

引用格式：许龙霞，任焯，何雷，等. EGNSS 授时服务安全性发展综述[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 102-112.

EGNSS 授时服务安全性发展综述

许龙霞^{1,2}, 任焯^{1,2}, 何雷^{1,2}, 李孝辉^{1,2,3}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600 ;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要：时间广泛应用于各行各业，基于卫星导航系统的星基授时与时间同步技术是人们获取时间的主要方式。时间的重要性及卫星导航系统的固有脆弱性，使得授时安全性成为用户关注的重要因素。目前，国内尚未建立关于授时安全性的相关概念和体系。本文主要介绍 Galileo 授时服务扩展与整合项目在授时安全性方面的初步研究结果。首先，根据用户对时间精度的需求，将卫星导航系统提供的授时服务定义为 3 个等级，确定了授时服务安全性要求。从影响授时的各项因素出发，分析了不同等级的固有异常概率。最后，设计了消除授时异常的安全性架构体系，达到授时服务的安全性要求。该项目的研究思路和成果可为北斗卫星导航系统授时安全性定义和体系架构设计提供参考。

关键词：Galileo；授时；安全性；异常概率；风险

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-02-0102-11

Review of safety analysis of EGNSS time service

XU Long-xia^{1,2}, REN Ye^{1,2}, HE Lei^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2,3}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Time is widely used in various aspects of life. Time service and time synchronization technology based on navigation satellites are the important ways to access time. Considering the importance of time and the inherent vulnerability of satellite navigation system, the safety of time service becomes the main focus. At present, there are fewer studies on the concept and architecture about the safety of time service. This paper introduces the preliminary research results of Galileo timing service extension and consolidation project on safety of time service in European. Firstly, the time service provided by satellite navigation system is defined as three levels according to the user's requirement for time accuracy, then the safety requirements of time service are determined. And the inherent hazard probability of each level is analyzed while considered the factors that affect time service. Finally, the safety architecture is designed to eliminate failures. The research ideas and

收稿日期：2020-11-17；接受日期：2020-12-05

基金项目：国家自然科学基金面上资助项目（12073033）；中国科学院青年创新促进会资助项目（1188000XLX）；中国科学院“西部之光”人才培养计划西部青年学者资助项目（XAB2020YN07）

preliminary results can provide valuable reference for the definition and design of BDS timing safety.

Key words: Galileo; time service; safety; probability of failure; hazard

0 引言

时间因其特殊性广泛应用于电信、能源和金融领域,这些领域是支撑现代社会运行的重要部门,具有重要的战略意义^[1-4]。美国国土安全部第 21 号总统政策指令确定的 16 个关键行业中,通信、移动电话、电力分配、金融和信息技术等 11 个都依赖于精准的授时与时间同步技术^[5]。可见授时体系对于国家经济命脉以及国土安全至关重要。也正是因为此,美国继 1997 年提出“导航战”之后^[6],2017 年美空军提出“授时战”概念^[7]。仿照“导航战”的定义,“授时战”可以定义为阻止敌方使用卫星授时信息,保证己方和友方可以有效利用卫星授时信息,同时不影响战区以外区域和平利用卫星授时信息^[7]。

考虑到时间的重要性及其在各行各业的广泛应用,欧盟已将 Galileo 授时与时间同步服务独立为与定位同等重要的一项服务能力。欧盟最先开展了授时完好性的相关研究, Galileo 授时服务扩展与整合(Galileo Timing Service Extension and Consolidation, EGALITE)项目^[8]作为欧盟地平线 2020 计划的一部分,致力于研究开发基于 Galileo 的欧洲全球卫星导航系统(European Global Navigation Satellite System, EGNSS)授时服务。

授时完好性与导航完好性概念不同,导航完好性与生命安全密切相关,完好性概念是成熟的,具有精确的定义且可用量化参数描述。而实际中 GNSS (Global Navigation Satellite System)授时应用领域与生命安全的相关性不及导航紧密。对于与生命安全不太相关及新兴的应用,只有完好性需求,尚无授时完好性定义和量化表达方法,需要研究“授时完好性”概念。

