

电离层中释放六氟化硫效应的三维精细模拟研究

赵海生 许正文 吴振森 冯杰 吴健 徐彬 徐彤 胡艳莉

A three-dimensional refined modeling for the effects of SF<sub>6</sub> release in ionosphere

Zhao Hai-Sheng Xu Zheng-Wen Wu Zhen-Sen Feng Jie Wu Jian Xu Bin Xu Tong Hu Yan-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 209401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.209401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.209401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电离层调制加热产生极低频/甚低频波定向辐射的理论分析

Theory of ELF/VLF wave directional radiation by modulated heating of ionosphere

物理学报.2013, 62(22): 229402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.229402>

不同释放高度的化学物质的电离层扰动特性

Ionospheric disturbances produced by chemical releases at different release altitudes

物理学报.2013, 62(20): 209401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.209401>

电离层钡云释放早期动力学行为的数值模拟

Numerical simulation on the early dynamics of barium clouds released in the ionosphere

物理学报.2012, 61(8): 089401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.089401>

## 电离层中释放六氟化硫效应的三维精细模拟研究\*

赵海生<sup>1)</sup> 许正文<sup>2)</sup> 吴振森<sup>1)†</sup> 冯杰<sup>2)</sup> 吴健<sup>2)</sup> 徐彬<sup>2)</sup>  
徐彤<sup>2)</sup> 胡艳莉<sup>2)</sup>

1)(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2)(中国电波传播研究所, 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107)

(2016年4月10日收到; 2016年7月7日收到修改稿)

传统的六氟化硫电离层释放效应研究, 一般建立的是点源释放模型, 仿真结果精度有限. 本文开展了电离层中释放六氟化硫的三维精细效应研究, 在释放物扩散方程中加入了运载器飞行速度和姿态、释放物释放速度和流量、热层风场等参量对释放物扩散过程的影响; 在等离子体扩散方程中考虑了地磁倾角和沿场扩散项对人工扰动结构等关键参数的影响, 将二维等离子体扩散方程扩展到三维. 同时, 采用射线追踪方法, 研究电离层人工扰动结构对短波传播路径的影响. 本文的研究结果对研究电离层的动力学过程、电离层不均匀体的生成机制和演化规律有重要意义.

关键词: 电离层, 化学物质释放, 六氟化硫, 效应

PACS: 94.20.Bb, 94.20.Vv

DOI: 10.7498/aps.65.209401

## 1 引言

1955年, Howard等<sup>[1]</sup>首次开展了空间化学物质释放主动试验, 用于研究临近空间大气风场. 此后, 空间化学物质释放试验引起科学界的广泛重视, 开展了大量试验, 其中包括: 巴西电离层变态试验 (Brazilian ionospheric modification experiments, BIME)<sup>[2]</sup>, 磁层粒子示踪主动试验 (active magnetospheric particle tracer explorers, AMPTE)<sup>[3,4]</sup>, 辐射效应卫星联合释放试验 (combined-release and radiation effects satellite, CRRES)<sup>[5-7]</sup>, 尘埃等离子体释放试验 (charged aerosol release experiments CARE)<sup>[8]</sup>, 金属氧化物云试验 (metal oxide space clouds experiment, MOSCE)<sup>[9-12]</sup>等.

在电离层中释放化学物质六氟化硫 (Hexafluoride, SF<sub>6</sub>) 能够产生电离层电子密度空洞和其他扰动效应, 国外对SF<sub>6</sub>的电离层释放开展了大量研

究. Bernhardt对SF<sub>6</sub>气体释放开展了广泛而深刻的研究, 研究了释放物云团在不均匀大气中的运动过程<sup>[13]</sup>, 地磁场对释放物动力学过程的影响<sup>[14]</sup>, 建立点源释放效应仿真模型<sup>[15]</sup>, 研究了电离层扰动的等离子体和流体不稳定性<sup>[16]</sup>. Scales和Bernhardt<sup>[17]</sup>仿真了卫星在轨高速释放情况下的中性气体的动力学过程, 研究了 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 对释放物运动过程的影响, 研究了速度对不稳定性的影响, 建立了高速释放效应仿真模型. 国内也开展了部分研究, 胡耀垓等<sup>[18,19]</sup>研究了多种典型化学物质的电离层释放效应及电离层人工扰动对短波传播的影响. 黄文耿和古士芬<sup>[20]</sup>研究了电离层化学物质释放的人工气辉辐射增强效应. 基于SF<sub>6</sub>电离层释放的理论和试验研究取得了很大进展, 但目前还存在以下两方面局限性. 其一, 基于点源释放假设, 忽略运载器飞行速度和姿态、释放物释放速度和流量等试验参数对效应仿真结果的影响; 其二, 基于地磁场磁偶极子假设, 效应仿真仅考虑沿地磁场和垂直地磁

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41104102) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

场两个方向, 忽略磁偏角对效应仿真结果影响, 存在一定误差.

本文以箭载 SF<sub>6</sub> 化学物质释放为试验场景, 考虑了火箭飞行速度和姿态、释放物释放速度和流量、释放区域风场等因素对效应仿真结果的影响, 并在等离子体扩散方程中考虑了地磁偏角和沿场扩散项对电离层扰动形态的影响, 将二维等离子体扩散方程扩展到三维, 开展了精细效应研究, 仿真了人工电离层扰动的时空演化过程. 在开展效应研究的同时, 采用射线追踪方法, 研究了人工电离层扰动结构对短波信号的影响. 本文的研究结果对研究电离层的动力学过程、电离层不均匀体的生成和演化机制具有重要意义; 同时, 短波射线追踪研究结论对研究人工电离层扰动对短波信道的影响, 具有参考意义.

## 2 SF<sub>6</sub> 电离层释放的动力学模型

SF<sub>6</sub> 在电离层中的动力学过程极为复杂, 包含膨胀、凝结、背景加热、自由扩散等过程. 释放之初的迅速膨胀及与背景气体的碰撞作用, 造成 SF<sub>6</sub> 内能损失温度降低, 甚至凝结; 当释放物密度扩散到极其稀薄状态时, 由于缺少自由分子和凝结核的碰撞释放物气团停止凝结, 最终释放物与周围环境温度达到热平衡.

### 2.1 SF<sub>6</sub> 扩散

化学物质释放的初始阶段, 在压力作用下, 释放物像铲雪机一样将周围的等离子体推开<sup>[21,22]</sup>, 这一过程以超声速进行, 经历的时间很短, 一般只有几秒. 然后压力差骤减, 当释放物密度与背景气体密度相比拟时, 释放物和周围等离子体充分混

合, 从而向空间扩散, 这一过程历经时间较长, 离子化学反应也主要发生在这一阶段.

