

基于平衡流场的再入飞行器电磁散射特性分析

韦 笑^{1,2}, 彭世³, 殷红成^{1,2}, 印国泰²

(1. 中国传媒大学信息工程学院, 北京 100024; 2. 电磁散射重点实验室, 北京 100854;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 针对高速再入飞行器穿过大气层时产生冗长等离子尾流的特点, 综合利用真实气体效应情况下等离子体流场计算方法和移位算子时域有限差分电磁散射建模方法。首先由再入飞行器相关参数得到其周围非均匀等离子体流场的分布情况, 然后据此建立含等离子体尾流目标的电磁散射模型。以锥球形目标为例, 计算和分析了以零攻角再入时的低频电磁散射特性。结果表明, 当飞行器再入速度较高时, 等离子体尾流在低频段将显著增强其后向散射, 有利于低频雷达探测再入目标。

关键词: 再入飞行器; 等离子体; 真实气体效应; 时域有限差分方法; 移位算子; 雷达散射截面

中图分类号: V 218 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.03.08

Analysis of electromagnetic scattering characteristics of the reentry vehicle based on equilibrium flowfields

WEI Xiao^{1,2}, PENG Shi-liu³, YIN Hong-cheng^{1,2}, YIN Guo-tai²

(1. College of Information Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China;
2. National Key Laboratory on Electromagnetic Scattering, Beijing 100854, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A redundant plasma wake is produced when the high-speed reentry vehicle cuts through the atmosphere. Accordingly, the plasma wake calculation method under the condition of real gas effect and the shift operator finite difference time domain method are utilized comprehensively. Firstly, the distribution of the inhomogeneous plasma flowfield is achieved by the relative parameters of the reentry vehicle, and hereby the electromagnetic scattering model of the plasma wake target is established. Taking the cone-spheroid target as an example, the low frequency electromagnetic scattering characteristics are calculated and analyzed when it cuts through the atmosphere with a zero attack angle. The results demonstrate that the back-scattering of the reentry vehicle with a high speed is dramatically enhanced at low frequency band by the plasma wake, from which the low frequency radar will benefit in detecting reentry vehicles.

Keywords: reentry vehicle; plasma; real gas effect; finite difference time domain (FDTD); shift operator (SO); radar cross section (RCS)

0 引言

当具有极高速度(如 10 个马赫数以上)的飞行器再入大气层时,由于目标与空气摩擦将产生高达几千摄氏度的气动热,使周围的气体发生电离,导致飞行器附近空气呈离子状态存在,形成等离子体鞘套和冗长的等离子尾流。尽管作为一种色散介质的等离子体具有“通高频、阻低频”的特性,即大于等离子体频率的电磁波可以在等离子体中传播,而小于等离子体频率的电磁波被等离子体反射,但对再

入飞行器来说,不同的再入速度对等离子体尾流会产生何种影响,等离子体尾流内的电子密度会达到何种量级,高电子密度的等离子体尾流对低频电磁波能否表现出强散射特性,从而有利于雷达的探测与识别,这些都是研究再入飞行器电磁散射特性时值得深入探讨的问题。

早在 20 世纪 60 年代初国外就已开展了与等离子体尾流相关的研究,鉴于等离子体尾流情况复杂,实验手段^[1-2]常被采用。在理论研究方面,文献[3]首先提出用 Born 近似方法计算等离子体尾流的电磁散射特性;文献[4]对该方

法进行改进,建立了再入尾流散射的畸变波 Born 近似模型。21 世纪初期,国内学者也基于 Born 近似方法开展了大量有关再入段等离子体尾流散射特性的研究^[5-7],但由于 Born 近似方法更适用于计算亚密(等离子体频率小于雷达波工作频率)状态下等离子体与雷达波的相互作用。因此,研究的频段主要集中在 L 和 S 波段。近年来,也有一些国内外学者利用电磁场数值计算方法研究了等离子体与电磁波的相互作用机理及其电磁特性^[8-12],但利用该方法研究再入飞行器等离子体尾流低频电磁散射特性的论文却鲜见发表。因此,本文根据再入飞行器的物理现象,将平衡流场的计算方法与电磁散射数值计算方法相结合,用于再入飞行器低频电磁散射问题的分析。首先借助真实气体效应情况下等离子体流场计算方法,获得锥球形目标再入时接近于真实尾流的非均匀等离子体分布,然后利用移位算子时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)^[13]计算和分析锥球形目标以零攻角再入时的低频电磁散射特性,最后给出了一些有价值的结论。

