

# 弹道导弹助推段尾喷焰 RCS 特性研究<sup>\*</sup>

彭鹏<sup>1</sup>, 童创明<sup>1,2</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 姬伟杰<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2. 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:**研究了弹道导弹助推段尾喷焰在 HF 频段的 RCS 特性。通过研究尾喷焰的等离子体性质, 推导了尾喷焰全反射的临界电子浓度, 建立了尾喷焰的等离子体模型。采用流体力学的方法分析了尾焰上流体动力学参数的分布, 建立了尾喷焰的流体力学模型。最后采用计算电磁学的矩量法计算了助推段弹道导弹尾喷焰的 RCS 特性, 通过商业软件 Feko 5.4 验证了计算方法的准确性。研究结果为天波超视距雷达的精确设计提供了依据。

**关键词:**超视距雷达; 助推段; 导弹尾焰; 矩量法; 雷达散射截面积

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2013.05.005

中图分类号:TJ761.3; TN011

文献标志码:A

文章编号:1009-086X(2013)-05-0022-05

## RCS of Ballistic Missile Plume in Boost Phase of Flight

PENG Peng<sup>1</sup>, TONG Chuang-ming<sup>1,2</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, JI Wei-jie<sup>1</sup>

(1. AFEU, School of Air and Missile Defense, Shaanxi Xi'an 710051, China;

2. State Key Lab. of Millimeter Waves, Jiangsu Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The radar cross section (RCS) of ballistic missile in the boost phase of flight at high frequency (HF) band is studied. To set up plasma model of the plume, the plasma property is studied; besides, the critical electron density is produced. Methods of hydrodynamics is adopted to analyze the distribution of hydro dynamical parameters, so that the hydrodynamic model is set up as well. Finally, RCS of the ballistic missile plume in the boost phase of fight is calculated with method of moment (MOM) algorithm and examined by Feko 5.4. The research provides principles for designing over-the-horizon radar (OTHR).

**Key words:** over-the-horizon radar (OTHR); boost phase; missile plume; method of moments (MOM); radar cross section (RCS)

## 0 引言

弹道导弹是现代战争中极具威胁的一种远程精确打击武器, 弹道导弹防御已成为当今作战研究的

焦点问题。助推段是弹道导弹发射后最脆弱的阶段, 其飞行速度慢且没有释放诱饵等突防装置, 雷达特性非常明显。工作在高频 (high frequency, HF) 频段的天波超视距雷达可以利用电离层的反射探测到

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-10-10; 修回日期: 2012-11-23

基金项目: 陕西省自然科学研究计划 (2011JM8025)

作者简介: 彭鹏 (1990-), 男, 江西新余人。硕士生, 主要研究方向为目标与环境特性。

通信地址: 710051 陕西省西安市长乐东路甲字一号防空反导学院防空导弹微波应用教研室

E-mail: pengpenghello@sina.com

视距以外数千千米处助推段的弹道导弹。利用天波超视距雷达对抗处于助推段的弹道导弹可以实现对弹道导弹的早期预警和远程监测<sup>[1]</sup>。

雷达散射截面(radar cross section, RCS)是雷达设计的重要参数,它反映了目标对雷达信号的散射能力,在估计雷达威力、检测雷达性能、信号处理、目标识别等方面有重要作用<sup>[2]</sup>。研究表明,助推段弹道导弹尾部喷焰是一种电子浓度与碰撞频率都要远高于大气电离层的等离子体,在 HF 频段具有很强的散射能力<sup>[3-4]</sup>。因此在计算超视距雷达对抗助推段弹道导弹的 RCS 时必须考虑尾喷焰的影响。本文研究了喷焰的等离子体性质,推导了等离子体散射的临界电子浓度,采用流体力学的方法建立了尾焰电子浓度分布的微分方程。最后采用计算电磁学的矩量法计算了超视距雷达对抗助推段弹道导弹时尾焰对 RCS 的影响。

## 1 助推段导弹尾焰建模

### 1.1 等离子体模型

助推段火箭发动机持续工作,燃烧室内的碳氢化合物燃料燃烧将产生大量的热,掺入燃料中的碱金属在高温下发生自由电子电离与复合形成等离子体,碱金属离子一般为二价的钾和钠,其电离与复合反应可以用下面通式表示<sup>[5]</sup>:



导弹尾喷焰是一种弱电离的等离子体,离子运动速度很慢,因此等离子体喷焰的电学性质主要靠电子运动及电子与分子的碰撞来体现。等离子体与普通气体有很大区别,在等离子体内除了有自由电子的热运动外还存在粒子振荡使得局部区域电中性被破坏。振荡角频率 $\omega_p$ 反映了电中性破坏的快慢,其表达式为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2)$$

不同频率的电磁波照射时,等离子体会表现出导体与介质的双重特性,其对电磁波的折射率表达式为<sup>[6]</sup>

$$n = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu_{en})} \quad (3)$$

可以看出自由电子碰撞频率和电磁波与等离子体频率比值是影响折射率的主要因素,先不考虑碰撞频

率 $\nu_{en}$ ,则式(3)变为

$$n = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (4)$$

当 $\omega/\omega_p < 1$ 时 $n < 0$ ,电磁波会发生全反射。代入等离子频率表达式可得对电磁波全反射的临界电子浓度为

$$n_c = \frac{\omega^2 m_e \epsilon_0}{e^2} \quad (5)$$

### 1.2 流体动力学模型

考虑弹道导弹发射后在低空时的情形,这时环境压强变化不大可以假定始终为一个大气压。尾流经喷口喷出不再受壁面的限制而成为自由流体向外扩散,为简化分析不考虑喷口的张角,尾流沿喷口轴向的喷射能力要远比横向扩散强得多,因而可以把尾流近似等效为一圆柱体内的一维流动,温度 $T$ 、电子浓度 $n_e$ 及传输速度 $u$ 等流体动力学参数在圆柱体横截面上是均匀分布的。

温度分布由图1给出,喷口处尾流因二次燃烧温度骤升,随着热量向环境中扩散,逐渐冷却至环境大气温度(288 K)。

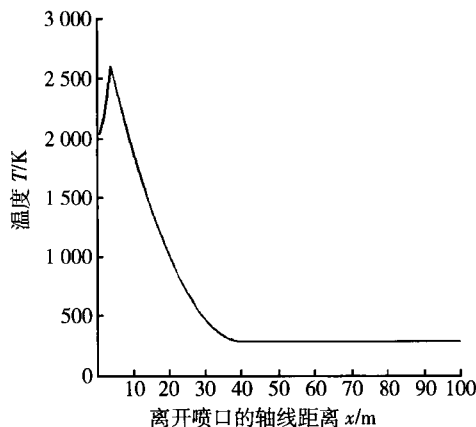


图1 离开喷口轴向温度分布

Fig. 1 Temperature distribution along axis out of the rocket exit

只考虑热量沿轴向的流动,在尾焰系统内把热量的流动看作绝热的等熵过程,满足等熵关系式 $\frac{u^2}{2} + h = h_0$ 与 $\frac{T}{T_0} = \frac{h}{h_0}$ ,可以得到电子传输速度与温度的关系表达式为

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{u^2}{2h_0} \quad (6)$$

式中: $h = C_p T$ ;  $h_0 = C_p T_0$ ;  $T_0$  为大气温度;  $C_p$  为比定

压热容,  $C_p = \frac{k}{k-1}R$ ;  $k$  为等熵系数, 对固体火箭发动机一般可取  $k = 1.25$  [7]。

采用流体力学的欧拉法建立电子浓度沿尾焰轴向分布的微分方程, 如图 2 所示, 将尾流部分分成  $M$  个单元, 每个单元体积为  $V = S\Delta x$ , 欧拉法是在每个单元体上进行分析, 选取第  $m$  个单元观察电子浓度的变化。