中性气体扩散一般方程为

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \nabla \cdot (v_s n_s) = \nabla \cdot (D_s \nabla n_s) - \sigma n_s, \quad (1)$$

其中,  $n_s$  是释放物密度,  $v_s$  是释放物初始速度,  $D_s$  为释放物扩散系数,  $\sigma$  为释放物损失系数. 将开始释放时释放物看作一个点源, 在背景电离层和热层水平分层的假设下, 忽略背景大气的运动, 中性分子的热扩散, 不考虑化学物质的膨胀过程, 释放物密度随时间和空间的变化可以用(2)式<sup>[18]</sup>近似计算:

$$\begin{aligned} n_s(\mathbf{r}, z, t) &= \frac{N}{(4\pi D_s t)^{1.5}} \exp \left\{ - (z - z_0) \left( \frac{3}{4H_\alpha} + \frac{1}{2H_s} \right) \right. \\ &\quad - \sigma t - \frac{H_\alpha^2 \{ 1 - \exp[-(z - z_0)/(2H_\alpha)] \}^2}{4D_s t} \\ &\quad - \frac{r^2 \exp[-(z - z_0)/(2H_\alpha)]}{4D_s t} - \left( \frac{1}{H_\alpha} - \frac{1}{H_i} \right)^2 \\ &\quad \left. \times \frac{D_s t \exp[(z - z_0)/(2H_\alpha)]}{4} \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

其中,  $z_0$  为释放点的高度,  $N$  为释放物总分子数,  $H_\alpha = kT/(m_a g)$  为大气标高,  $H_s = kT/(m_s g)$  为释放气体标高, 其中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为背景气体温度,  $m_a$ ,  $m_s$  分别为大气平均分子量和释放气体的分子量,  $g$  为重力加速度,  $\sigma t$  为化学反应引起的损失项.

### 2.2 化学反应

SF<sub>6</sub> 在电离层等离子体中的主要化学反应过程如表 1 所示.

表 1 SF<sub>6</sub> 在电离层等离子体中的主要化学反应<sup>[23]</sup>  
Table 1. Reactions stimulated by SF<sub>6</sub> release in ionosphere<sup>[23]</sup>.

序数	反应方程	反应速率/cm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
		$k_1 = 2.2 \times 10^{-7} / [1 + 640 \exp(-4770/T)]$
1	$SF_6 + e^- \xrightleftharpoons[k_1]{k_a} (SF_6^-)^* \xrightarrow{k_b} SF_6^-$	$k_a = 4.00 \times 10^4 s^{-1}$ $k_b = k_a/10$
2	$SF_6 + e^- \xrightarrow{k_2} SF_5^- + F$	$k_2 = 2.2 \times 10^{-7} - k_1$
3	$SF_6^- + O^+ \xrightarrow{k_5} SF_6 + O^*$	$k_5 \approx 5 \times 10^{-8}$
4	$SF_5^- + O^+ \xrightarrow{k_6} SF_5 + O$	$k_6 \approx k_5$

### 2.3 等离子体扩散

电离层化学物质释放区域电子密度的改变,破坏了原有带电粒子的密度分布结构和动态平衡,在电离层电场、磁场、离子和电子密度梯度、电离层扰动区碰撞、中性风等作用下,等离子体将发生漂移.其详细受力情况极其复杂,在F区我们仅考虑最大作用力,即磁场的作用.

等离子体连续性方程为

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\nabla \cdot (n_p v_p) + P - L, \quad (3)$$

其中,  $n_p$  为离子或电子密度;  $P, L$  分别为带电粒子的产生项和损失项;  $v_p$  为等离子体沿磁场方向的漂移速度,其计算表达式为

$$v_p = -D \left[ \frac{\partial \ln(n_p T_p)}{\partial s} + \frac{\sin I}{H_p} \right] + v_D, \quad (4)$$

其中,  $D$  为等离子体扩散系数,  $T_p$  为等离子体温度,  $I$  为磁倾角. 由于我们假定等离子体只沿磁场方向漂移,则(3)式可写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_p}{\partial t} = & - \left[ \sin I \frac{\partial(n_p v_p)}{\partial z} + \cos I \frac{\partial(n_p v_p)}{\partial x} \right. \\ & \left. + \sin \varphi \frac{\partial(n_p v_p)}{\partial y} \right] + P - L, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\varphi$  为磁偏角. 将(4)式代入(5)式可得等离子体扩散方程的三维表达式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_p}{\partial t} = & \sin^2 I \left( \frac{\partial D}{\partial z} \frac{\partial n_p}{\partial z} + D \frac{\partial^2 n_p}{\partial z^2} \right. \\ & + \frac{n_p}{T_p} \frac{\partial D}{\partial z} \frac{\partial T_p}{\partial z} + \frac{D}{T_p} \frac{\partial n_p}{\partial z} \frac{\partial T_p}{\partial z} \\ & \left. - \frac{D n_p}{T_p^2} \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{D n_p}{T_p} \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} \right) \\ & + \sin I \cos I \left( \frac{\partial D}{\partial z} \frac{\partial n_p}{\partial x} + D \frac{\partial^2 n_p}{\partial x \partial z} \right) \\ & + \sin I \sin \varphi \left( \frac{\partial D}{\partial z} \frac{\partial n_p}{\partial y} + D \frac{\partial^2 n_p}{\partial y \partial z} \right) \\ & + \sin^2 I \left( \frac{n_p}{H_p} \frac{\partial D}{\partial z} + \frac{D}{H_p} \frac{\partial n_p}{\partial z} \right. \\ & \left. - \frac{D n_p}{H_p^2} \frac{\partial H_p}{\partial z} \right) - v_D \cdot \sin I \frac{\partial n_p}{\partial z} \\ & + \sin I \cos I \left( D \frac{\partial^2 n_p}{\partial x \partial z} + \frac{D}{T_p} \frac{\partial n_p}{\partial x} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \\ & + D \cdot \cos^2 I \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + D \cdot \cos I \cdot \sin \varphi \frac{\partial^2 n_p}{\partial y \partial x} \\ & + \sin I \cos I \left( \frac{D}{H_p} \frac{\partial n_p}{\partial y} - \frac{D n_p}{H_p^2} \frac{\partial H_p}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - v_D \cdot \cos I \frac{\partial n_p}{\partial x} \\ & + \sin \varphi \sin I \left( D \frac{\partial^2 n_p}{\partial z \partial y} + \frac{D}{T_p} \frac{\partial n_p}{\partial y} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \\ & + D \cdot \sin \varphi \cos I \frac{\partial^2 n_p}{\partial x \partial y} \\ & + D \cdot \sin^2 \varphi \frac{\partial^2 n_p}{\partial y^2} \\ & + \sin \varphi \sin I \left( \frac{D}{H_p} \frac{\partial n_p}{\partial y} - \frac{D n_p}{H_p^2} \frac{\partial H_p}{\partial y} \right) \\ & - v_D \cdot \sin \varphi \frac{\partial n_p}{\partial y} + P - L, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $T_p = (T_e + T_i)/2$  是等离子体温度;  $H_p = 2T_p k / (m_p g)$  为等离子体标高;  $v_d$  为外加漂移速度. (6)式引入了磁偏角对等离子体扩散过程的影响,将二维等离子体扩散方程成功扩展为三维;(6)式中  $\sin I \cos I(\cdot)$  项为沿场扩散项,在电子密度梯度和洛伦兹力作用下等离子体沿磁场扩散,电离层扰动区形态表现出明显的沿场拉伸趋势,不再是近似球体结构.

