

等离子体中 X 射线透过率分析及 潜在通信应用研究*

李瑶¹⁾²⁾ 苏桐^{1)2)†} 雷凡³⁾ 徐能¹⁾²⁾ 盛立志¹⁾ 赵宝升¹⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710126)

(2018 年 11 月 5 日收到; 2018 年 11 月 25 日收到修改稿)

X 射线具有波长短、光子能量高等特点, 有望在等离子体环境中实现信息的有效传输. 本文首先采用基于连续介质中的 WKB 分层法, 研究了黑障条件下, X 射线在非均匀等离子体鞘套中的透过率特性, 仿真了不同等离子体电子密度和碰撞频率下 X 射线信号的透过率, 理论上证明了 X 射线可用于黑障区信息传输的可行性. 其次通过搭建环形扩散辉光放电等离子体发生器及实验验证系统, 进行了国内外首次 X 射线穿过等离子体鞘套的验证实验. 实验结果表明, 等离子体对 X 射线信号的透过率存在一定程度的衰减, 透过等离子体前后的 X 射线信号能谱轮廓相似度优于 95.5%, 能谱峰值点的偏移量小于 1.3%. 此外, 在原有理论模型的基础上, 考虑等离子体中的粒子与 X 射线的碰撞、吸收效应, 优化了 X 射线在等离子体中的透过率模型, 与传统的理论方法相比, 该模型可对实验现象进行更好的解释. 同时计算了 X 射线在临近空间的透过率, 并分析了 X 射线通信所能达到的潜在指标. 这些结果有望为解决黑障区信号传输提供一定的理论与实验依据.

关键词: X 射线, 等离子体鞘套, 透过率

PACS: 04.30.Nk, 07.85.Fv, 41.50.+ h, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.68.20181973

1 引言

目前, 临近空间相关技术研究已逐步成为世界各国争夺的战略制高点, 当再入飞行器返回地球, 或超高速飞行器在临近空间大气层飞行时, 瞬时速度大于 5 马赫 (1 马赫 \approx 1225 km/h), 会与其前部的大气摩擦产生强烈的弓形冲击波和黏性流^[1,2]. 此时飞行器表面温度迅速达到 5000 K 以上, 周围气体和耐热材料分解电离, 从而在飞行器的表面形成一个包覆的“等离子体鞘套”(plasma sheath), 对电磁波产生吸收、反射、折射效应, 使导航和通信信号中断、地面探测信号丢失, 造成“黑障”现象^[3,4].

一般再入飞船的黑障现象持续时间 4—10 min, 发生在高度 40—100 km 的临近空间^[5,6]. 因此, 如何解决黑障通信问题, 成为困扰航空航天领域的热点问题^[7,8].

国外对黑障区通信的研究实验始于 20 世纪 70 年代, 1971 年美国国家航空航天局进行了 RAM (radio attenuation measurements) 系列再入飞行实验, 得到了等离子体鞘套的相关参数指标^[9,10]. 随后 Gregoire 和 Santoru^[11] 推导了非磁化等离子体中微波的传输特性, Lemmer 等通过地面电弧风洞测试, 模拟并测试了等离子体鞘套的微波传输特性, 指出提高载波频率有助于减小信号衰减.

国内, 朱冰^[12] 和李伟^[13] 分别使用微波等离子

* 国家自然科学基金 (批准号: 61471357) 资助的课题.

† 通信作者. 苏桐, E-mail: sutong@opt.ac.cn

体和气体放电灯模拟等离子体鞘套, 取得了部分实验结论. 随后, 袁承勋^[14]研究了 THz 在等离子体鞘套中的传输特性, Zheng 等^[15]以激波管为实验平台, 研究了不同波段微波在等离子体中的衰减特性, 2015 年之后, 刘智惟等^[16]和 Dan 等^[17]通过数值模型、搭建辉光放电等离子体源, 研究了非均匀等离子体鞘套中微波和 THz 的传输与散射特性.

2007 年美国国家航空航天局 (NASA) 提出 X 射线通信的概念, 因其载波波长短、单光子能量大穿透力强, 因此, NASA 的 Kieth^[18]以及宋诗斌^[19]和牟欢等^[20]认为使用频率更高的 X 射线是一种可能解决黑障区通信的方法.

本文通过 NASA 的再入实验数据建立了非均匀等离子体鞘套模型, 利用基于连续介质中波动方程的 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) 分层法计算了黑障条件下, 1—30 GHz 频率的微波与波长小于 0.3 nm 的 X 射线透过率, 并与实验结果进行了对比, 得到了等离子体鞘套中 X 射线的传输特性, 为解决黑障区通信提供了一定的依据.