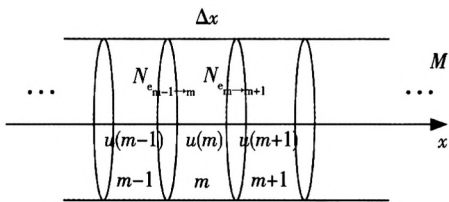


图 2 单元内电子传输示意图

Fig. 2 Electron transmission within cells

单位时间内由第  $m-1$  个子单元流入第  $m$  个子单元的电子数为

$$N_{e_{m-1} \rightarrow m}(t) = n_{e_{m-1}}(t)u(m-1)S. \quad (7)$$

从第  $m$  单元流出的电子数为

$$N_{e_{m \rightarrow m+1}}(t) = n_{e_m}(t)u(m)S, \quad (8)$$

可以写出第  $m$  个子单元电子浓度时变得微分方程为

$$\frac{dn_{e_m}(t)}{dt} + \alpha n_{e_m}^2(t) = \frac{[u(m-1)n_{e_{m-1}}(t) - u(m)n_{e_m}(t)]}{\Delta x}, \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为复合系数,  $\alpha = \frac{10^{-25}}{T(m)}n_{e_m}(t)$  [8], 与式(9)类似共有  $M$  个微分方程。

根据统计热力学推导, 可以得到关于反应方程式(1)的一次电离平衡成分的 SAHA 方程 [9] 为

$$\frac{n_1 n_e}{n_A} = \frac{2F_1}{F_A} \frac{(2\pi m_e RT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \cdot e^{-\frac{I}{kT}}, \quad (10)$$

式中:  $n_A, n_1, n_e$  分别为中性原子、离子、电子的粒子束浓度;  $F_1, F_A$  分别为离子、中性原子的分配函数;  $h$  为普朗克常数;  $I$  为电离电位。

根据式(10)可以求得喷口处的初始电子浓度。对  $M$  个微分方程采用 Runge-Kutta 法迭代求解, 可得尾焰轴向上电子浓度分布如图 3 所示。

结合式(5)可以估算尾焰的等效长度, 当尾焰

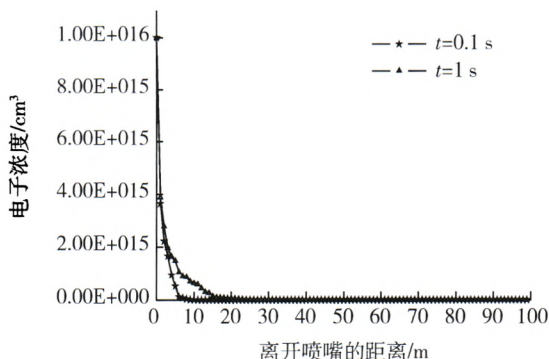


图 3 电子浓度在喷焰轴向分布

Fig. 3 Distribution of electron density

传播时间  $t = 0.1$  s 时尾焰传播距离为 10 m, 电子浓度高于  $n_c$  有效长度也为 10 m, 传播 1 s 后尾焰长度可达 100 m, 有效长度部分只有 40 m。这说明尾焰的最大可能有效长度为 40 m。

## 2 矩量法

在 HF 频段导弹目标电尺寸较小大都处于谐振区, 可以用矩量法求得其散射特性。

目标表面电流的电场积分方程 (EFIE) [10] 为

$$j\omega\mu\hat{t}\int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}(\mathbf{r}')dS' + \frac{1}{j\omega\epsilon}\hat{t}\int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}')dS' = -\hat{t}E^{inc}(\mathbf{r}). \quad (11)$$

对式(11)采用 Galekin-MOM [11] 展开为矩阵方程, 首先采用三角形网格对目标表面进行剖分, 对目标的表面电流用 RWG 基函数 [12] 离散, 而后进行 Galekin 测试 [13] 可得矩阵方程:

$$\mathbf{ZI} = \mathbf{V}. \quad (12)$$

其中阻抗元素的计算式为

$$Z_{mn} = j\omega\mu_0 \int_{S_m} d\mathbf{r} f_m(\mathbf{r}) \int_{S_n} d\mathbf{r}' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') f_n(\mathbf{r}') + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{S_m} d\mathbf{r} \nabla f_m(\mathbf{r}) \int_{S_n} d\mathbf{r}' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \nabla' f_n(\mathbf{r}'). \quad (13)$$

电压矩阵元素计算式为

$$\mathbf{V}_m = - \int_{S_m} d\mathbf{r} f_m(\mathbf{r}) E^{inc}(\mathbf{r}). \quad (14)$$

通过 CG 迭代法解得电流矩阵, 代入式(15)可求得散射场为

$$E^s(\mathbf{r}) = j\omega\mu \left[ \nabla \int_{S'} \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') G dS' + k^2 \int_{S'} \mathbf{J}(\mathbf{r}') G dS' \right]. \quad (15)$$

