0254-6124/2014/34(6)-815–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Fan Xin, Fang Hanxian, Niu Jun, Weng Libin, Yang Xu. Retrieval of initial disturbance of Spread-F based on adjoint theory and numerical simulation (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 815-821, doi:10.11728/cjss2014.06.815

基于伴随理论的 Spread-F 最优初值扰动提取研究及数值模拟

范 鑫[1,2] 方涵先[1,2] 牛 俊[1,2]

翁利斌[1,2] 杨 旭[3]

1(解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101)

2(空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

3(63788 部队 渭南 714000)

摘 要 通过讨论 Spread-F 扰动初值对于研究 R-T 不稳定性的必要性, 分析初值扰动提取在人工诱导电离层方面的重要作用, 首次提出了应用伴随理论将电离层不稳定性基本方程与 Spread-F 观测资料相结合提取其扰动初值的方法. 推导了电离层不稳定性方程的伴随模式并进行数值模拟实验, 结果表明电离层不稳定性方程能够较好描述 Spread-F 的发展过程; 伴随模式在利用不同迭代初值以及不同时刻观测资料进行反演时, 均能得到较为理想的结果, 表明利用伴随模式反演电离层 Spread-F 初始扰动是可行的.

关键词 伴随理论, 电离层 Spread-F, 初始扰动, 数值模拟

中图分类号 P 352

Retrieval of Initial Disturbance of Spread-F Based on Adjoint Theory and Numerical Simulation

FAN Xin[1,2] FANG Hanxian[1,2] NIU Jun[1,2]

WENG Libin[1,2] YANG Xu[3]

1(*Institution of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101)

2(*State Key Laboratory of Space Weather, Beijing* 100190)

3(*Unit 63788 of PLA, Weinan* 714000)

Abstract Retrieval of initial disturbance of Spread-F is very important in the study on Rayleigh-Taylor instability (R-T instability). In this paper, adjoint theory is proposed and used in the retrieval of initial disturbance of Spread-F for the first time. The adjoint model of ionospheric instability is presented and numerical simulation is also carried out to test the algorithm. A physical model for the development of the mid-latitude Spread-F is developed, including the equations for density,

2013-12-16 收到原稿, 2014-05-05 收到修定稿

E-mail: gunnervan@hotmail.com. 通讯作者方涵先, E-mail: fanghx@gmail.com

momentum and continuity. The simulation results show that ionospheric instability model described the development of Spread-F well. By using different iterative initial value and simulated observation data at different time, the retrieval results fit well with the initial values, and it is feasible to obtain the initial disturbance using adjoint model.

Key words Adjoint theory, Ionosphere Spread-F, Initial disturbance, Numerical simulation

0 引言

电离层作为近地空间环境的一部分, 不但为多领域提供了良好的传播介质 [1], 而且为实现天波超视距雷达 [2−4] 提供了条件, 对卫星通信和导航定位等空间活动具有重要意义. 电离层不规则体可导致无线电波在穿过电离层时发生闪烁, 其空间尺度从几米到上千公里不等, 持续的时间长度也因所处纬度和季节等因素不同而有所不同. Spread-F 是夜间 F 层电子和离子密度的一种不规则扰动, 在电离图上表现为描迹的扩展. 以往很长一段时间内, 有关 Spread-F 的研究主要集中在赤道地区 [5−8], 近年来在中低纬地区开展了一些观测和理论研究, 取得一定成果.

