

ROTI计算策略的初步分析比较*

邵冷冷^{1,2†} 宋淑丽^{1‡}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 由电离层闪烁和TEC (Total Electron Content)监测仪获取的振幅闪烁指数 $S4$ 和相位闪烁指数 σ_ϕ 是电离层闪烁研究中最常用的参数, 由双频GNSS (Global Navigation Satellite System)接收机获取的电离层TEC变化率指数ROTI (Rate of TEC Index)与 $S4$ 指数的相关性已得到很多相关研究的验证, ROTI也是电离层闪烁研究的一个有效参数, 这样就使利用全球分布的大量GNSS观测数据开展电离层闪烁研究成为可能. 但是在不同的研究中计算ROTI所使用数据的采样率和计算间隔有所差异, 对于计算策略的选择尚无定论. 利用海南三亚1 s、15 s和30 s采样率的GNSS双频观测数据与电离层闪烁和TEC监测仪获取的 $S4$ 指数, 分析了在电离层闪烁发生时, 不同计算策略获取的各类ROTI与 $S4$ 指数的相关性, 分析比对了几类ROTI对电离层闪烁的敏感性. 分析结果表明: 各类ROTI与 $S4$ 指数都具有较强的相关性, 在大多数情况下, 不同种类ROTI都可以在闪烁发生期间响应 $S4$ 指数的变化; 不同采样率的ROTI在响应 $S4$ 指数变化时, 判断是否发生电离层闪烁事件的阈值有所差异; 由于ROTI和 $S4$ 指数监测电离层闪烁的机理不同, 也会出现几个参数不能同时反映电离层受扰动的情况, 在进行电离层闪烁监测、预报和预警时, 建议同时采用多个参数综合分析; 在同等的电离层条件下, 15 s和30 s采样率的ROTI在数值上比较接近, 但是两者明显小于1 s采样率的ROTI. 使用GNSS接收机进行电离层闪烁观测时, 建议采用高于1 s采样率的GNSS观测数据.

关键词 行星和卫星; 大气, $S4$ 指数, ROTI, 电离层闪烁, 方法: 数据分析

中图分类号: P126; 文献标识码: A

1 引言

电离层E层和F层电子密度的不均匀性, 会导致穿过电离层的无线电信号发生振幅和相位的快速随机起伏, 这种现象称为电离层闪烁^[1]. GNSS (Global Navigation Satellite System)发射的无线电信标载波频率在L波段范围内, 非常容易受电离层闪烁活动的影响^[2], 其影响主要包括以下两个方面: 首先, 电离层闪烁对GNSS信号的影响不

2017-04-21收到原稿, 2017-05-08收到修改稿

*国家重点研发计划(2016YFB0501503-3)和国家自然科学基金项目(41730108)资助

†shaoll@shao.ac.cn

‡sllsong@shao.ac.cn

能通过电离层延迟的双频组合技术消除, 强烈的信号抖动会造成接收机跟踪GNSS卫星失败, 即卫星信号失锁, 这会增加导航定位误差, 严重时甚至会导致导航定位失败^[3]; 其次, 电离层闪烁中的不规则结构体会影响电离层TEC (Total Electron Content)的准确模型化, 影响电离层模型的精度, 从而影响导航系统的服务性能^[4]. 振幅闪烁指数 $S4$ 和相位闪烁指数 σ_ϕ 是电离层闪烁研究中最常用的参数, 但是它们需要利用GNSS接收机改进后的电离层闪烁和TEC监测仪来获得, 并且该设备大范围布设的应用、技术价值不高, 因此不利于大范围电离层闪烁监测. 根据双频GNSS接收机观测可以准确获得传播路径上电离层TEC变化率ROT (Rate of TEC)的思想, Pi等^[5]提出了利用TEC变化率指数ROTI (Rate of TEC Index)监测引起电离层闪烁的不规则结构体的方法. Basu等^[6]的研究结果表明: ROTI和 $S4$ 指数存在一定的相关性, 都可以用来监测引起电离层闪烁的不规则结构体, 两者在监测不规则结构体生成、演化和消散的过程中有着相同的趋势^[7].

Carrano等^[8]利用10 Hz采样率的GPS观测数据获得的1 min计算间隔的ROTI监测到了低于菲涅耳尺度的不规则结构体; 熊波等^[9]利用15 s采样率的GPS观测数据获得的1 min计算间隔的ROTI对电离层闪烁进行了监测, 并总结了ROTI响应 $S4$ 指数闪烁事件的准确率; Tanna等^[10]基于30 s采样率的GPS观测数据5 min计算间隔的ROTI, 研究了在低纬度带不同经度上磁暴对不规则结构体的生成和抑制作用; Jacobsen等^[11-12]利用1 s采样率的GPS观测数据和5 min计算间隔的ROTI监测了高纬度地区的电离层扰动, 并利用1 s和30 s采样率的GPS观测数据, 分析了不同采样率和不同计算间隔计算出的ROTI间的相关性, 得出不同采样率相同计算间隔的ROTI呈正相关的结论. Yang等^[13]对香港地区的电离层闪烁利用1 s采样率的GPS观测数据和5 min计算间隔的ROTI分析了ROTI与 $S4$ 指数的比率关系. 综上所述, 在ROTI和 $S4$ 指数的相关性、ROTI监测电离层扰动等研究中, 不同的研究采用了不同的计算策略, 但是目前还缺少对不同计算策略得到的各类ROTI与 $S4$ 指数的综合比较分析.

