doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.017
引用格式: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 Zuo-yi,ZHAO Liang,LIU Xiu-xiang. Influence of Reentry Plasma Sheath on TT&C Signals Transmission[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(9):1265-1269.]

再入等离子鞘套对测控信号传输的影响*

张作一**,赵　良,刘秀祥

(空间物理重点实验室,北京 100076)

摘　要:高超声速飞行器再入大气层时,会在飞行器周围产生一层等离子鞘套,对测控信号的传输产生严重的影响。为分析等离子鞘套对测控信号的影响,提出了一种非均匀等离子鞘套自适应分层模型,并仿真计算了电磁波在 RAM-C 典型再入等离子鞘套中的透射衰减情况,进而得出各频段测控信号进出"黑障"的高度。经与 NASA 报告中实测数据进行对比,"黑障"高度吻合得很好。在实际型号试验中的应用也证明了该方法的有效性。结果表明,该方法可以较好地模拟测控信号在再入等离子鞘套中的传播情况,将来可用于对"黑障"现象的进一步研究。

关键词:高超声速飞行器;测控信号;等离子鞘套;再入黑障
中图分类号:V556.4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-893X(2014)09-1265-05

Influence of Reentry Plasma Sheath on TT&C Signals Transmission

ZHANG Zuo-yi,ZHAO Liang,LIU Xiu-xiang

(Science and Technology on Space Physics Laboratory,Beijing 100076,China)

Abstract:In the reentry process of hypersonic vehicles,there is a layer of plasma sheath around the aircraft,which seriously influences the transmission of telemetry,track and command(TT&C) signals. An adaptive stratified model of inhomogeneous plasma sheath is proposed to analyze the influence of TT&C signals through plasma sheath. By simulating the transmission attenuation of electromagnetic waves in the RAM-C typical reentry plasma sheath,the blackout altitudes of TT&C signals are obtained. Comparing the results with the data in NASA's report shows the two correspond very well. The actual flight tests also demonstrate the effectiveness of this method. It indicates that the method can simulate the transmission characteristic of electromagnetic waves in reentry plasma sheath and can be used in further research of the blackout phenomenon.

Key words:hypersonic vehicle;TT&C signals;plasma sheath;reentry blackout

1　引　言

高超声速飞行器再入大气层时,由于空气密度较大,飞行器与空气发生强烈摩擦,进而在飞行器头部形成激波,导致气体温度和压力急剧升高而电离,在飞行器周围产生等离子鞘套。等离子鞘套对电磁波具有强烈的反射、折射和吸收作用,从而对飞行器测控信号的传输产生严重影响,严重时甚至造成测控信号的中断,即"黑障"问题[1]。例如,我国"神州 9 号"飞船再入过程中,就出现长达三四分钟的"黑障"现象。因此,研究等离子鞘套对飞行器测控信

*　**收稿日期**:2014-01-08;**修回日期**:2014-05-27　Received date:2014-01-08;Revised date:2014-05-27
**　**通讯作者**:zhangzy2@126.com　**Corresponding author**:zhangzy2@126.com

号的影响是十分必要的。

针对再入飞行器通信“黑障”问题,国内外学者开展了大量的研究。Ginzburg 等人为电磁波在等离子体中的传播研究奠定了理论基础[2],Shi J M 采用分层介质的方法研究了电磁波入射到非均匀等离子体中的衰减特性[3]。在国内,等离子体及等离子体隐身技术一直是相关高校和研究机构的重点研究方向之一[4]。国防科技大学、西安电子科技大学等高校的研究人员对等离子体中的电磁波传播特性进行了深入研究[5-6]。然而,目前大多数工作都是利用人为设定或者实验室条件下的等离子体模型,对电磁波在其中的传播特性进行理论分析或数值计算,很少有针对实际再入等离子鞘套模型中测控信号传播问题的研究。