大量研究结果表明, 电离层 Spread-F 大多是由 Rayleigh-Taylor (R-T) 不稳定性造成的 [9], R-T 不稳定性过程起始于电子密度的初始扰动, 在背景电场、中性风、重力波的作用下发展成不同的 Spread-F 形态. 有关背景电场、中性风、重力波等对 Spread-F 发展的影响已有许多研究. Luo 等 [10] 的研究表明, 热层风和背景电场的空间梯度对 R-T 不稳定性增长有不可忽视的促进或抑制作用; Huang 等 [11] 的数值模拟表明, 空间不均匀电场结构能在赤道地区触发 R-T 不稳定性, 导致电离层等离子体泡的产生; Woodman 等 [12] 和 Klostermeyer 等 [13] 研究了重力波在 R-T 不稳定性增长中的作用. 通常认为 R-T 不稳定性增长是由于电子密度扰动引起的, 多大强度的扰动会引起不稳定性增长, 即 R-T 增长的临界条件尚缺乏研究. 临界条件研究有助于更好地理解电离层不稳定性的发展原因, 而且对于研究 Spread-F 的触发机制具有十分重要的意义.

有关人工影响电离层的研究不断深入, 例如通过释放化学物质和电波加热等改变电离层环境. 但在电离层稳定时对其实施人工影响存在扰动幅度小、持续时间短等问题, 难以在实际中应用. 利用自然界本身的不稳定性, 通过诱导不稳定性能量的发生发展成为实现人工影响电离层的有效手段. 只有在已知不稳定发展的初始扰动情况下才能以最小的扰动实现电离层不稳定性发展. 因此, 基于有限时间点局部空间资料反演初值扰动成为实现人工诱导电离层不稳定性的关键技术.

综上所述, Spread-F 的初值扰动提取技术对于研究其触发机制、人工诱导电离层不稳定性等具有十分重要的作用. 目前研究 Spread-F 以观测资料分析和理论模型数值分析为主, 但两者都不能有效提取 Spread-F 初始扰动. 由于观测手段和技术的限制, 只有在 Spread-F 发展到一定尺度时才能观测到 Spread-F, 因而无法得到触发 Spread-F 的扰动初值. 理论模型的数值模拟实验扰动初值与实际电离层扰动存在差异, 因而会在与实际资料的对比中产生误差, 无法判断实际的扰动初值. 本文首次提出一种基于伴随理论的电离层 Spread-F 初值扰动提取方法, 利用有限时间点的局部空间资料, 根据理论模式的伴随模式反演 Spread-F 的初始扰动.

1 基本理论

利用空间局部资料提取初始扰动, 本质上是一类反问题. 反问题的显著特征是不适定问题, 即方程的解不一定存在, 存在也不一定唯一, 唯一也不一定稳定. 本文采用经典伴随理论推导电离层不稳定性方程的伴随模式.

采用电离层不稳定模式模拟电离层 Spread-F, 不稳定性的基本方程为 [14]

$$\frac{\partial Q}{\partial t}-\frac{c}{B}\Big[\frac{\partial}{\partial x}\Big(Q\frac{\partial}{\partial y}\phi_1\Big)\Big/\cos I-\frac{\partial}{\partial y}\Big(Q\frac{\partial}{\partial x}\phi_1\Big)\cos I\Big]=-\frac{c}{B}\frac{Q}{n_0}\frac{\partial n_0}{\partial y}\frac{\partial \phi_1}{\partial x}\cos I-\nu_{\mathrm{R}}(Q-1), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2\phi_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi_1}{\partial y^2}+\Big(\frac{1}{\nu_{\alpha\mathrm{n}}}\frac{\partial\nu_{\alpha\mathrm{n}}}{\partial y}+\frac{1}{Q}\frac{\partial Q}{\partial y}+\frac{1}{n_0}\frac{\partial n_0}{\partial y}\Big)\frac{\partial\phi_1}{\partial y}+\frac{1}{Q}\frac{\partial Q}{\partial x}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}=\Big(E_{0x}-\frac{B}{c}\frac{g}{\nu_{\alpha\mathrm{n}}}\cos I\Big)\frac{1}{Q}\frac{\partial Q}{\partial x}. \tag{2}$$

其中, I 为磁倾角; $Q=n/n_0$ 为电子密度无量纲量, n 为粒子数密度, n_0 为背景粒子数密度; ν_{R} 为复合系数, $\nu_{\alpha\mathrm{n}}$ 为粒子与中性分子间的碰撞频率, α 对应电子为 e, 对应离子为 i; $\boldsymbol{E}=\nabla\phi$, $\boldsymbol{E}$ 为背景电场. 建立如下目标泛函:

$$J[Q]=\int(Q-Q^{\mathrm{obs}})^2\mathrm{d}\Omega=\min. \tag{3}$$

式 (1) 的伴随方程推导如下.

