

等离子体鞘套局部电磁传输通道法*

杨鑫^{1,2,3}

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省微纳电子与软件技术重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 根据 RAM-C 高超音速飞行试验数据, 给出一种鞘套反演建模法, 能够以一维实验数据, 构建三维局部电磁传输通道。在此基础上, 采用非均匀介质射线跟踪法, 研究鞘套对 L 和 S 波段部分频点的能量传输干扰。研究发现, 在所关注频段, 鞘套显示出一些新的影响特征, 例如传输汇集效应, 电磁能量在局域具有沿特定方向传输的现象。该研究结果可进一步促进对电波在鞘套中传播行为的理解, 也为相关问题研究提供了一种更贴近实际物理背景的建模方法。

关键词: 实验数据; 电磁建模; 电波传播

中图分类号: TN014

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211294

中文引用格式: 杨鑫. 等离子体鞘套局部电磁传输通道法[J]. 电子技术应用, 2021, 47(8): 7-10, 19.

英文引用格式: Yang Xin. Method of the local EM transmission channel for plasma sheath[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(8): 7-10, 19.

Method of the local EM transmission channel for plasma sheath

Yang Xin^{1,2,3}

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Engineering Research Center of Semiconductor Power Device Reliability, Ministry of Education, Guiyang 550025, China;

3. Key Laboratory of Micro-Nano Electronics and Software Technology of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: According to RAM-C experimental data, an inversion modeling method for plasma sheath is presented, which provides a new way to construct the three-dimensional(3D) local transmission channel from one-dimensional(1D) sheath data. Then, the ray tracing method is used to study the energy transmission interference of the plasma sheath to some frequency points at L and S bands. Finally, the investigation shows some new propagation behaviors, such as the transmission convergence effect, where the EM energy is locally transmitted in a specific direction. The results can further promote the understanding on sheath interference, and provide a new modeling method for the actual physical modeling of related problems.

Key words: experimental data; EM modeling; electromagnetic waves propagation

0 引言

等离子体鞘套建模是高超音速飞行领域的重要问题, 只有获取可靠的鞘套模型, 才能全面了解和掌握鞘套的电磁传输特性, 进一步为缓解通信黑障提供条件^[1-3]。但多年来, 因受制于实验条件, 人们主要从仿真角度研究鞘套建模问题^[4-6]。这些研究的出发点是 Navier-Stokes 方程, 结合具体条件解该方程, 获得鞘套数值模型。此方法的优势在于, 摆脱了物理实验对研究的束缚, 同时易于研究各种环境下鞘套的基本特征。可是它也有不足之处, 譬如, 难以模拟实际高超音速飞行环境, 且仿真模型往往限于钝头和尖头等简单小尺度几何模型^[7]。实际

上, 自 21 世纪 70 年始, 美国在高超音速方面开展了一系列飞行实验^[8-9], 所得数据目前已对公众开放, 只是实验采集的仅有一维数据, 这种数据形式无疑限制了它的应用范围。因此, 主要在研究鞘套的一维传输特性时^[10-12], 这些数据才有被用到。

然而在特定条件下, 一维数据往往也包含三维信息, 用它可近似还原目标三维模型。这正是本文关注的主要问题, 并将其用于电磁传输特性分析。首先, 根据鞘套局部区域具有相似性的特点, 给出一种反演建模法, 由鞘套一维数据反演三维传输通道。在此基础上, 利用非均匀介质射线跟踪法, 研究鞘套对电波能量传输的影响, 重点揭示 L 和 S 这一卫星通信和雷达工作波段的传播行为。本文中所给方法为鞘套建模提供一新思路, 研究

* 基金项目: 贵州大学自然科学基金(2019-62); 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心开放基金(ERCMEKFJ2019-05)

结果可增进对鞘套电磁传输干扰的理解。

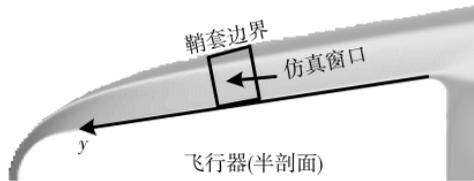
1 鞘套局部特征建模

实验数据通常满足某种函数关系, 可选用不同数学形式进行描述, 数学形式的选用直接影响后续计算的复杂程度。针对鞘套模型, 本文以文献[13]一维径向电子密度分布实验数据为基础, 选用指数函数对其拟合后, 结果如下:

