

7-30-2020

Properties of Terahertz Wave Propagation in Inhomogeneous Plasma Sheath

Jiang Jin

1. School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; ;

Changxing Chen

1. School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; ;

Wang Cheng

2. Dept. Computer & Information Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; ;

Ting Chen

3. Dept. Electron Engineering, Xi'an University of Posts Telecommunication, Xi'an 710121, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Properties of Terahertz Wave Propagation in Inhomogeneous Plasma Sheath

Abstract

Abstract: The communication blackout usually happens when the hypersonic vehicles voyage in the near space. According to the data provided by radio attenuation measurement C (RAM C) voyage experiment, *two models of inhomogeneous plasma sheath were established after dividing the near space into two spatial layers to build two mathematical models.* The principle of interaction between plasma and terahertz wave was analyzed through numerical calculation, getting the properties of terahertz wave propagation in plasma sheath. The simulation shows that the terahertz wave frequency band selected as communication frequency band used in near space can solve the problem of communication blackout. The result of simulation can be provision of reference for design of communication frequency-band used in the near space hypersonic vehicles.

Keywords

plasma sheath, terahertz wave, near space, hypersonic vehicles

Authors

Jiang Jin, Changxing Chen, Wang Cheng, Ting Chen, Tianxiang Zhou, and Yunfei Ling

Recommended Citation

Jiang Jin, Chen Changxing, Wang Cheng, Chen Ting, Zhou Tianxiang, Ling Yunfei. Properties of Terahertz Wave Propagation in Inhomogeneous Plasma Sheath[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3109-3115.

太赫兹波在非均匀等离子体鞘套中的传播特性

蒋金¹, 陈长兴¹, 汪成², 陈婷³, 周天翔¹, 凌云飞¹

(1.空军工程大学理学院, 西安 710051; 2.河海大学计算机与信息学院, 南京 211100; 3.西安邮电大学电子工程学院, 西安 710121)

摘要: 针对高超声速飞行器在临近空间巡航时出现的通信“黑障”问题, 根据 NASA 开展的无线电衰减测量 C (RAM C III) 飞行试验数据, 把临近空间分成两个空间层构建数学模型, 建立了 2 个一维非均匀等离子体鞘套模型, 通过数值计算分析了等离子体与太赫兹波的相互作用机理, 得到了太赫兹波在非均匀等离子体鞘套中传输特性曲线。仿真结果表明: 把太赫兹波段作为临近空间平台通信, 有利于解决黑障问题。此论证结果, 可为设计临近空间高超声速飞行器选用通信频段时提供参考。

关键词: 等离子体鞘套; 太赫兹波; 临近空间; 高超声速飞行器

中图分类号: TN011;V271 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 12-3109-07

Properties of Terahertz Wave Propagation in Inhomogeneous Plasma Sheath

Jiang Jin¹, Chen Changxing¹, Wang Cheng², Chen Ting³, Zhou Tianxiang¹, Ling Yunfei¹

(1. School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Dept. Computer & Information Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Dept. Electron Engineering, Xi'an University of Posts Telecommunication, Xi'an 710121, China)

Abstract: The communication blackout usually happens when the hypersonic vehicles voyage in the near space. According to the data provided by radio attenuation measurement C (RAM C) voyage experiment, two models of inhomogeneous plasma sheath were established after dividing the near space into two spatial layers to build two mathematical models. The principle of interaction between plasma and terahertz wave was analyzed through numerical calculation, getting the properties of terahertz wave propagation in plasma sheath. The simulation shows that the terahertz wave frequency band selected as communication frequency band used in near space can solve the problem of communication blackout. The result of simulation can be provision of reference for design of communication frequency-band used in the near space hypersonic vehicles.

Keywords: plasma sheath; terahertz wave; near space; hypersonic vehicles

引言

临近空间位于地面 20~100 km 处, 空气稀薄, 飞行器必须以高速飞行获得较强的机动能力和足够的升力; 稀薄的空气也有效减小空气阻力, 使飞

行器以高超声速在临近空间飞行成为各国研究热点^[1]。临近空间高超声速飞行器巡航时, 飞行器表面与空气发生强烈摩擦, 形成激波, 温度和压力急剧升高而导致空气电离, 产生等离子鞘套包覆飞行器表面, 引起飞行器天线极化和相位发生特性改变, 使信号衰减巨大, 很难达到天线接收机的功率要求, 对通信造成干扰, 严重时将导致电磁波通信中断, 出现通信“黑障”问题^[2-6]。国内外很早就研究并开展了一系列的地面仿真和飞行试验, 以此通过研究等离子体鞘套与电磁波相互作用机理、影