## 3 效应仿真模型建立

本模型考虑了火箭飞行速度和姿态、释放物释放速度和流量、释放区域风场等因素对效应仿真结果的影响.

### 3.1 SF<sub>6</sub>云团动力学分析

#### 3.1.1 释放速度和流量

根据SF<sub>6</sub>气体的理化特性,在释放容器端口打开瞬间,释放物在内外压力差作用下快速喷出,根据流体力学,释放物释放速度  $v_e$  可以表示为

$$v_e = \sqrt{\frac{2kT}{m_s}}. \quad (7)$$

在释放过程中, SF<sub>6</sub> 气体分子内能迅速转化为气体宏观动能,释放物温度将降低. 释放物喷出的过程中,由于释放器压强不断降低,释放物的密度不断减小,因此喷出过程流量是不不断减小的. 根据流体力学,拟合得到的释放物流量的表达式如下:

$$I(t) = \frac{N}{at_e} \exp[-t/(at_e)], \quad (8)$$

$$\Delta N(t) = \frac{I(t)}{m} \Delta t, \quad (9)$$

其中,  $I(t)$  为释放物流量,  $t_e$  是释放持续时间,  $a$  是与释放物本身物理性质有关的常数, 与实验数据对比发现当  $a = 0.5$  时与实验结果符合较好, 在仿真过程中将  $a$  取值为  $0.5$ ,  $\Delta N(t)$  为微元分子数,  $\Delta t$  为微元持续时间.

### 3.1.2 火箭惯性速度和姿态

火箭姿态主要通过影响释放物喷射方向, 从而影响效应仿真结果. 以正北方向为  $x$  轴, 以正西方向为  $y$  轴, 竖直向上为  $z$  轴建立平面直角坐标系. 释放时刻火箭姿态示意图如图 1 所示.

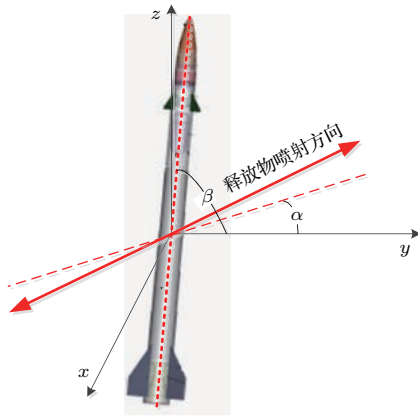


图 1 释放时刻火箭姿态示意图

Fig. 1. The rocket attitude at release time.

由于释放过程采用对称喷嘴释放, 那么两部分释放物释放方向分布可以表示为:

$$\begin{cases} v_{ex} = -v_e \cos \beta \sin \alpha, \\ v_{ey} = v_e \cos \alpha \cos \beta, \\ v_{ez} = v_e \sin \beta, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v_{ex} = v_e \cos \beta \sin \alpha, \\ v_{ey} = -v_e \cos \alpha \cos \beta, \\ v_{ez} = -v_e \sin \beta, \end{cases}$$

其中,  $\alpha$  为释放物喷射方向的方位角,  $\alpha = \alpha_0 + 2t$ ,  $\alpha_0$  为初始角;  $\beta$  为火箭倾角.

由 (10) 式, 释放物初始速度  $v_0$  的  $x, y, z$  三个分量可以分别表示为:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_{ex} + v_{rx}, \\ v_{0y} = v_{ey}, \\ v_{0z} = v_{ez} + v_{rz}, \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $v_{rx}$  为火箭水平速度,  $v_{rz}$  为火箭竖直速度.

释放物释放之后, 由于惯性的作用, 释放物云团将继续运动一段距离, 在背景大气的阻力作用下, 释放物云团的运动速度慢慢降低, 直至与背景相对静止. 释放物云团运动过程中, 满足动量方程. 释放后, 释放物云团压力很快下降到背景大气水平, 因此可以忽略释放物云团压力, 同时认为背景气体静止, 不考虑释放物云团运动速度的变化, 那么其运动速度可以简单表示为

$$v_c = v_0 \cdot \exp(-vt). \quad (12)$$

根据释放物云团的动力学分析, 在求解释放物扩散方程过程中, 不再将释放物扩散看作简单的点源扩散, 而看作多个不同初始位置, 不同释放时间, 不同释放量的点源在空间和时间上的叠加, 从而求得释放物密度分布.

### 3.2 仿真模型设计

根据释放参数和  $SF_6$  在电离层中的物理化学过程, 通过求解释放物扩散过程和等离子体扩散方程, 建立  $SF_6$  释放的效应仿真模型, 模型算法设计流程如图 2 所示. 效应仿真流程按照以下 4 个步骤进行.

1) 根据试验具体情况进行释放参数设置, 包括释放参数和火箭飞行参数;

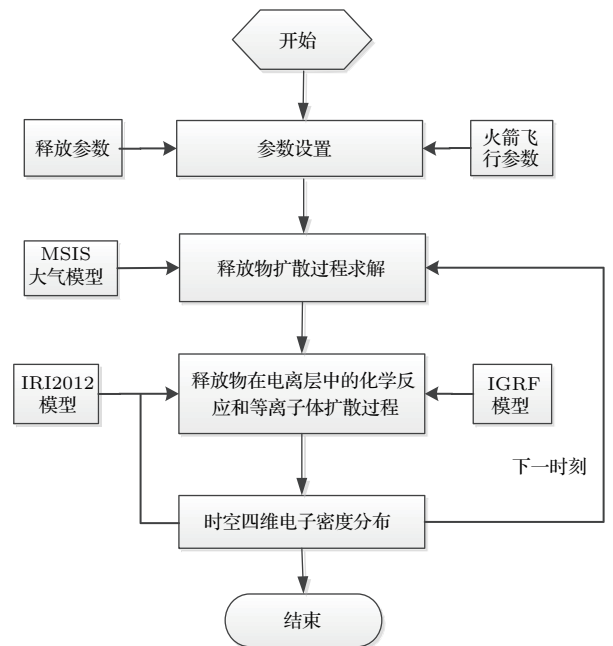


图 2  $SF_6$  三维精细效应仿真模型设计流程图

Fig. 2. The flowchart of the proposed temporal 3D refined model.

