

文章编号: 1007-4619 (2001) 01-0022-07

电离层 CT 数据采集和图像重建

吴雄斌¹, 徐继生¹, 马淑英¹, 田 茂¹, 叶公节²

(1. 武汉大学 物理与电子信息科学学院, 湖北 武汉 430072;

2. Department of ECE, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL 61801 USA)

摘 要: 介绍低纬电离层 CT 实验所使用的数据自动采集系统并提出一种电离层 CT 算法。在数据采集过程中引入了 GPS 标准时间; 重建算法的特点是利用差分多普勒频率数据避免了相位积分常数的计算, 提高了对较弱的电离层扰动和不规则结构的检测能力。数值模拟反演结果表明了该算法对电离层 CT 重建的有效性, 并给出有关实测数据的重建结果。

关键词: 电离层; CT; 数据采集; 算法; 差分多普勒

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

计算机层析成像技术(Computerized Tomography, 简称 CT)应用波全方位扫描通过探测目标内部, 根据目标介质对波作用的积分效应确定目标的内部结构。电离层层析成像(Computerized Ionospheric Tomography, 简称 CIT)是空间环境无线电遥测的一种新技术。1986年, Austen 等首次提出联合应用卫星无线电信标测量和 CT 技术反演电离层电子密度二维分布的设想^[1], 使电离层无线层析成为 CT 技术应用的又一种新尝试并获得迅速发展。20 世纪 80 年代末起, 俄罗斯、西北欧和北美相继设立了实验性 CIT 测线, 这些测线均分布在中高纬地区, 获得了有关中纬槽、电子密度场列增强、密度增强电离云团以及行进式电离层扰动等有意义的实验结果^[2,3]。目前 CIT 实验主要借助快速运行的极轨卫星发射的 VHF 和 UHF 频段无线电信标信号, 在短时间内实现对探测电离层区域的一次断层扫描, 地面上与卫星轨道的地面投影平行地布设一组接收机, 记录下卫星双频信标的相对差分多普勒相位, 由此获得探测区域内沿大量相互交叉的传播路径上的总电子含量即斜 TEC(Total Electron Content)数据, 进而利用合适的重建算法反演出扫描区域中电子密度分

布的二维图像。

为了监测研究赤道和低纬区域电离层电子密度大尺度构造与动力学过程, 武汉大学与美国伊利诺大学以及台湾地区中央大学和台湾地区中山大学合作, 在北半球赤道异常区, 沿东经 120°子午圈设立了国际上第一条低纬电离层 CT 探测台链 LITN(Low-latitude Ionospheric Tomography Network), 并获得了东亚赤道异常区电离层电子密度分布的初步结果^[4]。该台链从 1994 年 6 月起开始连续采集数据, 由 6 个信标卫星接收站组成, 北起上海(SH, 31.3°N, 121.5°E), 经温州(WZ, 27.9°N, 120.6°E)、中坳(CL, 25.0°N, 121.2°E)、高雄(KH, 22.5°N, 121°E)和碧瑶(BU, 16.4°N, 120.5°E), 南至马尼拉(MA, 14.6°N, 121°E), 同时接收美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, 简称 NNSS) 150MHz 和 400MHz 双频信标的差分多普勒相位。NNSS 卫星是极轨卫星, 轨道近似为大圆, 轨道高度大约在 990—1200km 之间, 绕地球一周约需 107min, 每一次卫星过境时地面台站接收信号的时间长度一般为 10—20min。LITN 南北跨越北半球电离层赤道异常区, 对于监测研究电离层赤道异常、等离子体泡和行进式电离层扰动等电离层电子密度大尺度结构的时空变化及其动力机制有重要的科学意义^[3]。图 1 是低纬 CIT 实验几何构型的示意图。

收稿日期: 2000-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(基金号: 49584006)和高等学校博士学科点专项基金项目。