第 1 步　求解式 (1) 的切线性模式. 如果 $Q=Q+\bar{Q}$, 则 $\bar{Q}$ 满足如下偏微分方程:

$$\frac{\partial\bar{Q}}{\partial t}-\frac{c}{B}\Big[\frac{\partial}{\partial x}\Big(\bar{Q}\frac{\partial}{\partial y}\phi_1\Big)\Big/\cos I-\frac{\partial}{\partial y}\Big(\bar{Q}\frac{\partial}{\partial x}\phi_1\Big)\cos I\Big]=-\frac{c}{B}\frac{\bar{Q}}{n_0}\frac{\partial n_0}{\partial y}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}\cos I-\nu_{\mathrm{R}}\bar{Q}. \tag{4}$$

第 2 步　求出目标泛函在 Q 处的方向导数, 根据定义 $J[Q]=\langle\nabla_Q J,Q\rangle$, 可以由如下泛函表达式直接计算得到

$$J'[Q]=\frac{J[Q+\bar{Q}]-J[Q]}{Q}=\langle\nabla_Q D,\bar{Q}\rangle. \tag{5}$$

第 3 步　导出伴随模式和泛函梯度. 在方程两边同时乘以 P, 再对时间和空间积分, 有

$$\iiint\frac{\partial\bar{Q}}{\partial t}P\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t-\iiint\frac{c}{B}\Big[\frac{\partial}{\partial x}\Big(\bar{Q}\frac{\partial}{\partial y}\phi_1\Big)\Big/\cos I-\frac{\partial}{\partial y}\Big(\bar{Q}\frac{\partial}{\partial x}\phi_1\Big)\cos I\Big]P\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t=\iiint-\Big(\frac{c}{B}\frac{1}{n_0}\frac{\partial n_0}{\partial y}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}\cos I+\nu_R\Big)\bar{Q}P\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t.$$

对方程左边进行分部积分, 左式第一项为

$$\iiint\frac{\partial\bar{Q}}{\partial t}P\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t=\iint\bar{Q}P|_{t=t_0}^{t=t_1}\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\iiint\bar{Q}\frac{\partial P}{\partial t}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t;$$

左式第二项为

$$\iiint-\frac{c}{B\cos I}\frac{\partial}{\partial x}\Big(\bar{Q}\frac{\partial}{\partial y}\phi_1\Big)P\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t=-\frac{c}{B\cos I}\Big(\iint\bar{Q}\frac{\partial}{\partial y}\phi_1|_{x=x_0}^{x=x_1}P\mathrm{d}y\mathrm{d}t-\iiint\bar{Q}\frac{\partial}{\partial y}\phi_1\frac{\partial P}{\partial x}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t\Big);$$

左式第三项为

$$\iiint\frac{c\cos I}{B}\frac{\partial}{\partial y}\Big(\bar{Q}\frac{\partial}{\partial x}\phi_1\Big)P\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t=\frac{c\cos I}{B}\Big(\iint\bar{Q}\frac{\partial}{\partial y}\phi_1|_{y=y_0}^{y=y_1}P\mathrm{d}x\mathrm{d}t-\iiint\bar{Q}\frac{\partial}{\partial x}\phi_1\frac{\partial P}{\partial y}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}t\Big).$$