GNSS 授时完好性是一个很宽泛的概念,不仅限于民用航空中的定义,还包括其他应用中的安全工程、质量保证与质量控制的概念,安全性分析是实现 GNSS 授时完好性的第一步。本文介绍了 EGALITE 项目的主要研究成果,该项目设计了系统级安全架构,展开分析了影响 GNSS 授时安全性的因素。从安全的角度分析了全球卫星导航系统提供授时服务的方法,分析了影响授时的各项风险及发生概率,研究了降低授时异常的消除机制,目的是基于安全架构定义 GNSS 授时服务^[9]。

1 基本假设与定义

欧盟提出的授时安全体系架构要求 GNSS 定时接收机满足如下假设条件:

GNSS 定时接收机连续运行,输出 Galileo/GPS 伪距,解析导航电文,输出标准 1 PPS 定时信号,电离层延迟采用单频模型或双频组合改正。

接收机可实时估计接收机钟差,且调节内部时钟输出至少 1 路秒脉冲信号,信号的上升沿与 GNSST (GNSS time) 或 UTC (Coordinate Universal Time) 对齐。

接收机可输出时标信息,采用 WN+TOW (week number + time of week) 形式表示 GNSST,或以 YYYY/MM/DD-HH:MM:SS (年月日时分秒) 表示的 UTC。

当应用于电信、电力和金融等关键基础设施行业时,要求 GNSS 定时接收机工作于静态、开阔环境中。

本文中 GNSS 指 GPS 和 Galileo。对于 GPS, GNSST 指 GPS 系统时间 GPST, GPS 播发的 UTC 物理实现为 UTC (USNO)。对于 Galileo, GNSST 指 Galileo 系统时间 GST, Galileo 播发的 UTC 物理实现为欧洲 5 个守时实验室保持的 UTC(*k*)时间尺度的平均。接收机从 GNSST 中减去闰秒数,再加上 GNSST 与

UTC (模 1 s) 之间的偏差预测值 (UTC offset prediction, UTC_{pre}) 就可以获得 UTC。

$$UTC = T_{GNSS} - l_{ps} + UTC_{pre}, \quad (1)$$

GNSS 导航电文播发闰秒 l_{ps} 和 UTC_{pre} 信息, 闰秒不影响 1 PPS 但影响 UTC TOD (time of day, TOD), UTC_{pre} 只影响 1 PPS 的产生。对于 GPS 和 Galileo, UTC_{pre} 值较小, 仅有几个纳秒。

1.1 正常授时服务状态的定义

考虑到用户当前及未来对时间精度的需求, 定义了 3 个不同的服务等级 (service level, SL) 和相应的最大容许误差 (maximum tolerable error, MTE), 如表 1 所示。此处“误差”是指通过接收 GNSS 信号获得的时间与 UTC 之间的偏差。

表 1 初步确定的最大容许误差

服务等级	最大容许误差 (MTE) / ns
SL1	1 000
SL2	100
SL3	10

1.2 异常授时服务状态的定义

根据上述正常授时服务状态的定义, 从定时接收机的输出来看, 当至少出现下列情况之一时可以认为出现了授时异常:

定时接收机输出的上升沿与 GNSST 或 UTC 对齐的 1 PPS 与参考 (GNSST 或 UTC) 1 PPS 的偏差超过相应服务等级定义的 MTE 值。

距 1 PPS 最近的整秒对应的 GNSST TOD (WN+TOW) 错误。

距 1 PPS 最近的整秒对应的 UTC TOD (YYYY/MM/DD-HH:MM:SS) 错误, 包括闰秒转换错误。

1.3 安全等级要求

文献[10]给出了安全异常严重等级的定义和量化要求, 示于表 2。

表 2 安全异常严重等级与量化要求^[1]

异常严重等级	量化安全要求 (异常次数/h)
灾难性	$P < 10^{-9}$
危险	$P < 10^{-7}$
重要	$P < 10^{-5}$
一般	无
无影响	无

考虑到时间应用的关键基础设施与生命安全相关性不大, 将 GNSS 授时异常的安全等级定为“重要”。该等级要求目标的最大异常概率低于 $10^{-5}/h$, 大约相当于每 11.4 年出现一次异常, 其中“异常”含义为 1.2 节定义的授时异常。

2 GNSS 授时安全性分析

在确定授时安全性等级后, GNSS 授时安全性分析的第一步为分析满足各服务等级 MTE 值前提下 EGNS 授时的“固有”异常概率, “固有”异常概率的含义为对预定义的 MTE 值无任何完好性保障或异