采用式(16)可计算远场 RCS [13] 为

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4 \pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^{inc}|^2} \tag{16}$$

3 仿真结果及分析

采用矩量法仿真超视距雷达对抗助推段弹道导弹的 RCS。导弹直径  $D = 0.1 \text{ m}$ , 长度  $L = 11.24 \text{ m}$ 。入射角定义为入射波方向与弹头的夹角, 入射角随导弹发射后姿态的变化取  $\theta = 0 \sim 90^\circ$ 。工作在不同频率的天波超视距雷达可探测到不同的距离范围, 仿真时取表 1 给出的 3 个典型工作频率<sup>[2]</sup>。

表 1 天波超视距雷达工作频率对应的探测范围

Table 1 Probing range at some typical frequencies of OTHR	
工作频率/MHz	探测距离/km
10	600 ~ 3 000
15	1 250 ~ 3 000
25	2 250 ~ 2 750

仿真结果采用商业软件 Feko5.4 验证如图 4 ~ 6 所示。

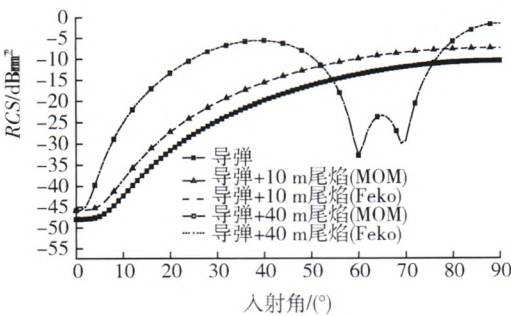


图 4 10 MHz 时导弹尾焰计算结果  
Fig. 4 Missile plume calculation results at 10 MHz

图 4 中采用矩量法计算的结果与商业软件 Feko5.4 的仿真结果吻合良好, 验证了本文矩量法计算的可靠性。可以看出, 在 HF 频段, 尾焰对助推段弹道导弹 RCS 的影响是非常明显的。当入射角较小时, 在一个宽的角度范围上尾焰会增大弹体的 RCS。同时当尾焰较长时还会带来电磁波的谐振。

图 5 和图 6 表明, 采用较高工作频率的超视距雷达能观察到更强烈的谐振现象。谐振现象产生的原因在于尾焰的存在增加了导弹的有效电长度, 使之与入射波波长可比拟, 从而导致照射在目标上电磁波相位变化显著, 使不同角度的 RCS 的变化出现

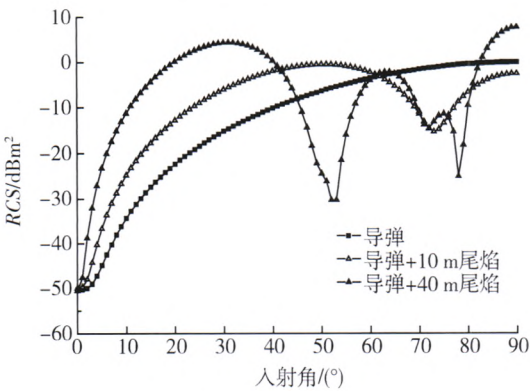


图 5 15 MHz 时导弹尾焰计算结果  
Fig. 5 Missile plume calculation results at 15 MHz

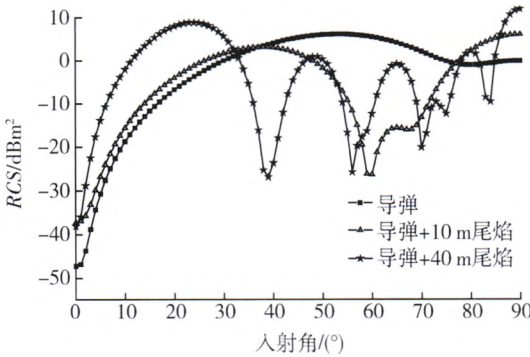


图 6 25 MHz 时导弹尾焰计算结果  
Fig. 6 Missile plume calculation results at 25 MHz

剧烈振荡。

4 结束语

准确获取助推段弹道导弹的 RCS 是正确设计天波超视距雷达进行远程监测的关键。本文分析了弹道导弹在助推段时尾喷焰对其散射特性的影响。分别建立了导弹尾焰的等离子体模型和流体动力学模型, 并采用计算电磁学的矩量法研究了采用天波超视距雷达探测助推段弹道导弹时导弹尾焰对其散射特性的影响。结果表明, 在助推段尾焰效应对弹道导弹在 HF 频段的散射特性影响显著。研究结论为天波超视距雷达的精确设计提供了依据。