利用 $\bar{Q}$ 的任意性, 导出伴随模式, 即

$$-\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{c}{B\cos I}\frac{\partial\phi_1}{\partial y}\frac{\partial P}{\partial x}-\frac{c\cos I}{B}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}\frac{\partial P}{\partial y}=-\Big(\frac{c}{B}\frac{1}{n_0}\frac{\partial n_0}{\partial y}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}\cos I+\nu_R\Big)P+\nabla_Q D, \tag{6}$$

$$P|_{t=t_1}=0. \tag{7}$$

目标泛函梯度为

$$\nabla_Q J=P|_{t=t_0}. \tag{8}$$

2　数值模拟

模拟区域是电子密度水平均匀的背景场, 地磁场强度取为 3×10^{-5} T, 初始时刻为太阳活动低年 2007 年 7 月份的 21:00 LT. 模拟正演的初始扰动, 将底部 5% 的余弦扰动 $Q=N(x,t=0)/N_0(x)=1-\exp(-3)\cos(\pi x/100)$ 作为 Spread-F 自然发生的初始条件. 电离层 Spread-F 的形态主要有等离子体泡、羽状不规则体以及底部正弦型不规则体, 不同特征形态所对应的形成机制可能略有不同, 本文主要从模拟等离子体泡发生及发展的形态特征来讨论 Spread-F.

2.1　模拟观测数据

正演问题中, 式 (1) 为椭圆方程, 采用交替隐式算法 (ADI) 求解 [15], 式 (2) 为双曲线方程, 采用通量修正法 (FCT) 求解 [16]. 背景电离层参数由 IRI-2007 模式 [17] 得到, 中性大气参数由 NRLMSISE-00

模式 [18] 得到. 数值计算中采用二维正交网格, 水平和垂直方向的网格数分别为 103 和 101, 空间步长分别为 1 km 和 3 km, 水平方向 Q 和 ϕ 采用周期边界条件, 竖直方向上下边界采用 $\frac{\partial Q}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$ 边界条件, 上边界为自由边界条件.

2.2 伴随模式

以模拟的 Spread-F 在各个时间点的数据作为观测数据, 代入伴随模式进行反演, 将反演结果与模拟的真实初始扰动对比, 检验伴随模式反演 Spread-F 扰动初值的可行性. 计算流程如图 1 所示.

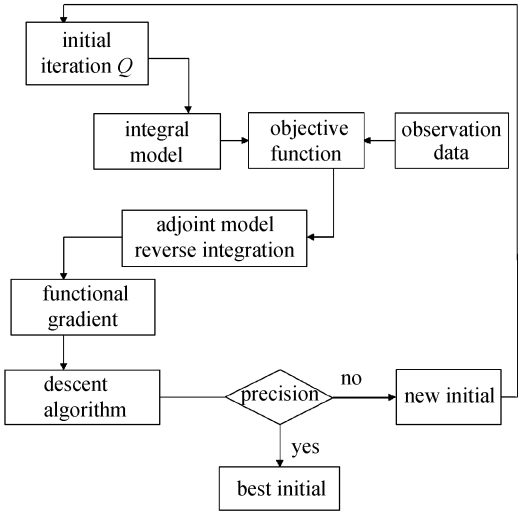


图 1 伴随方法反演扰动初值计算流程

Fig. 1 Flow chart of adjust method for inversion of initial disturbance

3 模拟结果及分析

3.1 模拟电离层 Spread-F 电子密度分布随时间的变化

利用式 (1) 模拟电离层底部扰动向上发展成为 Spread-F 过程中电子密度随时间的变化, 图 2 给出了 0 s, 360 s, 720 s, 1080 s 四个时间点的电子密度分布. 从图 2 可以看出, 电离层底部的小扰动逐渐发

