通过全球导航卫星系统观测确定海啸引发的电离层扰动

Domingo Centeno, Leonor Cui (1) (2); Puente García, Víctor (1) (2)

(1) 大地测量领域 - Instituto Geográfico Nacional General Ibáñez de Ibero，3 – 28003 马德里，西班牙 (2) 数学科学学院 - 马德里康普顿斯大学

Plaza de las Ciencias，3 – 28040 马德里，西班牙

leonorcd@ucm.es, vpuente@mitma.es

摘要

海啸传播过程中会产生重力波和声波，并从海啸源向电离层上层传播，从而扰动*E*区和*F*区的电子密度。利用永久全球导航卫星系统站记录的电离层总电子含量（*TEC*）测量值，可以详细研究这些电离层扰动。本文介绍*VARION*方法（实时电离层观测变分方法）的基础，以获取总电子含量的时间变化，进而检测此类电离层扰动。此外，本文还展示了将该方法应用于海啸真实案例后获得的数值结果；这些案例由电离层穿刺点（*IPP*）最靠近海啸源的卫星进行监测。最后，本文基于卫星发射信号中反映的这些电离层扰动，介绍了一种初步设计，探讨将其整合到面向伊比利亚半岛的海啸预警系统（*TWS*）中的可能性。

关键词

海啸、电离层、全球导航卫星系统、总电子含量（TEC）、电离层穿刺点（IPP）、海啸预警系统（TWS）。

1. 引言

近年来，全球导航卫星系统能够以准确、快速且经济高效的方式监测各种事件，这一已得到证实的能力使其在众多不同领域中的应用显著增加。特别是，已有多项研究利用全球导航卫星系统观测所获取的信息（甚至是实时信息），分析自然灾害发生时电离层的行为。电离层是地球大气层上层的电离部分，位于地球表面上方50至1000千米处。这种电离直接由太阳辐射活动引起，太阳辐射活动会改变电离层成分的性质，并导致电离层等离子体密度发生扰动。根据电离程度的不同，可将电离层划分为若干区域，每个高度层的成分也各不相同。这些区域被标记为D、 E、 F_1 和F_2层，其中D 层覆盖中间层的上部，直至F层延伸到外逸层的一部分（Kelley，2009年）。

本文重点探讨利用电离层的特性进行海啸探测。根据联合国教科文组织政府间海洋学委员会—美国国家海洋和大气管理局国际海啸信息中心[1], 的信息，海啸的大多数源自地震，但也可能由其他现象触发，例如地震、滑坡、火山喷发、地震、雷暴、深对流事件、空间天气效应以及各种人为事件（爆炸、火箭发射等）。

海啸形成时，会产生不同类型的声波和重力波，并向上传播至电离层。这些波可分为两类：一类是起源于海啸源区的声重力波（AGW），其垂直速度为500–600 m/s，在主震发生后7–9分钟到达电离层；另一类是由海啸在海洋中的传播所引起的内重力波（IGW），其垂直速度较低，为40–50 m/s（Astafyeva，2019年）。随着这些波在大气层中向上传播，海拔升高导致密度下降，波的振幅也随之增强。这使电离层成为传播和研究这些波的理想介质，因为这些波会在E 和F 区域产生可检测到的电子密度扰动；这些区域位于海平面以上300至350 km处。

[1] http://itic.ioc-unesco.org/index.php

可通过测量电离层的总电子含量（TEC）来分析电离层中的这些变化。这些测量由运行中的GNSS地基接收机持续采集，并采用一种基于实时电离层观测变分方法（简称VARION）的方法进行分析；该方法最初由Savastano等人（2017年）提出。因此，本研究旨在分析运用这一高效且成功的方法，在不同潜在海啸灾害情景下获得的数值结果，以评估将其整合到海啸预警系统中的可行性。

2. 实时电离层观测变分方法

实时电离层观测变分方法（VARION）是一种全球导航卫星系统处理算法，专注于实时估算斜向总电子含量（STEC）的变化。STEC 是沿卫星与接收机之间的射线路径，单位横截面柱体内自由电子总数的测量值。图1中以红色表示该 STEC 测量值。

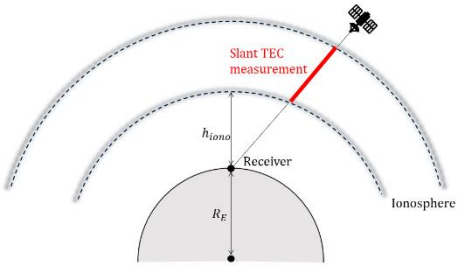


图1. 卫星—接收机射线之间的斜向总电子含量测量

这些 STEC 估算值会受到信号穿过电离层时传播状况的影响。此外，估算值还取决于一天中的地方时（LT）。具体而言，白天的电离层比夜间电离程度更高，其电离程度在地方时 12 时至 16 时之间达到最高。 此外，估算值还取决于接收机所在的纬度和经度，以及该层中的太阳活动和地磁活动。

此外，VARION方法基于位移分析独立变分引擎（简称VADASE），该引擎能够在实时场景中估算多次地震引发的地面速度和位移（Benedetti等，2015年）。

2.1. 数学模型

VARION方法以单频历元差分的GPS载波相位测量无几何组合为基础，使用独立运行模式下的双频GPS接收机。本节介绍VARION方法的数学基础，该方法用于提供海啸发生期间的斜向总电子含量时间序列，以便检测海啸。

设$L_{iR}^{S}(t)$为标准原始载波相位观测值，则以长度单位表示为：

$$L_{iR}^{S}(t) = \rho_{R}^{S}(t) + c(\delta t_{R}(t) - \delta t^{S}(t)) + T_{R}^{S}(t) - I_{iR}^{S}(t) + \lambda_{i}N_{iR}^{S}(t) + p_{R}^{S}(t) + m_{iR}^{S}(t) + \varepsilon_{R}^{S}(t), \quad (1)$$