参考文献:

[ 1 ] 吴晓进. 超视距雷达及其防空应用[J]. 现代防御技术, 2002, 30: 41-45.  
WU Xiao-jin. Over-the-Horizon Radar and Its Air Defence Application [ J ]. Modern Defence Technology ,



- 2002,30:41-45.
- [2] Merrill I Skolnik. Radar Handbook[M]. 3rd ed. New York: MacGraw-Hill, 2008.
- [3] 傅国平,许正文,吴俊杰. 火箭喷焰对电磁波影响的地面实验研究[J]. 电波科学学报,2007(增刊1): 133-135.
- FU Guo-ping, XU Zheng-wen, WU Jun-jie. Research on the Microwave Interaction with Rocket Propellant[J]. Chinese Journal of Radio Science,2007(S1):133-135.
- [4] NORIYOSHI O, HARUKI T. Interaction Between Plasma Plume of Electric Propulsion and Spacecraft Communication[R]. IEPC-99-228,1999.
- [5] LIU Bo, SHI Jia-ming, JIN Lin, et al. The RCS Simulation of Plasma Plume of Missile[C]//CIE International Conference on Radar. Beijing, 2006:1-4.
- [6] B. Л. 金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播[M]. 钱善璿,译. 北京:科学出版社,1978.
- GINZBURG V L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas[M]. QIAN Shan-xie, Trawslated. Beijing: Science Press in Chinese, 1978.
- [7] 王长起. 固体火箭发动机微波衰减的研究[J]. 固体火箭技术,1992,15(2):14-20
- WANG Chang-qi. Studies on the Microwave Attenuation of Solid Rocket Motor Plume[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1992,15(2):14-20.
- [8] MARTORELLA M, SOLETI R, BERIZZI F, et al. Plume Effect on Radar Cross Section of Missiles at HF band[C]//Proceedings of the International Radar Conference. Australia, Sept. 2003:656-661.
- [9] SAHA M N. On a Physical Theory of Stellar Spectra[M]. London:Proceedings of Royal Society of London, 1994.
- [10] Branko M Kolundzija. Electromagnetic Modeling of Composite Metallic and Dielectric Structures[M]. London: Artech House, INC. 2002.
- [11] HARRINGTON R F. Field Computation by Moment Methods[M]. New York:McMillan, 1968.
- [12] RAO S M. Electromagnetic Scattering and Radiation of Arbitrary Shape Surfaces by Triangular Patch Modeling[D]. Mississippi:University of Mississippi,1980.
- [13] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- RUAN Ying-zheng. Radar Cross Section and Stealth Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1998.
- 
- (上接第21页)
- [9] 朱建辉,方洋旺,张平,等. 双机协同定位误差分析的研究[J]. 电光与控制,2012,19(6):21-26.
- ZHU Jian-hui, FANG Yang-wang, ZHANG Ping, et al. Error Analysis in Dual-Aircraft Cooperative Locating[J]. Electronics Optics & Control,2012,19(6):21-26.
- [10] 曹可劲,朱银兵,张磊,等. 罗兰C双台链交叉定位算法研究[J]. 海军工程大学学报,2011,23(3):1-5.
- CAO Ke-jin, ZHU Yin-bing, ZHANG Lei, et al. On Algorithm of Double Chain Cross Positioning for Loran-C[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011, 23(3):1-5.
- [11] 罗景青. 雷达对抗原理[M]. 北京:解放军出版社, 2003.
- LUO Jing-qing. Principles of Radar Countermeasures[M]. Beijing:Liberation Army Publishing House,2003.
- [12] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- SUN Zhong-kang, ZHOU Yi-yu, HE Li-xing. Mono-Static, Multi-Static Active and Passive Location Techniques[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1996.

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>