我国大部分低纬度地区处于赤道异常峰的北峰区域, 如: 广东、广西、海南等地区是全球范围内电离层闪烁发生最频繁、受影响最严重的地区之一^[14]. 中国大陆构造环境监测网络(Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC)站点分布广泛, 为电离层变化率指数ROTI的研究提供了丰富的数据, 为大区域的电离层ROTI监测和研究提供了条件. 本文利用CMONOC海南三亚站(18.3°N, 109.6°E)提供的GNSS观测数据和位于海南三亚的电离层闪烁与TEC监测仪获得的电离层闪烁实测数据, 综合研究了不同采样率和计算间隔的ROTI与 $S4$ 指数的相关性、各类ROTI与 $S4$ 指数监测电离层闪烁时表现出来的不同特征, 为利用ROTI研究电离层闪烁计算策略的选择和应用提供参考.

2 计算方法

$S4$ 指数是衡量电离层闪烁强度的重要指标, 可由GNSS信号强度计算得到, 通常每分钟计算得到一个值, 定义为信号强度平均值归一化的标准差^[15], 计算公式如下:

$$S4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}}, \quad (1)$$

式中SI表示信号强度, 角括号 $\langle \rangle$ 表示60 s间隔内全部观测值的算术平均值.

相位抖动通常也作为电离层闪烁研究的主要参数. 在相位闪烁监测中, 相位闪烁指数 σ_ϕ 定义为消趋势后的L1载波相位1 min内的标准差^[16]:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2}, \quad (2)$$

其中, ϕ 为消趋势后的载波相位, 单位为rad, σ_ϕ 反映了卫星信号相位变化的剧烈程度.

ROT用来描述在倾斜路径上电离层TEC的变化率, 单位为TECU/min. ROTI定义为在一定时间间隔内ROT的标准差, 单位为TECU/min. 算法如下^[12]:

$$L_{GF}(i) = L1(i) \times \lambda_1 - L2(i) \times \lambda_2, \quad (3)$$

$$ROT(i) = \frac{L_{GF}(i) - L_{GF}(i-1)}{\Delta t \times 10^{16} \times 40.3 \times \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}, \quad (4)$$

$$ROTI(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=i-N}^i [ROT(j) - \overline{ROT}]^2}, \quad (5)$$

式中, $L_{GF}(i)$ 是*i*时刻GNSS双频观测的几何无关线性组合方程, $L1$ 和 $L2$ 为相位观测值, λ_1 和 λ_2 为对应载波频率的波长, Δt 是相邻两个历元间的时间差, 单位为min. f_1 和 f_2 为对应相位观测值的频率, N 为参与计算的历元数. 本文利用1 s、15 s和30 s采样率的GNSS观测数据, 获得了1 min和5 min计算间隔不同种类的ROTI, 具体的计算策略如表1所示.

表1 计算各类ROTI的参数设定

Table 1 Selected parameters for calculating various types of ROTI

Sampling/s	Time interval of ROTI calculation/min	Number
1	1	60
1	5	300
15	1	4
15	5	20
30	5	10

ROTI的计算使用滑动窗口法, 滑动时把窗口内的中间历元时刻当作该ROTI的时刻, 滑动窗口的长度以时间为单位, 如1 min或5 min. 为了确保统计结果的有效性, 进行数据处理时, 在该时间区间内, 只有ROT个数大于设定值时, 才解算当前的ROTI, 如30 s采样率和5 min计算间隔的ROTI需要在该窗口内有8个以上的ROT, 利用1 s采样率和1 min计算间隔的ROTI, 需要在该窗口内有50个以上的ROT, 否则继续往下滑动, 直到完成所有ROTI的计算.

在计算ROTI之前, 要对RINEX (Receiver Independent Exchange)观测文件中的相位观测值进行预处理. 首先, 使用Melbourne-Wbbena (M-W)组合和电离层(LG)组合进

行周跳探测与粗差别除^[17]; 其次, 为了消除多路径噪声对计算结果的影响, 去除了高度角在 30° 以下的GNSS观测数据.

3 数据分析

3.1 闪烁事件

本文所采用的振幅闪烁指数 $S4$ 和相位闪烁指数 σ_ϕ 由位于海南三亚的电离层闪烁与TEC监测仪实测获得, $S4$ 指数和 σ_ϕ 均为每分钟一个值. 根据三亚电离层闪烁与TEC监测仪的工作情况, 本文选取了海南三亚2015年4月份的电离层闪烁观测数据进行了统计分析. 图1为海南三亚2015年4月7日到23日的 $S4$ 指数、 σ_ϕ 的时间序列, 因接收机断电等原因未能连续观测造成部分数据缺失. 从图1中 $S4$ 指数的时间序列可以看出: 在4月7日、8日、13日、15日、22日、23日当地均发生了显著的电离层闪烁事件, $S4$ 指数最大值均超过了0.5. 在闪烁事件的统计中, $S4$ 指数闪烁主要为 $0.3 < S4 < 0.5$ 级别的闪烁, $0.2 < S4 < 0.3$ 和 $S4 > 0.5$ 的闪烁事件则相对较少. 在 $S4$ 指数发生闪烁的情况下, σ_ϕ 也有一定的响应, 但是相对于 $S4$ 指数的变化, σ_ϕ 的变化则相对较弱.

在振幅闪烁研究中, 通常以 $S4 > 0.2$ 作为判断电离层闪烁事件发生的条件^[18]; 在相位闪烁的研究中, 当 $\sigma_\phi > 0.1$ 时, 则认为发生了电离层闪烁事件^[19]. 通过比较图2中4月22日G02和G04 σ_ϕ 随 $S4$ 指数的变化可知: 当振幅闪烁指数 $S4$ 发生闪烁时, 相位闪烁指数 σ_ϕ 则可能达不到闪烁的量级, 如G02在17:30前后的一段时间内就出现了此类情况. 因此, 在随后的研究中, 选择 $S4$ 指数作为判断是否发生电离层闪烁事件的标准.