作者简介: 吴雄斌(1968—), 男, 1990 年 7 月毕业于北京大学地球物理学系, 获理学学士学位; 1999 年 6 月毕业于武汉大学物理与电子信息科学学院空间物理系, 获理学博士学位。目前从事博士后研究, 主要研究方向为电离层无线层析以及无线电海洋学。

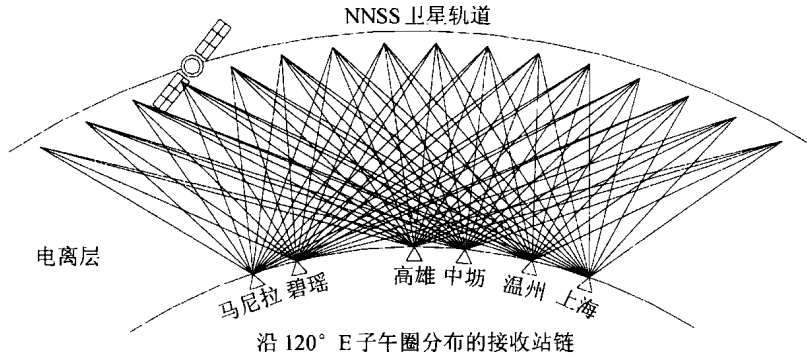


图 1 电离层层析实验几何构形示意图

Fig. 1 Sketch of the CIT experiment framework

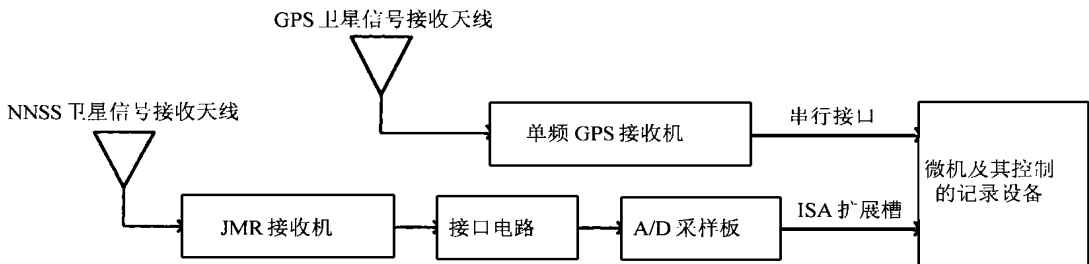


图 2 数据自动采集系统组成框图

Fig. 2 Components of the CIT data acquisition system

2 数据自动采集系统

2.1 系统构成

数据采集系统主要由 JMR-1 双通道多普勒频移接收机、单频 GPS (Global Positioning System) 接收机、接口电路、A/D 采样板和由微机数据采集软件控制的记录设备组成(图 2), GPS 接收机与微机的串行通讯口相连, NNSS 卫星的信号通过采样板由微机数据采集软件控制进行采样。该系统软硬件的设计和运行适用于无人管理台站。

2.2 NNSS 卫星信标的接收

测量 NNSS 卫星信标使用 JMR-1 接收机。该接收机的输出为: (1) 150MHz 和 400MHz 双通道多普勒频移方波脉冲串, 脉冲长度正比于多普勒频移; (2) 双通道 TTL (Transistor-Transistor Logic) 信号, 高电平指示接收机处于锁定状态; (3) 双通道 AGC (Automatic Gain Control) 电平; (4) NNSS 卫星发射, 并经过接收机解调的星历 (ephemeris) 信息, 但从 1997 年年初

开始 NNSS 卫星停止了广播星历码, 因此目前输出信号中不包含星历码。接收机的输出信号经过接口电路后, 双通道多普勒频移方波脉冲串转换为差分多普勒脉冲串, 经滤波后其信号电平正比于差分多普勒相位; 双通道锁定状态信号转换为单一的锁定/失锁状态信号, 以控制数据采集的开始和结束。

