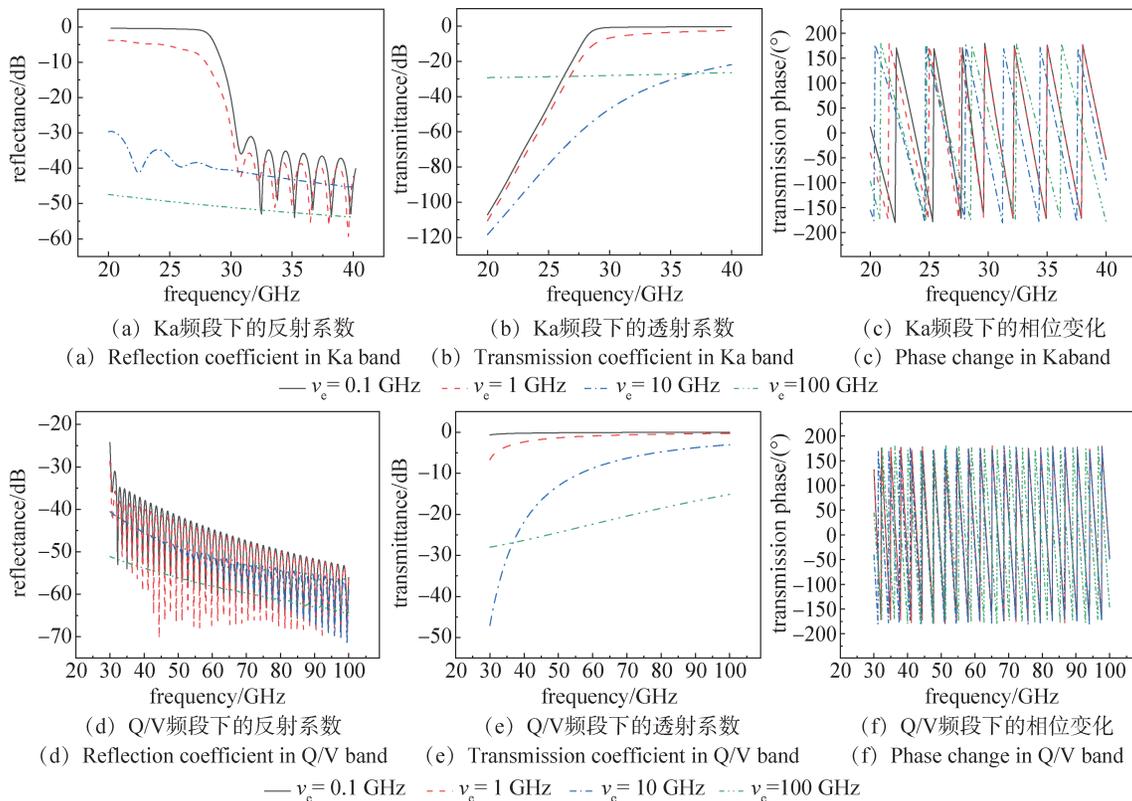


图 6 Ka、Q/V 频段电磁波在不同等离子体碰撞频率下的反射系数、透射系数、相位变化

Fig. 6 Reflection coefficient, transmission coefficient, phase change of EM waves in Ka and Q/V bands under different plasma collision frequency

是因为当等离子体碰撞频率很大时，电子与电场相互作用的时间很短，电子没能从电波中吸收较多能量便与中性粒子产生了碰撞，吸收减小，因此透射效果变好。图 6(c)和图 6(f)表明，等离子体碰撞频率的增大对相位曲线变化基本没有影响，此时影响相位变化的是电磁波频率和等离子体鞘套的厚度。

由图 7 可得，随着等离子体碰撞频率增大，电磁波在等离子体鞘套中的衰减也逐渐增大，但等离子体碰撞频率大于 50 GHz 时，衰减呈减小趋势，其机理与图 6(b)特性曲线一致。且 Q/V 频段的电磁波相较于 Ka 波段，在同等离子体状态参数一致的情况下，衰减更小，因此透射效果会更好，信道容量增大。

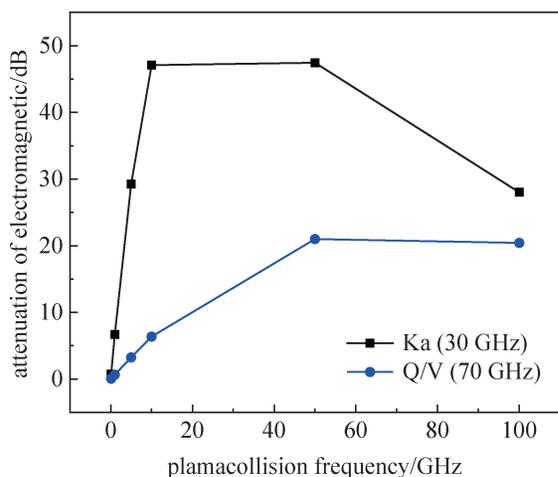


图 7 等离子体碰撞频率对电磁波的衰减

Fig. 7 Attenuation of electromagnetic waves by different plasma collision frequency