收稿日期: 2015-04-16 修回日期: 2015-08-13;
基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2014JM8344); 空军工程大学研究生创新基金资助项目 (LXY2015YJS06);
作者简介: 蒋金(1990-), 男, 安徽宿州, 硕士生, 研究方向为临近空间通信技术; 陈长兴(1964-), 男, 教授, 博导, 研究方向为临近空间通信系统。

<http://www.china-simulation.com>

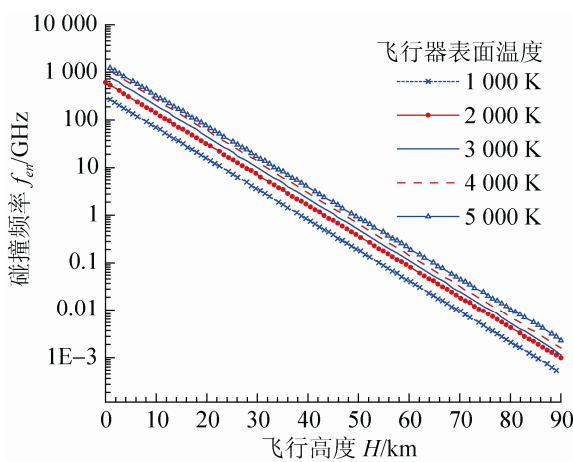
• 3109 •

响和应对方法,探索出减缓或消除再入黑障问题的技术途径^[7-10]。

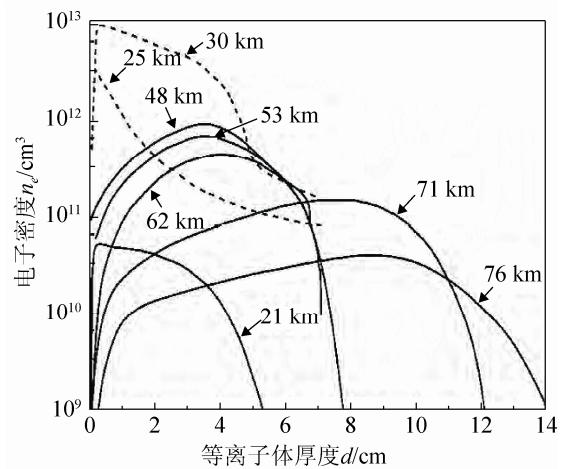
近代以来随着微波器件的研究和发展,现在很多都用微波频段来研究解决临近空间的通信黑障问题^[11-15]。20 世纪 70 年代美国航空航天局 NASA 的兰利研究中心(LRC)开展了以临近空间为平台的无线电衰减测量 C(RAM C)飞行试验,从文献报告中可知:提高射频工作频率可有效缩短在临近空间通信中断的时间和高度^[16]。文献[17]通过仿真和实验验证了太赫兹波在一维均匀等离子体中的传

输特性,结果表明:当通信频率达到太赫兹波段并增加时,反射率减小,衰减减小。文献[18]提出一套太赫兹通信系统的概念,并从理论上分析了太赫兹波穿透等离子体鞘套的可行性。

可见把临近空间通信载波波段提高至太赫兹波段具有较强的技术优越性,并有助于解决飞行器在临近空间高超声速飞行时的实时测控问题。本文主要根据图 1 中 NASA 开展的 RAM C III 飞行试验数据,研究太赫兹波在等离子体鞘套中的传输特性。



(a) 不同温度对应等离子体碰撞频率随飞行高度变化^[19]



(b) 不同高度对应等离子体电子密度随飞行速度变化^[20]

图1 RAM C III飞行试验数据图

1 等离子体电子密度的数学表达式

根据图 1(b)中不同飞行高度产生的等离子体电子密度的试验数据,综合分析表明,飞行器表面产生的可变电子密度和厚度存在以下几种形式的数学模型: Epstein 函数和高斯分布函数。由图 1(b)可看出,飞行器表面等离子体鞘套电子密度在中低空近似服从 Epstein 分布,在 48 km 以上高空飞行器表面的等离子体鞘套电子密度近似服从高斯分布。

