0254-6124/2014/34(2)-154–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Sheng Dongsheng, Zhao Zhenwei, Sun Shuji, Wang Feifei. Study on the adaptability of Global Ionospheric Scintillation Model at low latitude in China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2): 154-159, doi:10.11728/cjss2014.02.154

GISM 模型在中国低纬地区的适用性分析 *

盛冬生 赵振维 孙树计 王飞飞

(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)

摘 要 为检验全球电离层闪烁模型 (GISM) 在中国低纬地区预测的准确性, 根据 2011 年 7 月至 2012 年 6 月期间中国低纬地区三个观测站记录的 GPS L1 频点的电离层闪烁数据, 对 GISM 模型的预测结果进行了分析. 研究表明, 在太阳活动高年, 该模型能够反映出中国低纬地区闪烁的主要特征. 模型预测的闪烁开始时间与观测结果较为一致, 而结束时间滞后观测值约 1 h; 模型预测的低纬地区闪烁强度峰值与观测结果基本一致, 而在相同累积概率条件下, 模型预测的闪烁强度则高于观测值; 模型显示闪烁发生概率和闪烁强度随纬度的增加而减小, 这一结果与观测结果一致.

关键词 电离层闪烁, GISM 模型, S_4 指数, 累积概率

中图分类号 P 352

Study on the Adaptability of Global Ionoshperic Scintillation Model at Low Latitude in China

SHENG Dongsheng ZHAO Zhenwei SUN Shuji WANG Feifei

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

Abstract A forecast of ionospheric scintillations can provide the opportunity for radio communication system to take appropriate action to mitigate the effects and optimize service. The Global Ionospheric Scintillation Model (GISM) by Béniguel was developed to forecast the global ionospheric scintillation condition. To check the prediction accuracy of the model at low latitude in China, this paper compares the model predictions with observed L-band ionospheric scintillation data at three low-latitude stations in China from July 2011 to June 2012. The results show that the model predictions had a good correlation with the statistical characteristics of the scintillation during solar maximum. The predicted beginning time of the scintillation agreed with measurements in general, while the end time was delayed for about an hour. As to the maximum scintillation intensity, the predictions could reproduce the measurements fairly well. Under the same cumulate probability condition, the model had somewhat higher prediction precision for each given scintillation intensity. The predicted percentage of occurrence and intensity of scintillation show gradual decrease versus

* 国家自然科学基金重点项目资助 (61032009)

2013-04-15 收到原稿, 2013-07-05 收到修定稿

E-mail: dongsheng1112006@163.com

latitude, which is consistence with measurement.

Key words Ionospheric scintillation, Global Ionospheric Scintillation Model (GISM), S_4 index, Cumulative probability

0 引言

电离层闪烁是指穿越电离层的无线电信号幅度和相位发生快速变化的现象. 该现象由电离层中小尺度不均匀结构引起, 并受到地方时、季节、太阳和地磁活动等影响 [1−2]. 信号幅度的变化导致信号衰落产生误码, 信号相位的变化导致卫星失锁. 电离层闪烁会导致卫星通信、导航、遥感、测控等地空无线电系统的工作性能下降, 严重时会造成系统中断 [3−5]. 随着地空无线电系统的广泛应用, 该现象已成为电离层天气研究的重要内容之一.

近年来, 全球定位系统 (GPS) 快速发展, 使得监测全球电离层闪烁变得简便易行, 促进了对闪烁形态的认识及闪烁模型的建立与完善. 目前, 国际上影响广泛的闪烁模型是由美国 NWRA (Northwest Research Associates) 研究组 [6−7] 提出的电离层闪烁宽带模型 WBMOD (Wide Band Model) 和由 Béniguel 等 [8] 在欧空局支持下提出的全球电离层闪烁模型 GISM (Global Ionospheric Scintillation Model). 利用电离层闪烁模型并结合全球电离层闪烁观测数据开展对闪烁的现报和预报技术研究已成为当前研究热点.

