

第 11 次航行会议

2003 年 9 月 22 日至 10 月 3 日，蒙特利尔

议程项目 6：航空导航问题

全球导航卫星系统（GNSS）的脆弱性及其缓解办法 包括地面、机载和程序解决办法

（由秘书处提交）

摘要

本文件是以全球导航卫星系统（GNSSP）专家小组根据国际民航组织空中航行委员会的要求进行研究的成果为基础的。本文件指出了 GNSS 的脆弱性，建议采用适当的缓解办法，包括使用惯性导航系统、地面助航设施和相关程序。新的 GNSS 信号和卫星星座投入使用后，还会有另外一些缓解办法可供使用。本文件还建议各国评估本国空域的脆弱性问题，根据所涉空域空中交通的性质以及必须支持的运行情况选择缓解办法。缓解办法选用得当，可以保证向 GNSS 过渡中的安全运行，使各国得以减少地面导航设施现有的基础设施，避免提供新的地面导航设施。

迄今所有已经查明的脆弱性均不妨害朝向 GNSS 这个飞行各阶段的全球系统过渡的最终目标。

会议的行动在第 7 段。

1. 引言

1.1 GNSS 系统正在全世界崭露头角，它具有在整个导航领域实现安全和效率效益、进而满足飞行各个阶段的性能要求的潜力。随着 GNSS 运行的逐渐普及，服务提供者必须查明这一系统的脆弱性，制定出必要的缓解办法。本文件指出了 GNSS 存在的各种脆弱性和可以在适当时加以运用的相应缓解办法。在编写本文件时参考了其他几项脆弱性研究的成果，并考虑了其中的各项关注和建议。本文论及的大多数脆弱性是提供航空无线电导航服务的其他导航系统所共有的，但这些系统不属于本文件论述的范围。

2. GNSS 信号的脆弱性

2.1 干扰

2.1.1 由于 GNSS 的信号发自卫星而每个卫星的信号又覆盖着广袤的地球表面，所以收到的信号功率较低，GNSS 核心卫星星座和卫星增强系统（SBAS）发出的信号容易受到干扰。虽然地面增强系统（GBAS）的甚高频（VHF）数据广播较难受到干扰（其信号功率与地面导航设施相似），但 GBAS 依靠的还是核心卫星的信号。干扰信号仅限于视线式传播。例如，干扰区在地面以上 600 公尺（2000 英尺）处的，地面干扰源的传播范围必然局限在约 110 公里（60 海里）内。

2.1.2 关于 GNSS 的标准和建议措施（SARPs）要求在出现接收机干扰屏蔽所确定的干扰等级时，同时达到规定的性能等级。这些干扰等级一般都符合国际电信联盟（ITU）的规定。干扰超出屏蔽等级会造成服务的丧失，但不能允许这种干扰导致产生有害的或误导的信息。

2.1.3 非故意干扰 报告的大多数 GNSS 干扰事件都追溯到机载系统，而且安装 GNSS 的经验确定了非故意干扰的几个来源（如甚高频通信设备的寄生发射和谐波，以及卫星通信设备的频带外和寄生发射）。便携式电子装置也可以对 GNSS 和其他导航系统造成干扰。

2.1.3.1 目前，地面干扰源包括移动和定点甚高频通信，使用 GNSS 频带进行的点对点无线电链接，电视台谐波，以及某些雷达系统、移动卫星通信系统和军用系统等。发生这种干扰的可能性取决于国家对频谱的管理，以及每个国家或地区内的频率管理及执行情况。

2.1.4 故意干扰 由于 GNSS 信号功率低，使用低功率发射机来阻塞 GNSS 信号是可能的。虽然迄今尚无针对民用航空的故意干扰事件的记录，但故意干扰的可能性是必须加以考虑和评估的一种威胁。