美国国家航空航天局(NASA)于 20 世纪 60 年代开展了 RAM(Radio Attenuation Measurement)系列飞行试验,对钝锥体再入过程中的等离子鞘套特性及无线电信号衰减进行了测量,目前已公开部分试验结果[7]。本文利用 RAM-C 飞行试验的等离子鞘套数据,提出了一种非均匀等离子鞘套自适应分层模型,分析电磁波在其中的传播特性,并给出不同再入高度下测控信号穿过等离子鞘套的衰减情况,对再入“黑障”高度进行了预测,结果与实际情况符合得较好。

2 物理模型

2.1 再入等离子鞘套

等离子鞘套是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系,它具有数密度近似相等的自由电子和正离子,也可能存在中性粒子,在整体上呈电中性[8]。等离子鞘套通常由两个重要的特征参数来描述,即等离子体频率 ω_p 和碰撞频率 ν。等离子体频率描述外界某种扰动引起等离子体内部电子和离子的振荡情况,碰撞频率则描述单位时间内等离子体中各种粒子发生碰撞的次数。等离子体频率的定义为[8]

$$\omega_p = (N_e e^2/\varepsilon_0 m_e)^{1/2} \quad (1)$$

式中,N_e 是等离子体中自由电子密度,e 和 m_e 分别是单电子的电量和质量,ε_0 是真空中的介电常数。由式(1)可知,等离子体频率取决于等离子体中的自由电子密度。

实际再入过程中,不同外形的飞行器等离子鞘套分布也有所不同,本文利用 NASA RAM-C 试验中典型钝头飞行器的等离子鞘套数据进行分析。由于在再入飞行器表面,垂直方向等离子体参数的变化率远大于沿表面方向[9],因此可以认为沿飞行器表面方向等离子体参数近似一致。图 1 给出了不同高度下 RAM-C 试验中垂直于再入飞行器表面方向的等离子体电子密度分布[10]。可以看出,不同高度的再入等离子鞘套电子密度分布差异很大。

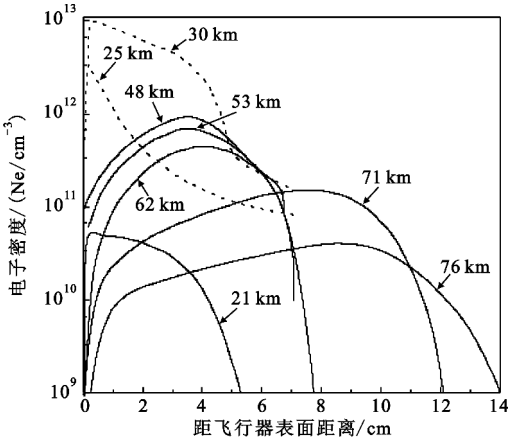


图 1 不同高度下 RAM-C 飞行器表面电子密度分布

Fig. 1 Electron density profiles at different altitudes for RAM-C vehicles

垂直于再入飞行器表面方向的等离子体碰撞频率可以认为是近似均匀分布的[11],Bachynski 等人[12]给出了不同高度下不同气体温度的碰撞频率曲线。本文选取典型锥形再入飞行器表面温度 T=2 000 K[13],依据 Bachynski 等人的结果,得到 RAM-C 飞行器再入过程中典型高度的碰撞频率数据,如表 1 所示。

表 1 不同高度下的碰撞频率(T=2 000 K)

Table 1 Collision frequencies in different typical altitudes(T=2 000 K)

高度/km	碰撞频率/GHz	高度/km	碰撞频率/MHz
21	23.00	53	175.00
25	13.18	62	49.92
30	5.71	71	11.82
48	0.42	76	5.37