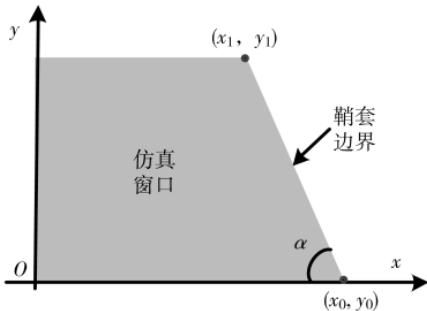
$$n(x) = a + bc^x \tag{1}$$

其中, 参数 a 、 b 和 c 分别取值 $4.396\ 91 \times 1\ 017$ 、 $1.904\ 5 \times 1\ 019$ 和 $1.849\ 06 \times 10^{-5}$ 。考虑实际情形, 鞘套局部范围往往具有类似分布, 在数学上满足近似的函数关系。所以从局部近似角度考虑, 一维分布函数可表征鞘套局域特征, 这是反演建模的基础。图 1(a) 给出了本文关注的鞘套局域示意, 即“仿真窗口”。只要该窗口物理尺度选取恰当, 内部会遵循相似分布, 这种分布就可由一维数据反演。图 1(b) 为仿真窗口的几何模型。因鞘套边界必然与飞行器外形相关, 为使它的空间分布更贴近实际情形, 本文在式(1)基础上, 引入电子密度伸缩因子 β , 使鞘套边界特征与飞行器表面吻合。此时, 经式(1)反演后, 鞘套轴向剖面局部分布如下:

$$\begin{cases} n(x) = a + bc^{\beta x} \\ \beta = \frac{x_0}{\frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0}(y - y_0) + x_0} \end{cases} \tag{2}$$



(a) 仿真窗口取样



(b) 仿真窗口几何模型

图 1 鞘套几何分布图

因需在球坐标系下求解方程, 针对固定剖面譬如 $\varphi=0$, 式(3)球坐标形式为:

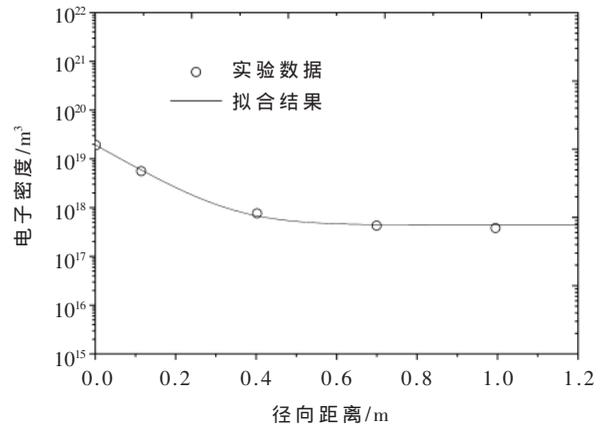
$$\begin{cases} n(r, \theta) = a + bc^{\beta r \sin(\theta)} \\ \beta = \frac{x_0}{\frac{x_1 - x_0}{z_1 - z_0}[r \cos \theta - z_0] + x_0} \end{cases} \tag{3}$$

为便于后续计算, 坐标轴 y 已用 z 代替。如图 1(a) 所示, 伸缩因子本质是: 模拟鞘套实际边界, 保证仿真窗口在满足边界条件同时, 区域内数据还能够遵循相似分布。再如图 1(b) 所示, 在边界点 (x_0, y_0) 与 (x_1, y_1) 已知情形下, 可得鞘套边界满足方程:

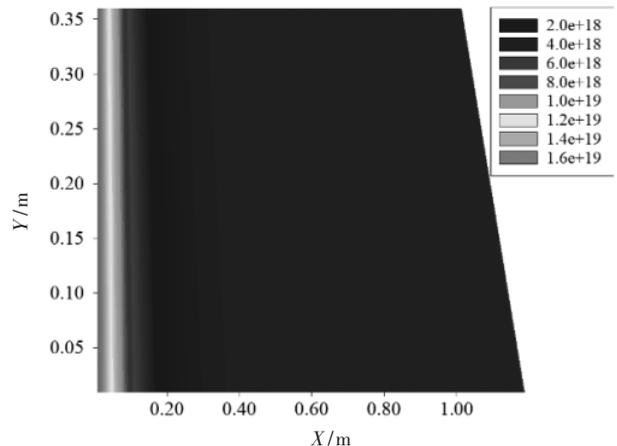
$$x \leq \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0}(y - y_0) + x_0 \tag{4}$$

式(4)同样可变换为球坐标表述形式。只是对于复杂外形飞行器, 鞘套边界往往比较复杂, 边界条件也就需根据具体环境进行设定。

最后, 根据上述结果, 可计算鞘套的局部特征分布, 如图 2 所示。图 2(a) 为式(1)计算结果, 并与实验数据对比, 展示出函数的良好拟合性。图 2(b) 是根据式(2)建立的鞘套局部仿真窗口, 计算中, (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 的取值分别为 $(1.2, 0.0)$ 以及 $(1.0, 0.4)$



(a) 拟合函数与实验数据对比



(b) 鞘套仿真窗口电子密度分布

图 2 实验数据的提取与建模

2 等离子体中的射线跟踪法

高超音速飞行器鞘套实质上是等离子体薄层,故可用等离子体中电波传播原理求解相关问题。高频情形下,电波行为可由射线方程描述^[14]:

$$\begin{cases} \frac{dr}{dp'} = \frac{c}{\omega} k_r \\ \frac{d\theta}{dp'} = \frac{c}{r\omega} k_\theta \\ \frac{d\varphi}{dp'} = \frac{c}{r\omega \sin\theta} k_\varphi \\ \frac{dk_r}{dp'} = -\frac{0.5\omega}{c} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{c}{r\omega} k_\theta^2 + \frac{c}{r\omega} k_\varphi^2 \\ \frac{dk_\theta}{dp'} = \frac{1}{r} \left(-\frac{0.5\omega}{c} \frac{\partial X}{\partial \theta} - \frac{c}{\omega} k_r k_\theta + \frac{c}{\omega} k_\varphi^2 \operatorname{ctg}\theta \right) \\ \frac{dk_\varphi}{dp'} = \frac{1}{r \sin\theta} \left(-\frac{0.5\omega}{c} \frac{\partial X}{\partial \varphi} - \frac{c}{\omega} k_r k_\theta \sin\theta - \frac{c}{\omega} k_\theta k_\varphi \cos\theta \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, p' 为电磁射线积分路径; c 为自由空间中电波传播速度; r 、 θ 和 φ 表示球坐标系空间坐标值, k_r 、 k_θ 和 k_φ 是波矢量在球坐标系中的分量。而 X 代表折射率的分布函数:

$$X = 1 - n^2(r, \theta) \quad (6)$$

其中, $n(r, \theta)$ 为鞘套折射率空间分布,可根据介电常数计算。对于等离子体这类物质,介电常数的计算模型为:

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \omega_c^2)} - j \frac{\omega_c}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \omega_c^2)} \quad (7)$$

式中, ω_p 代表等离子频率, ω_c 为等离子体碰撞频率。结合式(6)和式(7)求解式(5),获得电波在鞘套内各方向的传播轨迹,进一步便可分析其对电波的干扰机制。本文主要关注它在电波能量传输方面的影响。设射线起始点为 P_0 ,终点为 P_1 ,电波在两点间的衰减情况 $\text{Att}(\text{dB})$ 可由下式得到:

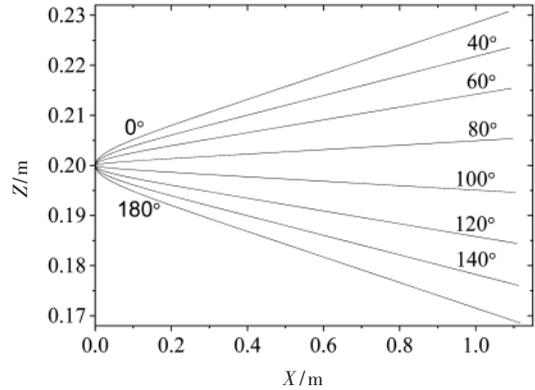
$$\begin{cases} E = E_0 \int_{P_0}^{P_1} e^{-\alpha} dr \\ \text{Att} = \log_{10}(E/E_0) \end{cases} \quad (8)$$