2.2 电子欺骗

2.2.1 电子欺骗是指故意侵蚀导航信号，致使航空器发生偏离并沿着虚假的航迹飞行。对卫星 GNSS 信号进行电子欺骗，在技术上要比欺骗传统的地面导航设施复杂得多。欺骗 GBAS 数据广播的难度则与欺骗传统的着陆设施相当。

2.2.2 虽然电子欺骗在理论上可以对一架航空器产生误导航向的作用，但通过正常程序（如通过监视飞行航迹和至航路点的距离以及通过雷达监视等）发现这种情况的可能性是很大的。近地警告系统（GPWS）和机载防撞系统更为防止撞地和撞机提供了额外的保护。鉴于欺骗 GNSS 的难度以及在操作上似乎并不需要采取独特的缓解办法的事实，本文件对电子欺骗的论述到此为止。

2.3 大气效应

2.3.1 天降大雨对 GNSS 信号的冲淡作用仅为零点几个分贝，对运行毫无影响。对流层效应由系统设计解决，不构成脆弱性问题。但有两个电离层现象必须加以考虑：电离层发生急速巨变和电离层发生闪烁。电离层变化可引起量程误差，必须在系统设计时加以考虑。闪烁现象则可以造成一个或多个卫星的 GNSS 信号暂时消失。

2.4 其他脆弱性

2.4.1 GNSS 地面和空域扇区的脆弱性也必须加以考虑。某个星座由于维持整个星座的资源短缺，或者发生发射故障或卫星故障，可能出现卫星数量不足的风险。管制扇区故障或人为错误也可能导致一个星座的多颗卫星发生故障。

2.4.2 另一个风险是国家出现紧急状态时服务发生中断或减损，这时国家根据《国际民用航空公约》享有行动自由的权力（参见第 89 条）。如果信号遏制限制在某个特定区域，所有民用的 GNSS 信号都有可能被阻扰，不过受影响的空域反正会对民航交通关闭。另外一个不常发生的情况，就是核心星座或卫星增强信号在整个覆盖区域发生衰减或者遏制。

3. 评估 GNSS 运行中断的风险

3.1 在评估与 GNSS 脆弱性有关的运行风险时应该考虑两个主要方面的问题：

- a) GNSS 运行中断的可能性；和
- b) GNSS 运行中断的影响。

3.2 空中航行服务提供者把这些方面当作一个空域功能问题来加以考虑，就能确定是否需要采取缓解办法；如需要，达到何种程度。对于发生概率为中度至高度且具有重大影响的服务中断，必须采取缓解措施。

3.3 评估 GNSS 运行中断的可能性

干扰

3.3.1 非故意干扰 运行经验是评估这一风险的最好办法。发生非故意干扰的可能性通常与所处的地理位置有关。无线电频率（RF）干扰源密集的大城市、工业区等，比边远地区容易遭到非故意干扰。边远地区发生这种干扰的可能性极小。

3.3.2 故意干扰 各国在确定故意干扰的可能性时必须首先考虑对 GNSS 进行干扰的动机何在。驱使这种动机的可以是对一个地区潜在的损害和对航空和非航空应用产生了运行上的影响。如果影响至微，则无干扰之动机，潜在的威胁就小。随着 GNSS 应用范围的扩大和对 GNSS 依赖性的增强，潜在影响的程度也会随之增加。

大气效应（电离层）

3.3.3 地磁赤道附近经常可以观察到电离层发生急速巨变的情况，但其效应并非大到足以影响航路上直至非精密进近运行的程度。对于垂直引导进近（APV）和精密进近（PA）运行，这些变化的效应可以在设计增强系统时进行衡量和缓解。在赤道地区，使用 GNSS 单频的 APV 和 PA 运行的数量可能是有限的。

3.3.4 电离层闪烁对中纬度地带影响较大。在赤道地区，以及较小程度上在高纬度地带，电离层闪

烁可以导致一种或多种卫星信号的暂时丧失。赤道地区的运行经验表明，由于观测卫星的阵营较大，丧失现有 GNSS 服务的概率微乎其微。电离层闪烁可以阻断发自 SBAS 对地静止卫星（GEO）的广播的接收。