常消除措施下的异常发生概率。

当“固有”异常概率不超过 $10^{-5}/h$ 时，卫星导航系统授时是安全的，不需要采取任何措施。当“固有”异常概率大于 $10^{-5}/h$ ，为降低异常概率，需要采取消除措施。最简单的方法是排除故障卫星，可以通过在接收机端采用时间完好性监测算法（time receiver autonomous integrity monitoring, TRAIM），同时结合外部监测系统提供的附加信息来实现。若采取上述措施后，异常概率仍大于 $10^{-5}/h$ ，还需要考虑其他消除措施。

根据 GNSS 授时的过程，授时异常来源于两方面，一方面异常来源于接收机钟差（接收机时间与 GNSS 系统时间的偏差）。GNSS 授时较为特殊，大多数定时接收机采用位置保持模式，只需一颗卫星就可以确定接收机钟差。另一方面异常来源于 GNSS 时间到 UTC 的转换，GNSS TOD 到 UTC TOD 的转换及闰秒。

2.1 授时安全风险分析

为了识别影响授时的所有相关风险及其发生概率，开展了风险分析，基于各项异常风险确定卫星导航系统的“固有”异常概率。

2.1.1 确定风险发生概率的方法

在风险分析中，必须确定各服务等级下每种风险的发生概率^[11-12]。文献中的大多数风险可通过引入误差概率密度函数来描述：

不可能发生的授时异常：有些风险不可能发生，因此不可能引起授时异常。例如，无论是否修正电离层延迟，其引起的误差都不会导致 SL1（MTE = 1 000 ns）出现授时异常。因此，实际中只考虑可能会导致各服务等级出现授时异常的风险。

从未发生过的授时异常：对于从未发生过的授时异常，采用风险水平为 10^{-5} 的卡方分布检验确定其发生概率。

估计时段从 2000 年 5 月（选择可用性（selective availability, SA）结束）到现在，当检验时段内无异常发生时，采用下式约束单侧异常概率，基于公式（2）估计的最终异常概率为 6.91×10^{-5} 。

$$-\frac{\ln(\alpha)}{T} = \lambda, \quad (2)$$

式（2）中， α 是置信水平， T 是检验时长， λ 为异常概率值。

只发生过一次的授时异常：相同的方法也适用于授时异常只出现一次的情况，风险水平为 10^{-5} 时对应的异常概率为 8.55×10^{-5} 。对于一段时间内的检验，采用单侧置信水平下尾部确定异常概率：

$$\frac{\chi^2(\alpha, 2r+2)}{2T} = \lambda, \quad (3)$$

式（3）中， α 是置信水平（ $\alpha = 1 - \text{Risk}$ 风险概率）， T 是检验时长， λ 为异常概率值， r 为异常发生次数。

2.1.2 确定异常概率的假设条件

此外，对所有服务等级均假设：

接收机放置于开阔环境中。

位置已知时，伪距误差即授时误差。

位置未知时，需要考虑时间精度因子（time dilution of precision, TDOP）的影响。

TDOP 衡量钟差的不确定性。设 E_{CLK} 为钟差解误差，则定时解误差为：

$$S_{\text{CLK}} = E_{\text{CLK}} \times T_{\text{DOP}}. \quad (4)$$

根据文献[13]TDOP 最大值为 5，而 Galileo 系统最坏情况下的位置精度因子（position dilution precision，

PDOP) 值仅为 5。考虑到 TDOP = PDOP, TDOP 值取 5 是较为保守的。因此位置未知时, 约束用户端不能使用 DOP 值大于 4.5 的解。

当风险引起的误差至少低于服务等级 MTE 误差一个数量级时, 对该服务等级认为此时风险是不可能发生事件, 不考虑该风险。

当不约束风险引起的误差时, 该风险将以相同的概率影响各个服务等级。

硬件、电离层、卫星钟差和位置误差的异常概率后面讨论。

用户最终应使用 MOPS 对流层模型, 此时对流层残差可用标准方差为 0.46 m 的高斯分布描述。因此对流层延迟误差不可能引起各服务等级授时异常。

定时接收机排除载噪比 (C/N0) 低于 30 dBHz 的卫星, 消除性能下降的等效全向辐射功率对定时的影响。

为保证定时的可靠性, 要求定时接收机对应各服务等级的异常概率低于 $10^{-6}/h$ 。

2.1.3 硬件异常要求与概率

硬件异常定义为正常情况下伪距计算中出现的额外误差。额外是指此类事件会直接引起或与其他风险共同引起安全异常。需要根据服务等级确定相对于正常情况下的最大偏差。对于所有服务等级, 接收机硬件的异常概率均为 $10^{-6}/h$ 。可接受的硬件最大误差与服务等级有关, 每个等级对应的正常情况下的最大伪距误差为: SL1: 100 ns; SL2: 10 ns; SL3: 3 ns。