1.1 Epstein 分布函数

等离子体电子密度服从的 Epstein 函数分布的表达式如下:

$$n_e(z) = \begin{cases} n_{e\max} \{1 + \exp[-\alpha_1(z - z_{10})]\}^{-1} & (z_1 \leq z \leq z_0) \\ n_{e\max} \{1 + \exp[\alpha_2(z - z_{20})]\}^{-1} & (z_0 \leq z \leq z_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n_{e\max}$ 为等离子体最大电子密度; z_0 为 Epstein 函数的分段点; α_1 和 α_2 为描述 Epstein 函数分段的常数; $z_2 - z_1$ 为等离子体厚度,如图 2 所示。

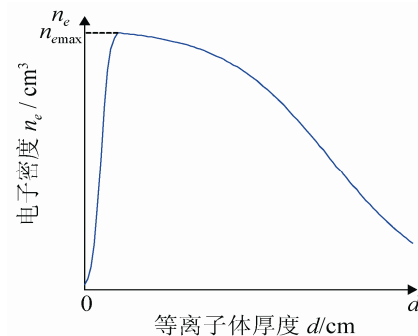


图2 等离子体电子密度Epstein函数分布

1.2 高斯分布函数

等离子体电子密度服从的高斯分布函数的表达式如下:

$$n_e(z) = \begin{cases} n_{e\max} \exp[\delta_1(z-z_0)^2] & (z_1 \leq z \leq z_0) \\ n_{e\max} \exp[-\delta_2(z-z_0)^2] & (z_0 \leq z \leq z_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n_{e\max}$ 为等离子体最大电子密度, z_0 是高斯函数的分段点, δ_1 和 δ_2 为描述高斯函数的常数, $z_2 - z_1$ 为等离子体厚度, 如图 3 所示。

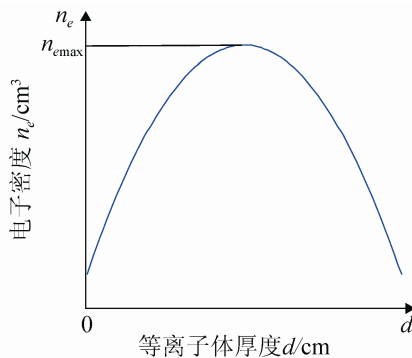


图3 等离子体电子密度高斯函数分布

2 理论分析及物理模型的建立

电磁波在一维非磁化等离子体中的传输模型如图 4 所示, 电磁波穿过等离子体过程中发生反射、折射、吸收和衰减。以 TM 波建立入射模型, 模型中电磁波沿 z 轴方向传播, 电场平行于 xoz 面, 磁场沿 y 轴方向。d 为等离子体厚度, z=0 处为电磁波入射分界面, z=d 处为电磁波透射分界面。

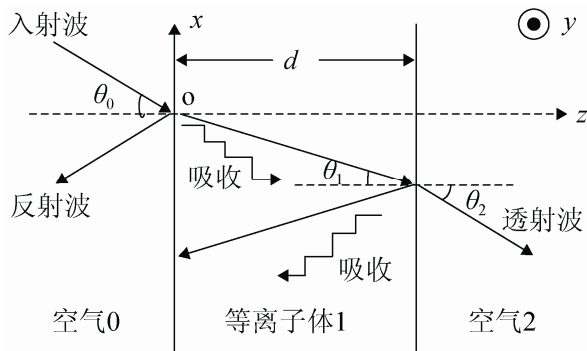


图4 等离子体中电磁波传输模型

z 轴方向等离子体密度为 $n_e(z)$, 此时在等离子

体 1 中的电磁波为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta) E_y = 0 \quad (3)$$

式中: θ 为电磁波入射角; k_0 为真空中电磁波波数; k_1 为等离子体 1 中电磁波波数。对式(3)求解可得:

$$E_y = E_0 \exp \left[j \int_0^z \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta} dz \right] \quad (4)$$

式中: E_0 为入射波电场振幅, 且需要满足:

$$\left| \frac{3}{4} \left(\frac{1}{\beta^2} \frac{d\beta}{dz} \right)^2 - \frac{1}{2\beta^3} \frac{\partial^2 \beta}{\partial z^2} \right| \ll 1 \quad (5)$$

式中: $\beta = \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta}$ 。当电磁波到达 $z=d$ 时, 功率衰减为:

$$P_2 = P_0 \exp \left[-2 \operatorname{Im} \left(\int_0^z \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta} dz \right) \right] \quad (6)$$