其中，下标i 和R分别对应信号频率和接收机，上标S 表示卫星。此外， λ 为载波相位波长，ρ_{R}^{S} 为几何距离，c 为光速，δt_{R} 和δt^{S} 分别为接收机和卫星的时钟误差，T_{R}^{S} 和I_{R}^{S} 分别表示沿卫星—接收机路径的对流层延迟和电离层延迟，N_{iR}^{S} 为载波相位模糊度，p_{R}^{S} 汇总了其他效应之和，例如天线相位中心变化、相位缠绕和相对论效应；最后，m_{iR}^{S} 和ε_{R}^{S} 分别对应多路径效应和噪声等其他残差。

假设没有发生周跳，载波相位模糊度在相邻两个历元之间保持不变。此外，基于双频 GPS 观测，我们考虑所谓的无几何组合或 L_4 组合。该组合消除了测量中的几何部分，仅保留所有频率相关效应。其表达式为$L_4 = L_1 - L_2$，其中 L_1 和 L_2 分别是 GPS 信号。

因此，对相邻两个历元$(t,\ t+1)$之间的时间对式（1）求导，可得无几何时间单差观测方程：

$$L_{4R}^{S}(t+1)-L_{4R}^{S}(t)=\frac{f_1^2-f_2^2}{f_2^2}\left(I_{1R}^{S}(t+1)-I_{1R}^{S}(t)\right), \tag{2}$$

其中，f_1和f_2 分别为全球定位系统的L_1 和L_2 载波频率。它们的值由基准频率$f_0=10.23$ MHz 推导得出，分别为 $f_1=154f_0=1575.42$ MHz 和$f_2=120f_0=1227.60$ MHz。

因此，考虑式（2）中沿几何距离的电离层折射，相邻两个历元之间的斜向总电子含量变化为：

$$\delta TEC(t)=\frac{f_1^2 f_2^2}{A(f_1^2-f_2^2)}\left(L_{4R}^{S}(t+1)-L_{4R}^{S}(t)\right), \tag{3}$$

其中，A 为一个常数，由 Teunissen（2017年）给出的等离子体频率推导得出：

$$A=\frac{1}{2}\frac{q_e^2}{4\pi^2\epsilon_0 m_e}=40.3081\cdot 10^{16}\ \ \mathrm{m^3/s^2}, \tag{4}$$

其中，q_e 为电子电荷，ϵ_0 为真空介电常数，m_e 为电子质量。

随后，通过对海啸发生期间的时间区间$[t_0,t_f]$内的斜向总电子含量变化进行数值积分，计算其估计值。因此，采用梯形法则积分可得：

$$\Delta TEC(t_f,t_0):=\int_{t_0}^{t_f}\delta TEC\ (t)\ dt\approx\sum_{k=1}^{N}\frac{\delta TEC(t_{k-1})+\delta TEC(t_k)}{2}\Delta t_k, \tag{5}$$

其中，$\Delta t_k=t_k-t_{k-1}$ 为时间网格间距。不失一般性，我们可以考虑一个间距为 $\Delta t_k=\mathrm{h}$ 的等距网格，因此误差项的阶为 $\mathcal{O}(\mathrm{h}^2)$。这些总电子含量测量值以总电子含量单位（总电子含量单位）表示，其中 1 个总电子含量单位对应每平方米 10^{16} 个电子。

VARION方法可使用Klobuchar广播电离层模型，甚至使用全球地图（例如IONEX文件），以确定总电子含量测量值的地理定位。此外，需要指出的是，该方法可适用于所有全球卫星导航系统星座，并考虑其观测码：全球定位系统为 (L1C, L2 W)，格洛纳斯为 (L1C, L2C) 或 (L1P, L2P)，伽利略为 (L1C, L5Q) 或 (L1X, L5X)，最后，北斗为 (L2I, L6I) 或 (L2I, L7I)。

然而，由于电离层效应会影响卫星与接收机之间传输的信号，因此分析海啸发生期间两者所形成的几何关系也至关重要。主要目标是选择最适合监测海啸的卫星。

2.2. 卫星选择标准

大多数算法都假设估计的总电子含量主要由电离层的F_2 区域贡献，因此可以将电离层建模为位于F_2 峰值高度的单层电离层。这一假设使我们能够将估计的总电子含量归属于一个特定点，即电离层穿刺点（IPP）。该点定义为卫星—接收机视线与位于固定高度的薄电离层壳层的交点，其标称高度为350 km。

根据 El-Gizawy（2003年），IPP的位置通过采用GRS80大地参考系中的椭球接收机坐标(ϕ_r,λ_r)以及卫星星历计算得出。图2所示的这一配置使我们能够获得电离层穿刺点（IPP）的坐标$(\phi_{IPP},\lambda_{IPP})$，其计算公式如下：

$$\begin{cases}\phi_{IPP}=\phi_r+\psi\cos A,\\ \lambda_{IPP}=\lambda_r+\dfrac{\psi\sin A}{\cos\phi_{IPP}},\end{cases} \tag{6}$$

其中，A 为卫星的方位角，ψ 为偏移角，该偏移角以假定的球形地球中心为基准，表示为 $\psi=E'-E$，其中 E' 和 E 分别为电离层穿刺点和用户接收机处的仰角。

