短波射线追踪技术中的电离层混合建模方法

栗伟珉 苏东林 阎照文 刘 焱

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在国际参考电离层模型和多层准抛物模型的基础上,提出了一种混合应用两种模型进行电离层建模的新方法.利用射线追踪技术,分别对混合模型和传统国际参考电离层模型下短波射线在电离层中的轨迹进行了仿真,得到了电波群路径.通过与实测电波群路径的对比,结果表明:对中国中纬度地区在电离层混合模型下的射线追踪精度优于传统国际参考电离层模型下的射线追踪精度,同时混合建模方法降低了多层准抛物模型对输入条件的要求,扩展了多层准抛物模型在射线追踪技术中的应用范围.

关 键 词: 电离层;混合建模;射线追踪;群路径

中图分类号: TN 011.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0473-05

Ionosphere hybrid modeling method for short-wave ray tracing

Li Weimin Su Donglin Yan Zhaowen Liu Yan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the international reference ionosphere (IRI) and the quasi-parabolic segments (QPS) model, a new ionosphere hybrid modeling method for short-wave ray tracing was proposed. The group ranges which show the short-wave propagation trace in the ionosphere were obtained separately by simulation in the hybrid model and the IRI model. By comparing the simulated results and the ionospheric oblique incidence sounding experimental data, the hybrid modeling method accuracy at mid-latitude region in China was analyzed. It indicates the ray tracing simulation accuracy in the hybrid model on experimental day better than the one in the IRI model. The limit to the QPS model's input is reduced by the hybrid modeling method and the QPS model's application range is extended in ray tracing technology.

Key words: ionosphere; hybrid modeling; ray tracing; group delay

在短波波段,电离层在一个波长内的变化很小,可以把电波近似为射线,利用射线追踪的方法来研究电波在电离层中的传播和反射.射线追踪技术已在短波电台、超视距雷达和卫星导航系统的设计与应用领域得到了广泛应用.电离层中的电子浓度分布称为电离层模型,射线追踪技术必须结合电离层模型进行[1-3],电离层模型的准确程度直接影响着短波射线追踪的精度.因此,电离层建模方法对于短波通信效能的预测和评估、超视距雷达和卫星导航系统的仿真与设计具有重要意义.

目前,电离层射线追踪技术中使用较多的典型电离层模型主要有:国际参考电离层(IRI, International Reference Ionosphere)模型[4-8],多层准抛物(QPS, Quasi-Parabolic Segments)模型[9-10].文献[8]利用 IRI 模型的最新版 IRI2007 确定的电子浓度剖面进行了电离层中的射线追踪,该模型只需输入时间和发射机/接收机位置即可进行射线追踪计算,在欧美地区射线追踪结果较精确,但在中国地区进行射线追踪计算偏差较大,不易

收稿日期: 2011-07-21; **网络出版时间**: 2012-04-20 09:18

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120420.0918.015.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60831001);国防基金资助项目(9140A31010109HK0101);创新群体基金资助项目(60921001)

作者简介: 栗伟珉(1981-),男,山西太原人,博士生,liweimin@ee.buaa.edu.cn.

直接应用;文献[9]和文献[10]提出了基于多层准抛物电离层模型进行三维射线追踪的快速算法,计算结果与实测吻合较好,但电离层底高、半厚度、临界频率等输入参数需要由经验确定;文献[11]和文献[12]在准抛物电离层模型的基础上分别对射线追踪解析算法和数值算法进行了研究,但仍然需要事先知道电离层的底高、半厚度和临界频率等参数,否则无法建立电离层模型. 目前还未见到混合使用 IRI 模型和 QPS 模型进行电离层建模的工作.

本文首先介绍了 IRI 模型和 QPS 模型的特点和构成,以及射线追踪技术的基本原理. 基于两种模型单独使用中的问题,提出了在射线追踪技术中混合使用 IRI 模型和 QPS 模型进行电离层建模的新方法. 对该方法在我国中纬度地区的短波射线追踪效果进行了仿真和实测研究,对比了电波群路径预测值与实测值间的差异,分析了直接使用 IRI 模型和混合建模这两种方法在我国中纬地区射线追踪计算结果的精确程度,验证了混合建模方法的可行性和有效性.