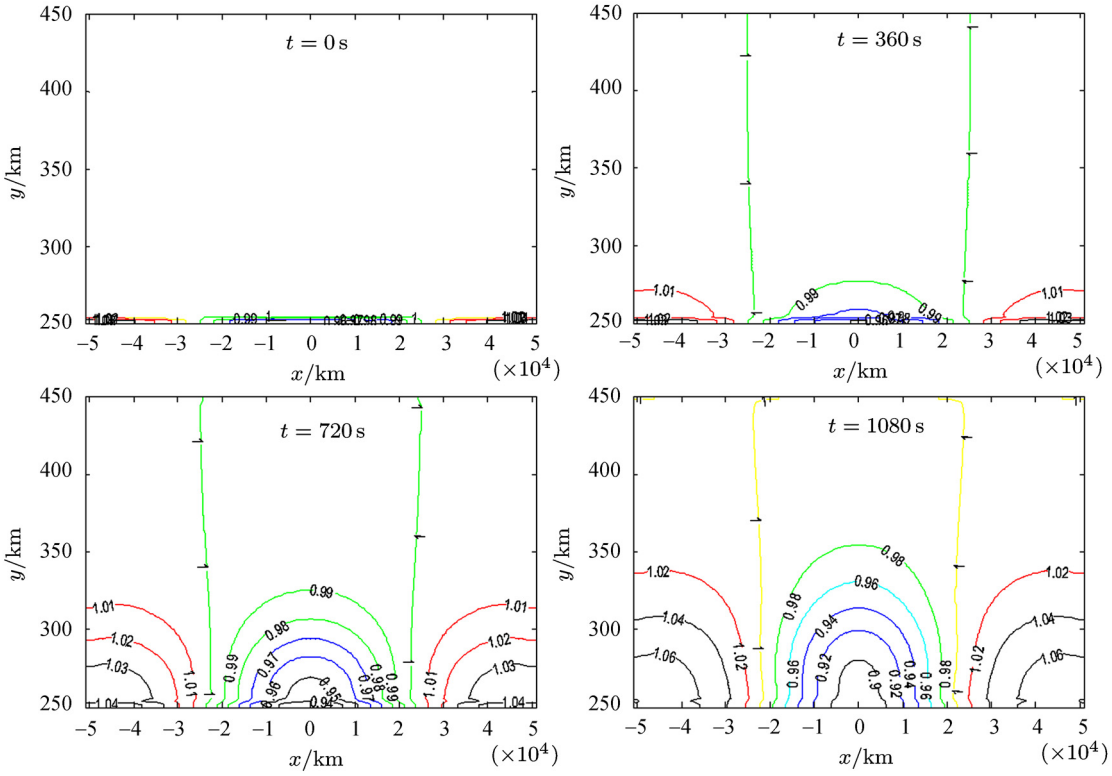


图 2 电子密度随时间的变化

Fig. 2 Evolution of electron density distribution with time

展并且向上抬升, 形成泡状的电离层不规则体. 其发展过程与已知的电离层 Spread-F 过程基本一致, 说明该电离层不稳定性方程能够较好描述电离层 Spread-F 的发展机制.

本部分通过数值模拟方法获取反演的观测资料. 模拟过程假设磁场、复合系数、离子和中性粒子间的碰撞频率及背景电子数密度可获取, 给出初始扰动, 通过数值求解, 得到在 R-T 和 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 共同作用下的电离层电子密度归一化分布.

从图 2 还可以看出, 在所选择的时间点上, 随着时间的推移, 等离子体泡形态逐渐明显, 不论是中间的电子密度耗散区域还是两侧的电子密度增强区域, 都有明显变化. 当 $t=1080\,\mathrm{s}$ 时, 耗散幅度约为 10%, 而增强幅度约为 6%.

3.2　伴随模式算法分析

(1) 初值敏感性分析

将模拟的 360 s 时的结果作为观测数据代入伴随模式进行计算, 选取三种不同迭代初值进行反演, 对算法进行敏感性分析.