式中: P_0 为入射波功率; P_2 为透射波功率。则电磁波的透射率 T 和衰减 Att 为:

$$T = \frac{P_2}{P_0}, \quad \operatorname{Att} = -10 \log_{10} T \quad (7)$$

根据上述建立的两个一维非均匀等离子体模型, 下面将从等离子体密度和碰撞频率等方面进行数值模型计算与分析, 通过研究等离子体中太赫兹波的透过率与衰减特性, 来研究等离子体鞘套对太赫兹波传输特性的影响。

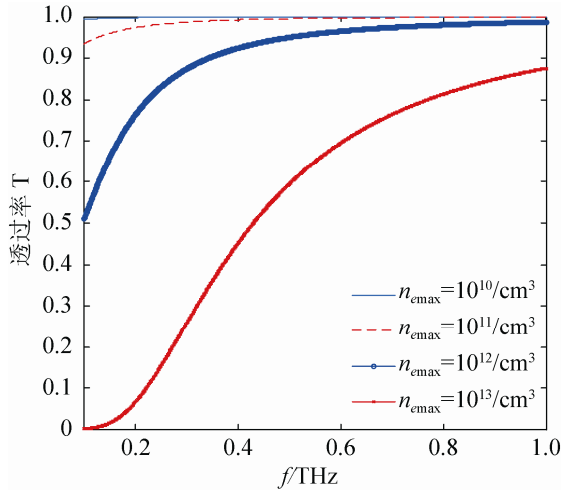
3 太赫兹波在等离子体中数值模拟

3.1 Epstein 函数分布

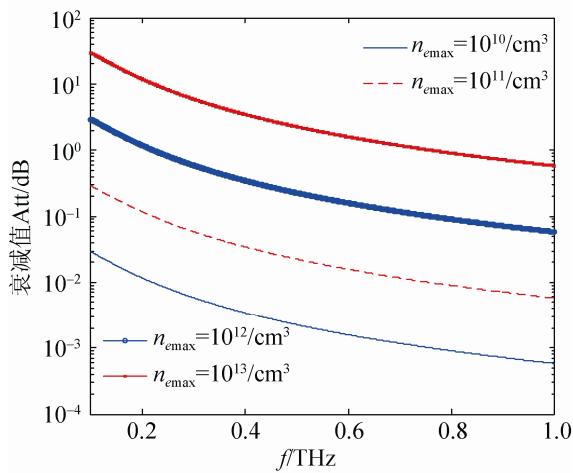
当等离子体电子密度为 Epstein 函数分布, 如 1.1 节中图 2 所示。

3.1.1 等离子体电子密度对太赫兹波传输特性分析

根据图 1 中 RAMC III 飞行试验数据, 设置等离子体碰撞频率 $f_{en} = 100 \text{ GHz}$ 时, 选取等离子体电子峰值密度 $10^{10} \sim 10^{13} / \text{cm}^3$ 之间。此时太赫兹波在不同等离子体峰值电子密度下对应的透射和衰减的结果如图 5 所示。