1 电离层建模方法

1.1 国际参考电离层(IRI)模型

国际参考电离层(IRI)模型由国际空间委员会和国际无线电科学联合会共同推荐,是一种基于大量观测数据的电离层统计预报模式,反映了宁静电离层的平均状态. IRI 模型以一定精度普适于全球,是一种通用的电离层经验模型. 通过该模型可以预测未来几年内地球上任意位置处的电离层状态,在与电离层状态密切相关的短波通信、超视距雷达、卫星导航等领域具有重要指导意义. 因缺乏中国地区电离层观测数据,IRI 模型电子浓度剖面函数在中国地区不如多层准抛物模型准确,但该模型输入简单,使用方便,并且描述了未来几年全球的电离层状态,在我国仍然得到了广泛应用,目前 IRI 最新版本是 IRI2007.

在 IRI 模型中,各层的电子浓度分布采用不同的函数表示,因为电子浓度 N 与等离子体频率 f_N 间存在关系 $f_N^2 = 80.6N$,所以常用等离子体频率分布表示电子浓度分布. 以 F_2 层为例,利用 CCIR 系数确定 F_2 层的临界频率 f_{oF_2} 和 $M(3000)_{F_2}$,其中 $M(3000)_{F_2}$ 是 F_2 层 3 000 km 最高可用频率因子;然后可由 f_{oF_2} 和 $M(3000)_{F_2}$ 确定 F_2 层底高和半厚. f_{oF_2} 和 $M(3000)_{F_2}$ 由傅里叶级数 $\Omega(\varphi,\lambda,t)$ 表示,$\Omega(\varphi,\lambda,t)$ 是地理纬度 φ、地理经度 λ 和世界时 t 的函数.

$$\left.\begin{aligned}\Omega(\varphi,\lambda,t) &= a_0(\varphi,\lambda) + \sum_{j=1}^{N}\left[a_j(\varphi,\lambda)\cos jt + b_j(\varphi,\lambda)\sin jt\right]\\ a_j(\varphi,\lambda) &= \sum_{k=0}^{n} U_{2j,k}G_k(\varphi,\lambda)\\ b_j(\varphi,\lambda) &= \sum_{k=0}^{n} U_{2j-1,k}G_k(\varphi,\lambda)\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中,$a_j(\varphi,\lambda)$,$b_j(\varphi,\lambda)$ 为傅里叶级数的系数;N 为傅里叶级数的阶数;$G_k(\varphi,\lambda)$ 由以球谐勒让德函数形式表示的地理坐标函数组成;U 为 $G_k(\varphi,\lambda)$ 对应的系数;n 为球谐函数在对应经纬度处的次数总和,各参数的具体形式和取值可参考文献[5].

1.2 多层准抛物(QPS)模型

另一种常用的电离层模型是准抛物模型,因其采用准抛物线方程来描述空间中的电子浓度分布而得名,其中的等离子体频率(单位 MHz)f_N 可利用式(2)计算.

$$f_N^2 = \begin{cases} a - b\left(1 - \dfrac{r_m}{r}\right)^2 & r_b < r < \dfrac{r_m r_b}{r_b - y_m} \\ 0 & \text{其它}\end{cases} \quad (2)$$

式中,r_b 为电离层底高(距地心的距离),km;y_m 为层的半厚度,km;$r_m = r_b + y_m$ 为最大电子浓度对应的高度;$a = f_o^2$;$b = a(r_b/y_m)^2$;f_o 为临界频率,MHz.