2.3 时间标准及各台站记录时间的同步

6 个接收台站使用统一的时间标准是 CIT 实验成功的关键。1997 年以前的 NNSS 卫星信号中包含星历码, 只要各台站微机内部时钟的时间与标准时间的误差在 $\pm 15\text{min}$ 以内, 并且接收的星历码不存在误码时, 通过对记录的星历码解码即可取得标准时间修正值, 从而达到各台站记录时间的同步^[4]。在 NNSS 卫星停止播送星历码后, 解决时间问题的措施是引入 GPS 的时间信息, 利用单频 GPS 接收机可以为各台站提供标准的时间信息, 以保持各台站记录数据的时间同步。同时, 引入 GPS 时间可以利用卫星轨道监测跟踪机构定期发布的轨道参数较为精确地计算出 NNSS 卫星的轨道, 以克服缺乏星历

码或星历码误码所带来的卫星定轨困难。

2.4 差分多普勒相位数据的采集

输入到微机采样板的信号包括差分多普勒相位信号、锁定/失锁状态信号以及 150MHz 和 400MHz 两通道 AGC 信号。信号接收和数据采集记录由自行编制的软件控制, 全自动和连续地进行。数据采集的流程主要由失锁循环和锁定循环组成。失锁循环进行失锁/锁定状态的监视和判断, 一旦锁定卫星信号且锁定持续时间达到阈值, 即转入锁定循环。锁定循环主要完成差分多普勒相位信息的采集记录, 同时监视和判断失锁/锁定状态, 一旦失锁持续时间达到阈值, 即退出锁定循环返回失锁循环。数据采集软件的主要特点是:

(1) 利用 GPS 时间作为数据采集记录以及系统其它运行过程的时间标准。

(2) 利用锁定/失锁状态电平来控制数据采集记录的开始与结束, 同时设置一组时间阈值以避免过短的无效记录和因偶然失锁而丢失数据。

(3) 差分多普勒相位数据的采样频率可由数据采集软件进行设置, 实际运行时取为 50Hz, 该频率足以适应赤道异常区电子密度水平梯度较大的情况。采样由采样板硬件直接控制, 因而采样均匀且采样频率与主控微机的机型无关。

(4) 采集记录差分多普勒相位信号的同时, 双通道 AGC 信号电平和记录状态等信息也一起显示在微机监视器的屏幕上, 使数据采集记录状态直观可见。

3 图像重建算法

3.1 CIT 问题的特点

由于待测区域、卫星轨道和地面接收台链之间特定的几何关系, 目前的 CIT 实验均存在缺乏水平或接近水平方向扫描射线的问题, 采集的投影数据不完整, 这是影响图像重建质量尤其是高度剖面的主要因素, 同时, 有限的接收机密度及其分布的不均匀会导致空间谱的混迭效应, 降低图像的空间分辨率^[6,7], 另外, 台站记录到的相位数据只是一种相对值, 而反演原则上需要绝对相位数据, 两者之间的差值即相位积分常数的精确确定也是决定重建图像是否合理的关键因素。与传统的 CT 算法相比, CIT 的算法更加着重于如何减轻和克服这几点不利因素所带来的影响, 其中数据的不完整性要求在反演过程

中补充先验的或由其它探测手段获得的电离层电子密度分布信息^[8], 对于在实际中普遍应用的迭代型线性代数算法^[9-11]而言, 先验信息是通过选择适当的初始电子密度分布(迭代初值)补充进图像的重建过程。

3.2 算法的原理

按照电波传播的射线理论, 双频无线电信标到达接收台站时的差分多普勒相位 Φ 由下式表达^[1,4]:

$$\begin{aligned}\Phi &= \Psi + \Phi_0 = C_D \int_p N_e(r, \theta) dl \\ &= C_D \int_{r_s}^{r_e} \frac{N_e(r, \theta)}{\cos \alpha} dr\end{aligned}\quad (1)$$