$10^{-6}/h$ 的硬件异常概率是符合目标最高安全概率的相对保守的先验要求。授时完好性监测站 (timing integrity monitoring stations, TIMS) 是确保符合目标的最高安全要求, 计算的最大概率主要由硬件异常概率引起。用户要选择和维护其硬件符合适于其应用的异常率, 或在不出最高安全要求的情况下适当放宽对硬件的要求。

对于 SL3, 硬件异常概率与 3 ns 相关, 要求定期校准接收终端。考虑到优于 3 ns 的校准精度较难实现, 将 SL3 最大伪距误差放宽至 5 ns。

2.1.4 最大误差预算

影响每个服务等级的主要误差项是不同的, 表 3 给出了接收机位置已知和未知情况下, 不同服务等级对应的硬件、电离层、星钟和卫星位置误差的最大预算值。

表 3 连续存在风险的安全误差预算

单位: ns

	总误差	硬件误差	电离层最大误差	星钟与卫星位置最大误差
SL1 位置已知	1 000	100	850	25
SL1 位置未知	1 000	100	170	25
SL2 位置已知	100	10	75	12
SL2 位置未知	100	10	0	12
SL3 位置已知	10	3	0	7
SL3 位置未知	10	3	0	2.3

2.1.5 星钟与卫星位置误差

对应每个服务等级, 使用空中信号测距误差 (signal in space range error, SISRE) 参数描述星钟与卫星位置误差的异常概率, Galileo SISRE 服从均值为 -0.14 m、标准方差为 1.06 m 的正态分布, GPS SISRE

服从均值为 -0.02 m 、标准方差为 0.778 m 的正态分布^[14]。为简化问题，以 Galileo SISRE 的概率分布确定星钟与卫星位置误差的边界。表 4 为位置已知和未知下各服务等级的星钟与卫星位置误差的异常概率。

表 4 星钟与卫星位置误差的异常概率（每颗星每小时）

	误差/ns	误差/m	Galileo 异常概率	GPS 异常概率
SL1 位置已知	25	7.5	2.85×10^{-13}	0
SL1 位置未知	25	7.5	2.85×10^{-13}	0
SL2 位置已知	12	7.5	2.09×10^{-4}	1.64×10^{-6}
SL2 位置未知	12	3.6	2.09×10^{-4}	1.64×10^{-6}
SL3 位置已知	7	2.1	1.73×10^{-2}	3.22×10^{-3}
SL3 位置未知	1.4	0.42	2.99×10^{-1}	2.86×10^{-1}

根据表中结果，可以得出以下结论：

SL1 位置已知和未知时，星钟和卫星位置误差的异常概率为 $2.85 \times 10^{-13}/(\text{h}\cdot\text{sat})$ ，远远低于 $10^{-6}/\text{h}$ ，此时星钟和卫星位置误差是不可能发生的。

SL3 位置未知时星钟和卫星位置误差的异常概率值很大，即使位置已知也很难满足安全性要求。为保障安全运行，在单星异常率为 $1.73 \times 10^{-2}/(\text{h}\cdot\text{sat})$ 时，组合使用 TIMS 授时完好性标识和 TRAIM 算法需要排除至少 3 颗异常卫星。

2.1.6 卫星异常概率到授时异常概率的转换

根据上述分析的各项风险概率可以计算授时异常概率，将卫星异常概率转换为授时异常概率。基于以下假设：

风险发生的概率是不相关的；

不同卫星发生风险的概率是不相关的；

基于伪距和导航电文采用 PVT 算法（无论是位置已知还是位置未知模式）确定授时解。对于 GPS/Galileo 组合定位，将 Galileo、GPS 系统时间偏差（Galileo GPS time offset, GGTO）作为一个未知数与 PVT 同时估计。