2.2 非均匀等离子鞘套分层模型

真实环境中的再入等离子鞘套是一种具有频率色散和折射效应的非均匀有耗介质,精确分析电磁波与非均匀等离子鞘套的相互作用机理十分复杂。

通常的研究中,对于按某种规律分布的非均匀等离子鞘套,可将其分成若干厚度相等的均匀等离子体薄层。而对于实际再入等离子鞘套,由于其电子密度分布极其不均匀,本文采取了一种自适应的非均匀等离子鞘套分层模型,按照相邻均匀薄层等离子体电子密度相差不超过 10% 来划分边界,即电子密度变化剧烈的位置分层间距也较小,相应的均匀薄层厚度较薄。这样,既能较精确模拟非均匀等离子鞘套,又能防止计算网格数过大,并可用于对各种不同外形的再入飞行器等离子鞘套进行分析。

分层模型中,每一薄层等离子体的参数根据2.1节中的参数分布规律来选取,从而非均匀等离子鞘套的电磁特性可以由每一薄层的等离子体频率 ω_p 和碰撞频率 ν 来建立。假设等离子鞘套被分成 n 层均匀薄层等离子体,则其中第 m 个薄层等离子体的相对复介电系数为[8]

$$\varepsilon_r^m=\left[1-\frac{\omega_{p,m}^2}{\omega^2+v^2}-i\,\frac{\omega_{p,m}^2(v/\omega)}{\omega^2+v^2}\right] \tag{2}$$

式中,$\omega_{p,m}$ 为第 m 层等离子体的特征频率,ν 为该高度下的碰撞频率。

图 2 给出了76 km高度处等离子鞘套的分层模型示意图,该模型按电子密度分布情况将等离子鞘套分为 40 层。在 0 ~ 3 cm和 12 ~ 14 cm处,由于电子密度变化较为剧烈,分层时每一薄层厚度也较小,其他位置分层厚度则较大。同理,可以得到其他各个高度的等离子鞘套分层模型。

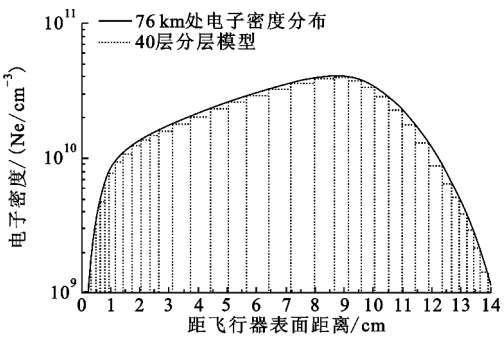


图 2　非均匀等离子鞘套分层模型

Fig. 2 Inhomogeneous plasma sheath stratified model

2.3　非均匀等离子鞘套电磁波透射系数

电磁波在分层等离子鞘套中传输时,在各个边界上发生多次反射和透射,每个薄层中都有入射波和反射波同时存在,传播示意图如图 3 所示。

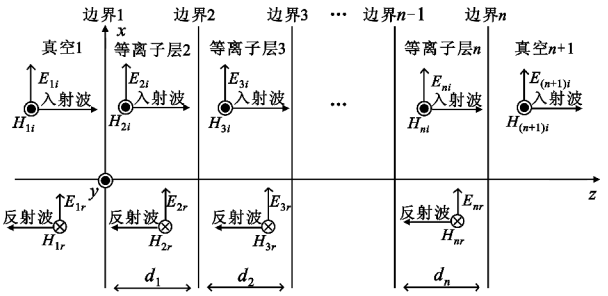


图 3　电磁波在分层等离子鞘套中传播

Fig. 3 Propagation of electromagnetic wave in plasma sheath stratified model

为了得到电磁波在多层等离子体中传播的透射系数,通常采用等效波阻抗法进行分析。在第 m 层等离子体中,总电场强度和总磁场强度可以表示为

$$E_m=e_x\left(E_{mi}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_m\left(z-\sum_{i=1}^{m}d_i\right)}+E_{mr}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_m\left(z-\sum_{i=1}^{m}d_i\right)}\right) \tag{3}$$

$$H_m=e_y\,\frac{1}{\eta_m}\left(H_{mi}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_m\left(z-\sum_{i=1}^{m}d_i\right)}-E_{mr}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_m\left(z-\sum_{i=1}^{m}d_i\right)}\right) \tag{4}$$