GISM 模型作为全球通用的闪烁模型, 已有许多学者对其准确性进行了检验. 例如, Béniguel 等 [9] 通过 PRIS (Prediction of Ionospheric Scintillation) 实验数据与模型预测结果的对比, 发现该模型在单次闪烁事件中的预测结果与测量结果相差较大. 但是从长期统计结果来看, 其预测结果与测量结果较为吻合. Forte 等 [10] 通过对比 Tucuman 站的观测结果与 GISM 模型的预测结果, 发现该模型只能预测南北向带状的不均匀体分布, 而不能给出小区域片状的不均匀体分布. 在中国 Hu 等 [11] 通过太阳活动低年三亚站的观测结果与 GISM 预测结果的比较分析, 验证了 GISM 模型能够较好反映海南地区电离层闪烁的季节变化、日变化和空间分布特性. 目前, 有关该模型在中国低纬地区适用性的报道还比较少. 为此, 本研究通过对太阳活动高年中国海口、广州和昆明三站的观测结果与 GISM 模型预测结果进行分析比较, 检验该模型在预测中国低纬地区闪烁起止时间和闪烁强度方面的准确性.

1 GISM 模型预报原理

GISM 作为一种半经验气候学模型, 根据全球电离层闪烁的历史数据, 确定不均匀体的起止时间和分布区域, 利用 NeQuick[12] 模式和相位屏理论 [13−14] 模拟计算穿越不均匀体卫星信号的振幅扰动和相位扰动信息, 最终获得电离层闪烁的特征参数.

在进行电离层闪烁预报之前, 需要对 GISM 模型的部分参数进行初始化设置. 依据电离层闪烁的时间分布, 设置模型中不均匀体出现的起止时间. 根据电离层闪烁的分布区域和穿刺点位置, 设置模型中不均匀体的分布区域. 通过接收卫星信号的历史数据, 推导获得不均匀体的特征参数 [15−16], 包括不均匀体的特征尺寸 L_0、功率谱斜率 p 以及背景电离层电子浓度的起伏 σ_{N_e}.

利用 GISM 模型计算闪烁特征参数时, 首先输入地球参数 (年份、日期、地方时和太阳活动参数 $F_{10.7}$), 由 NeQuick 模式求得背景电离层电子浓度 N_e. 其次, 根据背景电子浓度和相位屏理论将电离层分为一系列垂直于传播信号并具有明确统计特征的薄层, 依据不均匀体特征参数即可获得相位屏的自相关函数:

$$B_\phi(p) = \frac{\sigma_\phi^2}{2^{(p-4)/2}\Gamma[(p-2)/2]} \cdot (pq_0)^{[(p-2)/2]} K_{[(p-2)/2]}(pq_0). \quad (1)$$

式中, K_v 为 v 阶修正 Bessel 函数, σ_ϕ^2 为背景电子浓度起伏方差, 可通过背景电子浓度 N_e 和电子浓度起伏 σ_{N_e} 计算获得. 假定电波信号穿过每一薄层时仅相位发生变化, 场强不变, 由相位屏的自相关函数和电波传播前向散射公式可以求得接收信号的场强和相位. 最后, 根据电离层闪烁特征参数的定义求得各参数, 例如幅度闪烁指数可由式 (2) 求得:

$$S_4 = \left(\frac{\langle I^2\rangle - \langle I\rangle^2}{\langle I\rangle^2}\right)^{1/2}. \quad (2)$$

其中, I 为接收信号的场强, 尖括号表示取参数的平均值.

GISM 模型的输出分为地图模式和链路模式两种. 在地图模式下, 电离层按照一定经纬度划分成大小相等的网格, 根据网格点的坐标可以求得该点的幅度闪烁指数 S_4, 在该模式下还可得到闪烁强度的空间分布. 在链路模式下, 通过输入接收机的位置参数和卫星的星历文件确定地空卫星链路, 根据地空链路的位置信息可以获得该条件下闪烁的特征参数, 该模式下还可得到幅度闪烁指数、相位闪烁指数及衰落持续时间等.