PVT 解算中需要基于多颗卫星观测数据确定接收机钟差，需要分析单星风险概率下估计授时解异常概率。设 p 为某外部风险事件引起的单星异常概率，对于给定的风险事件，该事件的无异常概率为 $1-p$ 。假设风险事件之间相互独立，则所有风险事件对应的无异常概率为 $(1-p)^N$ ， N 为卫星数。那么有任一事件的异常概率为 $1-(1-p)^N$ ，用牛顿二项式表示为

$$1-(1-p)^N = \sum_{k=1}^N \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} = \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} C_N^k p^k。 \quad (5)$$

二项式展开中的每一项 $P(k) = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k}$ 给出了 N 个风险事件中 k 个同时出现异常的概率。

2.1.7 使用 EGNOS 电离层信息的异常概率

EGNSS 授时系统可能使用 EGNOS 格网电离层信息改正电离层延迟，表 5 给出了各服务等级下是否使用 EGNOS 格网电离层垂直误差（grid ionospheric vertical error, GIVE）信息的情况。

表 5 各服务等级的 EGNOS 使用情况

GIVE 值/ns	GIVE 整数	SL1	SL2
<50	0~13	使用	使用
<150	14	使用	不使用
无约束	15	不使用	不使用

表 6 总结了参考值为 200 TECU (total electron content unit) 和实际值为 20 TECU 时 SL1 和 SL2 在位置已知和未知下的异常概率^[15]。典型垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC) 值在地方时夜晚的几个 TECU 到白天的几十个 TECU 之间变化, 电离层活跃剧烈时 VTEC 值可达 200 TECU。

表 6 电离层异常概率

	NEQU fixed	KLOB fixed	NEQU free	KLOB free	EGNOS GIVEi 0~13	EGNOS GIVEi 14	EGNOS GIVEi 15
SL1 200 VTEC	1.9×10^{-12}	1.55×10^{-5}	5.77×10^{-2}	1.72×10^{-1}	2×10^{-7}	2×10^{-7}	不使用
SL2 200 VTEC	2.44×10^{-1}	3.38×10^{-1}	4.52×10^{-1}	4.71×10^{-1}	2×10^{-7}	不使用	不使用
SL1 20 VTEC	0	0	0	0	2×10^{-7}	2×10^{-7}	不使用
SL2 20 VTEC	1.9×10^{-12}	1.55×10^{-5}	1.14×10^{-1}	2.35×10^{-1}	2×10^{-7}	不使用	不使用

表 6 中结果说明:

安全运行取决于电离层实际情况。在无增强系统的情况下, 电离层的实际情况可以满足 SL1 和 SL2 的安全性要求。

使用 NeQuick 模型改正电离层延迟可以实现严格的安全评估, 必须提供一个数学误差边界。

SL2 位置未知情况下要求用户使用 EGNOS 格网信息或双频组合改正电离层延迟。

SL3 仅限位置已知, 要求必须采用双频组合改正电离层延迟。

2.2 风险分析结论

基于上述风险事件的分析, GNSS 授时异常风险主要来自两方面, 一方面为 PVT 解算接收机钟差和 GNSST 及 GNSST TOD 的计算。另一方面为根据 GNSST 计算 UTC, 包括 GNSST 与 UTC 之间的偏差及 UTC TOD。此外, 接收机终端也会引入授时风险, 如接收机未校准。表 7 总结给出了授时相关的风险及属性。

表 7 卫星导航系统授时相关的风险

影响方面	风险标识	原因	产生影响	消除措施	影响 SL
GNSST	GNSST_FIX POS	用户位置错误	定时解出现固定偏差	PVT 检测 粗大误差	1,2,3
GNSST	GNSST_ORBI T_MANU	机动引起卫星 轨道预报错误	未约束机动引起的 伪距误差 ^[16]	TIMS, TRAIM	1,2,3
GNSST	GNSST_OSPF	Galileo OSPF 参考站 故障持续 1 d	单星座授时 系统的异常	TIMS	1,2,3
GNSST	GNSST_CLK_ MC	GNSST 不稳定导致卫星 钟预报出现误差	URE 出现较大误差	TIMS	1,2,3