3.2 各类ROTI闪烁阈值的确定

国内外许多学者对利用ROTI判断不规则结构体的出现作了大量的研究. Ma等^[20]的研究中把 $ROTI > 0.5$ TECU/min作为出现不规则结构体的判断条件, Zou等^[18]的研究中也说明了当 $ROTI > 0.5$ TECU/min时则表示出现了数千米尺度的不规则结构体; 黄丽等^[21]在研究SED (Storm Enhanced Density, SED)边界附近电离层不规则结构体时, 以 $ROTI > 1$ TECU/min来判断是否存在小尺度的不规则结构体. 本文利用1 s、15 s和30 s不同采样率的GNSS观测数据和不同计算间隔计算的ROTI, 分析闪烁事件发生时不同种类ROTI能否很好地响应 $S4$ 指数的变化. 图3统计了2015年4月18日G04卫星不同采样率ROT的变化, 从图中可以看出, 在未发生闪烁时, 30 s和15 s采样率ROT的标准差(STD)分别为0.355 TECU/min和0.357 TECU/min, 1 s采样率ROT的标准差为0.57 TECU/min. 在发生闪烁时, 由图4中2015年4月13日G10不同采样率ROT的变化可知: 30 s和15 s采样率ROT的标准差分别为0.955 TECU/min和1.07 TECU/min. 1 s采样率ROT的标准差为2.18 TECU/min. 由此可知, 在相同的电离层条件下, ROT的振幅变化随采样率的增大而增大; 对于同一种采样率的数据, 在发生电离层闪烁期间, ROT的振幅会明显变大.