(a) 透过率曲线



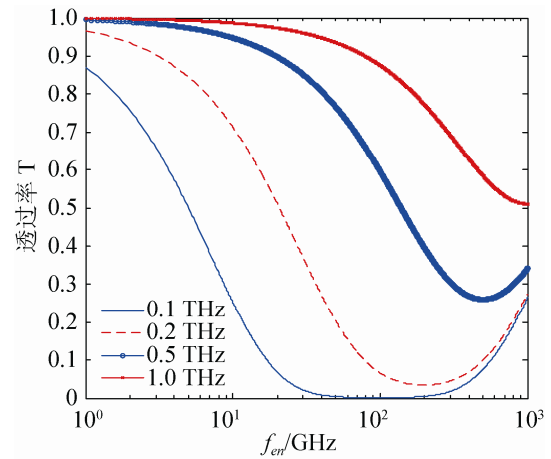
(b) 衰减曲线

图5 不同峰值电子密度对应太赫兹波的传输特性

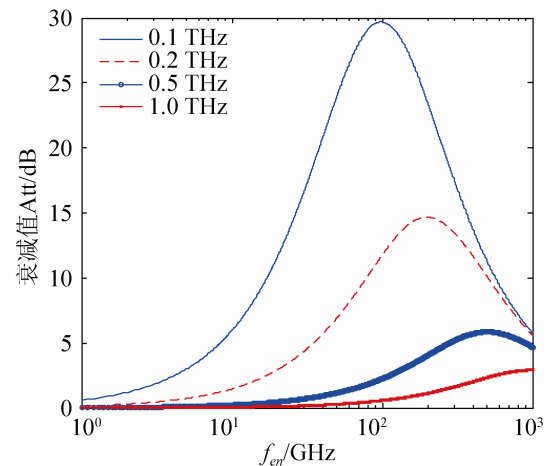
从图 5 可看出, 对于电子密度为 Epstein 函数分布等离子体来说, 随着等离子体峰值电子密度增加, 等离子体中电子数增多, 太赫兹波与带电粒子等碰撞几率增大, 电子从太赫兹波中吸收更多的能量加速自身无规则运动, 使得太赫兹波透过率减小, 衰减也增大。由图 5(a)可得, 太赫兹波在等离子体峰值电子密度 $n_{e\max} = 10^{10}/\text{cm}^3$ 时, 几乎全部透过等离子鞘套, 且随着太赫兹波频率的增加, 透过率增加。由图 5(b)可得, 在等离子体峰值电子密度 $n_{e\max} = 10^{10}/\text{cm}^3$ 时, 太赫兹波的衰减在 0.05 dB 以下, 而在峰值电子密度 $n_{e\max} = 10^{13}/\text{cm}^3$ 时, 太赫兹波的衰减也是在 30 dB 以下, 且随着太赫兹波频率的增加, 衰减减小。

3.1.2 等离子体碰撞频率对太赫兹波传输特性分析

参考图 1 中 NASA 的 RAMC III 飞行试验测试数据, 设置等离子体峰值电子密度 $n_{e\max} = 10^{13}/\text{cm}^3$, 选取等离子体碰撞频率 1~1 000 GHz 之间。此时太赫兹波在不同等离子体碰撞频率下对应的透射和衰减的结果如图 6 所示。



(a) 透过率曲线



(b) 衰减曲线

图6 等离子体碰撞频率下的太赫兹波的传输特性

由图 6 可看出, 对于电子密度为 Epstein 函数分布等离子体来说, 当入射太赫兹波频率低于等离子体碰撞频率时, 此时等离子体中电子惯性很大, 只能以驱动频率小幅振荡, 电子从入射电磁波中吸收能量增加, 透过率减小, 衰减增加^[13]。当太赫兹波频率大于等离子体碰撞频率时, 等离子体中电子以入射太赫兹波频率振荡, 等离子体碰撞频率越

大, 电子和中性粒子碰撞几率越大, 使电子从入射太赫兹波中吸收能量减小, 此时太赫兹波透过率增加, 衰减减小。

由图 6(a)可看出, 提高太赫兹波工作频率, 透过率增加; 随着等离子体碰撞频率的增加, 太赫兹波的透过率先减小后增大, 其中太赫兹波 0.1 THz 在碰撞频率 50 ~ 200 GHz 内透过率几乎为 0, 此时大部分入射太赫兹波能量进入等离子体内部。由图 6(B)可看出, 提高太赫兹工作频率, 衰减值减小; 且随着等离子体碰撞频率的增加, 衰减值先增大后减小; 且四个太赫兹波频率 0.1 THz, 0.2 THz, 0.5 THz, 1 THz 处的衰减曲线均出现峰值, 其中太赫兹波的衰减峰值对应的碰撞频率对应关系如表 1 所示。

表1 太赫兹波衰减峰值对应的碰撞频率

太赫兹波 f /THz	衰减峰值 Att /dB	碰撞频率 f_{en} /GHz
0.1	29.69	98.5
0.2	14.67	199.3
0.5	5.85	499.8
1	2.92	1000

从图 6 和表 1 可得, 提高太赫兹波的工作频率, 衰减值减小; 由于入射太赫兹波频率 f 和等离子体碰撞频率 f_{en} 相等时发生共振吸收, 使得太赫兹波衰减峰值均出现在等离子体碰撞频率附近^[15]。如表 1 所列, 在太赫兹 0.1 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 98.5 GHz, 在 0.2 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 199.3 GHz, 在 0.5 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 499.8 GHz, 在 1 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 1 000 GHz。