2 对比结果分析

分析使用的是中国海口 (20.00°N, 110.33°E)、广州 (23.15°N, 113.35°E) 和昆明 (25.50°N, 103.80°E) 三个观测站的 GPS L1 频点电离层闪烁观测数据. 由于 GISM 模型设定的不均匀体区域大于实际区域, 造成预测结果中发生闪烁的星地链路数大于实际发生闪烁的星地链路数, 影响对闪烁发生概率和累积强度的分析, 且低仰角易于引起多径干扰等效应, 这里仅选取卫星仰角 $\geqslant 25°$ 且同一时刻闪烁强度最大的观测数据. 选用了 2011 年 7 月至 2012 年 6 月期间的观测数据进行分析, 考虑到闪烁主要发生在夜间 [9], 模型仅计算当天夜间 18:00 LT 至第二天早晨 06:00 LT 的数据. 为了便于分析, 参照文献 [10−11], 将电离层闪烁发生概率定义为 1 h 内接收到的闪烁强度指数 S_4 达到 0.2 的星地链路数与这段时间内观测到的所有卫星总数的比值. 同时, 参照文献 [17], 电离层闪烁累积概率定义为观测数据中幅度闪烁指数 S_4 小于某一数值时的个数占全部观测样本的比例.

2.1 GISM 模型预测验证

为直观给出 GISM 模型预测结果的准确性, 通过单次电离层闪烁事件逐一对比来分析 GISM 模型的预测结果. 图 1 给出了一次闪烁事件观测与 GISM 预测闪烁事件指数曲线的对比. 从图 1 可以看出,

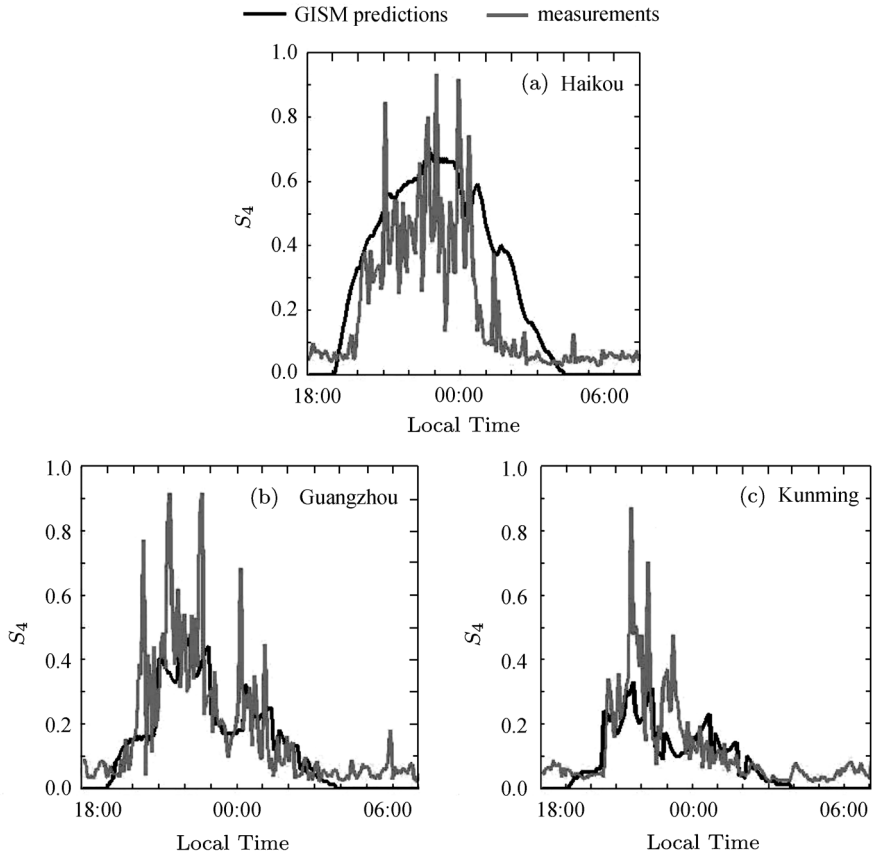


图 1 2012 年 3 月 26−27 日期间 GISM 预测与观测的闪烁事件对比

Fig. 1 Comparison between GISM predicted and measured scintillation from 26 to 27 in March, 2012

GISM 模型给出的闪烁强度指数 $S_4 > 0$ 的起始时间约为 19:00 LT, 结束时间约为次日 04:00 LT, 闪烁强度随地方时的变化较为平滑. 观测数据则显示单次闪烁起止时间不固定, 闪烁强度起伏较大且具有明显的逐日变化特征. 对 2011 年 7 月至 2012 年 6 月期间的数据进行分析, 发现其均有上述特征, 因此需要采用长期统计结果对比 GISM 模型预测值的准确性.