3.4 评估 GNSS 运行中断的影响

3.4.1 GNSS 运行中断对导航服务的影响取决于下述因素：

- a) 空域类型：纠正行动的时间选定对于航站区比对高纬度航路上空域更为关键，而对航路上空域而言，则对最低间隔标准较为严格的空域更为关键；
- b) 空中交通密集度：在交通高密度地区，由于工作量的缘故，依靠雷达引导或驾驶员程序可能不切实际；
- c) 服务等级：对于要求较低的运行，使用推测领航法也许就足以前进到有 GNSS 服务的区域；
- d) 有无可供使用的其他导航系统及其装备情况：有其他导航手段的航空器不受影响；
- e) 雷达监视：有一次雷达或二次雷达可供使用的，ATC 将得以提供更多的协助以保证间隔并引导至备降机场；
- f) 运行中断的程度：服务中断的地理范围和持续时间；
- g) 运行中断评估：空中航行服务提供者迅速评估服务中断程度的能力；和
- h) 天气条件：虽然在评估服务中断的影响时做出仪表气象条件（IMC）的假定不失为明智之举，但在任何分析中所假定的 IMC 地理范围和气象参数应该是现实的。

3.4.2 GNSS 运行中断对其他服务的影响也应该加以考虑。GNSS 常常被用作通信和雷达系统内精密定时情报的来源，而且还可以用于自动相关监视（ADS）服务。定时的脆弱性可以通过系统设计解决，ADS 的应用则不属于本文件的范围。

4. 减少 GNSS 运行中断的可能性

4.1 安装和运行

4.1.1 航空器上的干扰可以通过妥善安装 GNSS 设备、将其与航空器其他系统（如屏蔽、天线隔离和频带外滤波等）兼容连通，以及限制在航空器上使用便携式电子装置来加以预防。

4.2 频谱管理

4.2.1 频谱管理 有效的频谱管理是减轻来自人造发射装置的非故意干扰的主要手段。运行经验表明，实行有效的频谱管理可以将非故意干扰的威胁消除殆尽。有效的频谱管理包括三方面的内容：

- a) 制定管制频谱使用的法律/法规；
- b) 执行这些法律/法规；和
- c) 密切评估新的无线电频率（RF）源（新系统），确保其不对 GNSS 产生干扰。

4.2.2 干扰的发现和消除 不加拖延地发现和消除 GNSS 干扰源的能力，这是一个关键的方面。发现干扰的首要办法是通过驾驶员的报告。由于干扰最初发生时多架航空器可能会同时经历服务的中断，对服务中断采取自动报告的办法（如自动数据链电文）可以减轻工作量，有利于确定服务中断的区域及查明干扰源所在的位置。干扰探测系统可以装备在航空器上，也可以在地面装备。

4.3 新的信号和星座

4.3.1 新的信号和核心卫星星座将大幅减少 GNSS 的脆弱性。为 GPS、GLONASS 和 Galileo 规划使用的强信号和多频率将有效地消除非故意干扰的风险，因为这种干扰源同时影响一个以上频率的可能性极小。新增加的卫星（包括多个星座）将消除由于闪烁造成 GNSS 服务全面中断的风险，而多频率的使用则可减轻电离层变化的影响。未来的对地静止（GEO）卫星通过使用视线间隔至少为 45° 的卫星而减轻电离层对卫星增强系统的影响。GNSS 信号增强和新的频率使得故意干扰 GNSS 各项服务的难度增大。新增加的核心卫星星座可以降低系统故障、运行误差或服务中断的风险。此外，万一发生 GNSS 某个要素的提供者由于国家处于紧急状态而变更或拒绝服务的情况，这些星座仍能继续提供全球服务。

4.3.2 除国家发生紧急状态造成全球服务中断的可能性外，强有力的系统管理和供资是确保 GNSS 服务持续运行，减轻第 2.4 段所述系统脆弱性的关键所在。避免全球服务中断的一个有效办法，就是服务提供者在发生国家紧急状态时采取对特定区域遏制服务的政策。