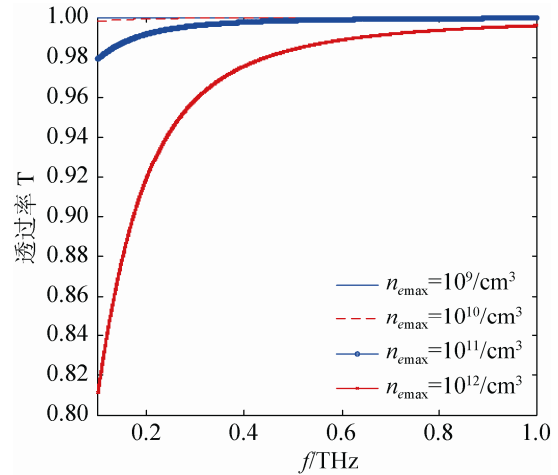
3.2 高斯函数分布

当等离子体电子密度为高斯函数分布时, 如 1.2 节中图 3 所示。

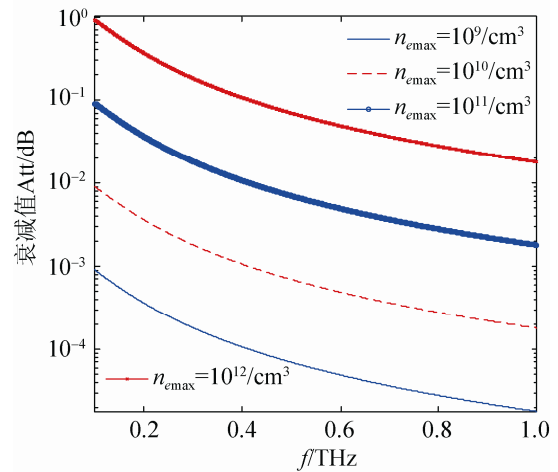
3.2.1 等离子体电子密度对太赫兹波传输特性分析

参考图 1 中 NASA 的 RAMC III 飞行试验数据, 设置等离子体碰撞频率 $f_{en} = 100$ GHz 时, 选取

等离子体电子峰值密度 $10^9 \sim 10^{12} / \text{cm}^3$ 之间。此时太赫兹波在不同等离子体峰值电子密度下对应的透射和衰减的结果如图 7 所示。



(a) 透过率曲线



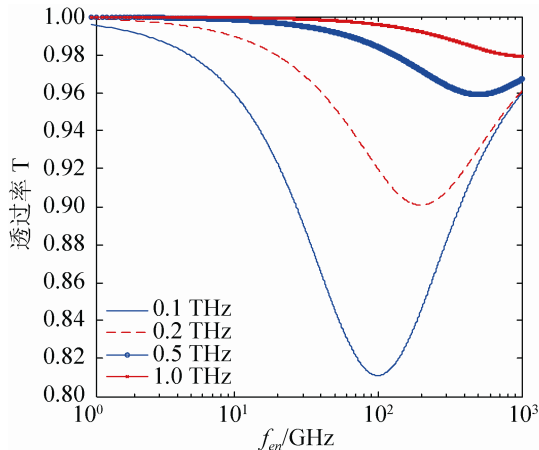
(b) 衰减曲线

图7 不同等离子体电子密度对应太赫兹波的传输特性

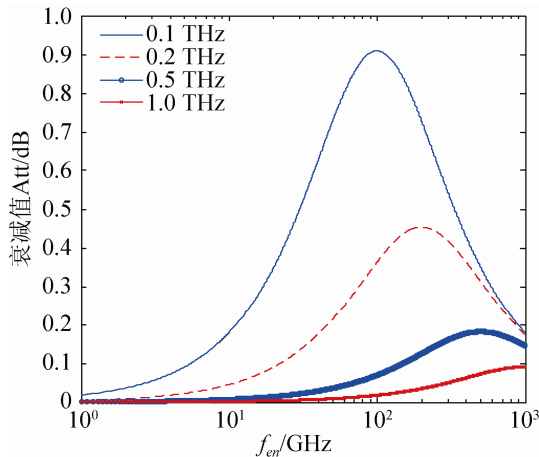
从图 7 可看出, 对于电子密度为高斯函数分布等离子体来说, 随着等离子体峰值电子密度增加, 太赫兹波透过率减小, 衰减也增大。从图 7(a)可得, 随着太赫兹波频率的增加, 透过率增加, 且太赫兹波在等离子体峰值电子密度 $n_{emax}=10^9/\text{cm}^3$, $n_{emax}=10^{10}/\text{cm}^3$ 时, 透过率几乎达到 100%。从图 5(b)可得, 随着太赫兹波频率的增加, 衰减值减小, 且在等离子体峰值电子密度 $n_{emax}=10^9/\text{cm}^3$ 时, 太赫兹波的衰减在 10^{-3} dB 以下, 而在峰值电子密度 $n_{emax}=10^{12}/\text{cm}^3$ 时, 太赫兹波的衰减也是在 1 dB 以下。