设电离层由 E 层、F_1 层、F_2 层组成,且各层均为宁静电离层,不考虑地磁、扰动、梯度等影响,则各层的等离子体频率剖面可表示如下[9]:

$$\left.\begin{aligned} f_{NE}^2 &= a_E - b_E\left(1 - \frac{r_{mE}}{r}\right)^2 && E\text{ 层}\\ f_{Nj_1}^2 &= a_{j_1} - b_{j_1}\left(1 - \frac{r_{j_1}}{r}\right)^2 && \text{第一连接层}\\ f_{NF_1}^2 &= a_{F_1} - b_{F_1}\left(1 - \frac{r_{mF_1}}{r}\right)^2 && F_1\text{ 层}\\ f_{Nj_2}^2 &= a_{j_2} - b_{j_2}\left(1 - \frac{r_{j_2}}{r}\right)^2 && \text{第二连接层}\\ f_{NF_2}^2 &= a_{F_2} - b_{F_2}\left(1 - \frac{r_{mF_2}}{r}\right)^2 && F_2\text{ 层}\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

式中,E 层和 F_1 层通过第一连接层 j_1 连接,F_1 层和 F_2 层通过第二连接层 j_2 连接,两个连接层的厚度很薄,仅起平滑连接作用. 各层参数的意义参考对式(2)的参数说明.

1.3 IRI-QPS 混合建模

IRI 模型和 QPS 模型分别采用不同的方程来描述空间中的电子浓度分布,在实际使用中各有

优缺点.

IRI 模型输入参数简单,但在我国使用该模型进行射线追踪结果精度较低,特别是在 F_2 层估算结果与实测值差异较大,不适用于如超视距雷达等对计算精度要求较高的场合. QPS 模型只需要知道各层的特征参数(底高、半厚、临界频率)就可建立相应的电子浓度剖面,结构简单,使用方便,同时经过中国电波传播研究所的验证,该模型能够较好地描述我国上空电离层电子浓度剖面分布,使用 QPS 模型进行射线追踪能够得到较为准确的结果[9-10],但在使用该模型进行射线追踪时必须先输入电波反射区上空各层的电离层基本参数(如:底高、半厚、临界频率等特征参数)用来建立模型,而这些重要的参数往往事先并不知道,需要对电波反射区进行探测获得或输入经验值,不便实时进行射线追踪,限制了 QPS 模型的使用. 而 IRI 模型能对过去几十年以及未来 5 年(自发布之日算起)内全球各地的电离层状态进行预测,通过 IRI 模型能够得到给定时间、地点下电离层各层底高、半厚、临界频率等参数,这些参数可供 QPS 模型建立反射区域上空的电子浓度剖面,恰好弥补了 QPS 模型无法预测电离层参数的不足,因此,提出了混合使用 IRI 模型和 QPS 模型进行电离层建模的方法,其中 IRI 模型使用最新版本 IRI2007.

在进行射线追踪仿真时,首先由发射机、接收机位置计算出两者中点处位置作为电波反射中点,将电波反射中点位置和待测时间输入 IRI 模型,由式(1)算出电离层各层的主要参数(底高、临界频率、半厚),再将各层参数代入式(3)中建立反射区域等离子体频率分布,在此基础上进行射线追踪. 这样只需要输入待测时间、发射机/接收机位置和工作频率等几个简单的参数就能计算出发射机与接收机间的电波群路径等参量,解决了 QPS 模型中输入参数获取不便的问题. 建模流程如图 1 所示.

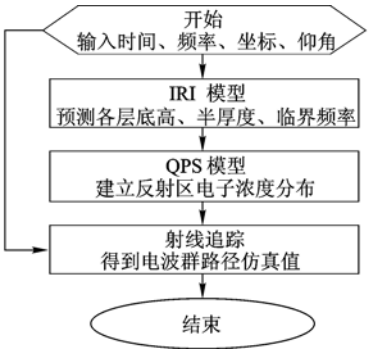

图 1　电离层混合建模流程图

2　射线追踪原理

在球坐标系中,当不考虑电子碰撞、地磁场和电离层梯度变化影响时,以电波群路径 P' 为自变量的射线追踪方程组为[3,9-10]