2.2 电离层闪烁概率预测分析

通常在描述闪烁事件时主要关注的是起止时间和强度, 因此本文采用闪烁随地方时变化的统计结果来验证 GISM 模型预测的准确性. 图 2 给出了海口、广州和昆明三个地区 GISM 模型预测与观测的闪烁发生概率对比结果. 从图 2 中可以看出, GISM 模型预测结果显示夏季闪烁的发生概率明显较小, 而其他三个季节发生的概率相近; 两分季的发生概率相近, 远大于两至季的发生概率. 图 2 显示, GISM 模型预测的海口、广州和昆明地区电离层闪烁发生概率的最大值分别为 100%, 100% 和 74%; 而观测结果则显示各个地区电离层闪烁发生概率的最大值分别为 22%, 11% 和 4%, 可见模型预测的闪烁发生概率高于观测结果. 这与文献 [11] 给出的观测结论一致. 从图 2 还可以看出, GISM 模型预测的海口地区闪烁起止时间约为 19:00 LT−03:00 LT, 广州和昆明地区闪烁的起止时间约为 19:00 LT−02:00 LT. 观测值显示, 不同地区闪烁的开始时间与模型预测值基本一致, 但闪烁的结束时间则比预测值提前一小时.

根据闪烁发生概率极大值和闪烁持续时间随纬度的变化趋势可知, GISM 模型能够反映出闪烁发生概率和持续时间随纬度增加而减小的特性. 然而, 该模型在预测闪烁发生概率和闪烁随季节变化趋势时与观测结果存在一定差异. 这种差异很有可能是由于 GISM 模型缺乏东亚低纬地区闪烁观测数据, 对闪烁发生率估计过高而对持续时间估计过长造成的.

2.3 电离层闪烁强度的累积分析

为进一步分析 GISM 模型在中国低纬地区预测的适用性, 这里分析了 GISM 模型在预测闪烁强度方面的准确性. 图 3 给出了模型预测与观测的电离层闪烁幅度指数 S_4 的累积概率对比. 根据 2.1 节的分析结果可知, GISM 模型预测的电离层闪烁仅发生在当天夜间 19:00 LT 至第二天凌晨 04:00 LT 期间, 因此, 本节仅选用这一期间的数据进行分析. 依据 2.2 节的分析可以看出, 模型预测发生电离层闪烁的天数多于实际发生闪烁的天数, 因而本节仅选用实际发生闪烁天数的数据进行分析. 由于观测数据得到的闪烁强度曲线起伏剧烈, 为避免突然跳变点对判断闪烁强度峰值的影响, 对观测数据进行了平滑. 从图 3 可以看出, 在累积概率接近 1 时, GISM 模型预测海口、广州、昆明地区的闪烁峰值强度分别为 0.9, 0.9, 0.7, 与观测值基本一致. 但是在累积概率相同的条件下, 模型预测闪烁强度则要高于观测值. 从图 3 还可以看