3.2.2 等离子体碰撞频率对太赫兹波传输特性分析

根据图 1 中 RAMC III 飞行试验测试数据, 设置等离子体峰值电子密度 $n_{e\max}=10^{12}/\text{cm}^3$, 选取等离子体碰撞频率 $1\sim 1000\text{ GHz}$ 之间。此时太赫兹波在不同等离子体碰撞频率下对应的透射和衰减的结果如下图 8 所示。



(a) 透射率曲线



(b) 衰减曲线

图8 等离子体碰撞频率下的太赫兹波的传输特性

由图 8 可看出, 对于电子密度为高斯函数分布等离子体来说, 随着等离子体碰撞频率增加, 太赫兹波透射率先减小后增加, 衰减先增加后减小; 随着太赫兹波频率增加, 透射率增加, 衰减减小。当太赫兹波频率较低小于等离子体频率时, 等离子体中电子以太赫兹波频率振荡, 等离子体碰撞频率越大, 电子和中性粒子碰撞几率越大, 使电子从太赫兹波中吸收能量减小, 此时太赫兹波透射率增加,

衰减减小。当太赫兹波频率大于等离子体频率时, 此时等离子体中电子惯性很大, 只能以驱动频率小幅振荡, 电子从太赫兹波中吸收能量增加, 透过率减小, 衰减增加^[4]。

由图 8(a)可看出, 太赫兹波 1 THz 在碰撞频率 $1\sim 1000\text{ GHz}$ 内透过率都在 0.95 以上, 此时大部分入射太赫兹波能量均能穿透等离子体鞘套; 在 0.1 THz 处, 太赫兹波的穿透率也均在 0.8 以上。由图 8(B)可看出, 太赫兹波 0.1 THz 以上在碰撞频率 $1\sim 1000\text{ GHz}$ 的等离子体内衰减均在 1 dB 以下。且四个太赫兹波频率 0.1 THz , 0.2 THz , 0.5 THz , 1 THz 处的衰减曲线均出现峰值, 其中太赫兹波的衰减峰值对应的碰撞频率对应关系如下表 2 所示。

表2 太赫兹波衰减峰值对应的碰撞频率

太赫兹波 f/THz	衰减峰值 Att/dB	碰撞频率 f_{en}/GHz
0.1	0.91	99.9
0.2	0.45	200.2
0.5	0.18	500.1
1	0.1	1000

从图 8 和表 2 可以看出, 四个太赫兹波工作频率出现四个衰减峰值, 在本文上述的 3.1.2 节已分析其原因。如表 2 所列, 在太赫兹 0.1 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 99.9 GHz , 在 0.2 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 200.2 GHz , 在 0.5 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 500.1 GHz , 在 1 THz 处最大衰减峰值时对应的等离子体碰撞频率为 1000 GHz 。

4 结论

从上述建立的两个非均匀等离子模型, 通过数值分析并计算一个以临近空间中低空近似代表的 Epstein 函数分布的等离子体电子密度模型, 一个以临近空间高空近似代表的高斯函数分布的等离子体电子密度模型, 得到了太赫兹波在不同等离子体电子密度分布模型下传输的透射率、衰减等曲线。由于高超声速飞行器在临近空间中低空巡航,

飞行器表面电离的电子密度比在临近空间高空较高一个数量级, 所造成的太赫兹波透过率要小, 衰减较大。等离子体电子密度为 Epstein 函数分布时, 峰值电子密度为 $10^{13} / \text{cm}^3$, 碰撞频率在 100 GHz 附近, 太赫兹波在 0.1 THz 处达到最大衰减 30 dB; 等离子体电子密度为高斯函数分布时, 峰值电子密度为 $10^{12} / \text{cm}^3$, 碰撞频率在 100 GHz 附近, 太赫兹波在 0.1 THz 处达到最大衰减 1 dB。从结果中可看出, 太赫兹波段的最大衰减也都在 30 dB 以下。