其中, E_0 表示电波的初始振幅, E 为观察点处的场值。该式的物理意义为:若将电磁轨迹分为若干单元 dr ,则沿轨迹的整体衰减等于每 dr 单元衰减的叠加。前述方程的数值解法请见文献[15]。

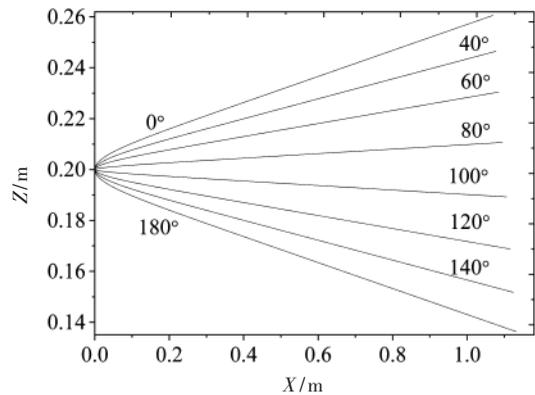
3 鞘套的电磁传输特性

根据RAM-C飞行实验数据,采用反演建模法构建鞘套模型;然后,结合非均匀介质电波传播原理与射线跟踪法,分析S和L波段部分频点电波在鞘套中的传播行为,计算结果如图3和图4所示。图中射线方向以图1飞行器表面为参照,沿表面正向取作 0° 。结果显示,鞘套对电波行为影响明显,并显示出一些新的现象。

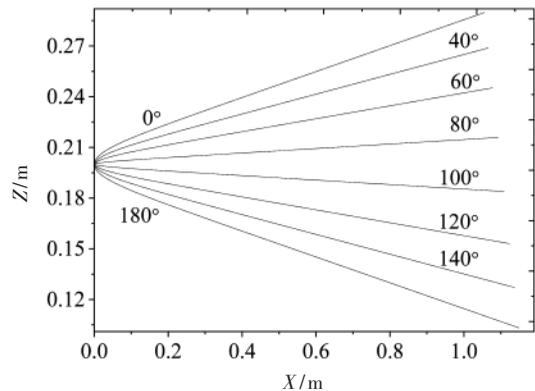
首先,如图3所示,电波表现出沿特定方向传播的行为,这种行为随频率增加而减弱,该现象可由鞘套电