2 数值分析

由于再入飞船周围包覆的等离子体鞘套具有非磁化、非均匀等特性, 且沿等离子体分布的法线方向梯度远大于流线方向分布, 而 WKB 法采用连续介质中波动方程的近似求解法, 它的基本思路是对传播介质进行分段处理, 认为各段介质中的电磁参数均匀、恒定, 具有计算时间少, 适应性强等特点, 被广泛地用于求解非均匀等离子体介质中电磁波传输特性^[14,15]. 在 WKB 法中, 将等离子体看作是一种色散介质, 电磁波的传输特性可由 Maxwell 方程组和其本构方程表示:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{J}}{dt} + \nu \mathbf{J} = \varepsilon_0 \omega_p^2(\mathbf{r}) \mathbf{E}, \quad (3)$$

其中 μ_0 为真空电导率, ε_0 为介电常数, \mathbf{E} 与 \mathbf{H} 分别为电场与磁场强度, $\omega_p(\mathbf{r})$ 表示位置 \mathbf{r} 处的瞬时等离子体角频率, 可描述等离子体鞘套的非均匀特性, 具体表示为

$$\omega_p(\mathbf{r}) = \omega_{p0} \sin((d, l) \cdot \pi) = \sqrt{\frac{n_e(\mathbf{r}) \cdot e^2}{\varepsilon_0 m_e}}, \quad (4)$$

其中 ω_{p0} 是等离子体角频率的最大值, d 是到飞行器表面的距离, l 是等离子体鞘套的厚度, $n_e(\mathbf{r})$ 表示位置 \mathbf{r} 处的等离子体电子密度, m_e 为电子质量.

如图 1 所示, 当 X 射线斜入射到二维非均匀动态时变等离子体鞘套时, 分别给出介质第 0 层、等离子体鞘套第 1— $N-1$ 层与介质第 N 层在不同极化条件下所对应的电场与磁场分量. 再根据边界连续性条件, 即可得到 $z = 0$ 界面处反射系数与 $z = d$ 界面处的透射系数的表达式^[16,17]. 其中, 等离子体鞘套中特定位置的介电常数 ε_r 可由 $\omega_p(\mathbf{r})$ 得到.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p(\mathbf{r})^2}{\omega^2 + \nu^2} - \mathbf{J} \frac{\nu}{\omega} \cdot \frac{\omega_p(\mathbf{r})^2}{\omega^2 + \nu^2} \right), \quad (5)$$

其中 ν 是等离子体的碰撞频率, ε_0 是常数, ω 是入射电磁波角频率.

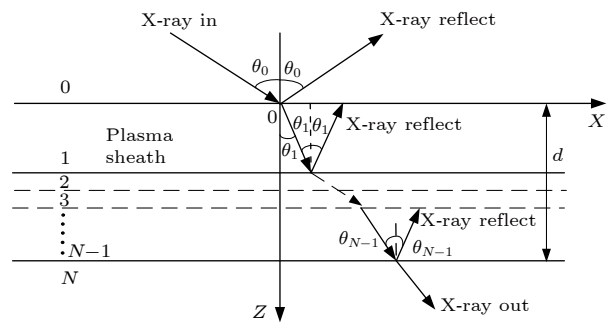


图 1 WKB 分层法传播示意图

Fig. 1. Schematic of WKB stratification method.

因此, 电磁波穿透二维等离子体鞘套时的透过率 T 与衰减系数 Att 可具体表示为:

$$T = \exp \left(-2 \operatorname{Im} \left(\int_0^d \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0}} dz \right) \right), \quad (6)$$

$$Att = 8.68 \operatorname{Im} \left(\int_0^d \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0}} dz \right), \quad (7)$$

其中 d 为等离子体鞘套的厚度, c 是光速. 根据 NASA 的 RAM 系列再入实验数据, 等离子体鞘套可看作是双指数分布^[14], 具体为:

$$N_e(d_r) = \begin{cases} n_{e \max} \cdot \exp(a_1(d_r - z_0)^2), & 0 \leq d_r \leq z_0 \\ n_{e \max} \cdot \exp(-a_2(d_r - z_0)^2), & z_0 \leq d_r \leq d \end{cases} \quad (8)$$

式中, z_0 是电子密度最大时的位置, d 是等离子体鞘套的总厚度, $N_e(d_i)$ 表示 d_i 处等离子体鞘套的电

子密度.

令 $a_1 = 1$, $a_2 = 0.5$, $z_0 = 0.09$ m, $d = 0.18$ m 时, 通过模拟不同频率的微波与 X 射线穿透非均匀静态等离子体鞘套时的透过率 (双指数分布的最大等离子体电子密度 $9 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{19}/\text{m}^3$, 碰撞

频率 0.1—100 GHz)^[16]. 图 2 给出基于 WKB 模型的 X 射线与微波的透过率特性, 可以看出, 对波长小于 0.3 nm (能量大于 4.1 keV) 的 X 射线, 透过率大于 99%, 且不受等离子体碰撞频率的影响, 理论上证明了 X 射线可用于黑障区通信的可能性.