仰角 E' 可表示为：

$$E' = \arccos\left(\frac{R_E}{R_E + h_{iono}}\cos E\right), \tag{7}$$

其中 R_E 为球形地球的平均半径，h_{iono} 为电离层穿刺点的高度，设为 350 km。

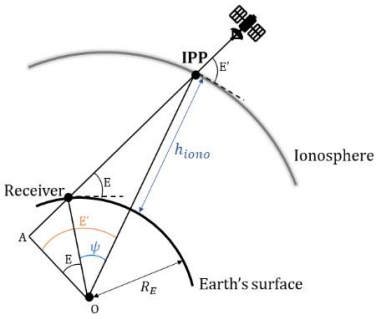


图2. 卫星-接收机几何关系

我们旨在根据已知的接收机和卫星大地坐标，确定卫星在（6）中以仰角和方位角表示的坐标。这些大地坐标以地心地固坐标系（ECEF）(x, y, z)表示。为此，根据 Subirana（2011）的定义，通过转换到局部东、北、天（ENU）坐标系——该转换通过两个旋转矩阵完成——我们得到卫星在局部坐标（ENU）系统中的仰角和方位角，表示如下：

$$\begin{cases} E = \arcsin(\vec{\rho}\cdot\vec{u}), \\ A = \arctan\left(\frac{\vec{\rho}\cdot\vec{e}}{\vec{\rho}\cdot\vec{n}}\right), \end{cases} \tag{8}$$

其中 $\vec{\rho}$ 为视线单位向量，最后，单位向量 $\vec{e}, \vec{n}$ 和 $\vec{u}$ 定义如下：

$$\begin{cases} \vec{e} = (-\sin\lambda_r\,, \cos\lambda_r\,, 0), \\ \vec{n} = (-\cos\lambda_r \sin\phi_r\,, -\sin\lambda_r \sin\phi_r\,, \cos\phi_r), \\ \vec{u} = (\cos\lambda_r \cos\phi_r\,, \sin\lambda_r \cos\phi_r\,, \sin\phi_r). \end{cases} \tag{9}$$

根据以 Mw 表示的矩震级，我们为那些电离层穿刺点最接近海啸源坐标的卫星定义一个阈值距离 κ：$(\phi_{ts},\ \lambda_{ts})$。根据 Kamogawa 等人（2016年）的研究，如果$Mw \geq 8.4$，则将 κ 设为 100 km；如果 $Mw < 8.4$，则 κ 取 50 km。因此，我们选取电离层穿刺点坐标位于以海啸源为中心、半径为 κ 的圆内的卫星，即：

$$(\phi_{IPP} - \phi_{ts})^2 + (\lambda_{IPP} - \lambda_{ts})^2 \leq \kappa^2. \tag{10}$$

3. 海啸真实案例

为验证该算法，我们考察了以下真实海啸案例产生的电离层效应。首先，我们考虑发生在日本东北地区的海啸，时间为2011年3月11^{th} 日协调世界时 05:46:24。此次海底巨型逆冲地震的震级为 9.0–9.1，震中位于西北太平洋的 $\phi_{ts} = 38^{\circ}$。 $297\ N$ 和 $\lambda_{ts} = 142^{\circ}$。 $373\ S$，距东北地区牡鹿半岛以东约 72 km，震源深度较浅，为 32 km。这是日本有记录以来最强烈的地震，因此被称为东日本大地震。地震持续约六分钟，并引发了海啸（Shibahara，2011年）。

此外，大洋洲的汤加海啸发生于2022年1月15^{th} 日协调世界时04:14:45。此次海啸由位于南太平洋汤加群岛的洪阿哈阿帕伊岛海底火山喷发引发，其坐标为$\phi_{ts} = 20^{\circ}$。 $546\ S$ 和$\lambda_{ts} = 175^{\circ}$。 $390\ W$。此次火山喷发引发了多次海啸，影响范围不仅包括汤加，还包括斐济、美属萨摩亚、瓦努阿图以及太平洋沿岸；新西兰、日本、美国、俄罗斯远东地区、智利和秘鲁均遭遇了造成破坏的海啸。这是自1991年皮纳图博火山喷发以来规模最大的火山喷发，也是自1883年喀拉喀托火山喷发以来威力最强的一次喷发（Denamiel，2022年）。

为分析使用VARION算法估算的斜向总电子含量，下一节将介绍每个海啸真实案例所使用的数据。

4. 数据集

首先，我们从国际GNSS服务（IGS）的地图列表中，选取距离海啸源最近的参考站接收机[2]。此外，对于海啸发生的日期，我们从地壳动力学数据与信息系统（CDDIS）获取这些接收机的RINEX观测文件[3]。最后，从欧洲轨道测定中心（CODE）[4]产品系列中获取轨道文件标准产品3（SP3），其中包含一系列位置记录以及各选定历元下每颗卫星的钟差改正。需要指出的是，卫星位置仅用于计算电离层穿刺点的位置。

鉴于RINEX 文件的采样间隔为30秒，而SP3文件的采样间隔为15分钟，我们采用拉格朗日插值，通过七阶插值多项式，利用信号发射时刻$T_{emission}$两侧各4个点来计算卫星位置。该时刻计算如下：$T_{emission} = T_{reception} - \Delta t$，其中$T_{reception}$为信号接收时刻，$\Delta t$ 为信号传播时间，其表达式为$\Delta t = \frac{Q}{c}$，其中Q 为卫星与接收机之间的伪距测量值，c 为光速。因此，为了验证该算法，下一节将给出每个海啸实际案例的数值结果。

5. 数值结果

首先，对于每种情况，我们展示了距离海啸发生地点最近的站点，以及那些在相应 RINEX 和 SP3 文件中确实有数据的站点。通过 RINEX 文件，我们获取了东北事件的每日 30 秒采样数据，以及汤加事件的每小时 30 秒采样数据。需要注意的是，尽管日本地区的 GNSS 网络非常密集，但对于这一日期的情况，仅有全球定位系统数据可用（其他卫星星座未进行采样）。此外，关于 SP3 文件，为了提高数值结果的精度，我们采用了采样间隔为 15 分钟的最终轨道。因此，图3展示了两种情况下所有可能的接收机，其中我们选择了红色标记的接收机，未选择绿色标记的接收机。同样，东北地震的震中以及汤加火山喷发的位置均以蓝色图钉标出。