很显然数据表明: 提高通信频率至太赫兹波段有助于减轻临近空间平台出现的通信黑障问题, 但是由于太赫兹波器件不成熟, 工作于太赫兹波段的器件也是目前研究的热点, 且太赫兹波段在大气中传输衰减较大。高超声速飞行器在临近空间巡航时, 建议采用天基和空基平台中继使用, 以期减缓太赫兹波在大气传输中的衰减, 对其进行实时测控。此仿真论证结果, 可为以后设计临近空间高超声速飞行器选用通信频段时提供参考。

参考文献:

- [1] 黄华, 刘毅, 赵增亮, 等. 临近空间环境对高速飞行器影响分析与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2230-2233.
- [2] L Zhao, B W Bai, W M Bao, *et al.* Effects of reentry plasma sheath on GPS patch antenna polarization property [J]. International Journal of Antennas and Propagation(S1687-5869), 2013, 823626: 1-8.
- [3] 高平, 李小平, 谢楷, 等. 等离子体对 GPS 信号载噪比的影响 [J]. 航空学报, 2015, 36(2): 633-639.
- [4] B W Bai, X P Li, Y M Liu, *et al.* Effects of reentry plasma sheath on the polarization properties of obliquely incident EM waves [J]. IEEE Transaction on Plasma Science (S0093-3813), 2014, 42(10): 3365-3372.
- [5] Yusuke Takahashi, Kazuhiko Yamada, Takashi Abe. Examination of radio frequency blackout for an inflatable vehicle during atmospheric reentry [J]. Journal of Spacecraft and Rockets (S0022-4650), 2014, 51(2): 430-441.
- [6] Eric D Gillman, John E Foster. Review of leading approaches for mitigating hyper sonic vehicle communications blackout and a method of ceramic particulate injection via cathode spot arcs for blackout mitigation [R]// NASA TM-2010-216220. USA: NASA, 2010.
- [7] 于哲峰, 刘佳琪, 刘连元, 等. 临近空间高超声速飞行器 RCS 特性研究 [J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 713-719.
- [8] 陈如山, 丁大志, 樊阵宏, 等. 克服临近空间等离子鞘套通信黑障的磁窗天线: 中国, 103531897 [P]. 2014-01-22.
- [9] Surzhikov S T. Three dimensional simulation of shock layer ionization for RAM C-II flight tests [C]// AIAA Sci Tech 52nd Aerospace Sciences Meeting, National Harbor, Maryland, USA, 2014. USA: AIAA, 2014.
- [10] Zhao Qing, Xing Xiaojun, Xuan Yinliang, *et al.* The influence of magnetic field on antenna performance in plasma [J]. Plasma Science and Technology (S1009-0630), 2014, 16(6): 614-619.
- [11] Zheng L, Zhao Q, Liu S Z, *et al.* Theoretical and experimental studies of 35GHz and 96GHz electromagnetic wave propagation in plasma [J]. Prog. Electromagn. Res. M (S1559-8985), 2012, 24: 179-192.
- [12] D Brida, D Tskhakaya. Investigation of Oscillations in the Plasma Sheath [J]. Contribution to Plasma Physics (S1521-3986), 2014, 54(4/6): 469-473.
- [13] 石磊. 近空间飞行器信道特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [14] 陈长兴, 蒋金, 凌云飞, 等. 适合临近空间通信的 Ka/V 双频口径耦合天线设计 [J]. 宇航学报, 2015, 36(8): 868-872.
- [15] 郑灵. 飞行器等离子体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.
- [16] Huber P W, Evans J S, Schexnayder Jr C J. Comparison of theoretical and flight-measured ionization in a blunt body reentry flowfield [J]. AIAA Journal, 1971, 9(6): 1154-1162.
- [17] 郑灵, 赵青, 刘述章, 等. 太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(24): 1-5.
- [18] Jin Li, Yiming Pi, Xiaobo Yang. A conception on the terahertz communication system for plasma sheath penetration [J]. Wireless Communications and Mobile Computing (S1530-8669), 2014, 14: 1252-1258.
- [19] C J Schexnayder, J S E Vans, P W Huber. Comparison of theoretical and experimental electron density for RAM C flight, NASA-SP252 [Z]. USA: NASA, 1970: 277-304.
- [20] C T Swift, F B Beck, J Thomson, *et al.* RAM C-III S-band diagnostic experiment [M]. Washington, USA: NASA, 1971: 137-155.