1 再入飞行器周围等离子体流场计算方法

等离子体作为一种特殊的色散介质,若不考虑外加电场,与其介电常数有关的参数有入射电磁波频率 ω 、等离子体振荡频率 ω_p 和等离子体碰撞频率 ν ,即

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (1)$$

式中, $\omega_p = \sqrt{Ne^2/m\epsilon_0}$; N 为等离子体中自由电子密度, e 为电子电量; m 为电子质量; ϵ_0 为真空中介电常数。由此可见,在对再入飞行器进行电磁散射建模时,必须首先计算得到飞行器周围等离子体的流场特性,如内部自由电子密度等。

当飞行器以超音速再入时,稳定的空气被排挤开,但由于空气是按音速传播压力,因此被排挤的空气以高于音速的速度被强行挤压而形成激波。空气受到激波的强烈压缩和粘性的剧烈摩擦,激波层内的温度迅速升高,可达数千度,驻点区域甚至达到 10 000 K 以上。在如此高的温度条件下,空气内部中不仅分子的平动能、转动能被激发,甚至振动能也将被激发,而且还会发生气体分子的离解和电离,气体成分亦随之发生变化,空气呈等离子状态,这种现象称为真实气体效应。真实气体效应不仅直接影响飞行器的气动特性和热负荷,而且还对流场的光电特性产生重要影响。

在常温常压下,若不计微量元素,可以认为空气由 N_2 和 O_2 两种成分组成。然而,在高温(如温度为 2 000 K ~ 10 000 K 的范围内)下, N_2 和 O_2 将发生化学反应。发生化学反应后,空气成为多组元的混合气体。针对不同的工程应用目的,选择空气混合气体组成成分的方法往往不同。对再入尾流的光、电特性的研究而言,较合理的方案是选择以下组元的化学成分: O_2 , N_2 , O , N , NO , O_2^+ , N_2^+ , O^+ , N^+ , NO^+ , e^- 。

在高超声速飞行器的流场计算中,必须考虑流动的物理化学状态。根据流动的物理化学状态的不同,可以将高温流动分为冻结流动、非平衡流动和平衡流动三类。由于本文的研究条件是 30 km 的高度和 3 km/s ~ 5 km/s 的速度,根据文献[14],其基本处于平衡状态。因此,可以近似用化学平衡模型来对整个流场开展分析。

在热力学平衡状态下,气体的密度、温度、压力、内能、焓、熵这六个特性参数中,任意两个可以视为独立变量,其余特性参数则可以通过实验或理论由这两个独立变量来确定。由气动热力学^[15]可知,平衡气体的化学组分仅与两个独立状态变量有关,而与发生反应的过程无关;当气体的状态参数确定时,其组份也相应地被确定。在给定压力 P 和温度 T 的条件下,若经过足够长的时间达到化学平衡状态,那么此时组元有各自确定的数量。显然,各组元的数量是压力 P 和温度 T 的函数。

对任何化学平衡混合气体,求解其化学组份时,首先需查明此化学系统包含的组元个数及元素个数(电子也当作一个单独的元素)。如果混合气体含有 M 个组元和 N 个元素,则应有 $M-N$ 个独立的化学反应方程和相应的化学反应平衡常数,其余 N 个方程为 Dalton 分压定律和元素守恒定律(包括电荷守恒定律)。这样,通过 M 个独立方程可以求解各组元分压,由各组元分压,可得到混合气体中 M 个平衡组元的摩尔分数为

$$\eta_i = \frac{P_i}{\rho RT} \quad (2)$$

式中, η_i 和 P_i 分别是第 i 个组元的摩尔分数和分压; ρ 、 R 和 T 分别是混合气体密度、通用气体常数和混合气体温度。由此可以得到流场的电子数密度分布等信息。

2 再入飞行器周围等离子体的电磁散射建模方法

本文采用文献[13]提出的移位算子 FDTD 方法对等离子体的电磁散射进行理论建模。该方法是通过差分近似引入离散时域移位算子直接得到时域和离散时域之间的算子过渡关系。当频域本构关系可以表示为有理分式函数时,首先将其过渡到时域,再转换到离散时域,进而导出从 D 到 E 的递推计算公式。从 E 到 H 和从 H 到 D 的递推公式与基本 FDTD 方法相同。由于等离子体的介电常数常可以写成有理分式的函数,因此该方法特别适合于计算含等离子体目标的电磁散射。