初值 1

$$Q=N(x,t=0)/N_0(x)=$$
$$1-\exp(-3)\cos(\pi x/100)+0.03\cos(100\pi x).$$

初值 2

$$Q=N(x,t=0)/N_0(x)=$$
$$1-\exp(-3)\cos(\pi x/100)+0.05\cos(100\pi x).$$

初值 3

$$Q=N(x,t=0)/N_0(x)=1.$$

图 3~5 给出了三种迭代初值条件下的反演结果, 从图中可以看出, 不同情况下迭代初值都会向真值的方向逐渐逼近. 经过下降算法处理, 反演的初始扰动与模拟真值具有较高的一致性.

(2) 不同时刻观测资料反演结果分析

伴随模式算法对 360 s 观测资料的反演结果与模拟真值比较一致, 考虑到此时的 Spread-F 发展不充分, 目前观测技术和手段还不能很好观测, 因此选取 720 s 和 1080 s 的观测资料和迭代初值 1 进行反演, 检验算法对于反演较长时间尺度观测资料的可靠性. 图 6 和图 7 分别给出了反演结果, 从图中可以看出, 反演结果的精度与观测资料的时间密切相关.

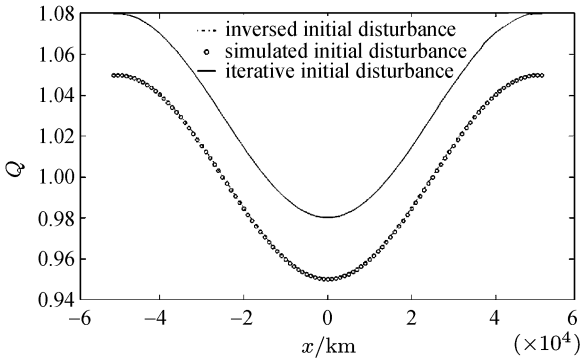


图 3　选择初值 1 时底部实际初始扰动与反演初始扰动的对比

Fig. 3　Comparison of the simulated initial disturbance and inversed initial disturbance at the bottom (iterative initial disturbance 1)

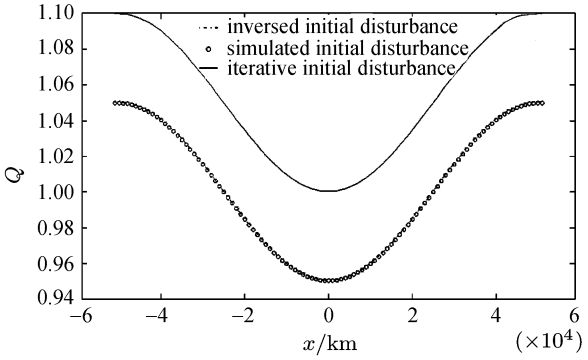


图 4　选择初值 2 时底部实际初始扰动与反演初始扰动的对比

Fig. 4　Comparison of the simulated initial disturbance and inversed initial disturbance at the bottom (iterative initial disturbance 2)

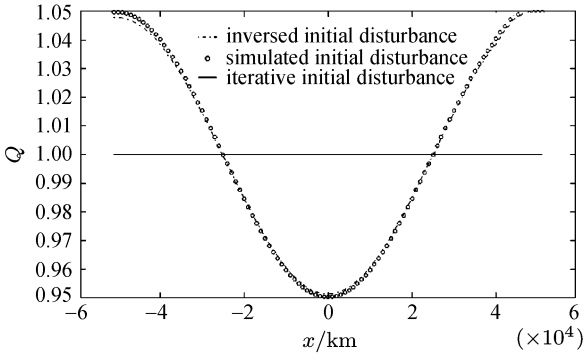


图 5　选择初值 3 时底部实际初始扰动与反演初始扰动的对比

Fig. 5　Comparison of the simulated initial disturbance and inversed initial disturbance at the bottom (iterative initial disturbance 3)

图 6 和图 7 分别给出选取 720 s 和 1080 s 观测资料时实际初始扰动与反演初始扰动的对比, 结果显示, 可以依据不同时刻的局部观测资料, 结合变分伴随理论, 最优地提取出初始扰动. Spread-F 理论研究关注的是给定电子密度的初始扰动, 重点研究其不稳定性扩散后的电子密度空间分布, 而本文提出的方法可以根据已知的等离子体泡电子密度的空间分布特征, 求解形成该等离子体泡的初始扰动, 为实现电波环境对电子密度空间分布的要求奠定了基础.