式中,$k_m=\omega\sqrt{\mu_m\varepsilon_m}$、$\eta_m=\sqrt{\mu_m/\varepsilon_m}$ 分别为第 m 层等离子体的波数和波阻抗。

利用式(3) ~ (4)及各个边界面的边界条件,可以得到各层边界面上电磁波反射、透射系数的递推关系式[14]:

$$\Gamma_m=\frac{Z_{m+1}-\eta_m}{Z_{m+1}+\eta_m} \tag{5}$$

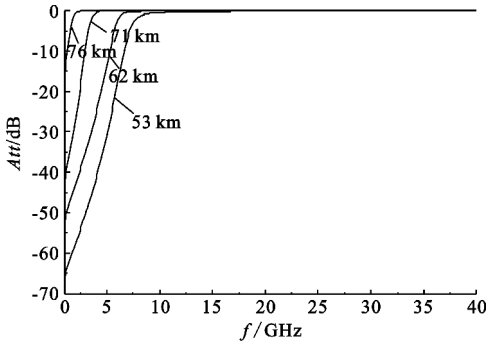
$$T_m=\frac{(1+\Gamma_m)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_{(m+1)}d_{m+1}}}{1+\Gamma_{m+1}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2k_{(m+1)}d_{m+1}}} \tag{6}$$

其中,$Z_m=\eta_m\,\dfrac{1+\Gamma_m\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2k_md_m}}{1-\Gamma_m\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2k_md_m}}$ 为第 m 层等离子体的等效波阻抗。由于最后一层介质中的入射波不再反射,因而最后一层边界面的反射、透射系数很容易得到,即 $\Gamma_n=\dfrac{\eta_{n+1}-\eta_n}{\eta_{n+1}+\eta_n}$ 和 $T_n=1+\Gamma_n$。这样根据式(5) ~ (6)便可以从最后一层逐渐向前迭代,计算得到各层边界面的反射、透射系数值。于是得到电磁波穿过非均匀等离子鞘套的透射衰减为

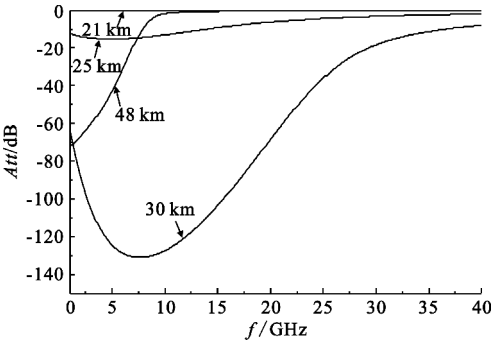
$$Att=20\lg\left|\prod_{i=1}^{n}T_i\right| \tag{7}$$

3　仿真结果与分析

根据 2.1 节中 8 个典型高度的实际再入等离子鞘套参数,分别建立其分层模型,并仿真计算电磁波穿过等离子鞘套的衰减情况。目前实际测控信号频段一般在40 GHz以内,因此设定电磁波频率范围为 1.0 ~ 40 GHz,仿真结果如图 4 所示。



(a) h=53 km,62 km,71 km,76 km



(b) h=21 km,25 km,30 km,48 km

图 4 电磁波通过不同高度等离子鞘套衰减情况
Fig. 4 Attenuation of electromagnetic wave through plasma sheath at different altitudes

为将仿真结果与 NASA 实测结果进行对比,这里参考 NASA 报告中所给出的信号频段,选取了 L、S、C、X 频段的 4 个典型频率值1.5 GHz、3.0 GHz、5.7 GHz和9.2 GHz,得到各高度下测控信号穿过等离子鞘套衰减情况,如表 2 所示。