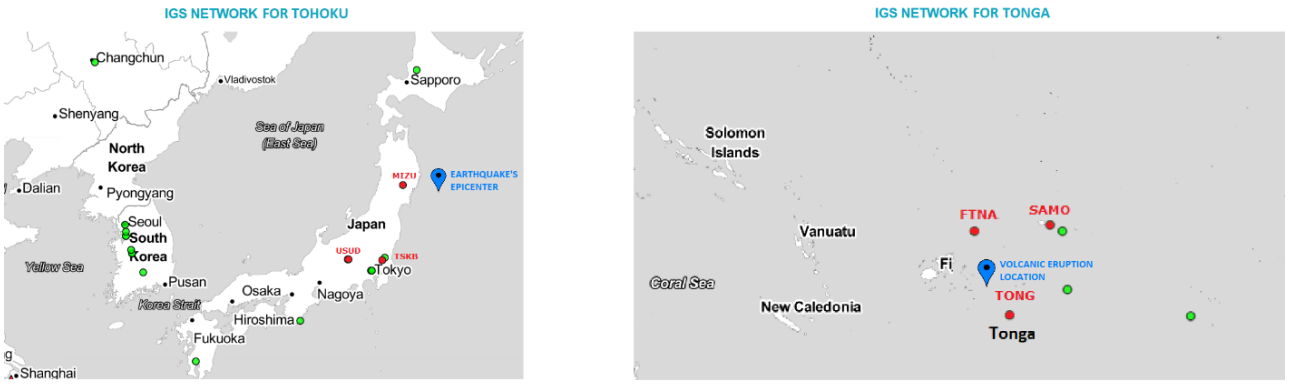
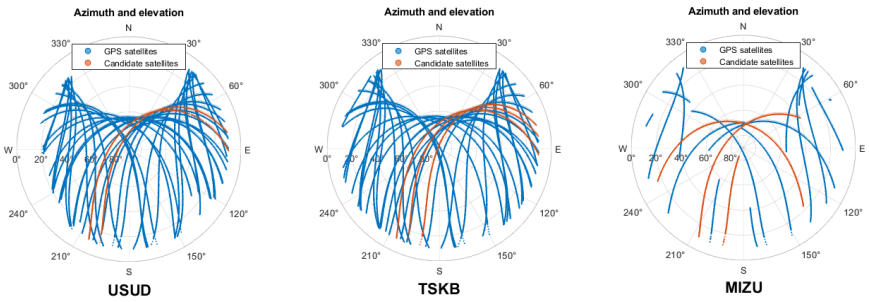


图3. 可能的 IGS 站点分布图

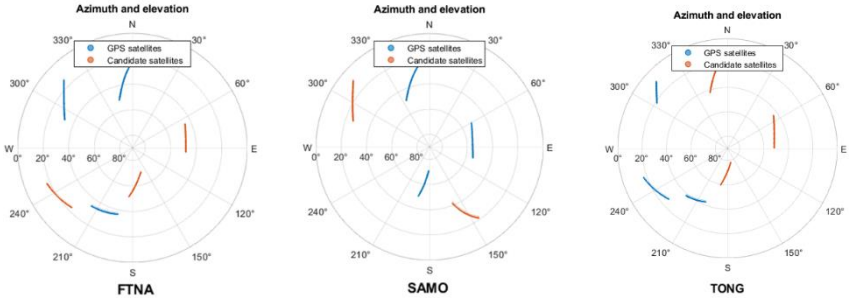
如我们所见，每个事件都有多个可能的测站，但并非所有测站都在相应的海啸发生日期提供了数据，因此我们选择了红色标出的测站：日本的 MIZU、USUD 和 TSKB，以及汤加的 FTNA、TONG 和 SAMO。

图4展示了各站点的所有 GPS卫星轨迹，这些轨迹以方位角和仰角坐标表示，采用东-北-天坐标系，并根据每种海啸情形，在极坐标图中绘制所选接收机的测量结果。在两种情形下，均采用了 10° 的仰角掩膜，以排除地平线附近的卫星：与在地平线上方较高处运行的卫星相比，低仰角卫星受到的大气噪声更大，且容易受到信号干扰，例如周跳测量误差，甚至多路径效应。

[2] https://igs.org/network/#station-map-list
[3] https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/
[4] http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/



(a) 东北事件



(b) 汤加事件

图4. GPS卫星仰角和方位角轨迹的极坐标图

如图所示，由于设定了取决于矩震级的阈值距离 κ，在所有以蓝色标示的可能卫星中，我们仅保留电离层穿刺点坐标满足式（10）所定义圆形条件的卫星。因此，电离层穿刺点处卫星路径的方位角-仰角极坐标图以红色标示。就图4而言，东北事件中，USUD、TSKB 和 MIZU 各站分别有 2、3 和 3 颗候选卫星；而在汤加事件中，FTNA、SAMO 和 TONG 各站分别有 3、2 和 3 颗候选卫星。电离层穿刺点坐标最接近海啸源的卫星数量，主要取决于若干因素，例如特定日期可用的全球导航卫星系统数据；从该站点可观测到的卫星可能不足——因为其发射信号未穿过电离层中的总电子含量凹陷，即海啸电离层空洞（TIH）。这一空洞由海啸发生后，海啸波在其起源区域上方传播所产生；此外，采样频率设置不当也可能引发混叠效应，导致信号测量误差。请注意，图4a与图4b之间的差异源于可用数据集不同：我们为东北地区的站点选用了每日数据，而为汤加的站点选用了每小时数据。

在图 5和6中，我们绘制了对两次真实海啸事件应用VARION方法后得到的斜向TEC时间序列 i.