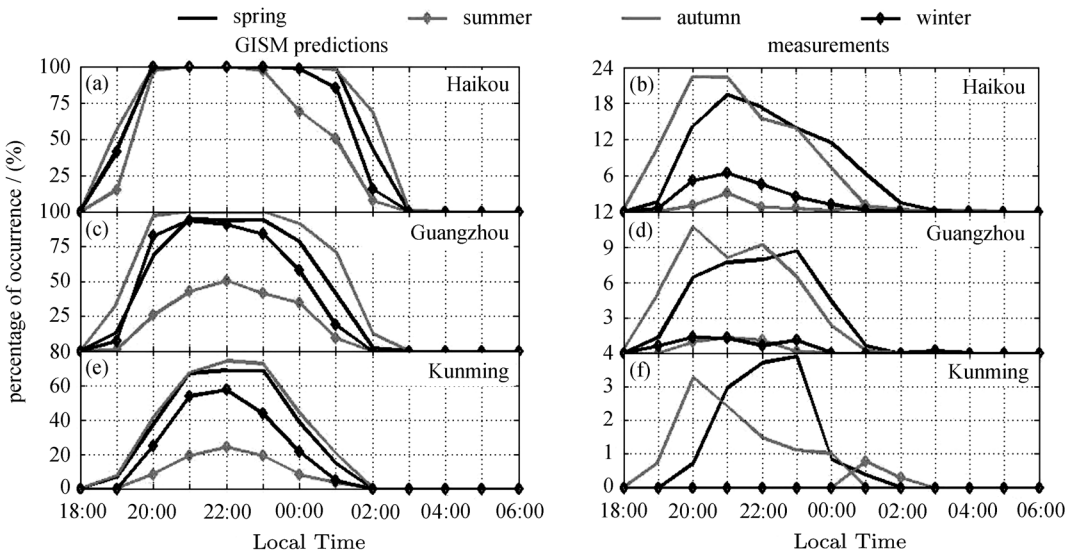


图 2 GISM 预测与观测的闪烁事件发生概率对比

Fig. 2 Comparison between GISM predicted and measured percentage of occurrence

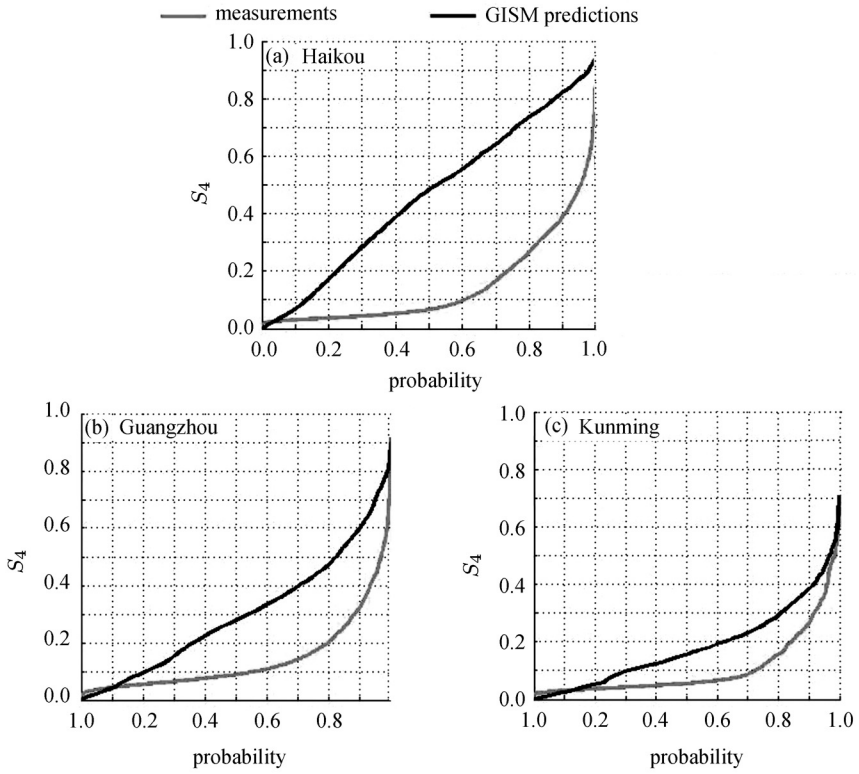


图 3 观测结果与 GISM 预测结果累积概率的对比

Fig. 3 Comparison between measured and GISM predicted probability

出, 预测结果显示昆明地区闪烁强度弱于海口、广州地区, 说明模型预测闪烁强度随纬度的增加而减弱, 这与观测结果基本一致.

在闪烁强度的对比中, 虽然去除了模型预测和观测数据中出现闪烁的卫星个数不同和闪烁次数不同带来的影响, 但在相同累积概率条件下, 模型预测的闪烁强度高于观测值, 这可能是由于模型预测的闪烁持续时间长于观测值所导致的.

3 结论与讨论

通过对 2011 年 7 月至 2012 年 6 月期间电离层闪烁的观测值与 GISM 模型预测值进行对比分析, 验证了该模型在中国低纬地区的适用性, 主要得到结论如下.

(1) GISM 模型能够准确预测出中国低纬地区闪烁主要开始于 19:00 LT, 而对于结束时间, 模型预测海口地区约为 03:00 LT, 广州和昆明地区约为 02:00 LT, 比观测结果滞后一个小时.