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}P'} &= \frac{c}{\omega}k_r \\
\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}P'} &= \frac{c}{r\omega}k_\theta \\
\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}P'} &= \frac{c}{r\omega\sin\theta}k_\varphi \\
\frac{\mathrm{d}k_r}{\mathrm{d}P'} &= -\frac{2\pi^2}{\omega c}\frac{\partial f_N^2}{\partial r} + \frac{c}{r\omega}k_\theta^2 + \frac{c}{r\omega}k_\varphi^2 \\
\frac{\mathrm{d}k_\theta}{\mathrm{d}P'} &= -\frac{c}{r\omega}(k_r k_\theta - k_\varphi^2\cot\theta) \\
\frac{\mathrm{d}k_\varphi}{\mathrm{d}P'} &= -\frac{c}{r\omega}(k_r k_\varphi + k_\theta k_\varphi\cot\theta)
\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中,P' 为电波群路径;r,θ,φ 是射线路径上点在球坐标系中的坐标分量;k_r,k_θ,k_φ 是波矢量在球坐标系中的 3 个分量;f_N 为等离子体频率,由前述 IRI-QPS 模型确定;ω 为电波圆频率;c 为光速. 方程组(4)用于计算射线路径上点的坐标及该点处的波矢量.

在射线路径上,以群路径为自变量,射线的坐标矢量和波矢量随着电波群路径的变化而变化,利用常微分方程数值解法龙格-库塔法求解该射线追踪方程组,在终点处,可得到由发射机到接收机的电波群路径.

3　仿真及实测分析

以青岛至长春电路中电波群路径为考察参量,根据上节的射线追踪原理对 IRI-QPS 混合模型的射线追踪效果进行了仿真,同时进行了青岛至长春间电波群路径的斜向探测,探测示意图如图 2 所示. 将混合模型仿真群路径与实测群路径以及单独使用 IRI 模型仿真得到的群路径进行了比对分析.

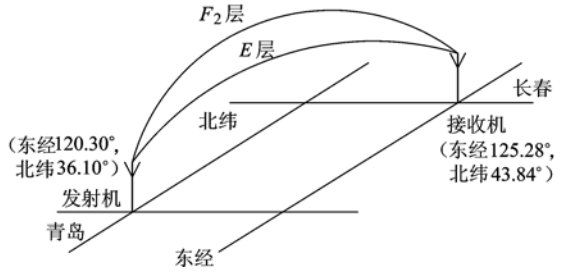

图 2　电离层斜向探测示意图

仿真中,以青岛(东经 120.30°,北纬 36.10°)

至长春(东经 125.28°,北纬 43.84°,)电路中点作为电波反射点,由 IRI 模型预测出反射点(东经 122.79°,北纬 39.97°)于 2008 年 10 月 28 日不同时刻所对应的电离层临界频率、底高和半厚度,再将不同时刻的电离层临界频率、底高和半厚度分别代入 QPS 模型中建立反射区电子浓度剖面,工作频率取 9.322 MHz,进行射线追踪,得到各时刻对应的电波群路径预测值,见图 3、图 4.

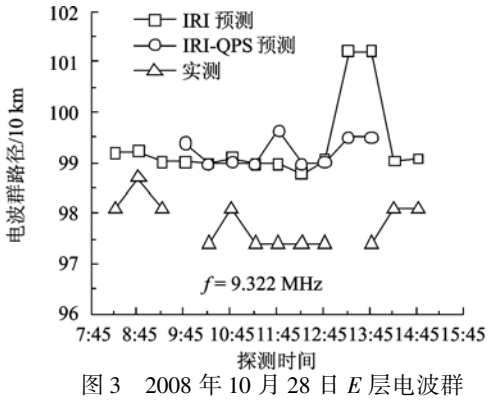

图 3 2008 年 10 月 28 日 E 层电波群路径预测值与实测值对比

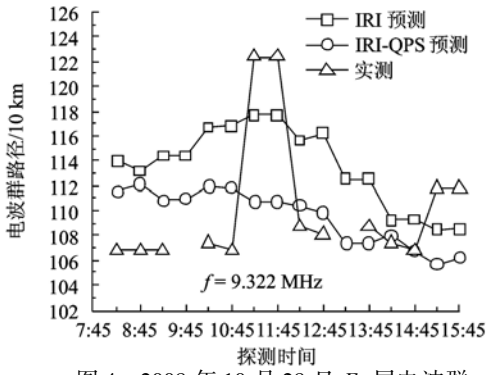

图 4 2008 年 10 月 28 日 F_2 层电波群路径预测值与实测值对比

同理按上述方法可分别得到 2008 年 10 月 31 日和 2008 年 11 月 1 日的电波群路径预测值,见图 5、图 6 所示. 仿真结果表明,三天中在仿真时间段内未出现 F_1 层.