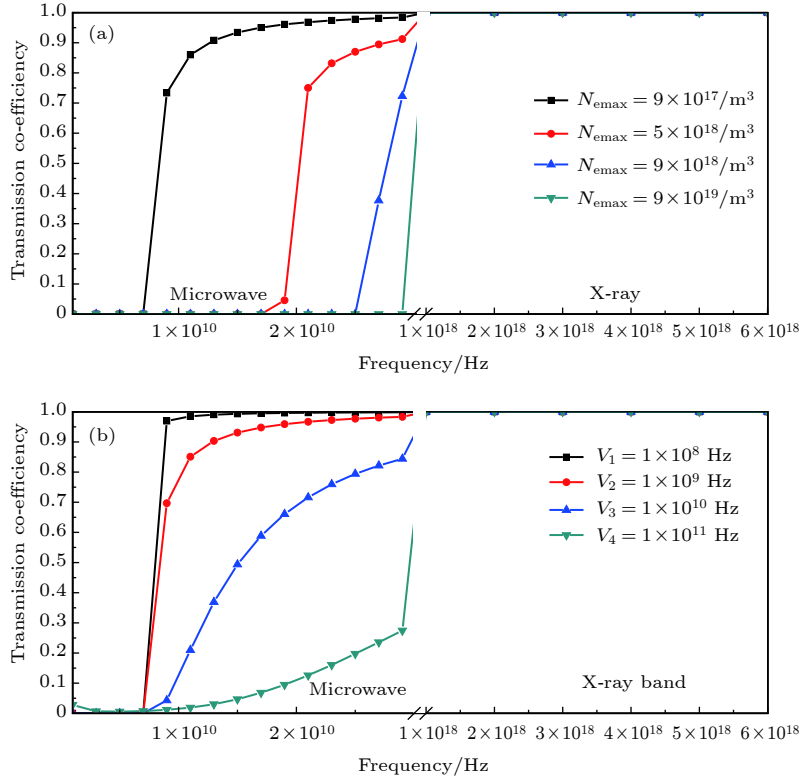


图 2 X 射线与微波透过率特性 (a) 不同等离子体电子密度; (b) 不同碰撞频率

Fig. 2. The X-ray and microwave transmission characteristics: (a) Different plasma electron density; (b) different plasma collision frequency.

3 仿真实验

根据 NASA 的 RAM-C 再入飞行实验数据, 黑障区的等离子体具有大面积、非均匀等特性^[7]. 如表 1 所示, 通过对不同等离子体产生方式进行对比, 发现辉光放电具有电子密度跨度大、等离子体持续时间长、面积大、非磁化、可控性好等优点

点^[16,19], 可以模拟不同轨道高度下的等离子体鞘套的特性, 因此本次实验中采用辉光放电等离子体源.

3.1 实验条件

为了验证不同等离子体条件下 X 射线信号的传输透过率特性, 搭建如图 3 所示的演示验证系统, 其中栅控 X 射线源和具有能量分辨的硅漂移 X 射线 (SDD, silicon drift detector)^[18] 探测器分别放置在辉光放电等离子体源的两端, 该等离子体源电子密度上限为 $2.5 \times 10^{17}/\text{m}^3$, X 射线在等离子体内的传输距离为 18 cm.

实验中, 等离子体的电子密度可由 Langmuir 探针测得, 对于碰撞频率, 根据 (9) 式计算得出

表 1 各种等离子体发生装置及其比较

Table 1. Various plasma generating devices and their comparison.

等离子体产生方法	最高电子密度	持续时间	可控性	成本
辉光放电	$10^{17}/\text{m}^3$	连续	好	低
激波管	$>10^{20}/\text{m}^3$	亚毫秒级	一般	高
发动机喷流	$>10^{20}/\text{m}^3$	几百毫秒	一般	高
载飞	真实鞘套	4—10 min	无法控制	极高

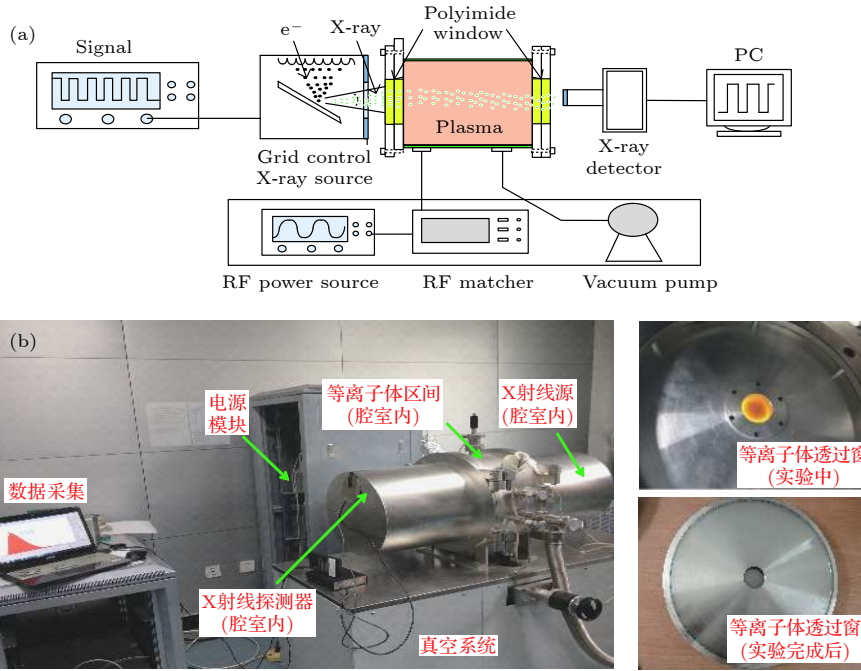


图 3 实验原理与现场图 (a) 实验原理图; (b) 实验现场图

Fig. 3. Schematic and experimental condition of X-ray transmission in plasma region: (a) Schematic diagram; (b) annotated photos of experiment condition.

$$\nu_e \approx 6.08 \times 10^9 P \frac{\sqrt{T_e}}{T}, \quad (9)$$

式中, P 为腔内气压, T 为环境温度, T_e 为电子温度. 实验中, 填充气体为氩气, 压强 $P = 5 \text{ Pa}$, 温度 $T = 350 \text{ K}$, 电子温度 $T_e = 10 \text{ eV}$, 此时不同射频电源功率下等离子体参数如表 2 所列.