(2) GISM 模型预测海口、广州、昆明三个地区的闪烁强度峰值分别为 0.9, 0.9, 0.7, 与观测结果基本一致.

(3) 在低纬地区, GISM 模型能够反映闪烁发生概率及强度随纬度增加而减小这一特征.

(4) 与观测结果相比, GISM 模型预测的闪烁发生概率偏高, 且在相同累积概率条件下, 模型预测的闪烁强度高于观测值, 这可能是由于该模型预测的闪烁持续时间较长造成的.

综上研究与分析, GISM 模型作为全球电离层闪烁的气候学模型, 基本能够给出中国低纬地区电离层闪烁的主要特征, 但是在具体细节方面, GISM 模型的预报结果与实测结果还存在一定偏差. 这主要是因为在确定模型所用参数的过程中, 使用的 PRIS (Prediction of Ionospheric Scintillation) 试验数据在亚洲的观察站点较少, 且模型没有考虑闪烁前兆特征. 因此, 使用该模型时需要利用更多的观测数据和与闪烁有关的参量来提高预测的准确性.

致谢 电离层数据由子午工程广州站提供.

参考文献

[1] Andersona D N , Reinischb B, Valladare C, *et al*. Forecasting the occurrence of ionosphere scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2004, **66**(17):1567-1572

[2] Crane R K. Ionospheric scintillation [J]. *Proc. IEEE*, 1977, **65**(2):180-198

[3] Seo J. Characteristics of deep GPS signal fading due to ionospheric scintillation for aviation receiver design [J]. *Radio sci.*, 2009, **44**(4):1-10

[4] Tu Shicong. The effects of scintillations on satellite communications [J]. *Radio. Comm. Tech.*, 1990, **16**(2):21-26. In Chinese (涂师聪. 电离层闪烁对卫星通信的影响 [J]. 无线电通信技术, 1990, **16**(2):21-26)

[5] Béniguel Y, Geiswiller J, Adam J P, *et al*. The effects of scintillations on the positioning errors [J]. *Space Comm.*, 2006, **20**(1/2):31-39

[6] Fremouw E J, Secan J A. Modeling and scientific application of scintillation results [J]. *Radio Sci.*, 1984, **19**(3):687-694

[7] Fremouw E J, Ishimaru A. Intensity scintillation index and mean apparent radar cross section on monostatic and bistatic paths [J]. *Radio Sci.*, 1992, **27**(4):539-543

[8] Béniguel Y. Global Ionospheric propagation Model (GIM): A Global Ionospheric Propagation Model for scintillations of transmitted signals [J]. *Radio Sci.*, 2002, **37**(3):1032-1044

[9] Béiguel Y, Adam J P, Jakowski N, *et al*. Analysis of scintillation recorded during the PRIS measurement campaign [J]. *Radio Sci.*, 2009, **44**(5):1-10

[10] Forte B, Radicella S M. Comparison of ionospheric scintillation models with experimental data for satellite navigation applications [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **48**(3):505-514

[11] Hu Lianhuan, Ning Baiqi, Li Guozhu. Comparison between GISM predictions and ionospheric scintillation measurements over Hainan region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, **27**(5):384-390. In Chinese (胡连欢, 宁百齐, 李国主. 南海地区电离层闪烁观测与 GISM 模式预测的比较分析 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(5):384-390)

[12] Radicella S M. The NeQuick model genesis, uses and evolution [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **52**(3/4):417-422

[13] Gherm V E, Zernov N N, Strangeways H J, *et al*. Propagation model for transionospheric fluctuating paths of propagation: Simulator of the transionospheric channel [J]. *Radio Sci.*, 2005, **40**(1):RS1003, doi:10.1029/2001RS003097

[14] Knepp D L. Multiple phase screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves [J]. *Proc. IEEE*, 1983, **71**(6):722-737

[15] Béniguel Y, P Hamel. A global ionosphere scintillation propagation model for equatorial regions [J]. *Space Weather Space Clim.*, 2011, **1**(1):A04, doi:10.1051/swsc/2011004

[16] Béniguel Y. Global Ionospheric Scintillation Model (GISM) Technical Manual [R]. Geneva: IEEA, 2011

[17] Béniguel Y. Global Ionospheric Scintillation Model (GISM) Technical Manual [R]. Geneva: IEEA, 2004