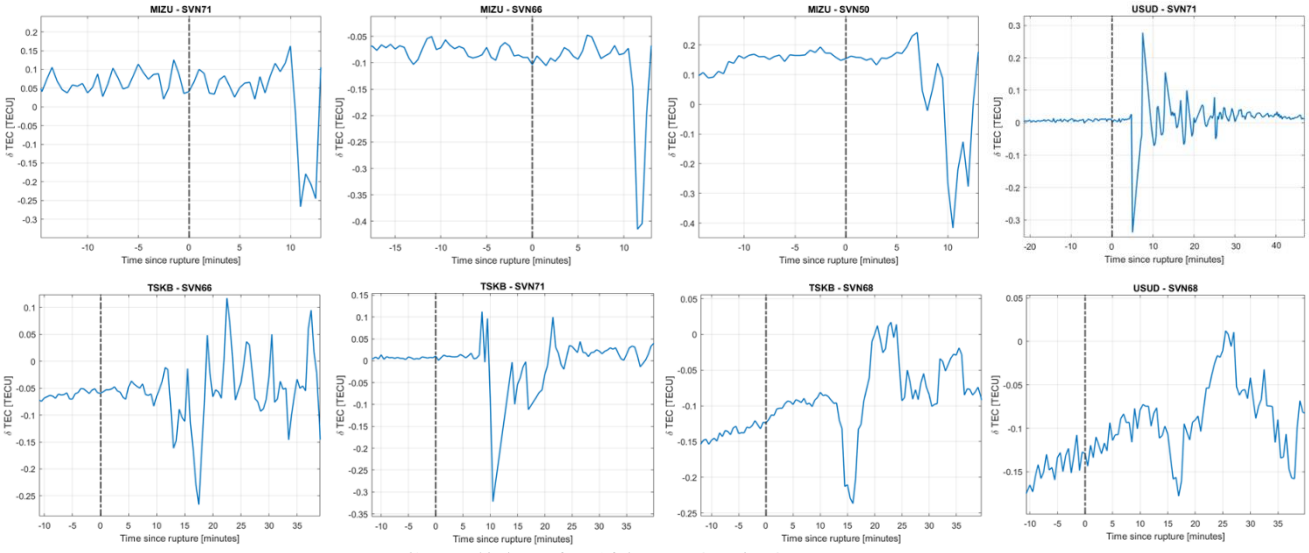


图 5. GPS卫星监测到的东北地区斜向TEC时间序列

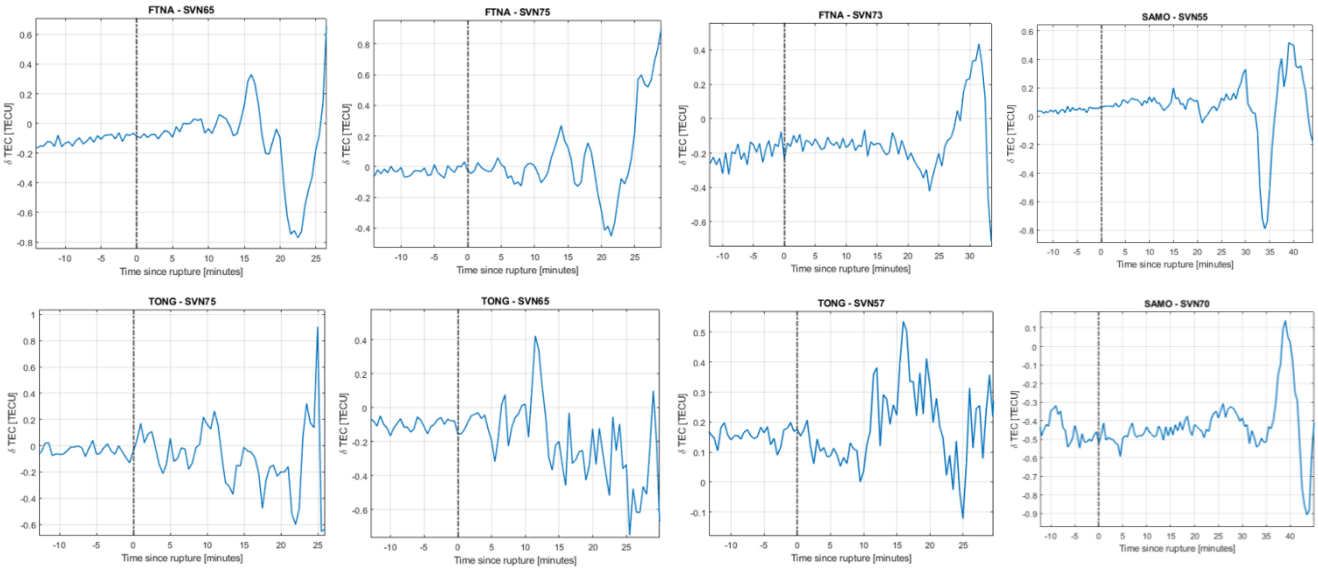
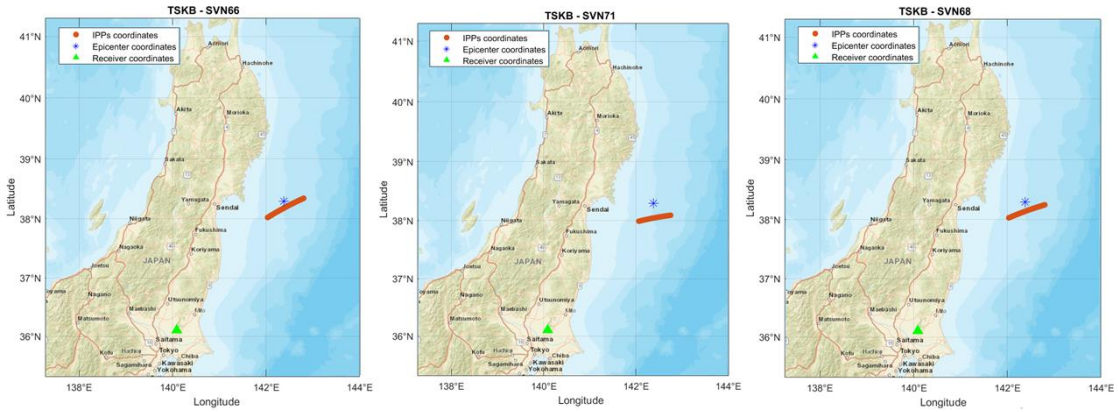