5. 减轻 GNSS 服务中断的影响

5.1 引言

5.1.1 目前，有三种主要办法可以减轻 GNSS 服务中断对航空器运行的影响：

- a) 利用惯性导航系统和 GNSS 接收机技术的优势；
- b) 使用（驾驶员或空中交通管理的）程序办法；和
- c) 利用作为 GNSS 备份或与之一体化的地面无线电导航设施。

5.1.2 服务提供者采用本节介绍的一种或多种办法形成有效的策略，不仅能在发生 GNSS 服务中断时确保航空器安全运行，而且可以通过减轻潜在影响来打消故意干扰的企图。

5.2 惯性导航系统和接收机技术

5.2.1 惯性导航系统（INS）在 GNSS 或其他的位置更新功能丧失之后提供短期的区域导航能力。许多从事航空运输的航空器都已装备 INS 系统，而且这种惯性系统对于小型地区性航空器的经营人来

说，因其财力所能及而比较容易获得。因此，在作为 GNSS 服务中断的缓解办法评估对地面设施的需要的时候，应该将这项能力考虑进去。

5.2.2 另外，还有一些可以增加 GNSS 接收机强度，从而减轻干扰的技术。抗阻塞技术包括先进的天线（如空间零置（spatial nulling））和接收机信号处理技术。随着其费用下降，这些技术对小型航空器而言，可能成为比惯性导航系统更为便宜的替代技术。

5.3 程序办法

5.3.1 在非雷达空域，如果在 GNSS 服务发生中断而又无可用的其他导航系统的情况下，航空器可以改用推测领航办法，因为大多数新航空器的导航系统都具有自动推测领航能力。可能时，驾驶员可以转换成目视领航后撤离受影响区域或者在合适的机场降落。如果发生 GNSS 能力丧失，ATC 可以估计出丧失横向间隔的可能性，在可能时，可以用垂直间隔代替。

5.3.2 雷达空域也可以采用同样的程序，另有可能引导航空器通过受影响的地区，但这需要 ATC 视其工作量和受影响的航空器数量而定。对于许多现有的航站区的运行而言，航空器已经是在雷达引导下切入精密进近航迹的。

5.3.3 在无管制的非雷达空域，驾驶员可以通过空对空频道相互通信，以保持间隔并努力确定服务中断牵涉的地理范围。

5.3.4 依靠程序办法确保间隔和绕航的成败取决于第 3.4 段的所有因素。最重要的考虑是航空器装备另一种导航手段（如惯性导航）的程度。

5.3.5 各种程序和驾驶员、空中交通管制员的培训，应该针对 GNSS 的脆弱性，确定有效处理干扰和执行备用程序，以及报告干扰事件及其发生地点的方法。

5.4 地面无线电导航设施

5.4.1 目前，减轻 GNSS 服务中断影响最有效的办法，就是航空器恢复使用地面导航设施。随着向 GNSS 的过渡逐步完成，地面基础设施减少，将会日益依赖于其他的缓解技术。对地面基础设施所要求的运行能力，将随着 GNSS 运行逐步占据主导地位、空域和程序日渐倚重区域导航（RNAV）运行而发生变化。可以使用测距仪（DME）设施，为装备有使用多个测距仪的飞行管理系统的航空器，提供航路上和航站区运行的区域导航服务。如果 DME 的覆盖范围足够，这一同样的能力还可以用于 RNAV 进近运行。

5.4.2 属于回转性导航不提供 RNAV 能力的情况的，必须考虑过渡到备用航路和程序的工作量。但是，一旦开始了在备用航路上的运行，如果发生持续性干扰，这种运行仍然可以按需要长时间地继续进行。