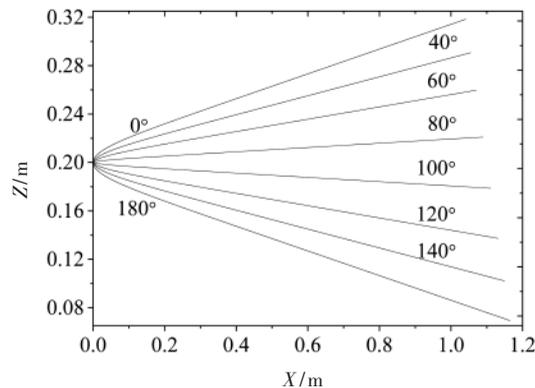
(a) 1 GHz 电波



(b) 2 GHz 电波



(c) 3 GHz 电波

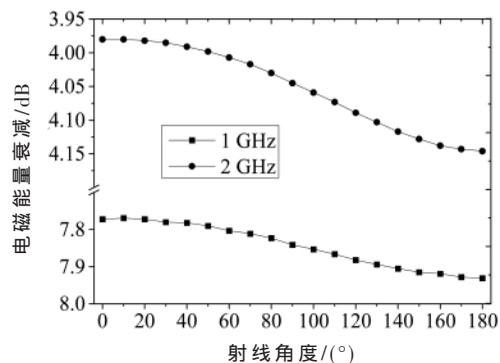


(d) 4 GHz 电波

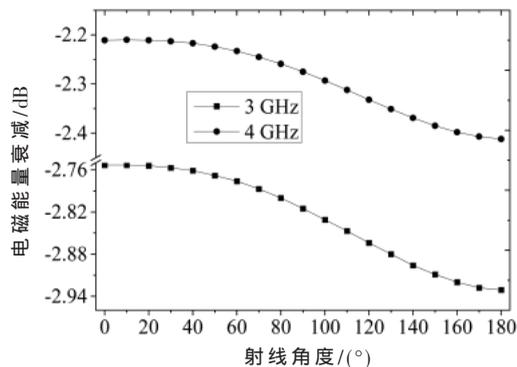
图3 电波在鞘套中的传输轨迹

子浓度分布解释。图 2 显示,沿飞行器径向,电子浓度呈逐渐降低趋势,这一趋势在距飞行器表面 0.0~0.3 m 处更显著。正是电子浓度上述特征,导致电磁射线趋于 90° 方向传播;而后在约大于 0.3 m 范围,因电子密度空间变化率相对较小,射线直线特征逐渐增强。对比图 3(a) 和图 3(d),随着频率增加,鞘套对电波行为的影响减弱,沿特定方向传播的趋势亦随之减弱。这些现象表明,若仅从传播方向角度考虑,本文关注的鞘套模型会有助于电波传播。另外,在 1 GHz 时,射线分布呈良好对称性;但随着频率增加,如 4 GHz 时,对称性逐渐消失;这同样可由鞘套空间分布特征来揭示。如图 2(b) 所示,鞘套电子密度的空间变化率分布具有沿轴向(飞行器头部)增强的趋势,它使得在 0°~90° 方向传播的射线受鞘套影响更加明显;并且随着电波频率增加,这种差异会更加显著,最终导致电波在传输方向上对称性的消失。

最后,给出与图 3 相应频点电波在透过鞘套后的衰减情况,如图 4 所示。总体来看,鞘套对 L 和 S 波段显示出类似的衰减趋势:沿飞行器头部方向传播的射线,传输效率更高;而尾部方向所受干扰最为强烈。该现象与鞘套边界空间分布相关:沿头部方向传播的射线穿过较短的高密度鞘套域,故受鞘套影响相对较小。这些结果表明,因 L 波段衰减强烈,已不适用于这种通信环境;而 S 波段穿透鞘套的能力较强,所以更有可能满足这种环境下的通信需求。



(a) L 波段内频点



(b) S 波段内频点

图 4 电波在鞘套中的衰减情况

4 结论

本文以高超音速实验数据为基础,给出一种反演建模法并用于鞘套电磁建模;后采用非均匀介质电波传播原理与射线跟踪法,揭示鞘套对 L 和 S 电波段传输的影响,并获得一些新结果。研究显示,本文所关注鞘套模型具有使电波沿特定方向传播的特征,但该特征会随着电波频率增加而减弱;另外,电波沿飞行器头部方向传播能力最强,向尾部传播能力反之。研究还表明,因 S 波段总体上受鞘套的干扰较弱,可为该飞行场景下的正常通信提供条件。这些结果也会有助于促进对鞘套在电波传输干扰方面的认识。

参考文献

- [1] OUYANG W, LIU Y, ZHANG X. Impact of angle of attack on plasma flow and electromagnetic wave propagation around hypersonic vehicles[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(6): 2270–2280.
- [2] WEI H, LIU Y. A 3-D total-field/scattered-field plane-wave source for the FDTD analysis of re-entry plasma sheath[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(8): 6214–6225.
- [3] ZHANG H, YANG M. Short-frame fountain code for plasma sheath with communication window[J]. *IEEE Tran. on Vehicular Tech.*, 69(12): 15569–15579.
- [4] TIAN D, FAN G, CHEN W. Numerical investigation of dynamic properties of plasma sheath with pitching motion[J]. *Applied Physics and Engineering*, 2020, 21(3): 209–217.
- [5] ZHANG J H, LIU Y M, LI X P. The study of spatial dispersion effect on electromagnetic waves propagation in the warm non-uniform re-entry plasma sheath[J]. *Physics of Plasma*, 2020, 27(2): 022104.
- [6] 李江挺, 郭立新, 方全杰, 等. 等离子鞘套中的电波传播问题研究[J]. *微波学报*, 2010, 26(S1): 11–14.
- [7] 杨鑫, 魏兵, 尹伟科, 等. 超高速飞行器气动外形对电波传播特性的影响[J]. *西安电子科技大学学报*, 2018, 45(3): 40–44, 162.
- [8] SCHROEDER L, AKEY N D. Material injection alleviation during the RAM C-III flight[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1973, 10(3): 170–174.
- [9] MEI J, XIE Y. Effects of a hypersonic plasma sheath on the performances of dipole antenna and horn antenna[J]. *IEEE Tran. on Plasma Science*, 2017, 45(3): 364–371.
- [10] JONES R M, STEPHENSON J J. A versatile three-dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere[R]. *NASA Sti/recon Technical Report N*, 1975.
- [11] 耿兴宁, 徐德刚. 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): 78–83.
- [12] CHEN X Y, SHEN F F, LIU Y M, et al. Improved scattering-matrix method and its application to analysis of electro-