2) 释放物扩散过程求解, 获得释放物密度分布;

3) 依据释放物与电离层等离子的化学反应和等离子体扩散过程, 计算获得电子密度分布;

4) 化学反应剩余释放物继续扩散, 重复执行步骤二到三, 计算下一时刻的等离子体密度, 从而得到任意时刻电离云密度分布, 即时空四维电离云密度分布.

## 4 数值模拟

### 4.1 仿真参数设置

为了验证效应仿真模型, 我们采用虚拟试验场景开展了数值模拟研究, 仿真参数设置如表 2 所列.

表 2 主要仿真参数  
Table 2. Parameters for the simulation.

参数	取值 (取值来源)
试验时间	201509301800LT
释放点	(19.3°N, 109.8°E)
释放高度/km	300
释放物	SF <sub>6</sub>
释放量/kg	20
火箭飞行速度/m·s <sup>-1</sup>	800
火箭发射倾角/(°)	80
释放容器压强/mPa	10
释放物温度/K	230
电离层模型	IRI2012
大气密度模型	ATMOSNRLMSISE00
释放高度中性气体温度/K	1000
地磁场强度/T	$4.5 \times 10^{-5}$
磁倾角/(°)	20
磁偏角/(°)	-0.5
化学反应系数 [14]	$2.0 \times 10^{-7}$
释放高度释放物扩散系数 [24]/cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	$1.6 \times 10^{10}$

### 4.2 数值模拟

根据仿真参数设置, 采用本文建立的效应仿真模型, 仿真了在 300 km 高度释放 20 kg SF<sub>6</sub> 产生的

电离层三维扰动结构的时空演化过程, 电子密度扰动演化剖面如图 3 所示.

从图 3 可以看出, 在释放之初, 由于释放物的密度高, 释放物与电子快速反应形成电子密度空洞. 释放后 30 s 形成的电子密度空洞深度最深, 电子密度耗空达 100%, 同时随着时间的增加电离层洞的最大耗空深度逐渐减小, 逐渐从释放后 30 s 的 100% 下降到释放后 1200 s 的 38.5%. 同时, 电离层扰动中心高度出现了明显的下降趋势, 从释放之初的约 300 km 逐渐下降为释放后 1200 s 约 260 km, 下降平均速度约 35 m/s.

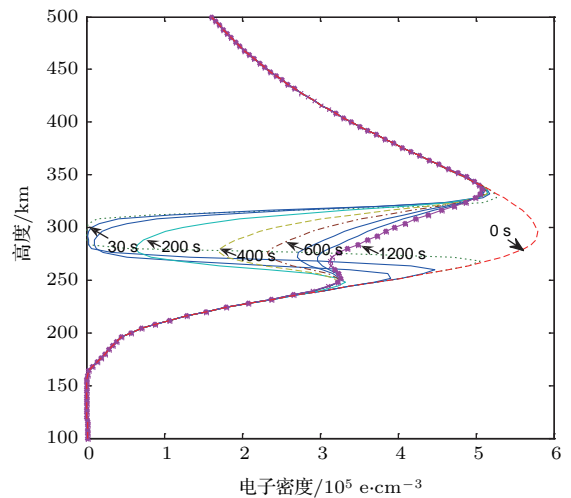


图 3 (网刊彩色) 20 kg SF<sub>6</sub> 在 300 km 高度释放产生的电子密度扰动演化剖面

Fig. 3. (color online) The temporally serial profiles of electron density after 20 kg SF<sub>6</sub> release at 300 km.

图 4 为 20 kg SF<sub>6</sub> 在 300 km 高度释放产生的电子密度扰动沿  $x$ - $z$  方向切面. 从图 4 可以看出, 释放之初, 扰动区形态接近球体, 随后地磁场对电子密度扰动的控制作用逐渐显现, 电子沿磁场方向回填, 电离层扰动沿磁场延伸, 形成椭球形状, 长轴和短轴之比逐渐增加.

图 5 为 20 kg SF<sub>6</sub> 在 300 km 高度释放产生的三维电子密度扰动结构, 从图 5 可以看出, 释放后 30 s 产生的电离层扰动区尺度约 50 km, 随后扰动尺度逐渐增大, 扰动形态也逐渐由球体转变为椭球体. 在释放后 600 s 扰动区的尺度基本达到最大值, 扰动区长轴约 100 km, 短轴约 50 km. 随后扰动区继续沿磁场扩散, 扰动区的长短轴比继续增加, 在释放后 1200 s 长短轴之比达 3 以上.