为了验证混合模型的有效性,在青岛-长春间建立短波电离层斜向探测电路,发射机位于青岛(东经 120.30°,北纬 36.10°)接收机位于长春(东经 125.28°,北纬 43.84°),实测时间为 2008 年 10 月 28 日、10 月 31 日和 11 月 1 日,从 8:15 开始,每隔 30 min 探测一次,至 16:45 结束,发射信号为脉冲信号,实测三天的工作频点分别为 9.322 MHz,8 MHz 和 10 MHz,测量参量为电波群路径,接收机群路径最小分辨率 5 km. 发射机到接收机地面距离为 958.97 km,方位角为 24.68°. 由实测结果发现,试验的三天中未出现 F_1 层,这点与仿真结果一致,实测电波群路径如图 3 ~ 图 6 所示.

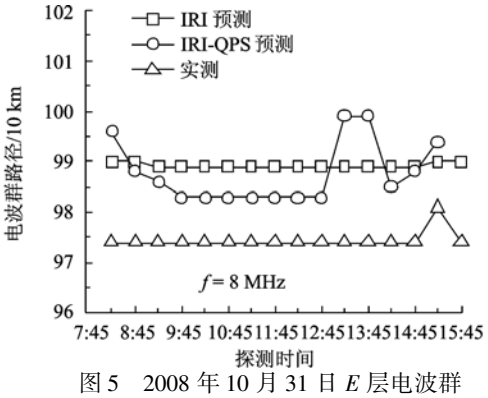

图 5 2008 年 10 月 31 日 E 层电波群路径预测值与实测值对比

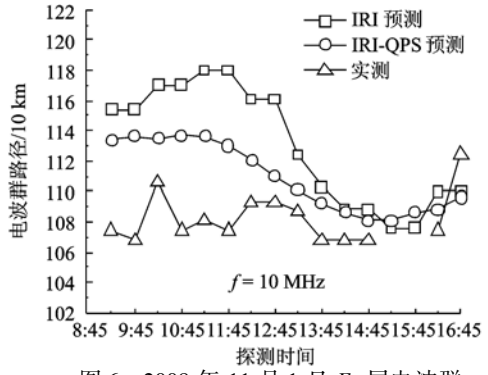

图 6 2008 年 11 月 1 日 F_2 层电波群路径预测值与实测值对比

图 3 是 2008 年 10 月 28 日 E 层电波群路径预测值与实测值随探测时间的变化曲线,图 4 是 F_2 层电波群路径预测值与实测值随探测时间的变化曲线,从曲线上可以发现 IRI-QPS 模型和 IRI 模型下电波群路径预测值的变化趋势与实测电波群路径趋势基本一致,且混合模型的预测值与实测值更为接近. 图中实测数据的间断表明在该探测时间未能接收到 9.322 MHz 工作频率的反射信号.

图 5 是 2008 年 10 月 31 日的 E 层电波群路径预测值与实测值的对比曲线,工作频率为 8 MHz,图 6 是 2008 年 11 月 1 日的 F_2 层电波群路径预测值与实测值对比曲线,工作频率为 10 MHz. 从图中可以发现,IRI-QPS 模型和 IRI 模型下电波群路径预测值的变化趋势与实测群路径趋势基本一致,且由 IRI-QPS 混合模型得到的预测值更接近实测值.

通过比对可以发现,在 E 层电波群路径预测值与实测值较接近(均方差异小于 20 km),在 F_2 层电波群路径预测值与实测值相差较大(均方差异大于 40 km),该现象可能与 IRI 模型在中国地区实测数据不足以及仿真中对电离层进行简化,忽略梯度、扰动、地磁影响等因素有关. 在 E 层,

IRI-QPS 混合模型对电波群路径的预测精度略优于单独使用 IRI 模型的预测精度,而在 F_2 层,IRI-QPS 混合模型对电波群路径的预测精度则明显优于单独使用 IRI 模型的预测效果,说明与 IRI 模型相比,由 QPS 模型表示的电子浓度分布更接近于中国中纬地区电子浓度真实分布,尤其是在 F_2 层.