式中 C_D 为常数, 对于 NNSS 卫星, $C_D = 1.612 \times 10^{-15}$ 弧度 $^\circ \text{m}^2$, N_e 是沿传播路径 p 上任意一点的电子密度, r 和 θ 是射线上任一点的极坐标, 由于目前均采用极轨卫星开展 CIT 研究, 因此 r 和 θ 可取为地心距离和纬度(图 3), α 是传播路径上任意一点的天顶角, r_e 和 r_s 分别是地球半径和卫星轨道半径, 积分项即为该路径的斜 TEC, Ψ 是台站实际记录到的相对差分多普勒相位, Φ_0 是相位积分常数, 它是由相位数据记录的特点(即记录的相位值总在 $0-2\pi$ 之间)所引入的一个未知量。目前大多数电离层 CT 重建算法都在重建之前以某种不符合实际的假设作为前提(如电离层电子为水平分层分布或分布在无限薄层之中等等)对各台站的相位积分常数作出估计, 这样的作法会引入较大的误差, 引起重建的图像失真^[12]。

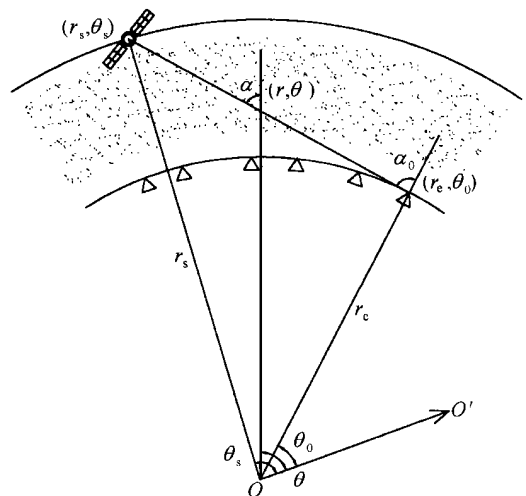


图 3 电离层层析几何构形示意图

Fig. 3 Geometry of CIT framework

本文算法回避确定 Φ_0 的问题, 将(1)式对时间求导, Φ_0 即可消失。物理上相位对时间的导数为频率, 因此这里用下式定义差分多普勒频率 Ω :

$$\Omega = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

再利用下述关系:

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \cdot \frac{d}{d\theta_s} \quad (3)$$

其中, θ_s 是卫星的地理纬度, $\omega_s = d\theta_s/dt$ 为卫星运动的角速度, 对于 NNSS 卫星, ω_s 可看作常数, 由此可得^[10]:

$$\Omega = \omega_s \cdot C_D \cdot \left[\int_{r_e}^{r_s} N_e \frac{\partial}{\partial \theta_s} \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right) dr + \int_{r_e}^{r_s} \frac{1}{\cos \alpha} \frac{\partial N_e}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \theta_s} dr \right] \quad (4)$$

实际计算时将记录到的相对差分多普勒相位数据对时间进行多点中心差分即可得到差分多普勒频率数据。与差分多普勒相位数据相比, 差分多普勒频率数据对电子密度的空间起伏更敏感^[12], 有利于检测和识别较弱的电离层扰动和不规则结构, 这也是本文算法所具有的一个优越性。

将(4)式离散化可以得到相应的线性代数方程组。基函数采用像素指标的形式, 将射线扫描区域用网格离散化, 对于(4)式, 由于式中含有电子密度对纬度的导数, 因此不能采用单个网格内电子密度为常数的近似, 通常采用双线性插值表达单个网格中任意一点的电子密度值:

$$N_e^{(k)}(r, \theta) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 a_{ij}^{(k)} r^i \theta^j \quad (5)$$