对频域中介质的本构关系 $D(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) E(\omega)$,若相对介电常数 $\epsilon_r(\omega)$ 可以写成如下有理分式函数的形式

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\sum_{i=0}^n p_i (j\omega)^i}{\sum_{i=0}^n q_i (j\omega)^i} \quad (3)$$

则有

$$\sum_{i=0}^N q_i (j\omega)^i \cdot D(\omega) = \epsilon_0 \sum_{i=0}^N p_i (j\omega)^i E(\omega) \quad (4)$$

根据傅里叶变换中频域到时域转换关系 $j\omega \rightarrow \partial/\partial t$,

并引入移位算子 z_t [13] $\left(\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \left(\frac{z_t - 1}{\Delta t z_t + 1}\right)\right)$, 得到离散时域本构关系为

$$\sum_{i=0}^N q_i \left(\frac{z_t - 1}{\Delta t z_t + 1}\right)^i \cdot \mathbf{D}^n = \epsilon_0 \sum_{i=0}^N p_i \left(\frac{z_t - 1}{\Delta t z_t + 1}\right)^i \mathbf{E}^n \quad (5)$$

当 $N=2$ 时, 整理式(5)得

$$\left\{ \left[q_0 + q_1 \frac{2}{\Delta t} + q_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \right] z_t^2 + \left[2q_0 - 2q_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \right] z_t + \left[q_0 - q_1 \frac{2}{\Delta t} + q_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \right] \right\} \mathbf{D}^n = \left\{ \left[p_0 + p_1 \frac{2}{\Delta t} + p_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \right] z_t^2 + \left[2p_0 - 2p_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \right] z_t + \left[p_0 - p_1 \frac{2}{\Delta t} + p_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \right] \right\} \epsilon_0 \mathbf{E}^n \quad (6)$$

由移位算子的定义 $z_t f^n = f^{n+1}$, 可得

$$\mathbf{E}^{n+1} = \frac{1}{b_0} \left[a_0 \left(\frac{\mathbf{D}^{n+1}}{\epsilon_0}\right) + a_1 \left(\frac{\mathbf{D}^n}{\epsilon_0}\right) + a_2 \left(\frac{\mathbf{D}^{n-1}}{\epsilon_0}\right) - b_1 \mathbf{E}^n - b_2 \mathbf{E}^{n-1} \right] \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} a_0 &= q_0 + q_1 \frac{2}{\Delta t} + q_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2, & a_1 &= 2q_0 - 2q_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \\ a_2 &= q_0 - q_1 \frac{2}{\Delta t} + q_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2, & b_0 &= p_0 + p_1 \frac{2}{\Delta t} + p_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \\ b_1 &= 2p_0 - 2p_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2, & b_2 &= p_0 - p_1 \frac{2}{\Delta t} + p_2 \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

对于非磁化冷等离子体, 由式(1)可以看出, 此时 $p_0 = \omega_p^2$, $p_1 = \nu$, $p_2 = 1$, $q_0 = 0$, $q_1 = \nu$, $q_2 = 1$ 。根据式(7)即可完成从 \mathbf{D} 到 \mathbf{E} 的迭代, 进而求解电磁场分布。

3 再入飞行器低频电磁散射特性计算与分析

为了验证本文所用的流场计算方法的准确性, 计算了某目标再入时等离子体尾流电子密度分布情况, 并与同一条件下爆轰驱动风洞实验得到的测量结果进行了对比, 如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 计算结果与实测结果吻合较好。

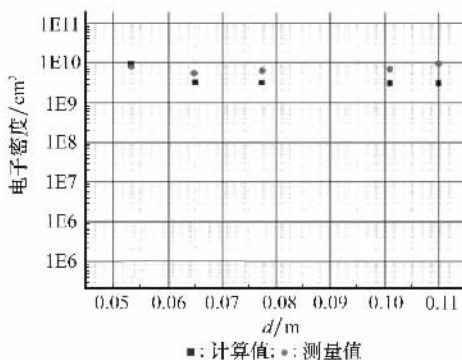


图 1 某目标再入时等离子体尾流电子密度分布结果比较

利用前面所述的考虑真实气体效应情况下等离子体流场的计算方法, 以简单的锥球形目标(见图 2)为例, 研究其以零攻角再入, 高度为 30 km, 速度分别为 5 km/s、4 km/s 和 3 km/s 时, 周围等离子体流场中电子密度分布情况。图 3 给出了在三种再入速度情况下沿锥球轴线方向上的等离子体尾流电子密度分布情况, 横坐标为等离子体尾流的采样点到锥球底面的距离, 纵坐标为电子密度数。可以看出, 当再入速度为 5 km/s 时, 电子密度数较大, 尾部区中心位置基本处于 10^9 cm^3 ; 当再入速度为 4 km/s 时, 电子密度数基本处于 10^8 cm^3 ; 而当速度为 3 km/s 时, 尾部区中心位置电子密度数降到了 10^5 cm^3 量级以下。