表 2 不同射频电源功率下的等离子体参数
Table 2. Different electron density and collision frequency under various RF power.

射频电源功率/W	等离子体电子密度/ m^{-3}	碰撞频率/MHz
300	6.2×10^{16}	428
500	9.1×10^{16}	491
700	1.05×10^{17}	494
1000	1.23×10^{17}	523

3.2 实验验证及结果分析

为了验证 X 射线信号在等离子体中的传输特性, 基于上述实验验证系统, 测试了不同等离子体电子密度、光子能量 (阳极高压) 和光子流量 (灯丝电流) 下, X 射线的透过率及能谱信息. 实验中, 等离子体介质的电子密度范围为 $6.2 \times 10^{16} \text{—} 1.23 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 栅控 X 射线源的阳极高压分别为 15, 20 和 25 kV, 实验中每个数据点的采集时间为 60 s. 此时, 不同光子能量和光子流量的 X 射线信号经

过不同电子密度的等离子体后, 透过率如图 4 所示.

由图 4(a) 可以看出, 当 X 射线信号的传输通道中存在等离子体介质时, 透过率存在一定的损耗, 随着入射 X 射线能量的增加, X 射线信号的透过率呈现一定程度的增加 (由 15 kV 时的 49.23% 提高到 25 kV 时的 67.76%); 由图 4(b) 可以看出, 单光子能量保持不变时, 随着入射 X 射线光子流量的增加, 相同电子密度 n_e 下的 X 射线信号透过率显著增加, 当光子流量大于 1.3 Mcps 时, X 射线信号的透过率趋于稳定, 接近理论仿真结果, 最高透过率在 95%—97% 之间. 因此, 对以 X 射线光子为载波的信息传输而言, 增加入射光子能量与流量有望实现 X 射线信号的高透过率.

此外, 对 X 射线信号穿透等离子前后, 能谱轮廓的相似度和峰值偏移量进行比较, 结果如图 5 所示, 随着等离子体电子密度的增加, 能谱轮廓的相似度略微减小, 但均保持在 95.5% 以上, 能谱峰值偏移量保持稳定, 均小于 1.3%, 因此, 等离子体对 X 射线信号只是整体衰减, 不改变穿透等离子体前后的能谱轮廓.

理论上 X 射线可以几乎无衰减地透过等离子体鞘套, 而实验并非完全符合理论结果, 产生这种现象的原因是: 在求解电磁波在等离子体中的传输

特性时, WKB 法本质上仍是基于 Maxwell 方程组, 只考虑了 X 射线的波动效应, 即当入射 X 射线的频率大于等离子体频率时, 可实现较高的透过率, 并未考虑入射 X 射线光子的粒子性, 并且忽略了入射 X 射线的强度 (光子流量) 对透过率的影响. 当 X 射线光子进入等离子体后, 会与等离子体中的粒子发生各种碰撞吸收、散射效应, 从而对出

射 X 射线光子强度产生一定程度的影响, 此时透过等离子体鞘套前后的 X 射线光子满足

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}}e^{-\alpha L}, \quad (10)$$

式中, I_{in} 和 I_{out} 表示入射与出射 X 射线强度, α 为吸收系数, L 为等离子体鞘套厚度. 考虑 X 射线光子与等离子体物质的三种基本作用过程, 即束缚-束缚吸收、束缚-自由吸收、自由-自由吸收, 并考虑

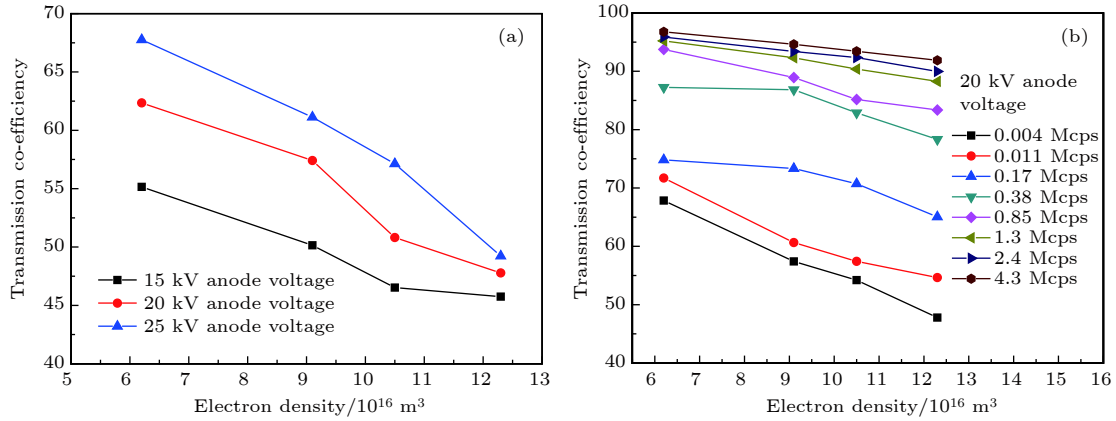


图 4 不同高压与灯丝电流时的透过率 (a) 不同光子能量; (b) 不同光子流量

Fig. 4. Transmission co-efficiency under various anode voltage and filament current: (a) Different X-ray energy; (b) different X-ray flow.