图6. GPS卫星监测的汤加斜向TEC时间序列

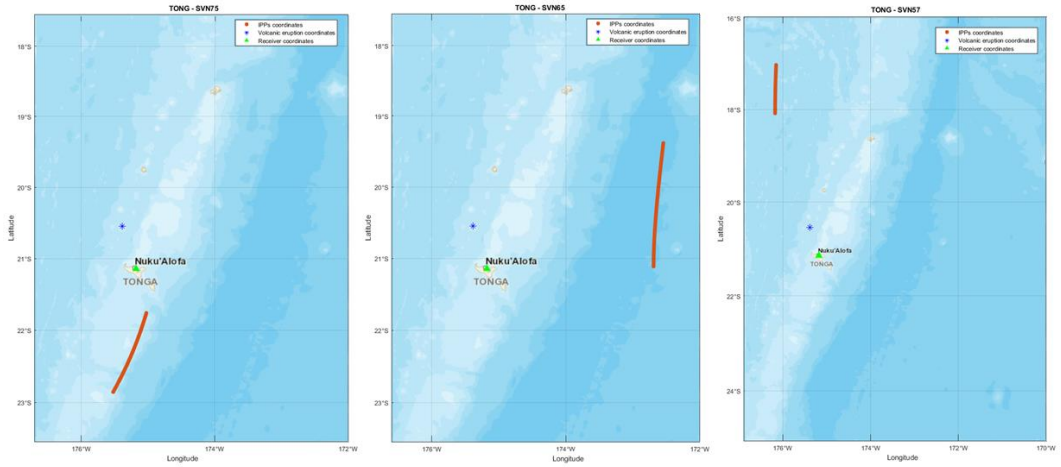
如图所示，虚线表示事件源被触发的时刻，因此所有时间序列均从事件发生时刻开始计算，具体时长视情况而定，范围从破裂前10分钟到破裂后最多40分钟。请注意，为确保唯一性，我们为每个测站标识候选卫星时使用其SVN编号，而非卫星的伪随机噪声码。此外，为提高估算精度，还加入了闰秒，东北事件和汤加事件分别计入15秒和18秒闰秒。

这些数值结果展示了斜向总电子含量的变化情况。在初始阶段，图5和图6中的时间序列在统计上是平稳的，这表明在此期间其均值和方差均保持恒定。然而，主震发生数分钟后，斜向总电子含量开始振荡，且没有明显趋势，反映出这些海啸造成的电离层扰动。如图所示，关于从事件源发生到检测到电离层异常所需的时间，结果如下。对于东北事件，所有选定测站均在15至20分钟内监测到这些扰动，斜向总电子含量扰动的绝对振幅范围为0.4个总电子含量单位。另一方面，对于汤加事件，所选测站需要多花几分钟才能监测到扰动，这可能是由于卫星几何布局所致。就此案例而言，火山喷发数分钟后发现斜向总电子含量扰动的显著振幅约为±1.0个总电子含量单位，高于正常水平。

最后，为了分析结果，我们在图 7 中仅绘制了候选卫星的轨迹，这些卫星的电离层穿刺点坐标最接近海啸源。这些电离层穿刺点坐标以红色标示，而海啸源和接收机坐标则分别以蓝色和绿色标示。



(a) 东北事件



(b) 汤加事件

图 7. 电离层穿刺点处的候选卫星轨迹

通过这些数值结果，VARION算法展现出能够检测由海啸驱动的重力波引发的电离层扰动，可被视为对未来海啸预警系统运行的一项创新贡献。

6. 海啸预警系统

海啸预警系统（TWS）通过提前探测海啸、对可能造成破坏的海啸发布警报，并有效防止海啸灾害。为此，需要实时进行海啸预报，以便受影响地区及时收到疏散警报，避免人员伤亡和民用财产遭受重大损失。因此，为了预防海啸灾害，系统会在海啸波抵达海岸前，根据全球导航卫星系统测量应具备的特征来确认海啸是否发生，并据此预警受影响的地点、预计到达时间及各地点的波高，同时确认海啸是否确实已经生成。

如前所述，海啸的主要成因是地震，因此目前的系统主要依赖地震仪，通过记录地面运动，快速探测可能造成破坏的地震的位置和规模。基于获取的地震参数，这些系统会采用多种工具进行风险评估，例如数值模拟、决策矩阵，或由中央处理设施处理的海啸情景数据库，以评估探测到的地震是否可能引发海啸。例如，海啸数值模拟主要通过估算海啸的波浪特性，或利用长周期地震波记录估算海啸初始高度；同时还需计算破裂区域的垂直位移（Blewitt 等，2009年）。为此，早期预警系统通常采用美国国家海洋和大气管理局（NOAA）海啸预警系统的 MOST（海啸分裂法）数值模型。该模型针对浅水波方程的特征形式采用有限差分格式，从而估算海啸波高。类似地，DART/WP-GITM软件利用电离层扰动，通过海啸参数反演模型估算海啸的波浪特性（Meng 等，2015年）。

由于准确计算破裂区域需要额外花费数十分钟，因此很难及时发布预警，准确告知下一次近场海啸的高度，让沿海地区的居民有足够时间撤离。为解决这一问题，人们利用定位系统（全球定位系统）浮标监测近海海啸；这些浮标能够更快地确认海啸，并与海底压力传感器和全球导航卫星系统卫星相连，以确保潮位测量具有较高精度。例如，深海海啸评估与报告系统（DART）浮标设置在距海岸 300 km 的海域，并持续监测水柱的变化（Meinig，2005）。然而，要建立足够密集的此类监测系统网络，其采购、安装和维护成本都很高，还需要投入大量人力。因此，亟需成本更低、实用性更强的海啸早期预警系统。此外，沿海岸线设置的潮位计可以持续监测水位变化；使用全球导航卫星系统卫星以及测量海面高度的卫星高度计，也可能有助于探测海啸。