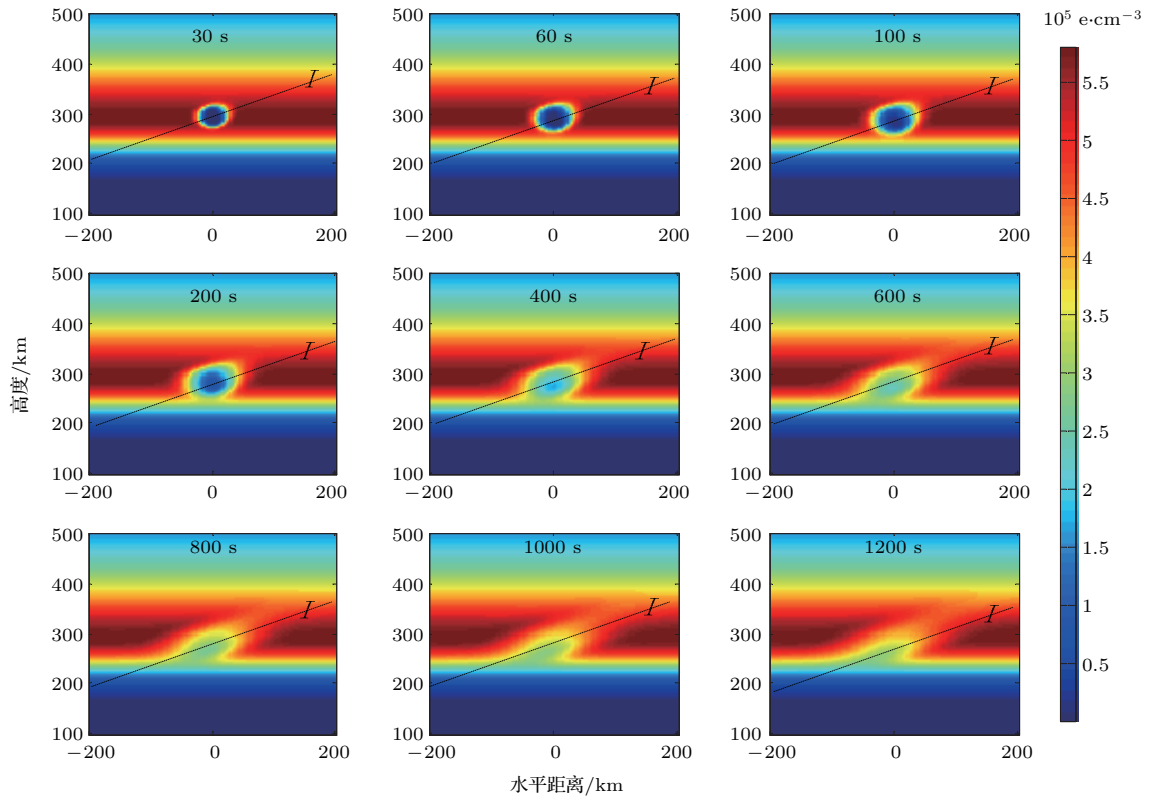


图4 (网刊彩色) 20 kg SF<sub>6</sub> 在 300 km 高度释放产生的电子密度扰动沿  $x$ - $z$  方向切面

Fig. 4. (color online) The temporally serial  $x$ - $z$  slices of the electron density evolution after 20 kg SF<sub>6</sub> release at 300 km.

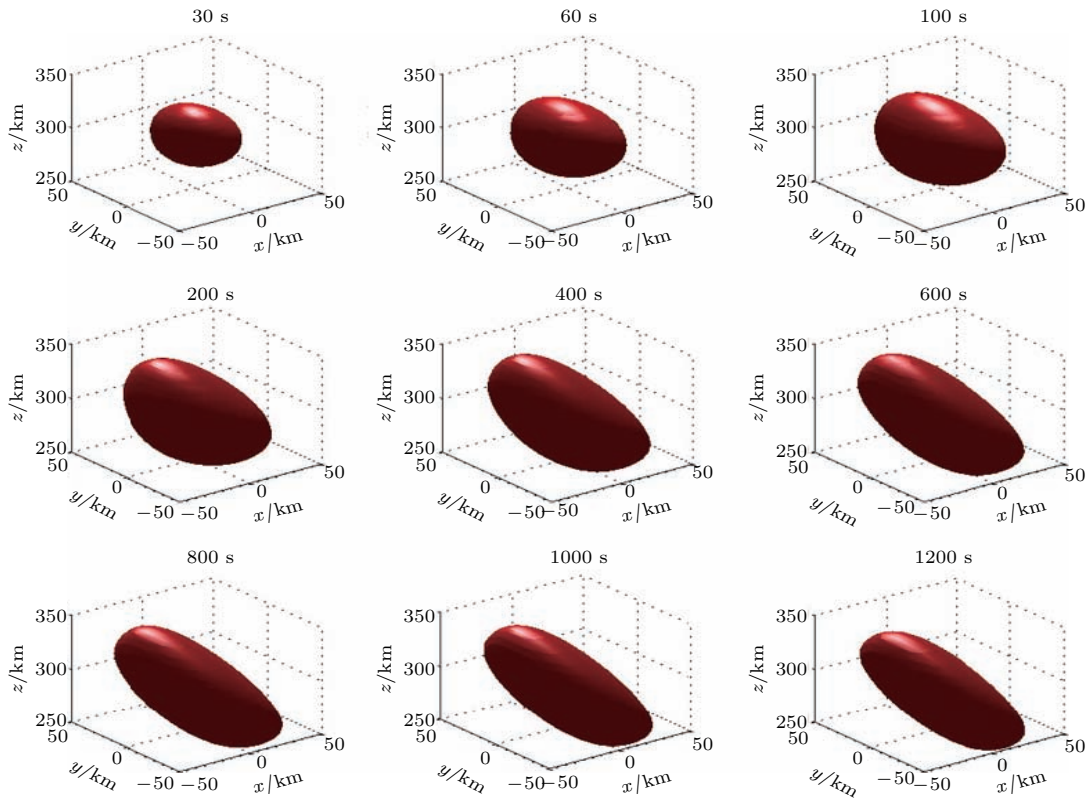


图5 (网刊彩色) 20 kg SF<sub>6</sub> 在 300 km 高度释放产生的三维电子密度扰动结构

Fig. 5. (color online) The temporally serial 3-D shapes of the electron density after 20 kg SF<sub>6</sub> release at 300 km.

### 4.3 短波射线追踪

射线追踪是研究电离层电波传播的有效方法之一, 尤其对高频以上频段电波信号, 射线追踪方法能够较准确描述电波的传播路径. 射线追踪可以分为数值法射线追踪和解析法射线追踪两种, 解析法射线追踪不能应用于非均匀的电离层, 其应用受到局限; 数值法射线追踪可以应用于非均匀电离层且便于计算机编程, 因此应用十分广泛, 最常用的是二维和三维射线追踪方法, 本文采用二维射线追踪方法. 由于射线追踪算法十分成熟, 在此不再赘述, 详细算法请查阅文献 [25, 26].

为了进一步研究 SF<sub>6</sub> 释放产生的电子密度扰动结构对信息传输链路的影响, 开展了短波射线追踪, 仿真了不同频率的短波信号穿越扰动区后信号的传播路径和方向的变化. 电子密度扰动形态选取

释放后 60, 400 和 1200 s 三个时间点.

释放后 60 s 是电离层扰动的起始阶段, 电离层扰动的深度深, 扰动范围小. 分析图 6 射线追踪结果, 可知 6 MHz 的无线电波完全被电离层反射, 无法达到电离层扰动区; 8 MHz 的无线电波能够穿透电离层, 到达电离层扰动区的无线电波, 在电离层扰动区内经过复杂绕射, 部分信号反射回地面, 这种超越临界频率的短波信号, 经过电离层扰动区后, 重新返回地面的现象, 我们暂且称之为“异常反射”现象; 10 MHz 的无线电波全部穿透电离层和扰动区, 但是, 由于扰动区电子密度的减小增加了信号的折射率, 因此穿越扰动区的信号出现了明显的聚焦效应; 12 MHz 的无线电波全部穿透电离层和扰动区, 但由于扰动区信号折射率随电波信号频率的增加而减小, 聚焦效应弱于 10 MHz 信号.