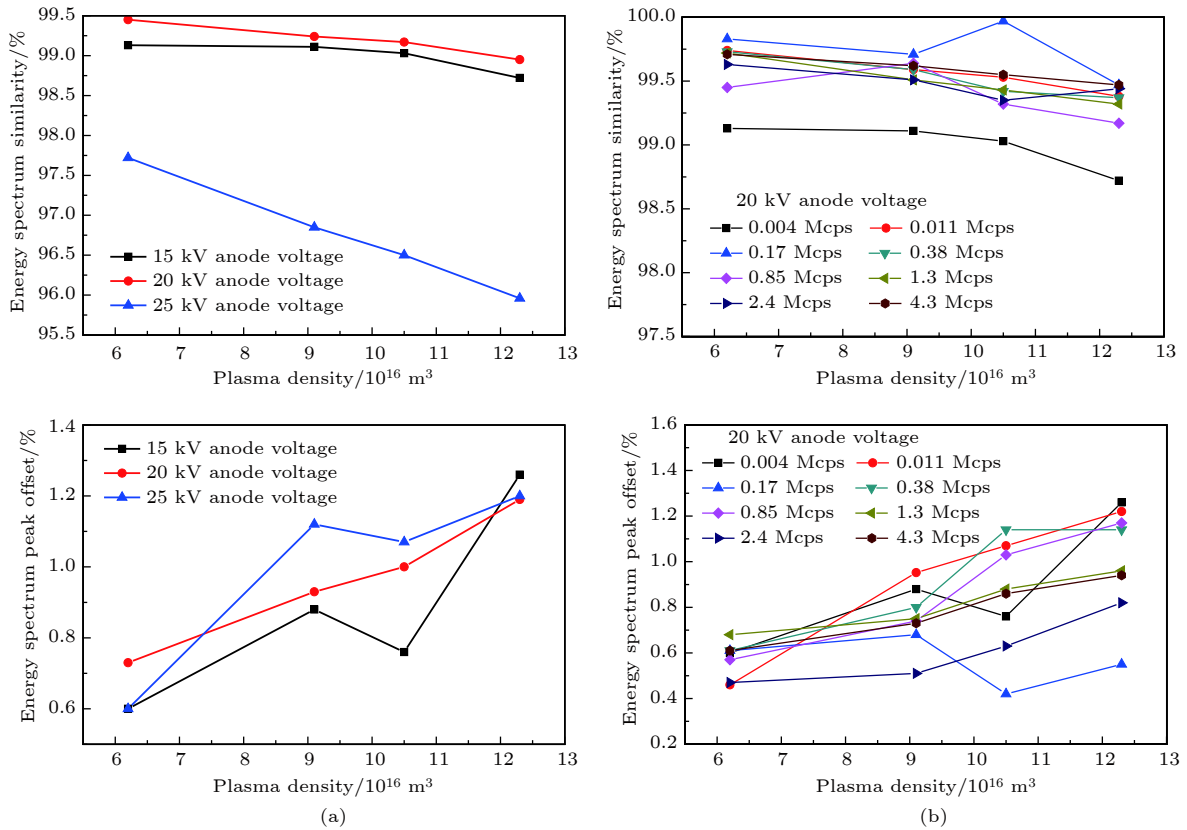


图 5 不同高压与灯丝电流时的能谱特性 (a) 不同 X 射线能量时; (b) 不同 X 射线流量时

Fig. 5. Spectrum characteristics under various X-ray energy and X-ray flow: (a) Different X-ray energy; (b) different X-ray flow.

散射效应^[21,22], 此时, 等离子体对 X 射线的吸收系数 α 可表示为

$$\begin{aligned} \alpha(E_i) &= [\alpha^{ff}(E_i) + \alpha^{bf}(E_i) + \alpha^{bb}(E_i)] \\ &\quad \times [1 - \exp(-E_i/T)] + \alpha^{es}(E_i) \\ &= N_e [\sigma^{ff}(E_i) + \sigma^{bf}(E_i) + \sigma^{bb}(E_i)] \\ &\quad \times [1 - \exp(-E_i/T)] + N_e \sigma^{es}(E_i), \end{aligned} \quad (11)$$

式中, 当入射光子能量为 E_i 时, $\alpha^{ff}(E_i)$ 为自由-自由吸收系数, $\alpha^{bf}(E_i)$ 为束缚-自由吸收系数, $\alpha^{bb}(E_i)$ 为束缚-束缚吸收系数, $\alpha^{es}(E_i)$ 为散射系数, 由康普顿散射和汤姆逊散射两部分组成, $\sigma^{ff}(E_i)$, $\sigma^{bf}(E_i)$, $\sigma^{bb}(E_i)$ 与 $\sigma^{es}(E_i)$ 为对应与入射 X 射线光子能量有关的吸收与散射截面, N_e 为等离子体中的电子密度, T 为电子温度. 此时, 对于以 X 射线