续表 7

影响方面	风险标识	原因	产生影响	消除措施	影响 SL
GNSST	GNSST_CLK_SAT	卫星钟不稳定引起的星钟预报误差	URE 出现较大误差	TIMS, TRAIM	2,3
GNSST	GNSST_IONO	较大的电离层残差	改正后的 URE 中有较大误差	双频, NeQuick 或 EGNOS 改正电离层延迟	2
GNSST	GNSST_TROPO	出现较大的对流层残差	校正和不校正情况下误差均较大	MOPS ^[17]	-
GNSST	GNSST_CAL	接收机校准误差较大或未校准	URE 出现较大误差	接收机校准	1,2,3
GNSST	GNSST_TGD	卫星 TGD 出现偏差	URE 出现较大误差	TIMS	2,3
GNSST	GNSST_RNM	接收机噪声与多路径误差大	URE 出现较大误差	TRAIM	-
GNSST	GNSST_EIRP	EIRP 值降低	PVT 解算卫星丢失, 解的质量下降		1,2,3
GNSST	GNSST_HW	接收机硬件异常	伪距误差	接收机要求	1,2,3
GNSST	GNSST_TOD	错误的 GNSST TOD	GNSST TOD 错误	TIMS, NTP	1,2,3
UTC0	UTC0_BIAS	UTC 物理实现与 UTC 的偏差	用户 UTC 错误	TIMS	1,2,3
UTC0	UTC0_MOD	UTC0 错误, UTC0 模型参数出现错误	用户 UTC 错误	TIMS	1,2,3
UTC0	UTC0_INST	UTC0 错误, 地面 GNSS UTC 物理实现不稳定	用户 UTC 错误	TIMS	1,2,3
UTC0	UTCT_LEAP	GNSS TOD 到 UTC TOD 转换错误, 闰秒错误	用户 UTC 错误	TIMS, NTP	1,2,3
UTC0	UTC_LEAPANN	闰秒公告错误	用户 UTC 错误	TIMS, NTP	1,2,3

综合考虑表 7 中的各项风险, 表 8 给出了故障树分析得到的各服务等级的异常概率。1.3 节中要求授时的异常概率不超过 $10^{-5}/h$, 由表 8 的结果可以看出卫星导航系统的“固有”异常概率大于要求值。若不采取异常消除措施, 无法满足卫星导航系统各服务等级的要求。

表 8 授时异常概率总结

服务等级 (SL)	MTE/ns	固有异常概率
SL1	1 000	1.27×10^{-3}
SL2, 位置已知	100	3.01×10^{-3}
SL2, 位置未知	100	1.12×10^{-1}
SL3, 位置已知	10	1.23×10^{-1}

3 Galileo 授时服务的安全性体系架构

考虑到卫星导航系统“固有”授时异常概率不能满足安全性等级的要求, 需要采取授时异常的消除措施, 设计了安全体系架构, 图 1 所示为系统级 EGNSS 授时安全性架构。