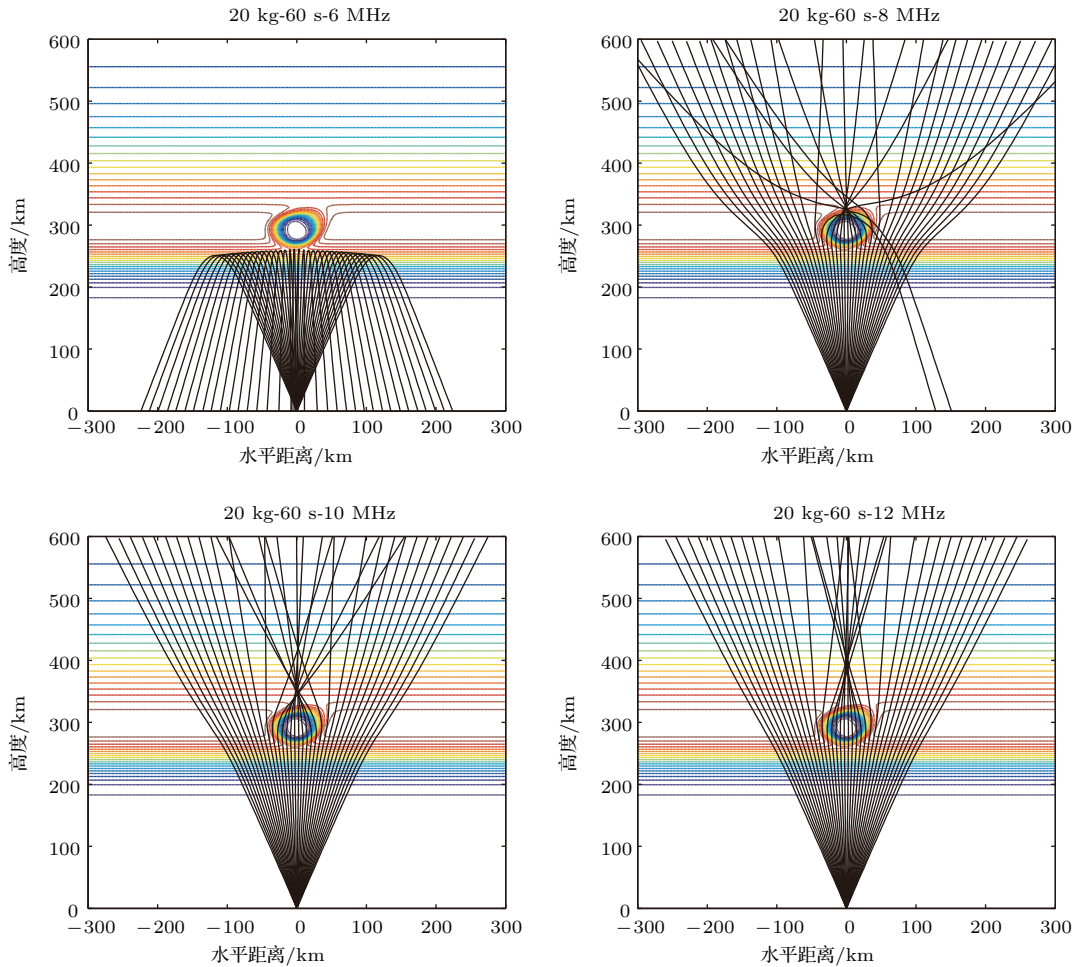


图 6 (网刊彩色) 释放后 60 s 射线追踪结果

Fig. 6. (color online) Ray tracing simulations of radio wave propagation through cloud at 60 s after release.



释放后 400 s 是电离层扰动的充分发展期, 扰动深度和扰动尺度均处于较大值. 分析图 7 射线追踪结果, 可知 6 MHz 的无线电波能够到达扰动区内部, 在扰动区发生了复杂的绕射效应, 信号传播路径出现了不可预知的改变; 6.4—6.6 MHz 无线电波在扰动区的传播效应, 具有明显的渐进过程, 从 6.4 MHz 信号完全被反射, 逐渐到 6.5 和 6.6 MHz 信号被部分反射部分穿透; 7 MHz 无线电波在扰动区经过复杂绕射、反射和透射, 部分信号返回地面, 部分穿透; 7.5 MHz 无线电波高于电离层临界频率,

全部穿透电离层和扰动区, 穿透扰动区的信号产生了明显的聚焦效应.

释放后 1200s 是电离层扰动的充分发展期, 电离层扰动的深度减小, 扰动范围进一步增加. 分析图 8 射线追踪结果可知, 6 MHz 无线电波在扰动区产生复杂绕射效应, 回波方向出现不可预知改变, 进入扰动区的 6.5 MHz 无线电波在扰动区聚焦后, 穿越扰动区, 其他信号被电离层反射; 进入扰动区的 7 和 7.5 MHz 无线电波在扰动区有明显的聚焦效应, 但聚焦效应随频率增加越来越微弱.