光子为载波的通信而言, 只考虑入射和出射后的 X 射线光子数, 可满足

$$N_{out} = N_{in} e^{-\alpha L} = \sum_{I=0keV}^{EkeV} N_I e^{-\alpha_I L}, \quad (12)$$

式中, N_{in} , N_{out} 分别为入射与出射 X 射线总光子数, N_I 表示不同能段的 X 射线光子流量, 可以由粒子蒙特卡罗仿真软件 MCNP 仿真得出或者硅漂移探测器 (silicon drift detector, SDD) 测出, α_I 表示不同能段的衰减系数, 可由 (11) 式得出. 因此, 可计算出考虑各种碰撞吸收效应后不同条件下 X 射线信号透过率的理论值, 并与仅考虑波动性时 WKB 法的计算结果和实验结果进行对比, 结果如表 3 所列.

表 3 不同条件下理论与实验结果对比
Table 3. Experimental and theoretical results under various condition.

实验条件	WKB法	实验结果	理论值
电子密度/ m^{-3} : 6.2×10^{16} 阳极高压/kV: 15	流量 5.41 kcps	67.84%	70.12%
	流量 1.3 Mcps	99.98%	95.22%
电子密度/ m^{-3} : 1.05×10^{17} 阳极高压/kV: 20	流量 7.52 kcps	57.41%	54.65%
	流量 0.82 Mcps	99.91%	84.07%
电子密度/ m^{-3} : 1.23×10^{17} 阳极高压/kV: 25	流量 21.86 kcps	59.78%	61.32%
	流量 2.8 Mcps	99.88%	96.81%

可以看出, 在原有模型的基础上, 针对 X 射线粒子性强的特点, 考虑碰撞吸收及散射等因素后, 理论与实验值接近. 即 X 射线光子进入等离子体后, 与等离子体中各种粒子发生碰撞、散射作用, 增加等离子体电子密度后, 碰撞散射截面增大, 透射率减小. 等离子体电子密度不变时, 其碰撞、散射截面固定不变, 因此增加光子能量和流量时, 可增加 X 射线的透过率, 这些结论有望为解决黑障区信号传输提供一定的依据.

4 X 射线通信可行性分析

对于相同等离子体电子密度下, 文献 [23] 中所得到的实验结果为 1.57 GHz 微波的透过率为千分之一 (-30 dB), 而实验中 X 射线有望以较高的透过率穿透等离子体屏蔽, 因此有望实现黑障区数据的可靠传输.

X 射线在等离子体鞘套和临近空间环境时衰减较小, 但无法在地面环境中有效传输. 因此可通过 X 射线载波, 将信号透过等离子体鞘套后上传

到中继站, 然后通过激光或微波通信的方式转发到地面. 整个通信系统如图 6 所示.

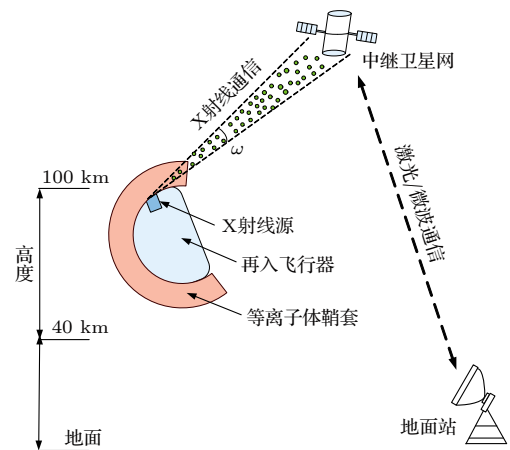


图 6 黑障区 X 射线通信信号传输原理图

Fig. 6. The schematic diagram of X-ray communication signal transmission process in blackout region.

考虑到临近空间链路中的损失, 通过基于蒙特卡罗方法的 MCNP 软件仿真 X 射线信号透过等离子体鞘套后, 从再入飞船 (40—80 km) 传输到中

继站 (240—280 km) 时, 临近空间链路对不同能量 X 射线光子的透过率^[24,25], 结果如图 7 所示.

从图 7 可以看出, 5 keV 能段的 X 射线光子在临近空间向上传输 200 km 后, 透过率为 39%, 而 15 keV 的 X 射线光子透过率高达 97%, 考虑到飞行器的负载、收发天线效率、探测器量子效率等因素, 15—25 keV 是临近空间用于 X 射线通信的最佳能段. 此外, 根据 X 射线通信的功率传输方程和误码率模型^[26-28], 仿真了入射 X 射线光功率 10 W, 链路长度 200 km, 发散角 3 mrad 时, 不同能量、调制模式下 X 射线的通信指标, 结果如图 8 所示. 4 PPM (pulsar position modulation) 的通信速率高于 OOK (on-off keying) 调制, 单光子能量越高, 通信速率相对越低. 对 15 keV 的入射 X 射线光子, 若采用 4 PPM 调制, 理论上最高可实现 1.3 Mbps 的测控、导航信号的传输.