4　结　论

通过对射线追踪技术中电离层混合建模方法的研究,得到如下结论:

1) 提出了一种基于 IRI 模型和 QPS 模型的电离层混合建模方法,在 IRI-QPS 混合模型下电波群路径预测值的变化趋势与实测电波群路径的变化趋势基本一致,且在中国中纬度地区混合模型下对电波群路径的预测精度要高于仅使用 IRI 模型的电波群路径预测精度,尤其是在 F_2 层;

2) 在 E 层群路径预测值与实测值间的差异要小于 F_2 层群路径预测值与实测值间的差异;

3) 在 F_2 层群路径预测值与实测值间的差异随时间逐渐变小,接近黄昏时达到最小,这一特征可能与 F_2 层电离层参数的日变化特征有关;

4) 电波群路径预测值与实测值间的差异大小与 IRI 模型在中国地区实测数据不足及仿真中对电离层进行简化处理,忽略梯度、扰动、地磁等因素有关.

致　谢　本研究工作得到了解放军信息工程大学于大鹏教授和中国电波传播研究所的大力支持,在此表示感谢.

参考文献 (References)

[1] Kelso J M. Ray tracing in the ionosphere [J]. Radio Sci,1968,3(1):1 - 12

[2] Ta C, Hoogasian H. Exact ray calculations in a quasi-parabolic ionosphere with no magnetic field [J]. Radio Sci,1968,3(1):69 - 74

[3] 索玉成. 电离层短波射线追踪[J]. 空间科学学报,1993,13(4):306 - 312
Suo Yucheng. Short wave ray tracing in the ionosphere [J]. Chinese Journal of Space Science,1993,13(4):306 - 312 (in Chinese)

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

[5] Bilitza D, Rawer K, Bossy L, et al. International reference ionosphere 1990[R]. NSSDC-1990-22,1990

[6] Richards P, Bilitza D, Voglozin D. Ion density calculator (IDC): a new efficient model of ionospheric ion densities [J]. Radio Sci,2010,45,RS5007:1 - 11

[7] Nsumei P, Reinisch B, Huang X, et al. Comparing topside and bottomside-measured characteristics of the F2 layer peak [J]. Adv Space Res,2010,46(8):974 - 983

[8] Cacciamano A, Capria A, Berizzi F, et al. A ray tracing based method for coarse coordinate registration in HF skywave OTH radar [C]// Radar Conf EuRAD. Rome: IEEE,2009:204 - 207

[9] 柳文,焦培南,王世凯,等. 电离层短波三维射线追踪及其应用研究[J]. 电波科学学报,2008,23(1):42 - 48
Liu Wen, Jiao Peinan, Wang Shikai, et al. Short wave ray tracing in the ionosphere and its application [J]. Chinese Journal of Radio Science,2008,23(1):42 - 48 (in Chinese)

[10] 柳文,王俊江,焦培南,等. 电离层三维射线追踪的快速计算方法[J]. 电波科学学报,2009,24(1):55 - 59
Liu Wen, Wang Junjiang, Jiao Peinan, et al. A fast ray tracing algorithm in the ionosphere [J]. Chinese Journal of Radio Science,2009,24(1):55 - 59 (in Chinese)

[11] 郭杰,于大鹏,雷雪,等. 基于二维解析射线追踪的短波电离层轨迹研究[J]. 通信技术,2008,41(05):20 - 22
Guo Jie, Yu Dapeng, Lei Xue, et al. Research on shortwave trace based on the 2-dimensional analytic ray-tracing in the ionosphere [J]. Communication Technology,2008,41(05):20 - 22 (in Chinese)

[12] 郭杰,于大鹏,雷雪,等. 基于数值射线追踪的短波电离层传播轨迹研究[J]. 通信技术,2008,41(04):33 - 35
Guo Jie, Yu Dapeng, Lei Xue, et al. Research on shortwave trace based on numerical ray-tracing in ionosphere[J]. Communication Technology,2008,41(04):33 - 35 (in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)