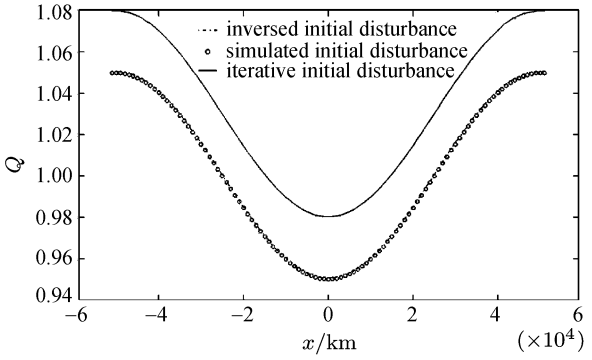


图 6 选取 720 s 观测资料时底部实际初始扰动与反演初始扰动的对比

Fig. 6 Comparison of the simulated initial disturbance and inversed initial disturbance at the bottom using observation data at 720 s

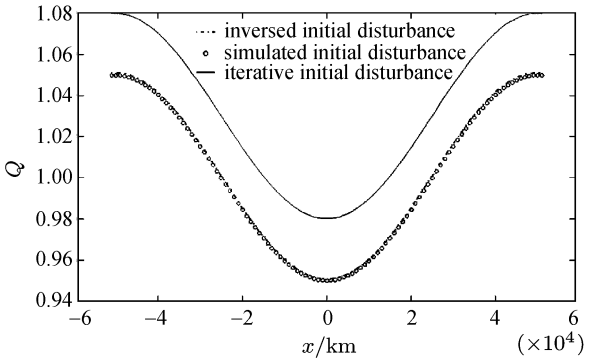


图 7 选取 1080 s 观测资料时底部实际初始扰动与反演初始扰动的对比

Fig. 7 Comparison of the simulated initial disturbance and inversed initial disturbance at the bottom using observation data at 1080 s

表 1 不同时刻观测资料反演结果相对误差的比较

Table 1 Relative error of inversion results at different time with observation data

模拟观测资料时刻/s	360	720	1080
反演结果相对误差/(%)	0.045	0.055	0.094

表 1 列出了不同时刻观测资料反演结果的相对误差, 可以看出模拟观测资料与初始扰动之间的时间间隔越长, 反演精度则越低, 这是由于伴随模式计算过程中的误差会随着时间的延长而累加, 导致反演结果精度下降.

4 结论

当 F 层底部的电子密度足够大或者峰值高度足够高时, 等离子体泡会从底部发展起来, 之后由于极化电场的作用逐渐上升, 有可能达到电离层 F 层顶部 [19]. 通过电离层不稳定性方程, 模拟了电离层 Spread-F 的发展过程, 结果与已知的 Spread-F 发展形成机制相符. 推导了电离层不稳定性方程的伴随方程, 并且通过模拟不同时刻 Spread-F 电子密度分布反演其初始扰动. 反演结果显示, 伴随模式在不同迭代初值下均能较好反演初始扰动, 伴随模式对于不同时刻的观测资料反演精度均在 0.1% 以内, 伴随模式的反演精度与模拟观测资料和初始扰动之间的时间间隔成反比, 说明伴随模式反演电离层 Spread-F 初始扰动是可行的.