3 波束指向分析

等离子体鞘套会对天线辐射的电磁波产生强烈的反射作用，本节用 CST 中的 Drude 模型模拟等离子体鞘套，如图 8 所示：

模型长、高均为 140 mm，宽 130 mm（即等离子体鞘套厚度），在模型中设置等离子体电子密度 10^{13} cm^{-3} ，等离子体碰撞频率为 10 GHz，采用高频喇叭天线作为馈源。此时从远场方向图分析得到天线波束指向偏差，由图 9(a)可得，天线波束偏差随着入射角的增大而增大，其中最大波束偏差达到了 9°。图 9(b)中，当电磁波入射角度小于 30° 时，等离子体鞘套造成的波束指向偏差很小，但随着入射角度的增大，波束偏差在抖动中逐渐变大，但最

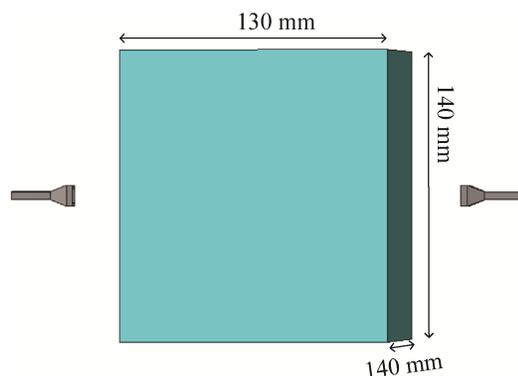
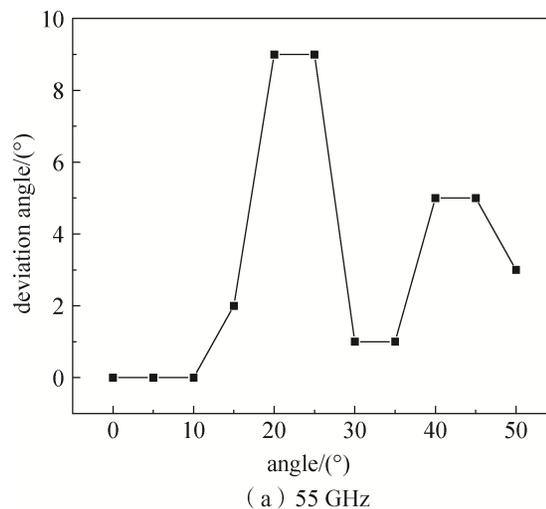


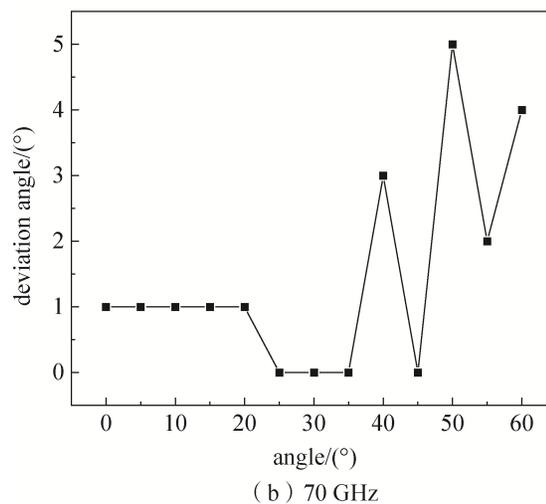
图 8 等离子体区仿真模型

Fig. 8 Plasma region simulation model

大偏差不超过 5°。可见，随着天线工作频率的增大，等离子体鞘套对天线波束指向影响减小。



(a) 55 GHz



(b) 70 GHz

图 9 等离子体鞘套对不同入射角度下的天线波束偏差

Fig. 9 Antenna beam deviation of plasma sheath for different incident angles

4 结束语

通过构建非均匀等离子体模型, 本文仿真计算了 Q/V 频段电磁波在等离子体电子密度、碰撞频率变化下的传输特性并与目前飞行器测控频段 Ka 波段进行对比, 且对等离子体鞘套下的高频段天线波束指向偏差进行了分析。结果表明: 等离子体电子密度和碰撞频率的增大使得 Q/V 频段下电磁波的传输损耗逐渐增大, Q/V 频段较之 Ka 频段穿透性更好。Q/V 频段下会产生一定的波束指向偏差, 且当飞行器天线辐射电磁波的传播方向垂直于等离子体鞘套时, 天线的指向精度更高, 传输性能更好。因此, 以 Q/V 频段为测控频段, 从背风面向天基中继卫星传输, 是解决通信“黑障”问题的一个研究方向。