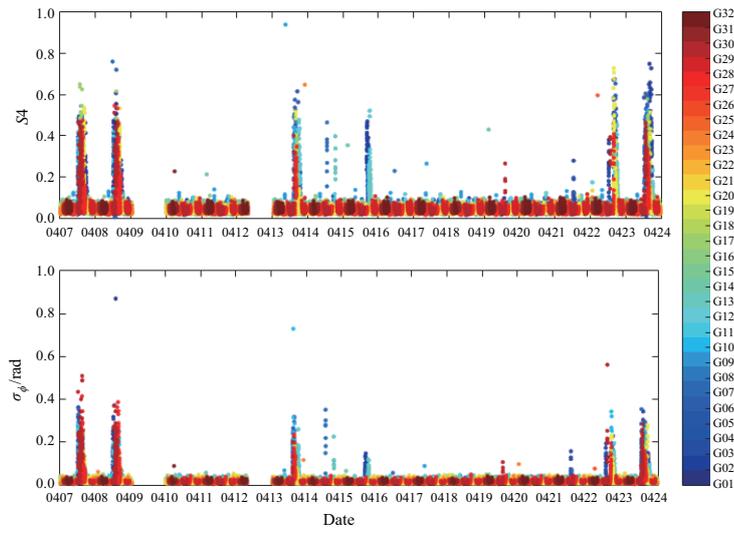


图 1 2015年4月7日到23日S4指数和 σ_ϕ 的时间序列

Fig. 1 Time series of S_4 index and σ_ϕ from April 7 to 23 in 2015

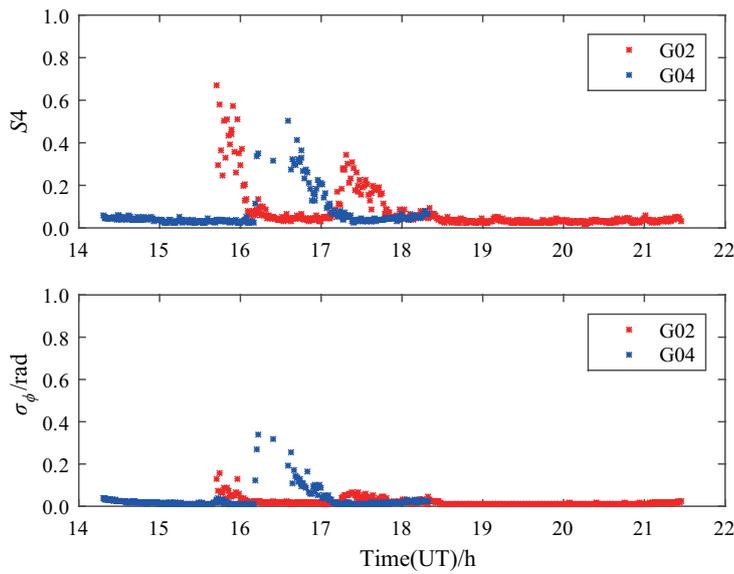


图 2 2015年4月22日G02卫星和G04卫星的S4指数和 σ_ϕ 的时间序列

Fig. 2 Time series of S_4 index and σ_ϕ of PRN G02 and PRN G04 on 2015 April 22

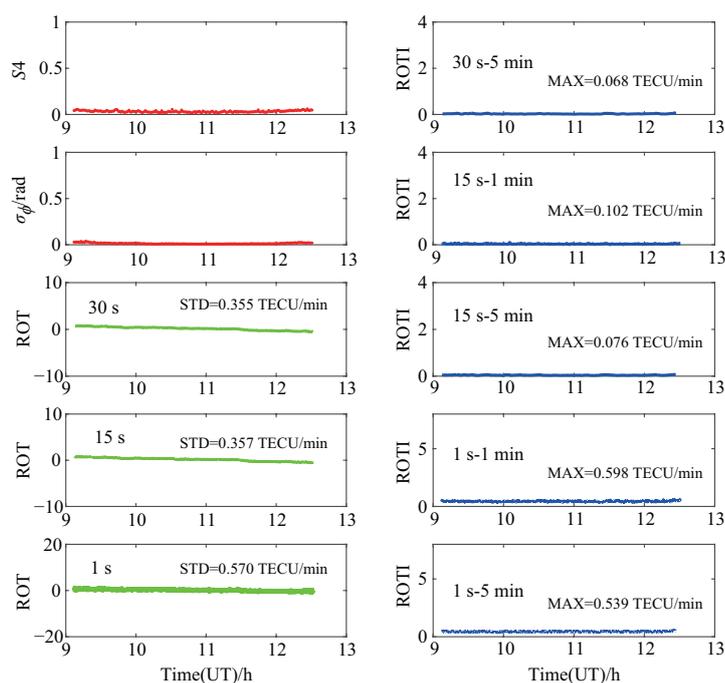


图 3 2015年4月18日G04无电离层闪烁时各参数时间序列

Fig. 3 Time series of different parameters of G04 without ionospheric scintillation on 2015 April 18

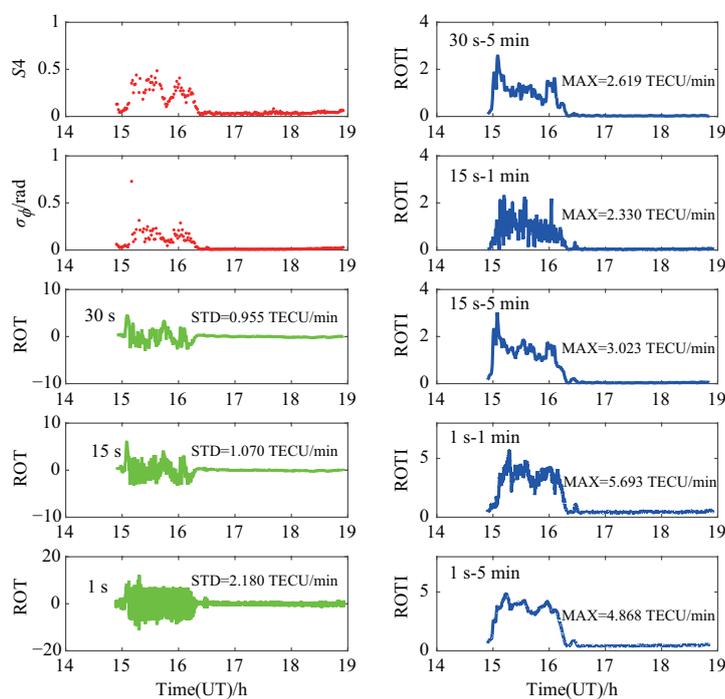


图 4 2015年4月13日G10闪烁条件下各参数时间序列

Fig. 4 Time series of different parameters of G10 with ionospheric scintillation on 2015 April 13

在平静电离层条件下,不同计算策略的各类ROTI的最大值是不同的. 30 s-5 min ROTI、15 s-1 min ROTI和15 s-5 min ROTI的最大值(MAX)约为0.1 TECU/min,而1 s-1 min ROTI和1 s-5 min ROTI的最大值均超过了0.5 TECU/min. 因此,对于不同采样率的GNSS观测数据,在利用ROTI响应S4指数的变化时,则需要采取不同的计算策略. 此外,根据不同的GPS卫星统计了电离层闪烁事件. 在所选取的观测时段内, GPS卫星共出现了60次振幅闪烁事件. 在发生振幅闪烁和未发生振幅闪烁时各类ROTI最大值大于一定阈值的统计结果如表2所示. 在30 s-5 min ROTI计算策略下,发生振幅闪烁时ROTI在0.5 TECU/min以上所占的百分比为95%,在未发生振幅闪烁时ROTI在0.5 TECU/min以上所占的百分比为1.96%. 因此,在未发生闪烁的统计中,对于15 s-1 min和15 s-5 min的ROTI阈值设在0.5 TECU/min以上即可,对于1 s-1 min ROTI和1 s-5 min ROTI阈值则需要设在1.4 TECU/min和1.2 TECU/min以上;在发生闪烁的统计中,15 s-1 min ROTI对应的阈值为0.7 TECU/min,15 s-5 min ROTI对应的阈值为0.6 TECU/min,而1 s-1 min ROTI和1 s-5 min ROTI对应的阈值则都为1.5 TECU/min. 因此,在下面的分析中,对于5 min计算间隔的ROTI,以30 s采样率数据计算的ROTI > 0.5 TECU/min、15 s采样率数据计算的ROTI > 0.6 TECU/min和1 s采样率数据计算的ROTI > 1.5 TECU/min作为发生电离层闪烁的判断条件. 通过图4电离层闪烁条件下不同采样率相同计算间隔的各类ROTI的比较可以看出:计算间隔相同时,采样率越高,则ROTI的峰值越大.