5.4.3 如经确定需要备用的精密进近服务，可以使用仪表着陆系统（ILS）或微波着陆系统（MLS）。这就需要在机场或是在考虑的某个区域内保留数量敷用的这种系统。

6. 结论

6.1 非故意干扰 发生干扰的可能性及其对运行的影响因环境而异。只要各国对电磁频谱，包括现有的和新分配的频率，实行恰当的管制和保护，非故意干扰就不被视为一个大的威胁。此外，在新的频率上推出 GNSS 信号，可以确保非故意干扰不致造成 GNSS 服务的全面丧失。

6.2 故意干扰 有无故意干扰的风险，取决于国家必须正视的一些问题。如果国家确定某些特定地区的风险是不能接受的，可以采取有效的缓解策略，综合使用机上缓解技术（如使用 INS）、程序办法和地面导航设施确保安全和效率。

6.3 电离层 在赤道地区和极光地区发生电离层闪烁，可以造成 GNSS 卫星信号的丧失，但不太可能造成 GNSS 服务的完全丧失，而且在增加了新的 GNSS 信号和卫星之后其影响可以得到缓解。在赤道地区用单一的 GNSS 频率提供的 SBAS 和 GBAS 服务，可能由于电离层变化而受到限制，因此，在设计增强系统时必须考虑到这一点。

6.4 其他脆弱性 独立管理的星座和资金来源，加上强有力的系统设计，将会大幅减少系统故障、运行误差和服务中断的现象。

6.5 各国应该评估本国空域内 GNSS 的脆弱性，根据所涉空域以及需要支持的运行的情况选定合适的缓解办法。这些缓解办法可以在向 GNSS 的过渡中确保安全运行，促使各国免于提供新的地面导航设施，减少现有的地面导航设施，并在一些地区停止使用这些设施。迄今所有已经查明的脆弱性均不妨害朝向 GNSS 这个飞行各阶段的全球系统过渡的最终目标。

7. 会议的行动

7.1 请会议同意下述建议：

建议 6/A—关于缓解 GNSS 脆弱性的指导原则

各国在规划和实施 GNSS 服务的过程中：

- a) 评估本国空域可能有的 GNSS 脆弱性及其影响，并在必要时按照关于议程项目 6 的报告的有关附录中所载指导原则，使用其中概述的缓解办法；
- b) 实行有效的频谱管理和对 GNSS 频率的保护，以减少非故意干扰的可能性；
- c) 充分利用机上缓解技术，尤其是惯性导航；
- d) 作为向 GNSS 过渡的一部分，确实需要保留的地面导航设施，要优先保留 DME 以支持航路上和航站区运行的 INS/DME 或 DME/DME RNAV，并优先保留 ILS 或 MLS 以支持选定跑道上的精密进近运行；和
- e) 充分利用新的 GNSS 信号和星座未来对减少 GNSS 脆弱性的贡献。

建议 6/B—继续研究 GNSS 的干扰问题

为了协助各国减轻 GNSS 的脆弱性，ICAO：

- a) 对一些缔约国正在进行研究赤道地区的电离层效应，以便使增强系统能够减少电离层效应对单频 GNSS 运行的影响的成果做出评估；和
- b) 考虑将报告 GNSS 中断及确定中断范围的自动报告办法标准化。

附录

GNSS 脆弱性评估实例

关于评估 GNSS 服务中断的可能性和影响的指导意见载于本文件第 3 节。本附录提供将这一方法运用于现有的 GNSS 运行的两个实例。这些实例没有考虑未来的 GNSS 信号或星座。

1. 拥挤的空域 — 中纬度 以下实例适用于航空器运行高度密集的空域和实行有效频谱管理的中纬度地区现有的 GNSS 运行。

1.1 非故意干扰 在北美和欧洲遭遇过非故意干扰的情况。在北美，过去几年内，GPS 受到干扰经确认的次数为 7 次。根据运行经验，非故意干扰可能性很小，但不容忽视。

1.2 故意干扰 对当前的运行而言，没有故意干扰 GNSS 的明显动机。此外，迄今还从未有报告关于在民用环境下故意进行干扰的情况。对现有运行故意进行干扰的可能性微乎其微。但随着对 GNSS 的依赖性增强，故意干扰的威胁可能会适时发生变化。