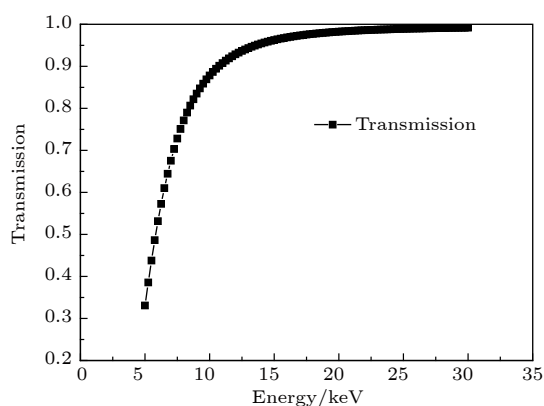


图 7 临近空间 X 射线的透过率

Fig. 7. Transmission rate of X-ray on condition of near space.

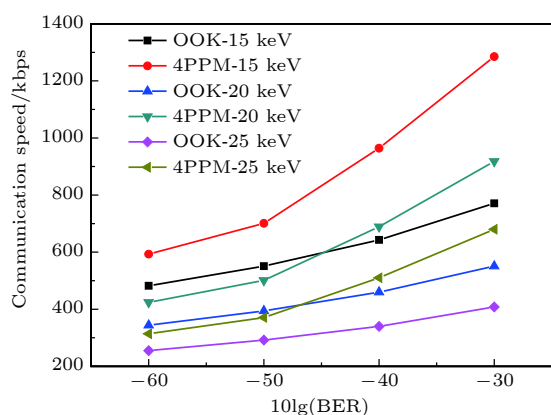


图 8 不同光子能量与调制模式下的 X 射线通信指标

Fig. 8. Communication speed and BER versus different energy and modulation.

5 结 论

本文基于 WKB 法, 引入 X 射线与等离子体中各粒子间的碰撞效应, 同时考虑波动性与粒子性的影响, 构建了 X 射线穿透非均匀等离子体鞘套的数学模型. 并设计实验对修正后的模型进行了验证. 理论仿真与实验同时表明: 1) 等离子体鞘套对 X 射线传输有影响, 等离子体电子密度越高, 对 X 射线信号透过率的影响越显著; 2) 穿透等离子体鞘套前后, X 射线信号的能谱轮廓相似度和峰值偏移量基本保持不变; 3) 增加 X 射线信号光子数的能量和流量, 可以显著提高透过率. 相比于传统的波动模型, 该修正模型考虑了 X 射线与等离子体相互作用的物理过程, 更加接近 X 射线在等离子体中信号传输的真实情况. 此外计算了黑障区 X 射线通信的可行性, 为下一步研究 X 射线在等离子体中的传播机理及 X 射线通信在黑障区的应用, 奠定了一定的理论与实验基础.

感谢西安电子科技大学空间科学与技术学院的李小平教授、刘彦明教授在实验过程中提供的帮助.

参考文献

- [1] Liu Z, Bao W, Li X, et al. 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 3147
- [2] Wang J S, Yang X Q 2014 *Spacecraft Engineering* **23** 1 (in Chinese) [王家胜, 杨显强 2014 *航天器工程* **23** 1]
- [3] Zhou H, Li X P, Xie K 2017 *AIP Adv.* **10** 105314
- [4] Zhang Y, Liu Y 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 940948
- [5] Li J, Yang S, Guo L, et al. 2017 *Opt. Commun.* **396** 1
- [6] Li H, Tang X, Hang S, et al. 2017 *J. Appl. Phys.* **12** 123101
- [7] Kim M, Keidar M 2010 *J. Spacecraft Rockets* **47** 1
- [8] Yang M, Li X P, Liu Y M, et al. 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085201 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 刘彦明等 2014 *物理学报* **63** 085201]
- [9] Jones W L, Cross A E 1972 *Electron Static Probe Measurements of Plasma Parameters for Two Reentry Flight Experiments at 25000 Feet Per Second.* (Hampton: Langley Research Center) NASA-TN-D-6617
- [10] Beiser A, Raab B 1961 *Hydromagnetic and Plasma Scaling Law* 4 2
- [11] Gregoire D J, Santoru J 1992 *Hydrol. Res. Lett.* **5** 7
- [12] Zhu B 2006 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [朱冰 2006 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [13] Li W 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [李伟 2010 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]