表 2 闪烁和非闪烁时各类ROTI最大值大于阈值的统计

Table 2 Statistics of various ROTI maximums greater than their threshold values under the circumstances of ionospheric scintillation and non-scintillation

Sampling-Interval	ROTI threshold	Scintillation/%	Non-scintillation/%
30 s-5 min	0.5	95.00	1.96
15 s-1 min	0.5	98.33	1.96
15 s-1 min	0.6	96.67	0.98
15 s-1 min	0.7	95.00	0.73
15 s-5 min	0.5	96.67	0.98
15 s-5 min	0.6	93.33	0.49
15 s-5 min	0.7	91.67	0.24
1 s-1 min	1.1	98.33	8.07
1 s-1 min	1.2	96.67	4.4
1 s-1 min	1.3	96.67	2.44
1 s-1 min	1.4	96.67	1.22
1 s-1 min	1.5	95.00	0.73
1 s-5 min	1.1	96.67	2.2
1 s-5 min	1.2	96.67	0.49
1 s-5 min	1.3	96.67	0.49
1 s-5 min	1.4	96.67	0.49
1 s-5 min	1.5	95.00	0.24

3.3 各类ROTI与S4指数的相关性分析

在一般情况下, ROTI可以较好地响应S4指数的变化, 当S4指数增大时, ROTI也随之增大, 当S4指数变小或处于平静时, ROTI也随之减小或进入平静状态. 图5给出了2015年4月13日到4月19日S4指数与不同种类ROTI的时间序列, 从图中可以看出, 4月13日发生了一次强闪烁事件, 闪烁的强度大、持续时间长、受影响的卫星数目多, 各类ROTI响应都比较强烈, 总体上和各颗卫星的S4指数变化一致; 在4月15日, 发生了较小的电离层闪烁事件, 闪烁的强度弱、持续时间短、受影响的卫星数少, 但是总体上各类ROTI同样很好地响应了S4指数的变化. 由此可以得出, 不同种类ROTI都可以很好地响应S4指数的变化, 均可以作为电离层闪烁研究的参数.

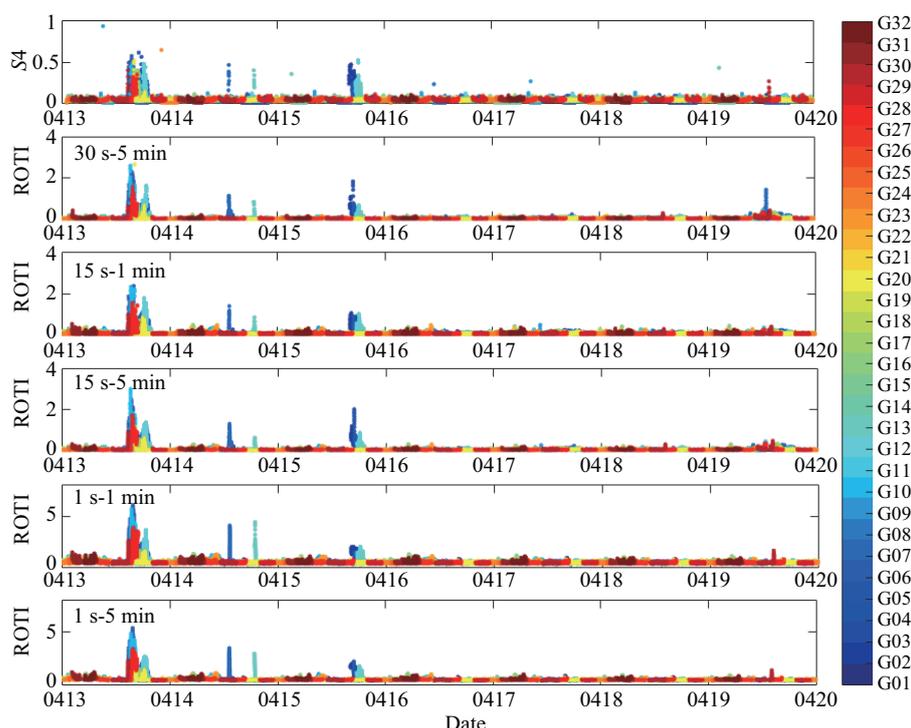


图 5 2015年4月13日到19日S4指数与各类ROTI的时间序列

Fig. 5 Time series of S4 index and different ROTI from April 13 to 19 in 2015

从图5统计的海南三亚2015年4月13日到19日不同种类ROTI的时间序列可以看出: 13日、14日和15日各类ROTI的量级均达到了电离层闪烁事件的级别, 而且各类ROTI都能很好地响应S4指数闪烁事件. 从各类ROTI与S4指数变化趋势的一致性可以得出, 两者有一定的相关性. 图6 (a)中统计了观测时段内 $S4 > 0.2$ 的闪烁事件与各类ROTI的相关系数(Corr.Coef), 可知: 各类ROTI与S4指数在整体上都是强相关的, 并且相关系数差距不大. 此外, 从各类ROTI与S4指数的比率关系来看, 对于30 s-5 min和15 s-1 min计算策略的ROTI, 大致存在 $ROTI = 3S4$ 的关系, 对15 s-5 min计算策略的ROTI则大致有 $ROTI = 4S4$ 的关系, 而1 s-1 min和1 s-5 min计算策略则约为 $ROTI = 9S4$ 的关系. 图6 (b)-(f)统计了2015年4月15日发生闪烁事件时各类ROTI与S4指数的相关系数, 直线

的斜率表示ROTI与S4指数的比率关系. 可以看出: 对于不同的闪烁条件, S4指数与各类ROTI的相关系数可能会有所不同, 但是在总体上1 s采样率的GNSS观测数据计算得到的ROTI的相关系数略高于30 s和15 s采样率的ROTI, 在ROTI和S4指数整体的比率关系上也可以得出相似的结论.