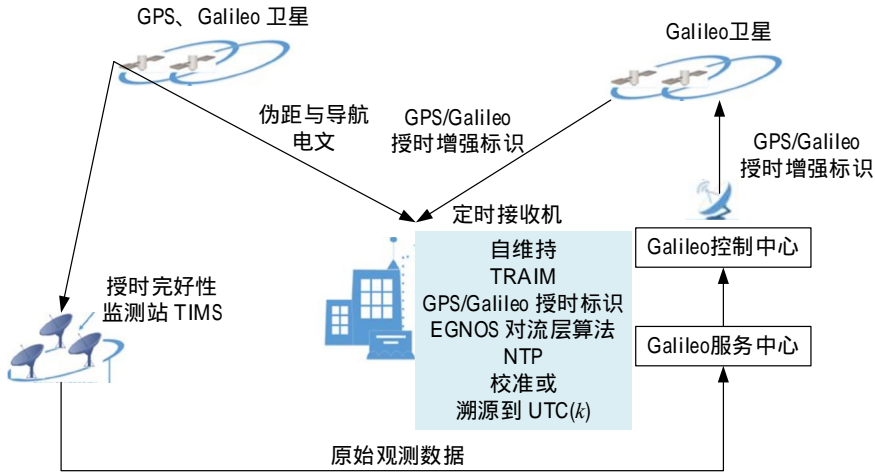


图 1 EGNSS 授时安全性架构

用户接收 Galileo 标准服务信号,获得伪距观测值和导航电文,同时接收 Galileo 空中信号获得 GNSS 授时增强信号。每颗 Galileo 卫星发播全星座卫星的授时增强标识信息。授时增强标识信息基于全球分布的 TIMS 观测数据确定。部分 TIMS 可接入外部 $UTC(k)$ 参考 1 PPS 和 10 MHz 信号,至少有 3 个 TIMS 位于 $UTC(k)$ 守时实验室,以 $UTC(k)$ 为真值实现 GNSS 授时的冗余比较。TIMS 产生的原始数据(伪距和导航电文)实时发送到 Galileo 服务中心,通过对原始数据进行处理生成 Galileo(GPS)授时增强标识,发送至 Galileo 控制中心,上行至卫星。Galileo(GPS)授时增强标识由 Galileo 卫星广播。

用户接收 Galileo 空中信号和 Galileo 授时增强标识,结合 TRAIM 算法和授时增强标识解算确定接收机钟差。一般地,接收机采用 TRAIM 算法可以排除大部分卫星异常,但仍然还需使用 TIMS 授时增强标识。根据 TIMS 标识,事先排除已知故障卫星,TRAIM 算法可以有效检测本地异常。TRAIM 无法检测星座共同偏差,尤其在接收机未经过校准时,TIMS 可以检测星座共同偏差,例如广播群延迟中的出现共同偏差。TRAIM 算法相对复杂,不一定所有的接收机都集成了该算法,接收机终端使用 TIMS 标识排除异常卫星较易实现。

在延迟改正算法方面,建议采用 EGNOS 电离层模型(对位置未知的 SL2 用户是最低要求)和 NeQuick 电离层模型(位置已知 SL1、SL2 用户)。推荐用户使用 EGNOS 对流层算法改正对流层延迟。推荐将 GNSS 授时信息与 NTP 进行互检。通过互联网使用网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)将 GNSS 授时信息与一台或多台 NTP 服务器连接,可以在几十毫秒量级验证 GNSS 授时信号的有效性,尤其是在整数秒量级验证 UTC TOD 的有效性。此外,需要对定时接收机进行校准,或溯源至 $UTC(k)$ 守时实验室。为实现连续监测,每个 TIMS 至少可视一颗 Galileo(GPS)卫星。

4 用户端采取鲁棒措施

在 Galileo 卫星导航电文中采用 2 bit 发播授时增强标识,对应当前 Galileo 卫星各服务等级的“使用/不使用”标志。此外,建议播发 VTEC 标识,覆盖 3 个经度带和 4 个纬度带,表示最大 VTEC 值是否超过 TIMS 监测数据的最大阈值。若不使用 EGNOS 模型改正电离层延迟,单频接收机将无法提供 SL2 服务。对于位置已知要提供 SL2 服务的无 EGNOS 电离层改正能力的单频用户,建议用户解析电文中的 VTEC 值,该值反映了最近几分钟内 TIMS 监测的全球电离层状态。若 VTEC 最大值标识表明有异常的电离层活动,建议用户切换到自主维持状态。

告警时间 (time to alert, TTA) 是衡量完好性的一项重要参数, 目前尚未根据用户需求定义告警时间, 需结合授时应用场景进一步研究。一般地授时应用领域无关生命安全, TTA 不是授时的关键因素, 一般授时应用中 TTA 值大约为几十分钟。用户端采取 TRAIM 算法, 结合 Galileo 导航电文正常更新的授时增强标识即可满足用户要求, 在几秒内实现告警的需求不大。表 9 给出了用户接收终端需要采取的鲁棒措施。

表 9 EGNSS 授时接收机端鲁棒措施

鲁棒措施	EGNSS 授时接收机类型	EGNSS 授时服务等级	措施属性	备注
校准	全部	SL2~3	强制	对于 SL2 以上服务需要定期校准
TRAIM	全部	全部	强制	有完好性要求的应用
GPS/Galileo 授时增强标识	全部	全部	强制	有完好性要求的应用
EGNOS 电离层改正	具有 EGNOS 处理能力的 Galileo 单频接收机	SL2	强制	适用于位置未知的单频 SL2 用户 对于非赤道地区用户 NeQuick 模型也是一种选择
EGNOS 对流层改正	全部	全部	强制	-
与 NTP 互检	全部	全部	建议	-
本地钟自主维持	全部	全部	强制	出现 GNSS 授时异常时将本地钟自主维持作为备份提高授时的可用性 当自动增益控制检测到干扰欺骗或
干扰检测	全部	全部	强制	TRAIM 监测到授时解异常或 NTP 互检失败时切换到本地钟自主维持模式