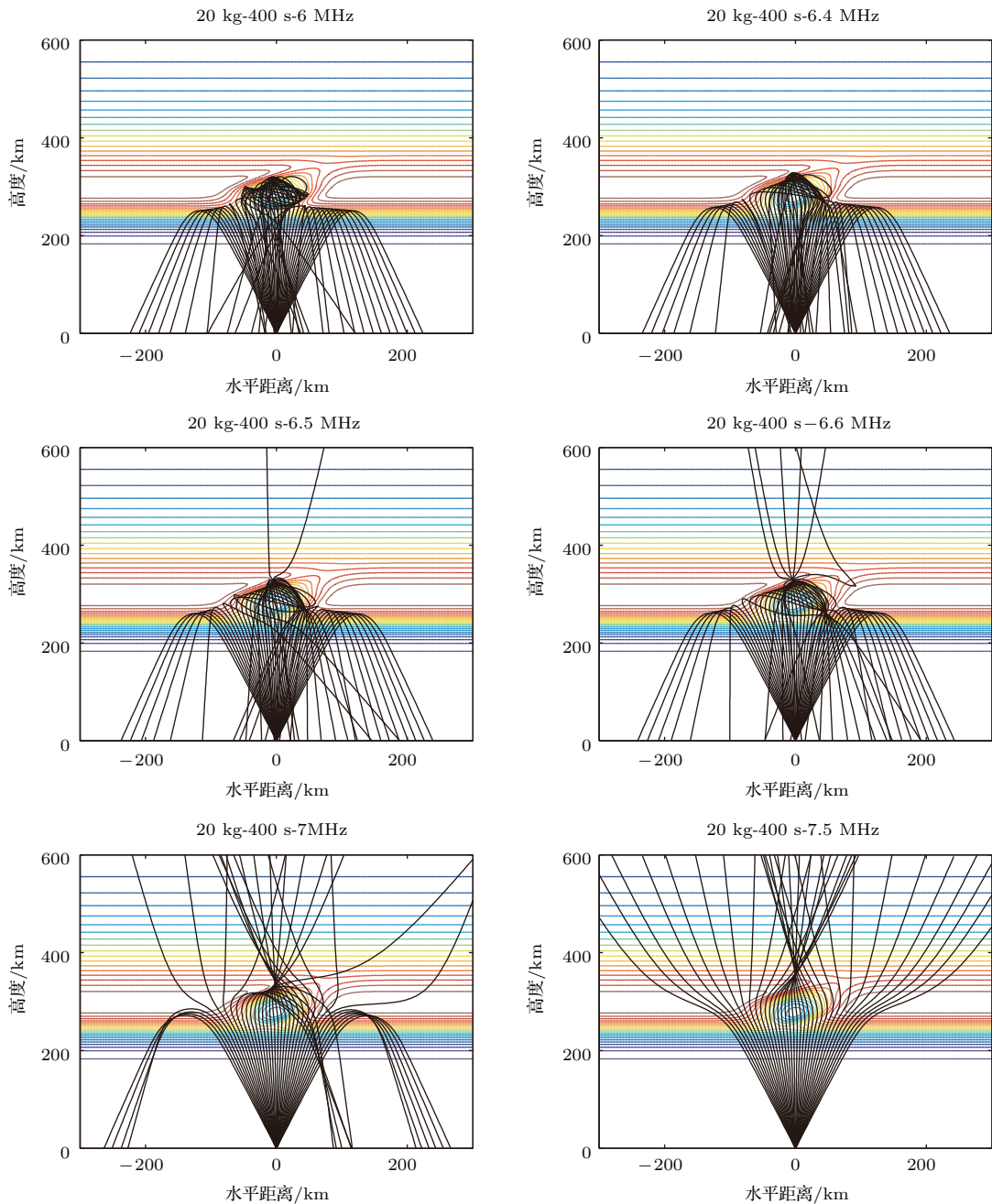


图 7 (网刊彩色) 释放后 400 s 射线追踪结果

Fig. 7. (color online) Ray tracing simulations of radio wave propagation through cloud at 400 s after release.

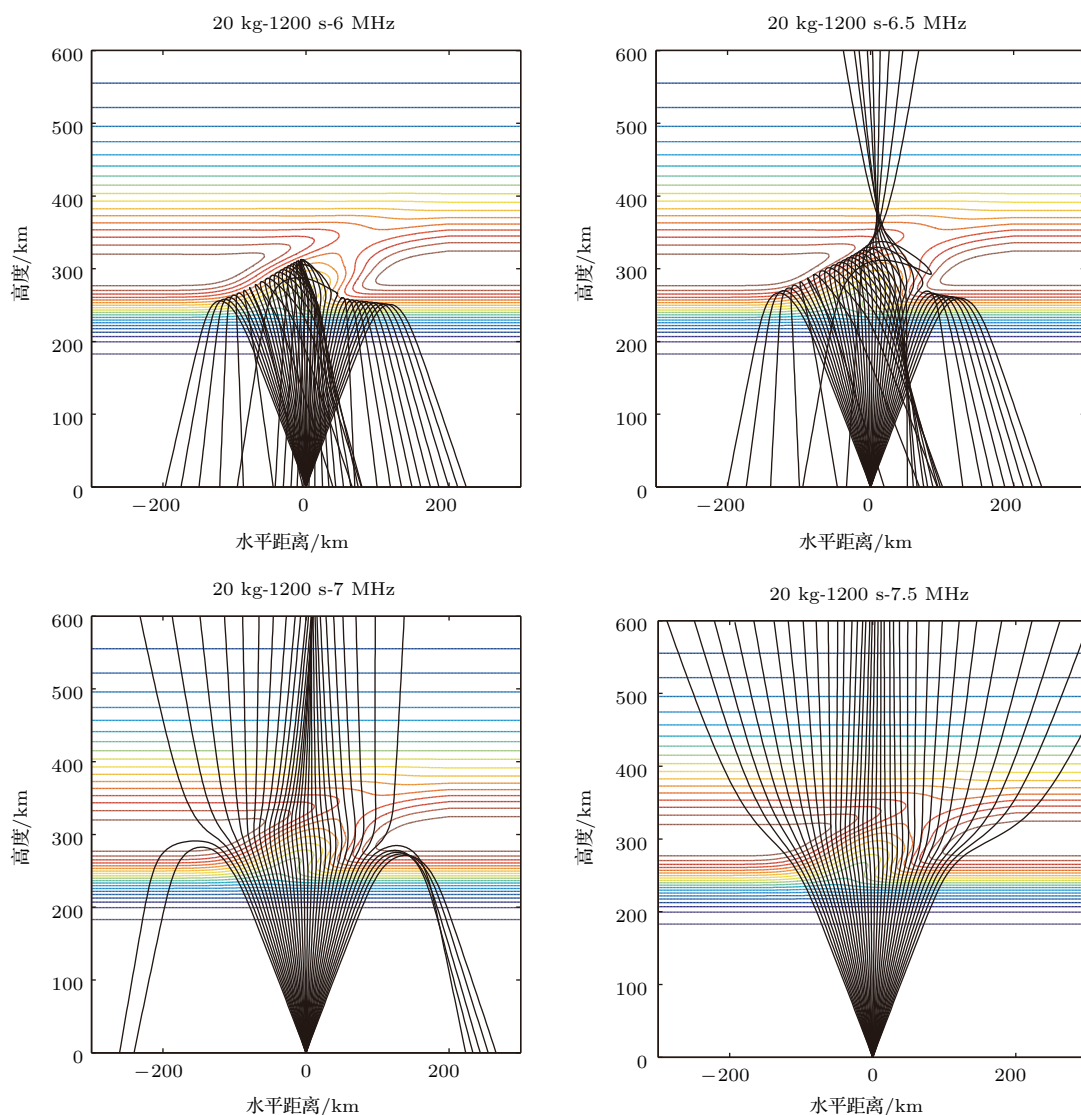


图8 (网刊彩色) 释放后 1200 s 射线追踪结果

Fig. 8. (color online) Ray tracing simulations of radio wave propagation through cloud at 1200 s after release.