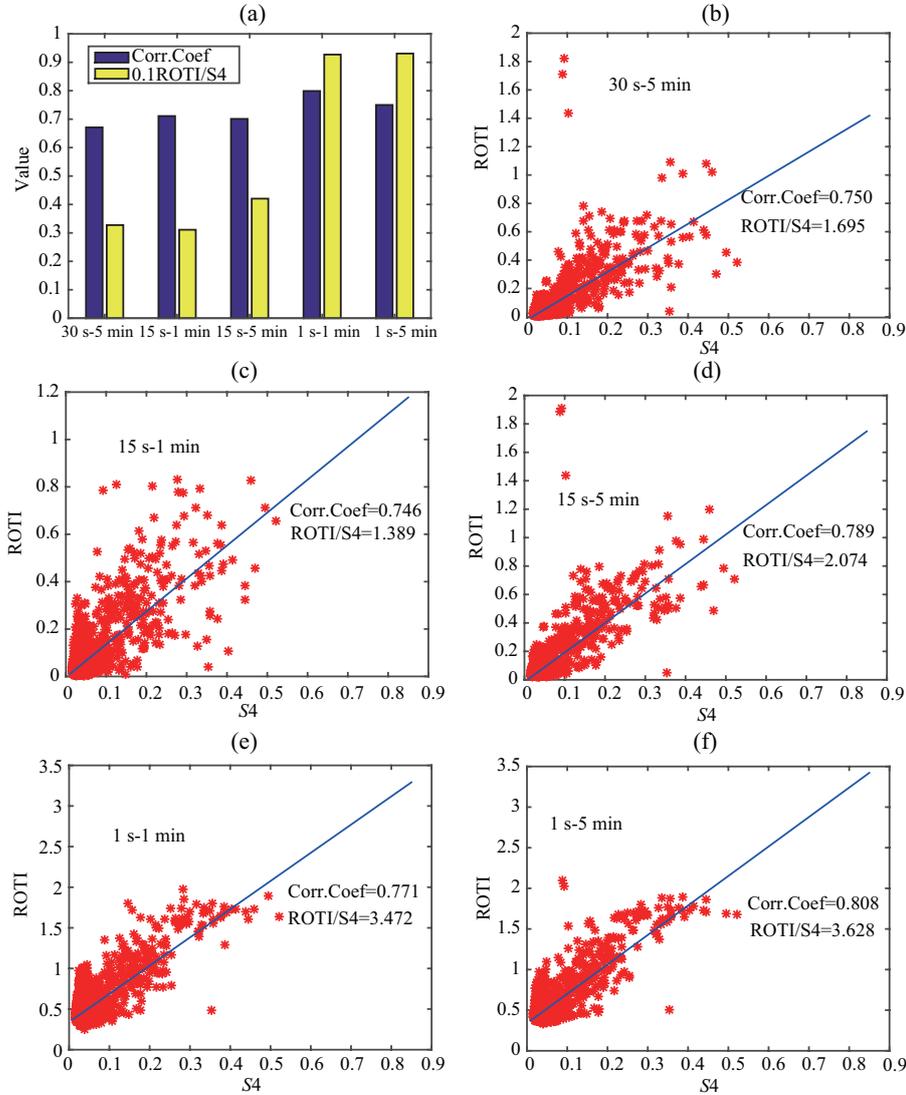


图 6 ROTI与S4指数的相关性. (a)为2015年4月闪烁发生时各类ROTI与S4指数的相关系数及比率关系, (b)、(c)、(d)、(e)和(f)为2015年4月15日发生闪烁事件时S4指数和各类ROTI的相关系数及比率关系.

Fig. 6 The correlation between ROTI and S4 index. (a) is the correlation coefficient and ratio between ROTI and S4 index during ionospheric scintillation in April 2015. (b), (c), (d), (e), and (f) are the correlation coefficient and ratio between different ROTI and S4 index on 2015 April 15.

3.4 各类ROTI与S4指数的特征分析

振幅闪烁的形成与不规则结构体的第一菲涅耳尺度有关, 满足 $R = \sqrt{2\lambda z}$, R 为不规则

则结构体的大小, λ 为信号的波长, z 为不规则结构体的平均高度^[22]. 对于GPS L1载波, $\lambda = 0.1903 \text{ m}$, 假设不规则结构体的平均高度为 $z = 350 \text{ km}$, 则引起闪烁的不规则结构体的尺度约为 365 m . ROTI由卫星穿刺点的运动速度与不规则结构体在卫星信号传播路径的垂直方向上的漂移速度矢量和以及Nyquist周期决定^[23]. 对于 30 s 采样率的ROTI, Nyquist周期为 60 s , 如果当卫星星下点轨迹的运动速度和不规则结构体正交于传播路径的漂移速度矢量和大致为 100 m/s 时, 那么ROTI对应的不规则结构的尺度大约为 6 km .

由于ROTI和S4指数的监测机制存在差异, 因此同时利用ROTI和S4指数监测电离层闪烁时也会出现一些差异. 各类ROTI和S4指数在大多数情况下, 都可以同时反映电离层扰动的变化, 但是在一些情况下也会表现出不同的特征. 在图7 (a)中, S4指数闪烁事件发生的时间很短暂, 各类ROTI都得到了即时响应, 这进一步验证了不同种类ROTI监测电离层闪烁的可靠性. 在图7 (b)中出现了在S4指数闪烁结束后, ROTI闪烁还会持续的现象. 图7 (c)中则出现了S4指数发生闪烁, 而各类ROTI均未出现闪烁的情况. 在图7 (d)中当卫星仰角接近 30° 时, 从S4指数看, 并没有发生闪烁事件, 但是各类ROTI都达到了闪烁的级别.