- [14] Yuan C X 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [袁承勋 2010 博士学位论文(哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [15] Zheng L, Zhao Q, Liu S, et al. 2012 *Progress in Electromagnetics Research* **24** 179
- [16] Liu Z W, Bao W M, Li X P 2014 *Acta Phys. Sin.* **23** 235201 (in Chinese) [刘智惟, 包为民, 李小平 2014 物理学报 **23** 235201]
- [17] Dan L, Guo L X, Li J T 2018 *Phys. Plasmas* **25** 013707
- [18] Dr. Keith Gendreau talk about NICEER and Modulate X-ray Source[EB/OL]. <http://www.techbriefs.com/component/content/article/24-ntb/features>[2018-11-05]
- [19] Song S B 2016 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [宋诗斌 2016 博士学位论文(西安: 西安电子科技大学).]
- [20] Mu H, Li B Q, Cao Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 140703 (in Chinese) [牟欢, 李保权, 曹阳 2016 物理学报 **65** 140703]
- [21] Jiang M 2004 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu:Sichuan University) (in Chinese) [姜明 2004 博士学位论文(成都: 四川大学)]
- [22] Zeng J L 2001 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [曾交龙 2001 博士学位论文(长沙: 国防科技大学)]
- [23] Xie K 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [谢楷 2014 博士学位论文(西安: 西安电子科技大学)]
- [24] Liu D, Qiang P F, Li L S, et al. 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 010703 (in Chinese) [刘舵, 强鹏飞, 李林森 等 2016 物理学报 **65** 010703]
- [25] Liu D, Qiang P F, Li L S, et al. 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 0834002 (in Chinese) [刘舵, 强鹏飞, 李林森等 2016 光学学报 **36** 0834002]
- [26] Su T, Li Y, Sheng L Z, et al. 2017 *Acta Photon. Sin.* **46** 212219 (in Chinese) [苏桐, 李瑶, 盛立志等 2017 光子学报 **46** 212219]
- [27] Xu N, Sheng L Z, Zhang D P, et al. 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 334340 (in Chinese) [徐能, 盛立志, 张大鹏 等 2017 物理学报 **66** 334340]
- [28] Song S B, Xu L P, Zhang H, et al. 2015 *Sensor* **15** 325342

X-ray transmission characteristics and potential communication application in plasma region*

Li Yao¹⁾²⁾ Su Tong^{1)2)†} Lei Fan³⁾ Xu Neng¹⁾²⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾ Zhao Bao-Sheng¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China*)

(Received 5 November 2018; revised manuscript received 25 November 2018)

Abstract

When a supersonic spacecraft enters into the atmosphere of earth, part of the spacecraft's kinetic energy changes into thermal energy, thus causing the air surrounding the craft to be heated and compressed. As a result, the temperature near the surface may reach several thousands of kelvins, which leads the surface materials to be ionized and form a plasma sheath around the vehicle. This plasma layer has an electron density ranging from 10^{15}m^{-3} to 10^{20}m^{-3} , and may interrupt the radio communication signal between the re-entry vehicle and ground-based stations, which is known as 'communication blackout'. According to the radio attenuation measurement (RAM) experiments carried out by NASA (National Aeronautics and Space Administration) in the 1970s, the duration time of communication blackout ranges from 4 to 10 minutes in an altitude range from 40 km to 100 km. Communication blackout has puzzled aerospace industry for several decades, and has not yet been completely resolved. Due to this, it becomes necessary to understand the causes of communication blackout and the methods for its mitigation. Compared with other communication methods, x-ray communication (XCOM) has the advantages of short carrier wavelength and high photon energy, as well as strong ability to resist anti-interference, thus being able to open a novel way to solve this long-lasting unresolved problem. In this paper, to begin with, we analyze the transmission coefficients under different plasma electron densities and collision frequencies based on Wentzel Kramers Brillouin (WKB) approximation method. The simulation results indicate that the x-ray carrier is not influenced by the reentry plasma sheath. After that, a plasma source based on glow discharge is used to verify the mathematical model. The non-magnetized unobstructed plasma region is $\Phi 200\text{ mm} \times 180\text{ mm}$, which can be used for simulating plasma sheath near the reenter spacecraft. Then the transmission coefficient, energy spectrum similarity and energy spectrum peak offset under different x-ray energy, x-ray flow and plasma electron density are firstly analyzed. Experimental results indicate that plasma can lead the x-ray signal to be attenuated to a certain extent, the increase of plasma electron density will cause higher attenuation. However, with a higher signal x-ray energy and x-ray flow, the XCOM could achieve less attenuation in the re-enter plasma layer. When the plasma electron density ranges from $6 \times 10^{16}/\text{m}^3$ to $1.2 \times 10^{17}/\text{m}^3$, 1.34 Mcps signal x-ray photons' flow with 20 kV anode voltage would achieve more than a 95% transmission efficiency. Also, the spectrum of x-ray signal can obtain more than 95.5% similarity and the peak offset is less than 1.3% after passing the plasma sheath. Subsequently, based on the original mathematic model and experimental results, considering the free-free absorption, free-bound absorption, bound-bound absorption and scattering effect of x-ray photons in plasma, the x-ray transmission characteristics are optimized to make simulation results well consistent with the experiment results. Finally, an MCNP (Monte Carlo N Particle) transport simulation is used to analyze the feasibility of XCOM in blackout region, which indicates that the energy range 15—25 keV is the suitable to achieve the XCOM in adjacent space, and the relation of potential transmitting speed with bit error is calculated. Theoretically, the XCOM can achieve about 1.3 Mbps communication speed in blackout region. In summary, these theoretical and experimental results indicate that the XCOM is a potential and novel method to solve the blackout communication problems.

Keywords: X-ray communication, plasma sheath, transmission co-efficiency

PACS: 04.30.Nk, 07.85.Fv, 41.50.+ h, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.68.20181973

* Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471357).

† Corresponding author. E-mail: sutong@opt.ac.cn