人工影响电离层技术是一个十分敏感的问题, 很多关键技术仅限于某些技术报告, 相关实测数据很少. 本文重点基于电离层 Spread-F 电子密度扩散方程, 利用变分伴随理论, 结合反问题处理方式, 研究了基于空间局部资料提取不稳定性扰动初值的方法. 本研究在仅给出一个水平均匀的电子密度背景场情况下, 重点研究了实现该方法的技术方案, 进一步的工作将结合海南站的实测数据模拟海南地区 Spread-F 的发展过程, 模拟 Spread-F 发生率更高的磁赤道地区. 有关背景电场和风场等的耦合机制将是未来研究的重点.

参考文献

[1] Shen Qiqi, Shen Desheng. HF Communication [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 1997. In Chinese (沈琪琪, 沈德生. 短波通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997)

[2] Zhou Wenyu, Jiao Pienan. OTH Radar Technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. In Chinese (周文

瑜, 焦培南. 超视距雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004)

[3] Headrick J M. Looking over the horizon [J]. *IEEE Spectrum*, 1990, **27**(7):36-39

[4] Tang Xiaodong, Han Yunjie, Zhou Wenyu. Skywave over-the-horizon backscatter radar [C]//2001 CIE International Conference on Radar. Beijing: IEEE, 2001. 90-94

[5] Sultan P J. Linear theory and modeling of theRayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **26**:875-891

[6] Keskinen M J, Ossakow S L, Fejer B G. Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric Spread-F bubbles [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(16):1855

[7] Huang Weiquan, Xiao Saiguan, Xiao Zuo, *et al.* Comparison study of IRI-2007 Spread-F occurrence predictions and observations [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(3):275-280. In Chinese (黄为权, 肖赛冠, 肖佐, 等. IRI-2007 对扩展 F 的预测与观测比较研究 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(3):275-280)

[8] Sigh S. Morphology of equatorial plasma bubbles [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **A9**:20 019-20 029

[9] Ossakow S L. Spread-F theories—A review [J]. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 1981, **43**:37-52

[10] Luo Weihua, Xu Jisheng, Xu Liang. Analysis of controlling factors leading to the development of R-T instability in equatorial ionosphere [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(4):849-858. In Chinese (罗伟华, 徐继生, 徐良. 赤道电离层 R-T 不稳定性发展的控制因素分析 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(4):849-858)

[11] Huang Chaosong, Kelley M C. Spatial and temporal evolution of equatorial Spread-F generated by electric fields [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1996, **36**(5):296-305. In Chinese (黄朝松, Kelley M C. 电场产生的赤道扩展 F 的时空演变 [J]. 地球物理学报, 1996, **36**(5):296-305)

[12] Woodman R F, Laho Z C. Radio observation of F-region equatorial irregularities [J]. *J. Geophys. Res.*, 1976, **85**:5447-5466

[13] Klostermeyer J. Nonlinear investigation of the spatial resonance effect in the nighttime equatorial F region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**:3753-3760

[14] Xie Hong, Xiao Zuo. Numerical simulation of Spread-F in low and mid-latitudes [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1993, **36**(1):18-26. In Chinese (谢红, 肖佐. 中低纬度 Spread-F 的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 1993, **36**(1):18-26)

[15] Fu Zhufeng, Hu Youqiu. Numerical Simulation of Space Plasma [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1995. In Chinese (傅竹风, 胡友秋. 空间等离子体数值模拟 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1995)

[16] Zalesak S T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids [J]. *J. Comput. Phys.*, 1979, **31**(3):335-362

[17] Bilitza D, Reinisch B W. International reference ionosphere 2007: Improvements and new parameters [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **42**(4):599-609

[18] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, *et al.* Enhanced empirical models of the thermosphere [J]. *Phys. Chem. Earth: C*, 2000, **25**(5):531-542

[19] Ossakow S L, Zalesak S T, McDonald B E. Nonlinear equatorial spread F: Dependence on altitude of the F peak and bottomside background electron density gradient scale length [J]. *J. Geophys Res.*, 1979, **84**:17-29