表 2 各频段测控信号穿过等离子鞘套衰减情况
Table 2 Attenuation of TT&C signals through plasma sheath

高度/km	衰减/dB			
	L 频段	S 频段	C 频段	X 频段
76	-6.64	-0.03	-0.004	-0.001
71	-35.50	-9.57	-0.030	-0.010
62	-47.60	-35.20	-5.480	-0.100
53	-61.90	-50.40	-22.400	-0.620
48	-69.80	-60.30	-35.200	-3.160
30	-76.50	-104.90	-127.500	-129.300
25	-13.20	-14.70	-15.300	-13.600
21	-0.47	-0.47	-0.450	-0.410

在中高空(30 km 以上),由于碰撞频率很低,等离子鞘套电子密度是影响电磁波传播的主要因素。从图 4 中可以看出,随着飞行器高度降低,等离子鞘套电子密度逐渐增加,导致电磁波衰减逐渐增大,并且频率越高的电磁波衰减越小,因此低频信号要比高频信号进入“黑障”的高度高。

到了低空,碰撞频率迅速增大,而由于飞行器已经减速,等离子鞘套电子密度逐渐降低,这时碰撞频率引起的共振吸收成为影响电磁波传播的主要因素。此时存在一个电磁波衰减的峰值频率,因而在一定频率范围内,高频信号的衰减反而要大于低频信号,这在30 km和25 km高度的数据里可以明显看出。这意味着,在这段频率的信号中,低频信号将比高频信号更早离开“黑障”。

NASA 试验中测控信号的链路余量在30 dB左右[7],因此可以认为当信号衰减达到或恢复至30 dB时,飞行器进入或离开“黑障”。由此根据表 2 中的数据,估算出各频段测控信号进入和离开“黑障”的高度值,并与 RAM-C 试验实测“黑障”高度[15]进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 各频段测控信号“黑障”高度
Table 3 Blackout altitudes of TT&C signals

频段	进入“黑障”高度/km		离开“黑障”高度/km	
	理论计算	NASA 报告	理论计算	NASA 报告
L	72 ~ 73	73	26 ~ 27	25
S	63 ~ 64	65	26 ~ 27	25
C	49 ~ 50	51	25 ~ 26	24
X	40 ~ 45	44	25 ~ 26	23

由表 3 可以看出,实测结果是 L 频段进入“黑障”高度最高,X 频段最低,这验证了上文频率越低进入“黑障”高度越高的分析,而且实测各频段进入“黑障”的高度与理论计算值均相差不大。无论理论结果还是实测数据,各频段离开“黑障”高度都相差很小,但低频信号确实比高频信号更早离开“黑障”,这也很好地验证了前文理论分析的结论。用同样的方法在型号工作中对飞行试验“黑障”情况进行了预测,结果与最后的试验情况也较为相符。可见,本文的理论计算结果有一定的实际参考价值,可用于模拟电磁波在再入等离子鞘套中的传播特性,对飞行试验“黑障”情况进行分析和预测。

4 结 论

本文提出了一种对实际再入等离子鞘套进行自适应分层的方法,直接对电磁波在实际再入等离子鞘套中的传播情况进行了仿真分析,从而对“黑障”

情况进行预测。仿真结果表明,再入飞行器通信“黑障”主要发生在25 ~ 70 km的高度上。在中高空,频率越高的信号,在等离子鞘套中的衰减越小,进入“黑障”的高度也越低;而低空由于碰撞频率较大,引起电磁波的共振吸收,导致在常用测控频段内,低频信号可能比高频信号更早离开“黑障”。仿真计算结果与试验实测数据基本相符,验证了本文等离子体分层模型及其中电磁波透射衰减算法的合理性,后续可结合型号飞行试验进一步对“黑障”问题进行深入研究。

参考文献:

[1] Rybak, Causes J P. Effects and diagnostic measurements of the reentry plasma sheath[R]//AD0718428. Fort Belvoir, Virginia: Defence Technial Information Center, 1970.

[2] Ginzberg V L. The propagation of electromagnetic waves in plasma[M]. New York: Pergamon Press, 1970.

[3] Shi J M. Scattering cross-section of an inhomogeneous plasma cylinder[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 16(3): 19-27.