参考文献

- [1] 王柏懿. 再入等离子鞘的电波传播特性[J]. 宇航学报, 1982(2): 81-101.
WANG Baiyi. Propagation properties of reentry plasma sheath for electromagnetic wave[J]. Journal of Astronautics, 1982(2): 81-101.
- [2] 赵良, 刘秀祥, 苏汉生. 高超声速飞行器等离子体鞘套相关问题研究与展望[J]. 遥测遥控, 2015, 36(5): 28-32.
ZHAO Liang, LIU Xiuxiang, SU Hansheng. Study and prospect on some issues of plasma sheath of hypersonic vehicle[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 28-32.
- [3] 陈伟. 等离子体鞘套的电磁波传播与散射关键问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [4] 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 Wenge, 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.
- [5] 喻明浩, 邱泽洋. 飞行器大气再入过程中黑障缓解方法综述[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(2): 1-12.
YU Minghao, QIU Zeyang. Review of blackout mitigation methods for vehicles during the atmospheric reentry [J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(2): 1-12.
- [6] 龚旻, 谭杰, 李大伟, 等. 临近空间高超声速飞行器黑障问题研究综述[J]. 宇航学报, 2018, 39(10): 1059-1070.
GONG Min, TAN Jie, LI Dawei, et al. Review of blackout problems of near space hypersonic vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(10): 1059-1070.
- [7] 魏金鑫. 临近空间高速飞行器低轨卫星中继通信方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
ALOISIO M, ANGELETTI P, COROMINA F, et al. Exploitation of Q/V-band for future broadband telecommunication satellites[C]//IVEC 2012. IEEE, 2012: 351-352.
- [8] 郝才勇. Q/V 频段 NGSO 卫星通信进展[J]. 中国无线电, 2018(8): 33-35.
- [9] 袁丽, 王悦, 王权, 等. Q/V 频段卫星通信发展现状与关键技术分析[J]. 无线电工程, 2021, 51(1): 78-86.
YUAN Li, WANG Yue, WANG Quan, et al. Analysis of the development status and key technologies of Q/V band satellite communication[J]. Radio Engineering, 2021, 51(1): 78-86.
- [10] ROSSI T, DE SANCTIS M, RUGGIERI M, et al. Satellite communication and propagation experiments through the alphasat Q/V band Aldo Paraboni technology demonstration payload[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(3): 18-27.
- [11] CUERVO F, MARTELLUCCI A, RIVERA CASTRO J, et al. The Alphasat Aldo Paraboni scientific and communication experiments at Ka and Q/V bands in Austria[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(5): 437-448.
- [12] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成[J]. 国际太空, 2020(7): 38-41.
- [13] 陈锴, 耿兴宁, 李吉宁, 等. 太赫兹波在高速飞行器等离子体鞘套中的传输特性[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(5): 421-427.
CHEN Kai, GENG Xingning, LI Jining, et al. Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath of high-speed aircraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(5): 421-427.
- [14] 耿兴宁, 徐德刚, 李吉宁, 等. 太赫兹波在飞行器等离子体鞘套中的传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(3): 74-79.
GENG Xingning, XU Degang, LI Jining, et al. Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath around air vehicle[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(3): 74-79.
- [15] CHEN W, YANG L, HUANG Z, et al. Propagation characteristics of THz waves in space-time inhomogeneous and fully ionized dusty plasma sheath[J]. Journal of

- Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 232: 66-74.
- [16] BAI B, LIU Y, LIN X, et al. Effects of a reentry plasma sheath on the beam pointing properties of an array antenna[J]. AIP Advances, 2018, 8(3): 035023.
- [17] GENG X, XU D, LI J, et al. Terahertz wave propagation characteristics in plasma sheath around a hypersonic blunt cone[J]. Optik, 2020, 206: 163633.
- [18] 胡希伟. 等离子体理论基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [19] 李小平. 高速飞行器等离子体鞘套电磁波传播理论与通信技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[作者简介]

王显煜 1983年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络和人工智能。

孔 哲 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁传播。

杨 敏 1986年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为临近空间通信系统建模和等离子体诊断。

(本文编辑: 傅 杰)