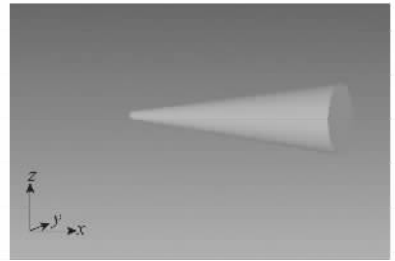


图 2 锥球形目标几何模型

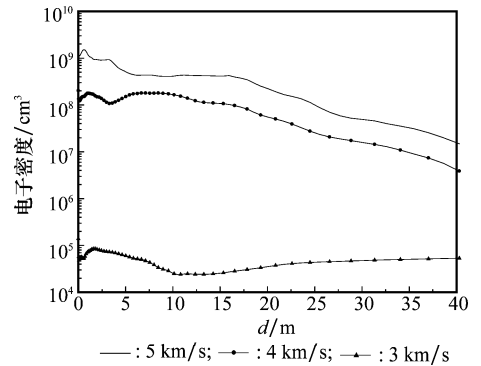


图 3 不同再入速度时沿锥球轴线方向上的等离子体尾流电子密度分布情况

由于目标再入时, 其壁面附近产生的等离子体鞘套相对较薄, 一般为十几厘米, 但电子密度很大, 能够达到 10^{15} cm^3 量级。因此, 等离子体鞘套对再入通讯影响十分严重, 而对整体的电磁散射特性影响较小。相反, 再入产生的等离子体尾流虽然电子密度不是很高, 但尺寸大、距离长, 对雷达探测、跟踪和识别是有利的。因此, 这里主要考虑等离子体尾流对目标电磁散射特性的影响。含等离子体尾流的锥球形目标几何模型如图 4 所示。由于计算能力的限制, 这里截取大约 10 m 长的等离子体尾流, 若考虑整个尾流, 其对再入飞行器的电磁散射特性影响将更加严重。根据计算得到的等离子体尾流电子密度分布情况, 对尾流进行了一定的简化。由于电子密度小于 10^4 cm^3 时, 等离子体频率在 MHz 量级以下, 对 200 MHz 以上的电磁波传播没有影响, 因此可将电子密度小于 10^4 cm^3 的等离子体尾流外围部分视为空气。

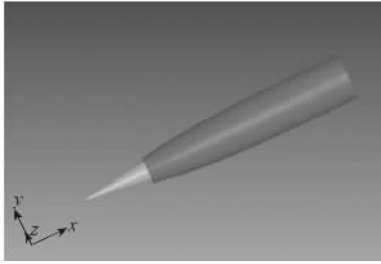


图 4 含等离子体尾流的锥球形目标几何模型

根据锥球形目标再入段周围等离子体流场特性计算结果和含等离子体尾流的锥球形目标的几何模型,可以利用移位算子 FDTD 方法计算其低频电磁散射特性。

图 5~图 7 分别为锥球目标以 5 km/s 速度再入,方位角为 0°、30°、60°(头部入射为 0°)时,垂直极化下含等离子体尾流目标的后向雷达散射截面 (radar cross section, RCS),为便于比较,图中还给出了同种姿态下锥球形目标的后向 RCS。可以看出,当从正头部入射时,等离子体尾流被锥球本身遮挡较多,但未遮挡部分在低频段(300 MHz 左右)仍然明显增强了目标的后向散射,这有利于雷达对目标的探测和跟踪。当入射方位角偏转一定角度时,等离子体尾流可见区域更大,因此在 300 MHz~1 GHz 频段内,目标后向 RCS 也显著增大,普遍提高 10 dB 以上。此外,由于入射波偏转一定角度后,目标与等离子体尾流之间的干涉效应增强,回波明显出现剧烈的振荡。