## 5 结 论

随着理论研究的逐步深入和卫星信标等高精度诊断技术的发展,对仿真模型精度的要求越来越高,基于简单点源释放的效应研究,越来越不能满足卫星信标等高精度诊断技术研究的需要,传统的二维点源效应模型将逐渐被三维精细效应模型所取代.本文开展了SF<sub>6</sub>电离层释放的三维精细效应研究,在释放物扩散方程中加入了运载器飞行速度和姿态、释放物释放速度和流量、热层风场等参量对释放物扩散过程的影响;在等离子体扩散方程中考虑了地磁偏角和沿场扩散项对扰动形态等关键参数的影响,将二维等离子体扩散方程扩展到三

维,提高了模型精度.本文建立的精细化效应仿真模型,更全面考虑了试验现场因素,同时也更为准确描述了电离层扰动的沿场扩散过程;但遗憾的是,由于缺少空间试验数据,本模型的模拟结果尚无法开展与实测结果的对比研究,随着我国空间主动试验的开展,本模型将得到进一步验证和完善.

本文采用射线追踪方法,研究了化学物质释放产生的电离层扰动效应对短波信号传播的影响.短波射线追踪结果可以看出,不同频率短波信号穿越扰动区后信号的传播路径发生了显著改变,产生了复杂的绕射、聚焦、异常反射等电波传播效应.短波信号的绕射和异常反射效应对改善短波信道,甚至建立新的短波通信链路具有应用价值;短波信号

的聚焦效应对研究电离层聚焦加热技术具有重要意义.

### 参考文献

- [1] Howard D E, John F B, Edward R M, Cooper C D 1956 *J. Geophys. Res.* **61** 82
- [2] Klobuchar J A, Abdu M A 1989 *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **94** 2721
- [3] Gurnett D A, Anderson R R, Bernhardt P A 1986 *J. Geophys. Res. Lett.* **13** 644
- [4] Bernhardt P A, Rousseldupre R A, Pongratz M B 1987 *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **92** 5777
- [5] Huba J D, Bernhardt P A 1992 *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **97** 11
- [6] Bernhardt P A, Huba J D 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 1613
- [7] Wescott E M, Stenbaek-Nielsen H C, Hampton D L 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 2145
- [8] Bernhardt P A, Baumgardner J B, Bhatt A N 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 2774
- [9] Joshi D, Groves K, McNeil W 1997 *Modeling the High Frequency Propagation Environment in Metal Oxide Space Cloud Experiment* (American: Elsevier Science Inc.) p174
- [10] Caton R G, Pederson T R, Parris R T, Groves K M, Bernhardt P A, Cannon P S 2013 *American Geophysical Union, Fall Meeting*, Moscone, American, December 9–13, 2013 #SA21A-2011
- [11] Natasha J B, Paul C, Matthew A, Ronald C, Keith G, Todd P, Richard P, Su Y J, et al. 2014 *Proceedings of the XXXIst URSI General Assembly and Scientific Symposium* Beijing, Chinese, August 17–23, 2014 p1362
- [12] Groves K M, Caton R G, Pedersen T R, Parris R T, Su Y J, Cannon P S, Natasha J B, Angling M J, Retterer J M 2013 *American Geophysical Union, Fall Meeting* Moscone, American, December 9–13, 2013 #SA23B-05
- [13] Bernhardt P A 1979 *J. Geophys. Res.* **84** 4341
- [14] Bernhardt P A 1984 *J. Geophys. Res.* **89** 3929
- [15] Bernhardt P A 1979 *J. Geophys. Res.* **84** 793
- [16] Bernhardt P A 1982 *J. Geophys. Res.* **87** 7539
- [17] Scales W A, Bernhardt P A 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 13815
- [18] Hu Y G, Zhang Y N, Zhao Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8293 (in Chinese) [胡耀垓, 张援农, 赵正予 2010 物理学报 **59** 8293]
- [19] Hu Y G, Zhao Z Y, Zhang Y N 2011 *J. Geophys. Res.* **116** doi: 10.1029/2011JA016438
- [20] Huang W G, Gu S F 2006 *J. Space Sci.* **28** 81 (in Chinese) [黄文耿, 古士芬 2006 空间科学学报 **28** 81]
- [21] Schunk R W, Szuszczewicz E P 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1337
- [22] Gatsonis N A, Hastings D E 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 7623
- [23] Bernhardt P A 1988 *J. Geophys. Res.* **93** 8696
- [24] Bernhardt P A 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 4617
- [25] Haselgrove J 1955 *Proc. Phys. Soc.* **23** 355
- [26] John M K 1968 *Radio Sci.* **13** 1

# A three-dimensional refined modeling for the effects of SF<sub>6</sub> release in ionosphere\*

Zhao Hai-Sheng<sup>1)</sup> Xu Zheng-Wen<sup>2)</sup> Wu Zhen-Sen<sup>1)†</sup> Feng Jie<sup>2)</sup> Wu Jian<sup>2)</sup> Xu Bin<sup>2)</sup>  
Xu Tong<sup>2)</sup> Hu Yan-Li<sup>2)</sup>

1) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China*)

( Received 10 April 2016; revised manuscript received 7 July 2016 )

## Abstract

The traditional simulation model of sulfur hexafluoride ionosphere release is a simple point-source model and the simulation precision is not high. The three-dimensional refined simulation model of rocket SF<sub>6</sub> release is established in this paper, in which the rocket pose and velocity, gas injection velocity and flow, and wind velocity are all taken into account in the diffusion equation. Meanwhile, the influences of geomagnetic inclination and the field diffusion on artificial disturbance form are considered in the plasma diffusion equation, and the two-dimensional plasma diffusion equation is extended to three-dimensional case. The ray tracing method is used to study the influence of ionospheric artificial disturbance on the short wave propagation path. The research results of the ionosphere kinetics process, ionospheric uneven body generation mechanism and evolution are of great significance.

**Keywords:** ionosphere, chemical release, sulfur hexafluoride, effects

**PACS:** 94.20.Bb, 94.20.Vv

**DOI:** [10.7498/aps.65.209401](https://doi.org/10.7498/aps.65.209401)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41104102).

† Corresponding author. E-mail: [wuzhs@mail.xidian.edu.cn](mailto:wuzhs@mail.xidian.edu.cn)