然而，海啸预测存在若干不确定因素，例如对海洋活动断层缺乏准确了解、地震规模与海啸严重程度之间并无直接对应关系、对震源位置及其震级的估算存在不确定性，甚至缺乏有关地震当前震源的信息，即破裂范围、断层几何形态、滑动方向等。此外，还可能出现其他与海啸生成无关、但会影响电离层的异常现象。这些现象主要由外部因素引起，例如太阳辐射活动变化导致的电离差异、地磁暴，甚至在影响较小的情况下，强烈的气象过程也可能影响这一电离层。

为此，本文介绍的海啸预警系统通过利用全球导航卫星系统卫星监测电离层，并有望将 VARION方法整合到这些预警系统中，从而克服了大多数此类限制。特别是，下一节将讨论把该方法纳入西班牙海啸预警系统的可能性。

7. 西班牙海啸预警系统

历史上，伊比利亚半岛曾多次遭受海啸侵袭，尤其是伊比利亚半岛西南部的大西洋区域，如图8所示。

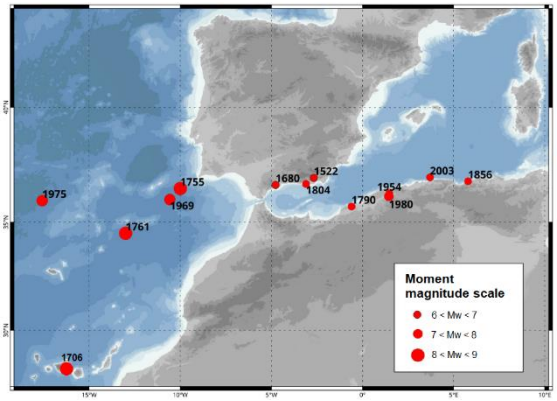


图8. 伊比利亚半岛历史上海啸分布。改编自 Cantavella（2021年）。

1755年，伊比利亚半岛海岸遭遇了有史以来规模最大的海啸。这场海啸发生在里斯本发生8.5级地震之后，这场灾难性地震被称为里斯本地震，席卷了葡萄牙和西班牙的多座城市，并造成数千人死亡。地震震中位于伊比利亚半岛西南方向的近海，处于亚速尔群岛—直布罗陀断层带内，由此产生的海浪在加的斯湾沿岸高达10至15米（Oliveira，2008年）。另一方面，地中海沿岸也发生过中等规模的海啸，地点靠近阿尔及利亚北岸，主要位于阿尔沃兰海及加的斯湾的断层带；西班牙面临的海啸威胁最大可能出现在这些区域（Aniel-Quiroga，2017年）。

鉴于这一背景，西班牙国家地理研究所（IGN）实施了西班牙海啸预警系统（STWS）[5]，该系统自2015年11月起投入运行。它由一套自动化流程组成，用于评估海啸是否可能影响西班牙海岸。这样，一旦出现海啸威胁，系统便会向国家民防部门发送警报信息，告知沿海不同地点的灾害等级估算、海啸预计强度以及抵达这些地点的预计时间。此外，西班牙的若干站点采集GPS卫星的多频数据，其他站点则跟踪来自其他卫星星座（格洛纳斯、伽利略和北斗）的多GNSS数据，从而帮助我们更好地分析电离层。此外，借助位于“埃尔阿雷诺西略”的电离层测高仪、对其提供的电离图进行分析，以及位于圣巴勃罗、圣费尔南多和圭马尔的地磁观测站，我们将能够辨别与海啸无关的电离层扰动源，例如地磁暴。

基于这些原因，我们提议在西班牙海啸预警系统（STWS）中实施并整合这一互补性的新方法——VARION方法，以便在海啸波抵达伊比利亚半岛海岸之前检测到海啸的发生。

[5] http://www.ign.es

需要指出的是，为了将海啸地震引发的电离层异常纳入海啸预警系统，研究人员分析了会在电离层中产生扰动的地震震级范围。Le等人（2011）指出，矩震级低于6的地震在总电子含量中引起的电离层扰动不太明显，会产生难以察觉的微小扰动，因而容易与地磁暴、强烈气象过程等其他事件混淆。

目前正在开展大量研究，以改进这些海啸早期预警系统，包括开发新的实现方案。根据Martire等人（2023年）的研究，GUARDIAN（全球导航卫星系统上层大气实时灾害信息与警报网络）系统是一款近实时（NRT）电离层监测软件，通过多全球导航卫星系统总电子含量测量来增强自然灾害早期预警。为推动这些举措，各方保持密切的国际合作，旨在降低灾害风险。例如，国际大地测量与地球物理学联合会设有一个名为地球物理风险与可持续发展（IUGG GeoRisk）的特别委员会[6]，致力于研究地球物理灾害和灾害防备。其次，国际大地测量学协会（IAG）下设全球大地测量观测系统地质灾害焦点小组[7]，以加强基于全球导航卫星系统的海啸早期预警系统（GTEWS）；此外，联合国的许多成员国依据《仙台减少灾害风险框架》开展合作，目标是提升灾害防备。

8. 结论

本文通过永久全球导航卫星系统站持续记录的总电子含量（TEC）测量数据，分析了海啸引起的电离层扰动。为探测海啸，我们采用了一种称为 VARION（实时电离层观测变分方法）的实时方法，该方法不受周跳影响，且计算耗时极短。该方法能够估算海啸发生期间的斜向TEC（STEC）时间序列，并监测电离层穿刺点（IPP）坐标最接近海啸源的全球导航卫星系统卫星。

我们在两个真实海啸案例中验证了该方法：一个是由地震引发、发生在东北地区的海啸；另一个是由火山喷发引发、发生在汤加的海啸。对图5和图6所示数值结果的分析证实，从破裂发生时起，斜向TEC时间序列出现了预期变化，反映出这些海啸造成的相应电离层扰动。