式中, k 为网格的指标, a_{ij} 为插值多项式的系数。对于每一个网格, 4 个插值系数可以用网格 4 个顶点处的电子密度值表达出来, 从而可将网格内任意一点的电子密度值表达为网格 4 个顶点电子密度值的线性组合。用(5)式可将(4)式离散为下面的矩阵方程:

$$Y_D = L_D X + E_D \quad (6)$$

式中, Y_D 为各台站记录到的所有可用射线的差分多普勒频率数据组成的列向量, L_D 是相应的投影矩阵, 列向量 E_D 代表离散化引入的误差, X 是反演区域离散化网格点的电子密度值所组成的待求列向量, 投影矩阵的每一行与 X 的标积对应于一条射线路径的数据采集。本文计算所用网格的高度为 12—15km, 水平尺度为 40km 左右。

由于投影数据不完整, 选择适当的初始电子密

度分布对于重建十分重要, 我们采用的初值分布是沿纬向平均的加权 IRI (International Reference Ionosphere) 模型, 它不包含任何电子密度水平梯度的先验信息, 其表达式为:

$$x_0(r, \theta) = c \cdot N_{e\text{IRI}}(r) \quad (7)$$

式中, $N_{e\text{IRI}}(r)$ 是反演区域内沿纬向平均 IRI 模型的电子密度分布, 权系数 c 是常数, 其取值范围通常在 0.1—2.0 之间(经验值), c 的不同取值确定了一簇初始电子密度分布, 由这些分布出发进行相同次数的 ART 迭代可以相应地得到一簇重建结果, c 的确定原则是使重建结果的迭代误差最小。第 n 次迭代的迭代误差 $e^{(n)}$ 定义如下:

$$e^{(n)} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{(n)})^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中, y_i 是向量 Y_D 的元素, 代表实际的差分多普勒频率值, $y_i^{(n)}$ 是第 n 次迭代产生的差分多普勒频率值, N 是参与反演的射线总数。在 n 相同的情况下, c 的某一取值总能使 $e^{(n)}$ 达到最小。最小迭代误差对应的重建图像即为所求的电子密度分布 $x(r, \theta)$ 。

4 算法的数值模拟检验及图像重建实例

4.1 数值模拟检验

模拟反演所用的几何构架与低纬 CT 探测台链 (LITN) 相同, 计算时台站经度均取为 120°E, 卫星高度 $h=1000\text{km}$ 。图 4(a) 是一个有扰动的槽状电子密度分布模型(图中的三角符号表示台站的位置, 电子密度的单位为 10^{11}m^{-3} , 下同), 由于 CIT 采集数据的不完整性, 反演的成像区域只能是模型的中央部分。图 4(b) 是用本文算法反演的结果, 可以看出, 槽的位置、深度和倾斜程度都得到较好的重现, 槽的北坡由于靠近反演区域的边缘, 射线扫描的视角狭窄, 导致有一定程度的形变, 扰动也基本上得到重现, 但其幅度略有减小, 这是由于缺乏水平方向射线的信息约束的结果, 扰动的影响弥散到周围的区域, 这反映了目前 CIT 所固有的内在局限性^[9]。图 5(a) 是对图 4(a) 模型进行数值积分得到的差分多普勒相位数据曲线, 图 5(b) 是相应的差分多普勒频率数据曲线。不难看到, 频率曲线对于电子密度扰动的敏感程度较高。