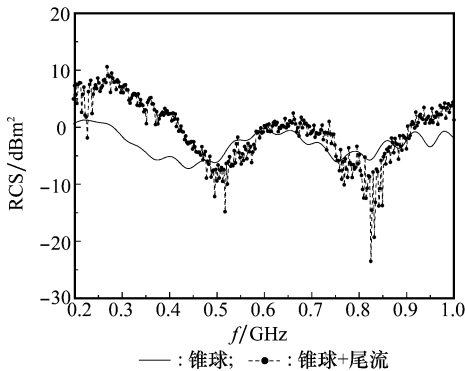


图 5 5 km/s 再入、0°入射时锥球及含等离子体尾流的 RCS

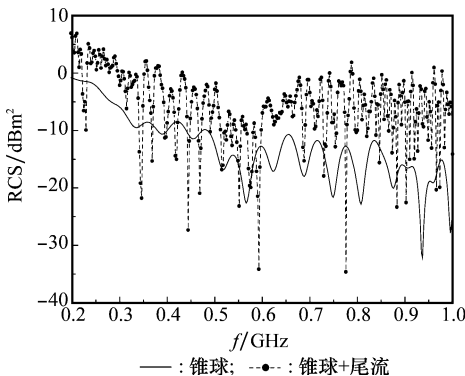


图 6 5 km/s 再入、30°入射时锥球及含等离子体尾流的 RCS

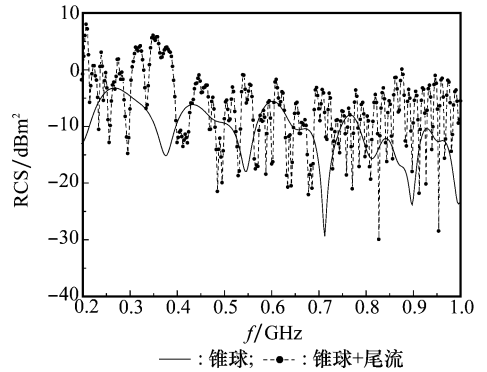


图 7 5 km/s 再入、60°入射时锥球及含等离子体尾流的 RCS

图 8 为锥球目标以 3 km/s 再入、60°方位角入射时,垂直极化下含等离子体尾流目标的后向 RCS。可以看出,由于以 3 km/s 再入时,产生的等离子体尾流电子密度较低,等离子体基本表现为空气的特性,因此尾流对弹头的后向散射特性影响很小。

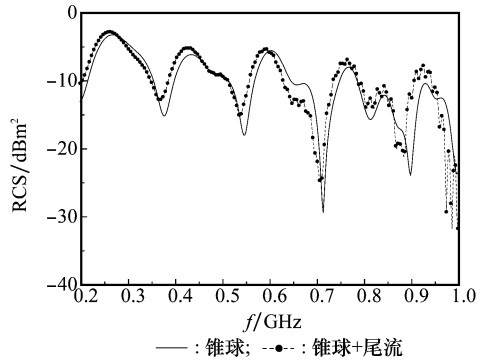


图 8 3 km/s 再入、60°入射时锥球及含等离子体尾流的 RCS

4 结 论

针对高速再入飞行器穿过大气层时将产生冗长的等离子体尾流的特点,基于平衡流场计算方法和移位算子 FDTD 方法,本文实现了从目标再入参数到其周围等离子体流场分布情况,再到含等离子体尾流目标的电磁散射建模的完整过程。以锥球形目标为例,计算和分析了其再入段低频电磁散射特性,得到以下结论:

(1) 当飞行器再入速度较高(10 个马赫数以上)时,对以较大方位角入射的电磁波,等离子体尾流在低频段将显著增强目标的后向 RCS,这对于利用低频雷达探测再入目标十分有利。

(2) 当飞行器再入速度较低时,等离子体尾流电子密度较弱,因此对目标电磁散射影响很小,与等离子体的基本特性相符。

受目前计算方法和能力的限制,本文只是对再入飞行器的电磁散射特性进行了初步的计算和分析,尚有很多问

题,如等离子体尾流的电子密度分布情况如何更接近于实际状态、不同目标和不同条件下等离子体鞘套对目标电磁散射的影响、非零攻角再入时目标周围的等离子体分布情况等,有待在后续的工作中深入研究。

参考文献:

- [1] Pippert G F. On the structure of wake turbulence deduced from field radar measurements[C]// *Proc. of AIAA Conference on Physics of Entry into Planetary Atmospheres*, 1963.
- [2] Attwood D. Microwave scattering from underdense and overdense turbulent plasmas[R]. AD-741187, 1972.
- [3] Menkes J. Scattering of radar waves by an underdense turbulent plasma[C]// *Proc. of Aerospace Sciences Meeting*, 1964.
- [4] Bisbing P E. Development of a computer model for scattering of electromagnetic waves by a turbulent wake[R]. ADA-032662, 1976.
- [5] 于明,牛家玉. 再入尾迹湍流对雷达散射截面影响分析[J]. 计算物理, 2002, 19(6): 501-506. (Yu M, Niu J Y. Analysis for the effects of reentry wake turbulence on radar cross section[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2002, 19(6): 501-506.)
- [6] 彭世,高巍,牛家玉. 湍流等离子体尾迹雷达散射截面的计算及其影响因素分析[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(1): 103-107. (Peng S L, Gao W, Niu J Y. Calculation of radar cross section of the re-entry wake turbulence and analysis for the characteristics[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2005, 23(1): 103-107.)
- [7] 张志成,高铁锁,董维中,等. 再入飞行器目标特性建模研究[J]. 实验流体力学, 2007, 21(1): 7-12. (Zhang Z C, Gao T S, Dong W Z, et al. Study on modeling of re-entry vehicle signature[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(1): 7-12.)
- [8] Martorella M, Soleti R, Berizzi F, et al. Plume effect on radar cross section of missiles at HF band[C]// *Proc. of the International Radar Conference*, 2003: 656-661.
- [9] Liu B, Shi J M, Jin L, et al. The RCS simulation of plasma plume of missile[C]// *Proc. of International Conference on Radar*, 2006: 1-4.
- [10] Yan M, Shao K R, Hu X W, et al. Z-transform-based FDTD analysis of perfectly conducting cylinder covered with unmagnetized plasma[J]. *IEEE Trans. on Magnetics*, 2007, 43(6): 2968-2970.
- [11] Chaudhury B, Chaturvedi S. Study and optimization of plasma-based radar cross section reduction using three-dimensional computations[J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2009, 37(11): 2116-2127.
- [12] Liu S, Liu S B, Song H. A higher order ADI-FDTD method for EM propagation in plasma[C]// *Proc. of 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2009: 9-12.
- [13] 葛德彪,吴跃丽,朱湘琴,等. 离子体散射 FDTD 分析的移位算子方法[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 359-362. (Ge D B, Wu Y L, Zhu X Q. Shift operator method applied for dispersive medium in FDTD analysis[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18(3): 359-362.)
- [14] Anderson J D. *Hypersonic and high temperature gas dynamics*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [15] 卞荫贵,徐立功. 气动热力学[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1997. (Bian Y G, Xu L G. *Aero thermo dynamics*[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1997.)
- (上接第 505 页)
- [10] 钟晓军,王国宏,黄力超. 多源抗反辐射导弹方法综述[J]. 现代防御技术, 2001, 29(5): 11-16. (Zhong X J, Wang G H, Huang L C. A survey of countering antiradiation missile with multiple source decoy system[J]. *Modern Defence Technology*, 2001, 29(5): 11-16.)
- [11] 吴迪军,侯慧群,李彦志,等. 三点源诱骗抗反辐射导弹合成场计算与仿真[J]. 电光与控制, 2008, 15(5): 67-71. (Wu D J, Hou H Q, Li Y Z, et al. Calculation and simulation on compound electric field of three-point source decoy against anti-radiation missile[J]. *Electronics Optics and Control*, 2008, 15(5): 67-71.)
- [12] 周伟光,罗积润,王华彬. 多辐射源合成场对反辐射导弹的诱偏作用[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1193-1197. (Zhou W G, Luo J R, Wang H B. Modeling of electromagnetic-field-combined profile of multiple radiation sources as well as its decoying effect on ARM[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1193-1197.)
- [13] 邓彬,秦玉亮,王宏强,等. 一种对反辐射导弹多源诱偏干扰的建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 874-877. (Deng B, Qing Y L, Wang H Q, et al. Modeling method for multiple-source decoy jamming to the ARM[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(6): 874-877.)
- [14] 刘剑,王丰华,黄知涛,等. 阵列扩展用于反辐射导弹抗诱偏的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 365-367. (Liu J, Wang F H, Huang Z T, et al. Aperture extension for anti-decoy in anti-radiation missile[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(3): 365-367.)
- [15] 沈阳,陈永光,李修和. 组网雷达抗 ARM 工作模式设计及仿真研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 538-541. (Shen Y, Chen Y G, Li X H. Study on design and simulation of working mode for netted radar antagonizing ARM[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(4): 538-541.)