这种方法实施成本低，还能缩短事件确认时间，因为它利用了现有基础设施，例如全球导航卫星系统衍生数据，以及该区域用于监测电离层扰动的站点。因此，结合全球导航卫星系统卫星的集成与运行能力以及其全球导航卫星系统接收机的开发，我们提出了这一新方法，可将其整合到海啸预警系统（TWS）中，更具体地说，整合到西班牙海啸预警系统（STWS）中，作为一种辅助技术，补充现有方法，用于验证可能危及伊比利亚半岛的海啸灾害。

对于未来的研究方向，我们考虑利用全球导航卫星系统广播的实时数据，并结合潮位计、地震仪、浮标甚至全球导航卫星系统接收机等不同来源的实时数据，实现 VARION算法的自动化。通过环绕地球运行的多个卫星星座以及遍布全球的地基全球导航卫星系统接收机，可以获得大量无需额外成本的数据。因此，一旦在特定地点检测到事件，系统便会利用实时数据，处理海啸源附近多个可用站点的斜向总电子含量，以便在大气波到达电离层数分钟后，搜寻受扰的电离层信号。系统还会持续分析 RINEX 文件中有可用数据的站点、GPS卫星的轨道位置和钟差，并最终筛选出电离层穿刺点坐标位于距震源预设阈值范围内的站星对。基于上述原因，利用全球导航卫星系统实时监测电离层，可为自然灾害预警系统带来颇具价值的改进。

[6] https://iugg.org/associations-commissions/commissions/
[7] https://ggos.org/about/org/fa/geohazards/

参考文献

[1] Aniel-Quiroga, Í., González, M., Álvarez-Gómez, J. A., and García, P. (2017年): "西班牙海岸全国尺度的地震源海啸危险性地图"。欧洲地球科学联盟大会, 15970。

[2] Astafyeva, E.（2019年）：“自然灾害的电离层探测”。《地球物理学评论》，57(4)，1265-1288。

[3] Benedetti, E., Branzanti, M., Colosimo, G., Mazzoni, A. 和 Crespi, M.（2015年）：“VADASE：现状及全球导航卫星系统地震学第三条途径的新进展”。第八届*Hotine-Marussi*数学大地测量学研讨会，施普林格，查姆，59-66。

[4] Blewitt, G., Hammond, W. C., Kreemer, C., Plag, H. P., Stein, S. 和 Okal, E.（2009年）：“利用全球定位系统实时测定地震震源并为海啸预警系统提供支持”。《大地测量学杂志》，83(3)，335-343。

[5] Cantavella, J. V., Gaite, B., González, C., Naveiras, F., Ros, E., Sáenz de San Pedro, L.（2021年）：“《海啸风险国家民防计划》：评注版”，第一版——*2021*年*12*月出版。国家总行政管理局出版物目录。

[6] Denamiel, C., Vasylkevych, S., Žagar, N., Zemunik, P. 和 Vilibić, I.（2022年）：“洪加汤加—洪加哈派火山喷发之外行星尺度气象海啸波的破坏潜力”。《美国气象学会通报》。

[7] El-Gizawy, M. L.（2003年）：“利用全球定位系统测量为高纬度全球定位系统用户开发电离层监测技术”。卡尔加里大学，测绘工程系。

[8] Kamogawa, M., Orihara, Y., Tsurudome, C., Tomida, Y., Kanaya, T., Ikeda, D., Gusman, A.R., Kakinami, Y., Liu, J.Y. 和 Toyoda, A.（2016年）：“利用海啸电离层空洞观测构建天基海啸预警系统的可能性”。《科学报告》，6(1)，1-7。

[9] Kelley, M. C. (2009年)：“地球电离层：等离子体物理学与电动力学”。学术出版社。

[10] Le, H., Liu, J. Y., 和 Liu, L. (2011年)：“2002—2010年间736次6.0+ 级地震发生前电离层异常的统计分析”。《地球物理研究杂志：空间物理学》，116。

[11] Martire, L., Krishnamoorthy, S., Vergados, P., Romans, L.J., Szila´gyi, B., Meng, X., Anderson, J.L., Komja´thy, A. 和 Bar-Sever, Y.E. (2023年)：“GUARDIAN系统——全球导航卫星系统上层大气实时灾害信息与警报网络”。*GPS Solutions*，27(1)，1-13。

[12] Meinig, C., Stalin, S. E., Nakamura, A. I., 和 Milburn, H. B. (2005)：“实时深海海啸测量、监测与报告系统：NOAA DART II说明与披露”。*NOAA*，太平洋海洋环境实验室 *(PMEL)*，1-15。

[13] Meng, X., Komjathy, A., Verkhoglyadova, O. P., Yang, Y. M., Deng, Y. 和 Mannucci, A. J. (2015年)：“海啸-电离层耦合的全新物理建模方法：海啸-电离层模型”。《地球物理研究快报》，*42(12),* 4736-4744。

[14] Oliveira, C. S. (2008年)：“根据近期对历史观测的分析回顾1755年里斯本地震”。历史地震学，施普林格，多德雷赫特，261-300。

[15] Savastano, G., Komjathy, A., Verkhoglyadova, O., Mazzoni, A., Crespi, M., Wei, Y. 和 Mannucci, A. J. (2017年)：“使用独立全球导航卫星系统接收机实时探测海啸引发的电离层扰动：初步可行性验证”。《科学报告》，7(1)，1-10。

[16] Shibahara, S.（2011年）：“2011年东北地震与毁灭性海啸”。《东北大学实验医学杂志》，223(4)，305- 307。

[17] Subirana, J. S., Zornoza, J. J., 和 Hernández-Pajares, M.（2011年）：“地心地固坐标系与东-北-天坐标之间的转换”。https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations_之间_地心地固坐标系_和_东-北-天_坐标

[18] Teunissen, P. J., Montenbruck, O, 编者。（2017年）：“《施普林格全球导航卫星系统手册》”。施普林格国际出版社，纽约，美国，10, 978-3。