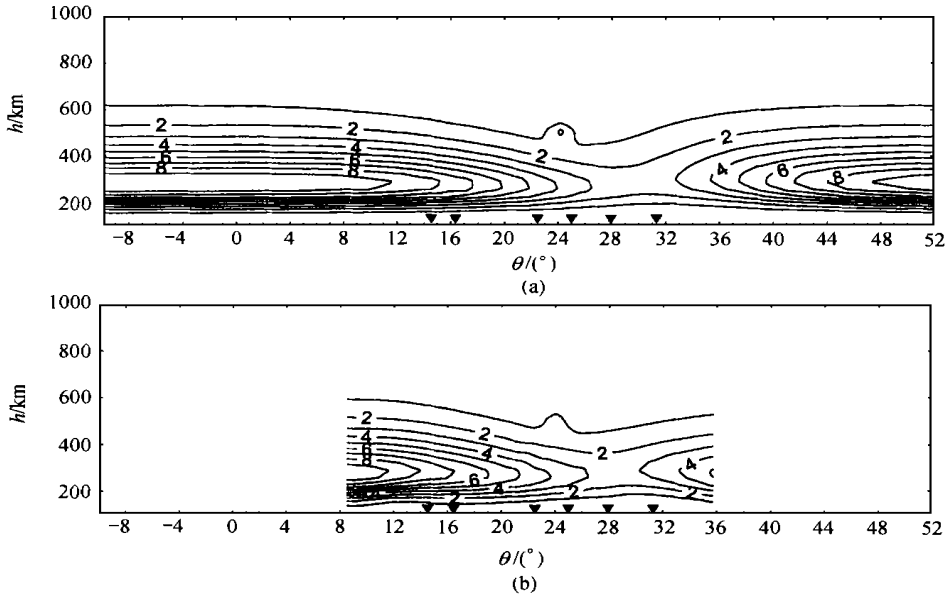


图 4 数值模型和反演得到的电子密度等值线分布

Fig. 4 Data model and contour distribution of electric density derived from inversion

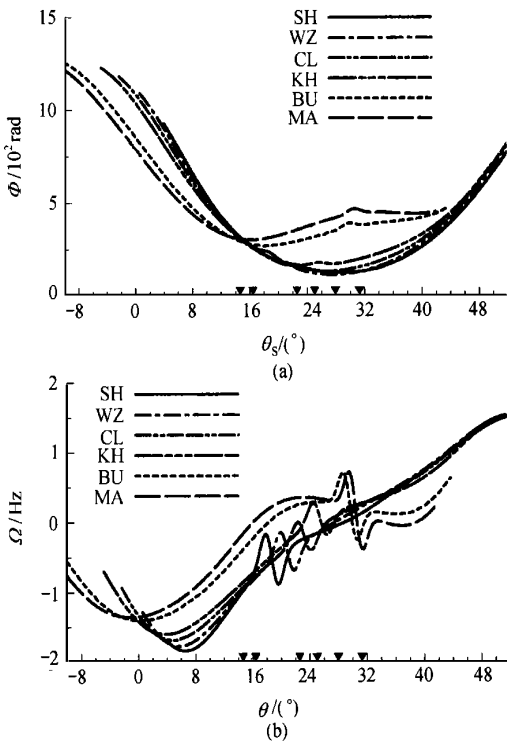


图 5 模拟各台站观测到的差分多普勒相位曲线和差分多普勒频率曲线

Fig. 5 Simulated observing differential Doppler phase curves and frequency curves for each station

4.2 图像重建实例

图 6(a) — (d) 是由 LITN 实测数据利用本文算法

反演得到的若干具有曲型意义的电离层电子密度等值线分布。图中注明了数据采集的日期和时间。图 6(a) 中可以看到在从 12°N 到 20°N 的电离层中存在一个行进式电离层扰动; 图 6(b) 清晰地显示了沿地球磁力线延伸发展的电离层赤道异常, 其峰值位于纬度 22.5°N 高度 370km 处; 图 6(c) 中可以看到电离增强的不规则结构的存在; 图 6(d) 显示了在 22°N 附近电离层中的一个电子密度的“空洞”, 这是一次中等强度磁暴急始之后约 20min 时的图像, 对于研究磁暴的电离层效应很有意义。