(下转第 19 页)

- wide stopband[J].IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2014, 24(11): 742-744.
- [7] CHEN X, YU X, Sun Sheng. Design of high-performance microstrip diplexers with stub-loaded parallel-coupled lines[J]. Electronics Letters, 2017, 53(15): 1052-1054.
- [8] SHANG X, WANG Y, XIA W, et al. Novel multiplexer topologies based on all-resonator structures[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2013, 61(11): 3838-3845.
- [9] GUAN X, YANG F, LIU H, et al. Compact and high-isolation diplexer using dual-mode stub-loaded resonators[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2014, 24(6): 385-387.
- [10] XIAO J K, ZHANG M, MA J G. A compact and high-isolated multiresonator-coupled diplexer[J]. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., 2018, 28(11): 999-1001.
- [11] 黄巍. 面向无线通信的高性能平面双工器研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [12] VOSOOGH A, SORKHERIZI M S, ZAMAN A U, et al. An integrated Ka-band diplexer-antenna array module based on gap waveguide technology with simple mechanical assembly and no electrical contact requirements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2): 962-972.
- [13] 李飞. 基于消失模的新型波导滤波器研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [14] DE PAOLIS F. Dimensional synthesis of evanescent-mode ridge waveguide bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2): 954-961.
- [15] 尤清春, 陆云龙, 尤阳, 等. 一种紧凑型的宽频带单脊波导功分器[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(2): 50-54.

(收稿日期: 2021-04-02)

作者简介:

余亮(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 毫米波集成电路。

张健(1978-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 毫米波集成电路及无线通信系统设计, E-mail: zhangjian@hdu.edu.cn。

孙朋飞(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 毫米波集成电路及应用。



扫码下载电子文档

(上接第 10 页)

- magnetic wave reflected by reentry plasma sheath[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(5): 1755-1769.
- [13] KUNDRAPU M, LOVERICH J, BECKWITH K, et al. Modeling radio communication blackout and blackout mitigation in hypersonic vehicles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 52(3): 853-882.
- [14] MICHAEL J R, STEPHENSON J J. A versatile three-dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere[R]. Washington, DC: NTIA Technical Report OT-75-76, USA, 1975.
- [15] YANG X, WEI B, YIN W. Relationship between the velocity of hypersonic vehicles and the transmission efficiency of radio waves[J]. Waves in Random and Complex Media, 2019, 29(2): 382-391.

(收稿日期: 2021-01-13)

作者简介:

杨鑫(1988-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 非均匀介质中电波传播的数值方法与应用, E-mail: e_yangx@126.com。



扫码下载电子文档

(上接第 14 页)

- [12] TAN R, ZHOU J, DU H, et al. An modeling processing method for video games based on deep reinforcement learning[C]//2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, 2019: 939-942.
- [13] SILVER D, LEVER G, HEES N, et al. Deterministic policy gradient algorithms[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, 2014: 387-395.
- [14] 马东立, 罗勋, 裴旭. 低重频 PD 雷达的临界散射截面计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1011-1014, 1050.

(收稿日期: 2021-07-12)

作者简介:

马子杰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 体系仿真、机器学习。

高杰(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 体系仿真、目标特性、计算电磁学。

谢拥军(1968-), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算电磁学及应用、天线与微波工程、太赫兹技术等, E-mail: yjxie@buaa.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所