5 结语

基于设计的安全性架构, 用户端采取异常消除措施后, EGNSS 授时各服务等级的异常概率为 SL1 位置已知 1.01×10^{-6} ; SL2 位置已知 1.03×10^{-6} , 位置未知 1.05×10^{-6} ; SL3 位置已知 2.23×10^{-6} , 基本满足授时的安全性等级要求。

我国的北斗卫星导航系统星座刚刚部署完成, 国内在授时与时间同步方面的研究主要围绕性能的提升与改善。对授时与时间同步的完好性、鲁棒性方面的关注度不够。目前, 卫星导航系统提供的授时服务在精度方面可以满足绝大多数用户的需求, 越来越多的用户提出完好性要求, 要求提高授时服务的可靠性与鲁棒性。本文内容可为开展授时完好性相关的研究提供思路, 为应对“授时战”提供一种可能的途径。

参考文献:

- [1] YULLIS P. The world economy runs on GPS. It needs a backup plan[J/OL]. Bloomberg Businessweek. (2018-07-25)[2020-11-16]. <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-07-25/the-world-economy-runs-it-needs-a-backup-plan>.
- [2] LESLIE M. What if the global positioning system didn't work?[J]. Engineering, 2019, 5(6): 985-986.
- [3] BANERJEE P. Timing in GNSS-its importance and challenges[C]//2015 International Conference on Microwave & Photonics, India: IEEE, 2015.

- [4] O'CONNOR A C, GALLAHER M P, CLARK-SUTTON K, et al. Economic Benefits of the Global Positioning System (GPS)[K]. North Carolina: RTI International, 2019.
- [5] The White House Office of the Press Secretary. Presidential policy directive 21/PPD-21[EB/OL]. (2013-02-12)[2020-11-02]. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/presidential-policy-directive-critical-infrastructure-security-and-resil>.
- [6] CRAIG COVAULT. Navigation warfare[EB/OL]. (2010-11-01)[2020-11-02]. <https://www.defensemianetwork.com/stories/navigation-warfare/>.
- [7] 葛悦涛, 薛连莉. 美国导航战与授时战劣势分析[J]. 飞航导弹, 2020(6): 6-11.
- [8] FIDALGO J, PÍRIZ R, CEZÓN A, et al. Proposal for the definition of a Galileo timing service[C]//32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami: Institute of Navigation, 2019.
- [9] PÍRIZ R, BUENDÍA F, MARTÍN J R, et al. Safety analysis for a new GNSS timing service via Galileo[C]//32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami: Institute of Navigation, 2019.
- [10] BLANQUART J P, BIEBER P, DESCARGUES G, et al. Similarities and dissimilarities between safety levels and security levels[C]//Embedded Real Time Software and Systems, ERTS 2012 Toulouse: [s.n.], 2012.
- [11] HENG L, GAO G X, WALTER T, et al. GPS signal-in-space anomalies in the last decade: data mining of 400 000 000 GPS Navigation Messages[C]//Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2010), Portland: Institute of Navigation, 2010.
- [12] DYKE V, KOVACH K, LAVRAKAS J. Status update on GPS integrity failure modes and effects analysis[C]//Proceedings of the 2004 International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), San Diego: Institute of Navigation, 2004.
- [13] REID T, NEISH A M, WALTER T, et al. Broadband LEO constellations for navigation[J]. Navigation, 2018, 65(2): 205-220.
- [14] PEREA S, MEURER M, RIPPL M, et al. URA/SISA analysis for GPS and Galileo to support ARAIM[J]. Navigation, 2017, 64(2): 237-254.
- [15] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Systems[M]. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017.
- [16] TANG H, PULLEN S, ENGE P, et al. Ephemeris type a fault analysis and mitigation for LAAS[C]//Position Location & Navigation Symposium, Indian Wells: IEEE, 2010.
- [17] RTCA INC. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. DO-229D[R]. Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), Washington D C, 2006.