5 结 论

电离层 CT 将数千公里水平尺度的电离层纳入统一的框架中进行研究, 对电离层宏观现象的揭示是传统探测手段难以实现的。本文介绍了低纬电离层 CT 实验所使用的数据自动采集系统以及一种新的电离层 CT 算法。在数据采集过程中引入了 GPS 标准时间, 以实现各台站数据采集的同步。重建算法利用差分多普勒频率数据, 避免了计算相位积分常数的困难, 提高了对较弱的电离层扰动和不规则结构的检测能力。数值模拟和实例计算结果表明了这种算法的有效性, 同时说明电离层 CT 这一新兴的遥测手段在揭示电离层电子密度大尺度结构的时空变化及其动力学机制方面有着重要的应用价值。

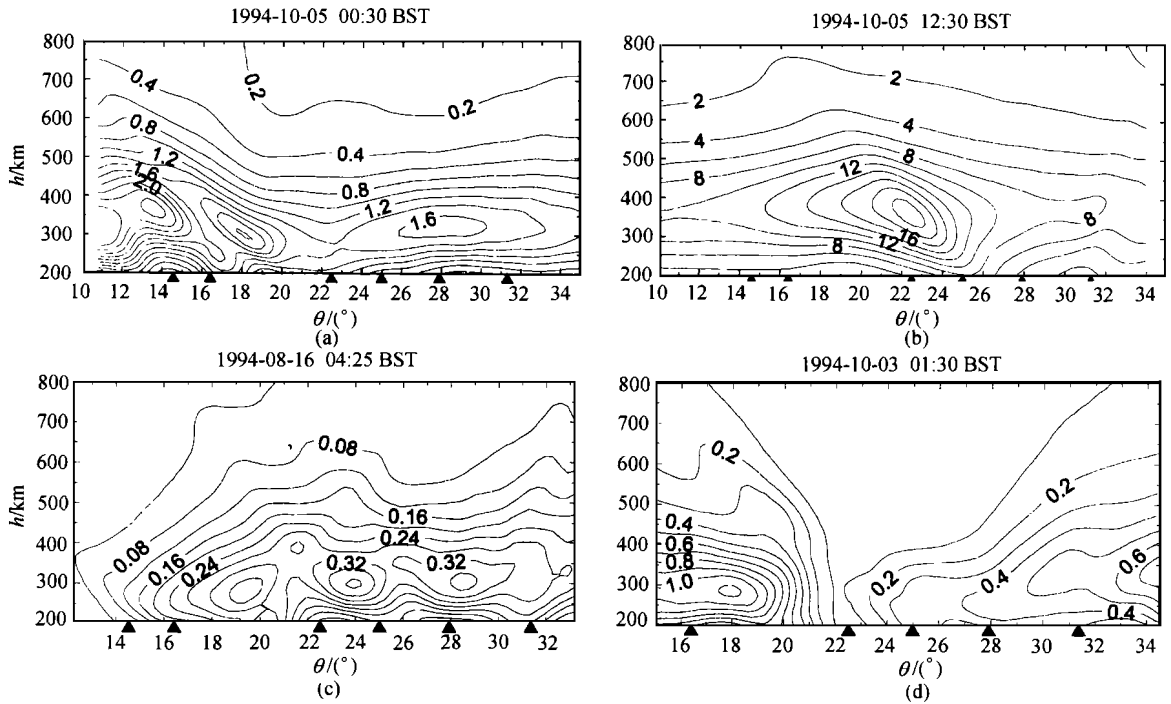


图 6 由 LITN 实测数据反演得到的电离层电子密度等值线分布

Fig. 6 Contour distributions of Ionospheric electronic density derived from LITN experimental data