根据ROTI和S4指数监测电离层闪烁的不同机制, 可以选择不同的参数来实现不同的目的. S4指数可以监测第一菲涅耳尺度大小的不规则结构体, 并且可以更为直观、准确地表现出电离层闪烁发生的剧烈程度; ROTI和S4指数存在一个比率关系, 对于同一个S4指数闪烁事件, 由于不规则结构体的漂移速度不相同等原因, ROTI的大小也可能不同. 对于不同采样率的GNSS观测数据, 对于较低的采样率, 如 30 s 和 15 s 采样率的GNSS观测数据, 可以节省更多的存储空间, 数据处理速度相对较快, 缺点是难以监测造成GNSS信号闪烁的第一菲涅耳尺度大小的不规则结构体; 对于较高的采样率, 例如 1 s 采样率的GNSS观测数据, 相同时段的数据需要占用更多的存储空间, 数据处理的速度也相对较慢, 但有可以监测到小于第一菲涅耳尺度的不规则结构体的优势. 因此, 基于GNSS的S4指数、不同种类的ROTI进行业务类的电离层闪烁的监测、预报和预警时, 需要进行更为深入的研究.

4 讨论与小结

电离层闪烁事件常发生于低纬赤道区和高纬度地区^[24], 是一种常见的电离层空间天气现象. 目前电离层闪烁的监测有多种手段, 重要的手段之一是GNSS电离层闪烁和TEC监测仪获得的振幅闪烁指数S4和相位闪烁指数 σ_ϕ . 电离层闪烁接收机主要安装在电离层闪烁发生频繁的区域, 如低纬赤道区和极区. GNSS双频接收机为开展更大范围电离层闪烁事件的监测提供了机会. 电离层变化率指数ROTI能较好地反映电离层扰动条件下各卫星的信号发生异变的情况, 也是电离层闪烁研究的一个常用参数. 由于ROTI监测的可实现性强, 在不具备电离层闪烁和TEC监测仪的区域, 可以通过双频GNSS接收机获取的观测数据计算出的ROTI对电离层闪烁事件进行监测.

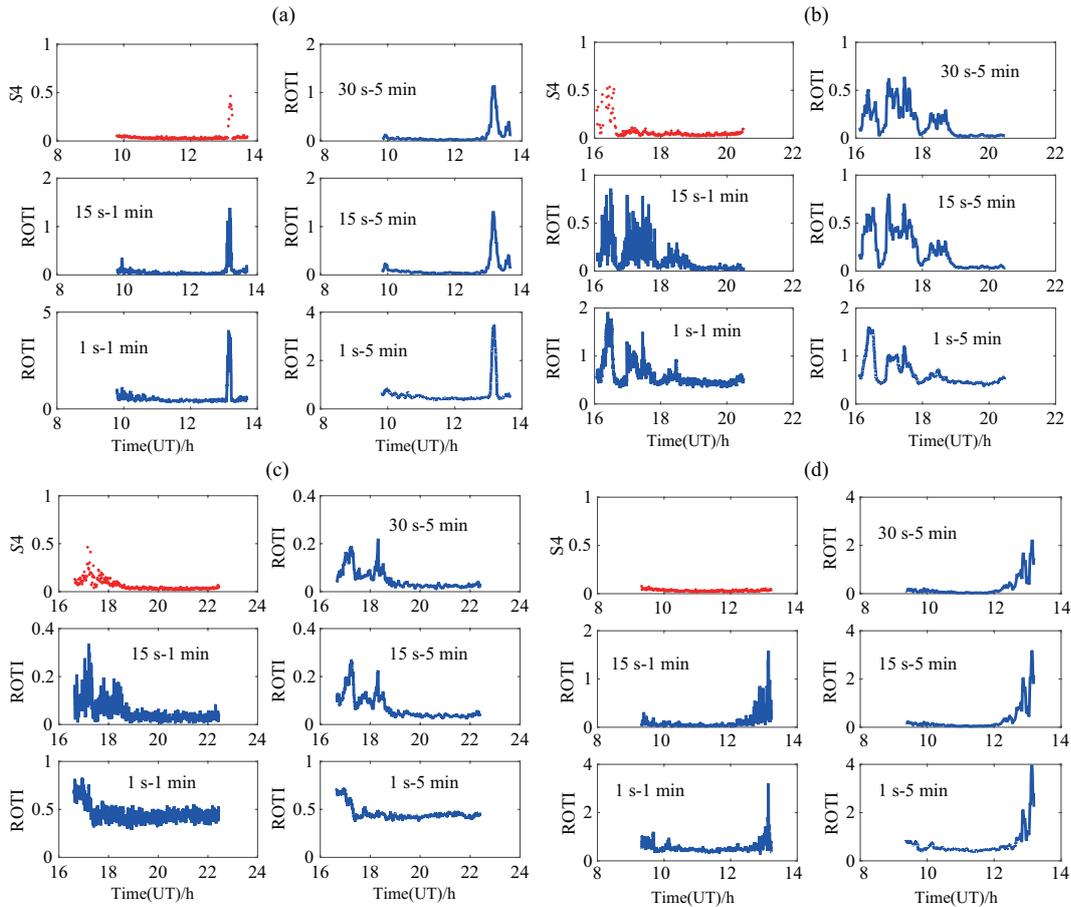


图7 S_4 指数和各类ROTI在监测电离层闪烁时的不同表现. (a) 2015年4月14日G07卫星, (b) 2015年4月7日G20卫星, (c) 2015年4月7日G02卫星, (d) 2015年4月21日G07卫星

Fig. 7 The different performances of S_4 index and different ROTI in monitoring ionospheric scintillation. (a) 2015 April 14 G07 satellite, (b) 2015 April 7 G20 satellite, (c) 2015 April 7 G02 satellite, and (d) 2015 April 21 G07 satellite

本文的分析基于 S_4 指数的不同采样率和不同计算间隔计算得到的ROTI, 得出如下初步结论:

(1)在通常情况下, 不同种类的ROTI都可以很好地响应 S_4 指数的变化, 强相关且相关系数差异不大;

(2)不同采样率的ROTI在响应 S_4 指数变化时判别是否发生闪烁的阈值不同. 数据分析结果表明: 对于5 min计算间隔的ROTI, 以30 s采样率的ROTI > 0.5 TECU/min、15 s采样率的ROTI > 0.6 TECU/min、1 s采样率的ROTI > 1.5 TECU/min作为判断是否发生电离层闪烁事件的阈值, 相对而言比较合适;

(3) ROTI与 S_4 指数存在类似线性的关系, 一般采样率越高, 则这个比率也越大; 并且对于同一采样率的数据, 1 min和5 min计算间隔的ROTI与 S_4 指数有较为相似的线性关系;

(4)由于ROTI和S4指数监测不规则结构体的机制不同,因此各类ROTI和S4指数在某些情况下会表现出不同的特征;

(5)尽管在利用ROTI监测电离层不规则结构体时,可以根据不同的需求和目的选择数据采样率,通常情况下需要采用高于1 s采样率的GNSS观测数据来监测更小尺度的不规则结构体.

参 考 文 献

- [1] Yeh K C, Liu C H. Proceedings of the IEEE, 1982, 70: 324
- [2] Groves K M, Basu S, Webber E J, et al. RaSc, 1997, 32: 2047
- [3] Dubey S, Wahi R, Gwal A K. AdSpR, 2006, 38: 2478
- [4] 刘钝, 甄卫民. 电波科学学报, 2012, 27: 95
- [5] Pi X, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. GeRL, 1997, 24: 2283
- [6] Basu S, Groves K M, Quinn J M, et al. JASTP, 1999, 61: 1219
- [7] Cherniak I, Zakharenkova I, Krankowski A. EP&S, 2014, 66: 1
- [8] Carrano C S, Groves K. TEC Gradients and Fluctuations at Low Latitudes Measured with High Data Rate GPS Receivers. ION 63rd Annual Meeting, Cambridge, April 23-25, 2007
- [9] 熊波, 万卫星, 宁百齐, 等. 地球物理学报, 2007, 50: 1639
- [10] Tanna H J, Pathak K N. Ap&SS, 2014, 235: 373
- [11] Jacobsen K S, Dahnn M. JSWSC, 2014, 4: A27
- [12] Jacobsen K S. JSWSC, 2014, 4: A33
- [13] Yang Z, Liu Z Z. GPS Solutions, 2016, 20: 815
- [14] 黄林峰, 邓博昌, 黄江, 等. 空间科学学报, 2012, 32: 25
- [15] Coco D. GPSW, 1991, 2: 47
- [16] Beach T L. RaSc, 2006, 41: 1
- [17] 谭争光, 郭金运, 宗干, 等. 全球定位系统, 2013, 38: 60
- [18] Zou Y H, Wang D L. JASTP, 2009, 71: 1948
- [19] Jiao Y, Morton Y T, Taylor S, et al. RaSc, 2013, 48: 698
- [20] Ma G, Maruyama T. GeRL, 2006, 33: 1
- [21] 黄丽, 袁志刚, 邓晓华, 等. 空间科学学报, 2009, 29: 552
- [22] Shagimuratov I I, Krankowski A, Ephishov I, et al. EP&S, 2012, 64: 521
- [23] Tanna H J, Karia S P, Pathak K N. AdSpR, 2013, 52: 412
- [24] Crane R K. Proceedings of the IEEE, 1977, 65: 180

The Preliminary Comparative Analysis of ROTI Calculation Strategies

SHAO Leng-leng^{1,2} SONG Shu-li¹

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The amplitude scintillation index $S4$ and the phase scintillation index σ_ϕ acquired by the ionospheric scintillation and TEC (Total Electron Content) monitor are the most commonly used indices for the ionospheric scintillation study. The correlation between the change rate of TEC index ROTI, which is obtained from the dual frequency GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver, and $S4$ index is verified. Most of the researches show that ROTI is sufficient for ionospheric scintillation studies. It is possible to conduct ionospheric scintillation study using a large number of globally distributed GNSS observations. However, the data sampling rate and ROTI calculation interval used in respective studies are different, and the choice of calculation strategy is inconclusive. GNSS dual-frequency observation data of 1 s, 15 s, and 30 s sampling rates and $S4$ index obtained by ionospheric scintillation and TEC monitor are used to analyze the correlation between ROTI and $S4$ index which are obtained from different calculation strategies during the ionospheric scintillation in Sanya, Hainan province. Besides, the sensitivity of the difference between ROTI and ionospheric scintillation is analyzed and compared. The result shows that different ROTIs have a strong correlation with $S4$ index. The different kinds of ROTI can respond to $S4$ index during the ionospheric scintillation. The different sampling ROTI have different threshold values to determine whether the scintillation occurs responding to $S4$ index changes. Due to the different mechanisms of ROTI and $S4$ index monitoring ionospheric scintillation, they will not reflect the ionospheric disturbance at the same time in some cases. It is suggested that multiple parameters should be analyzed for ionospheric scintillation monitoring, forecast, and forewarning. Under the same ionospheric scintillation condition, the ROTI values of 15 s and 30 s sampling are relatively close, but they are significantly lower than the ROTI values of 1 s sampling rate. It is recommended to select the sampling rate of GNSS observations more than 1 s to monitor ionospheric scintillation using GNSS receivers.

Key words planets and satellites: atmospheres, $S4$ index, ROTI, ionospheric scintillation, methods: data analysis