[4] 潘文俊,童创明,周明. 等离子体与等离子体隐身技术[J]. 电讯技术,2009,49(8):11-16.
PAN Wen-jun, TONG Chuang-ming, ZHOU Ming. Plasma and Plasma Stealth Technology[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(8): 11-16. (in Chinese)

[5] 郑灵,赵青,罗先刚,等. 等离子体中电磁波传输特性理论与实验研究[J]. 物理学报,2012,61(15):155203.
ZHENG Ling, ZHAO Qing, LUO Xian-gang, et al. Theoretical and experimental studies of electromagnetic wave transmission in plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(15): 155203. (in Chinese)

[6] 李江挺,郭立新,金莎莎,等. 等离子体鞘套中的电磁波传播特性研究[J]. 电波科学学报,2011,33(3):494-500.
LI Jiang-ting, GUO Li-xin, JIN Sha-sha, et al. Studies of of electromagnetic wave transmission characteristics in plasma sheath[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 33(3): 494-500. (in Chinese)

[7] National Aeronautics and Space Administration. The entry plasma sheath and its effects on space vehicle electromagnetic systems[R]. Washington DC: NASA, 1970.

[8] 庄钊文,袁乃昌,刘少斌,等. 等离子体隐身技术[M]. 北京:科学出版社,2005:8-11.
ZHUANG Zhao-wen, YUAN Nai-chang, LIU Shao-bin, et al. Plasma Stealth Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005: 8-11. (in Chinese)

[9] Grantham W L. Flight Results of a 25000 Foot-Per-Second Reentry Experiment Using Microwave Reflectometers to Measure Plasma Electron Density and Standoff Distance[R]. Washington DC: NASA, 1970.

[10] Swift C T, Beck F B, Thomson J, et al. RAM C-III S-Band Diagnostic Experiment in Proceedings: The Entry Plasma Sheath and its Effects on Space Vehicle Electromagnetic Systems[R]. Washington DC: NASA Langley Research Center, 1970: 137-155.

[11] Dix D M. Typical Values of Plasma Parameters around a Conical Re-Entry Vehicle[R]. California: Aerospace Corporation, 1962.

[12] Bachynski M P, Johnston T W, Shkarofsky I P. Electromagnetic Properties of High-Temperature Air[J]. Proceedings of the IRE, 1960, 48(1), 347-356.

[13] 胡红军,陈勇,陈菊. 飞行器黑障区测控技术问题探讨[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(2):15-20.
HU Hong-jun, CHEN Yong, CHEN Ju. The Discussion on TT&C Technology for Spacecraft in Blackout Aera[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(2): 15-20. (in Chinese)

[14] 高军,曹祥玉,曹越胜,等. 电磁场与电磁波[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:56-57.
GAO Jun, CAO Xiang-yu, CAO Yue-sheng, et al. Electromagnetic Field Theory[M]. Xi´an: Xidian University Press, 2007: 56-57. (in Chinese)

[15] Akey N D. Radio blackout alleviation and plasma diagnostic results from a 25000 foot per second blunt-body reentry[R]. Washington DC: NASA, 1970.

作者简介:

张作一(1989—),男,天津人,2011 年获工学学士学位,现为硕士研究生,主要从事飞行器测控与通信系统的研究;

ZHANG Zuo-yi was born in Tianjin, in 1989. He received the B. S. degree in 2011. He is now a graduate student. His research concerns spacecraft TT&C and communication system.

Email: zhangzy2@126.com

赵　良,男,内蒙古人,研究员,主要从事飞行器测控与通信系统的研究;

ZHAO Liang was born in Inner Mongolia Autonomous Region. He is now a senior engineer of professor. His research concerns spacecraft TT&C and communication system.

刘秀祥,男,天津人,工程师,主要从事飞行器测控与通信系统的研究。

LIU Xiu-xiang was born in Tianjin. He is now an engineer. His research concerns spacecraft TT&C and communication system.