致谢 本文所用数据由武汉大学电离层物理实验室与中国台湾中央大学太空物理研究所和台湾省中山大学电机系以及美国伊利诺大学波传播实验室合作共同取得, 在此谨向参加实验有关各方表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] Austen J R, Franke S J, Liu C H, Yeh K C. Application of computerized tomography technique to ionospheric research [A]. URSI and COSPAR International Beacon Satellite Symposium on Radio Beacon Contribution to the Study of Ionization and Dynamics of the Ionosphere and to Corrections to Geodesy and Technical Workshop [C]. Oulu, Finland, Proc. Part I, 25, A. Tauriainen, Ed., University of Oulu, ISBN 951-42-2256-3, 1986.
- [2] Pryse S E, Kersley L, Rice D L, Russell C D, Walker I K. Tomographic imaging of the ionospheric mid-latitude trough [J]. *Ann. Geophys.*, 1993, **11**(2): 144.
- [3] Mitchell C N, Jones D G, Kersley L, Pryse S E, Walker I K. Imaging of field aligned structures in the auroral ionosphere [J]. *Ann. Geophys.*, 1995, **13**: 1311.
- [4] Xu Jisheng, Ma Shuying, Yang Qihan, et al. Tomographic Diagnosis of the Ionosphere in the Region of East-Asian Equatorial Anomaly: An Experimental Campaign and Some Early Results [J]. *Chinese J. of Geophys.*, 1995, **38**(5): 553—562. [徐继生, 马淑英, 阳其罕等. 东亚赤道异常区电离层 CT 诊断——实验及初步结果 [J]. *地球物理学报*, 1995, **38**: 553—562.]
- [5] Yeh H C, Liu C H, Yeh K C, Lin K H. Low latitude ionospheric tomography along Taiwan meridian [A]. Proc. of Western Pacific Geophysical Meeting [C]. Hong Kong, 1994.
- [6] Yeh K C., Raymond T D. Limitations of ionospheric imaging by tomography [J]. *Radio Sci.*, 1991, **26**: 1361.
- [7] Na H, Sutton E. Resolution analysis of ionospheric tomography systems [J]. *Int. J. Imaging Sys. Tech., Special Issue, Computerized ionospheric tomography*, 1994, **5**: 169.
- [8] Kersley L J, Heaton A T, Pryse S E, Raymond T D. Experimental ionospheric tomography with ionosonde input and EISCAT verification [J]. *Ann. Geophys.*, 1993, **11**: 1064.
- [9] Censor Y. Finite series expansion reconstruction methods [J]. *Proc. IEEE*, 1983, **71**(3): 409—419.
- [10] Xu Jisheng, Ma Shuying. Radio Tomography of the Ionosphere [A]. Pu Zuyin. Developments in Space Physics Front [C]. Beijing: Meteorological Publication, 1998. 193—205. [徐继生, 马淑英. 电离层无线层析 [A]. 濮祖荫. 空间物理前沿进展 [C]. 北京: 气象出版社, 1998, 193—205.]
- [11] Leitinger R. Tomography [A]. Modern Ionospheric Science (Eds: Kohl H, Schlegel K), 346, European Geophys. Soc. [C]. ISBN 3-9804862-1-4, 1996.
- [12] Kunitsyn V E, Andreeva E S, Razinkov O G, Tereshchenko E D. Phase and Phase-difference ionospheric radio tomography [J]. *Int. J. Imaging Sys. Tech.*, 1994, **5**: 128.

Data Acquisition System and Image Reconstruction for Computerized Ionospheric Tomography

WU Xiong bin¹, XU Ji sheng¹, MA Shu ying¹, TIAN Mao, K. C. Yeh²

(1. *College of Physics and Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, 430072, China*; 2. *Department of ECE, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL 61801, USA*)

Abstract: This paper presents the design and operational features of the automatic data acquisition system for the low-latitude ionospheric tomography along the 120°E meridian. An improved reconstruction algorithm of computerized ionospheric tomography is also proposed. The algorithm avoids the calculation of integral phase constant by exploiting the differential Doppler frequency data, thus its capability of detecting weaker ionospheric irregularities has been enhanced. Both numerical simulated examples and the reconstructed results from observed data show that the new algorithm works reasonably and effectively with ionospheric CT problems.

Key words: ionosphere; tomography; data acquisition; algorithm; differential doppler