1.3 干扰的影响 是造成干扰源视线范围内的 GNSS 服务发生中断。在这些地区的大多数航空器经营人都装备有惯性导航设施和/或具有 DME/DME RNAV 能力的飞行管理系统 (FMS)。大多数空域也有可供使用的 DME 设施。有些航空器虽然没有配备独立的 RNAV 能力，但这些航空器的安全无虑，可以继续运行，只是效率可能受损而已。因此，非故意干扰和故意干扰的影响都是非常有限的。

1.4 电子欺骗 发生电子欺骗的威胁不大，其影响非常有限。

1.5 电离层效应 在中纬度地区从未遭遇过电离层闪烁造成 GNSS 丧失定位功能的情况，所以发生这种事情的可能性是微乎其微的。由于这种现象发生时间短促，又有地面导航设施可供使用，而且使用这些设施的设备配套性很强，所以并不存在运行上的影响。

1.6 总结 表 1 总结了已经确定的各种脆弱性的可能性及其对运行的影响。该表对可能性和运行影响进行了比照。各国应该注意减轻的是那些可能性很小但影响严重，或是影响虽有限但发生的可能性很大的任何脆弱性。此外，还应该考虑可能性很小但影响居中的脆弱性。

2. 边远地区 — 赤道地区 以下实例适用于实行有效频谱管理的赤道地区航空器运行密度很低的边远空域中现有的 GNSS 运行。

2.1 非故意干扰 边远地区非故意干扰源的发生可能性普遍较小。加上有效的频谱管理，这些地区发生干扰的可能性微乎其微。由于没有可供使用的雷达服务，服务中断的影响可以是居中到严重不等。

2.2 故意干扰 没有遇到故意干扰的情况；由于地处边远，运行密度低，并不存在对 GNSS 故意进行干扰的明显动机。对现有运行进行故意干扰的可能性被认为是小之又小的。但随着对 GNSS 的依赖性增强，故意干扰的威胁可能会适时发生变化。故意干扰的影响与非故意干扰相同。

2.3 电子欺骗 发生电子欺骗的威胁不大，其影响有限。

附录

2.4 电离层效应 在赤道地区有可能发生影响 GNSS 性能的电离层闪烁。但其对运行的影响居中，因为它通常只会造成性能的减弱，而不会引起导航能力完全丧失。即便发生定位功能完全丧失的情况，其延续的时间也不会很长，运行密度低能够确保持续安全。

2.5 总结 表 2 总结了已经确定的各种脆弱性的可能性及其对运行的影响。最大的问题是电离层闪烁的潜在风险。各国应该采取行动减轻这一效应的影响。具体办法是：

- a) 执行 GNSS 服务发生短期中断时可以确保继续运行的运行程序；和
- b) 对严重闪烁的持续时间和可能性继续进行研究。

表 1 拥塞的空域 — 中纬度

		运行影响		
		无影响	影响居中	影响严重
可能性	极微小	电离层效应	故意干扰； 电子欺骗；	
	很小		非故意干扰	
	很大			

表 2 边远地区 — 赤道地区

		运行影响		
		无影响	影响居中	影响严重
可能性	极微小		非故意干扰 和故意干扰； 电子欺骗；	
	很小			
	很大		电离层效应	

3. 如果分析表明不存在关键的脆弱性，执行频谱管理措施对于尽可能减少服务中断的发生仍然是至关重要的。

参考资料

- [1] Interference Assessment of GPS, Working Paper 91 and Information Paper 119, Special Communication/Operational Divisional Meeting, 1995.
- [2] GPS Mitigation Techniques, Information Paper 120, Special Communication/Operational Divisional Meeting, 1995.
- [2] RTCA/DO-235, Assessment of Radio Frequency Interference Relevant to the GNSS, 27 January 1995.

- [3] GPS Risk Assessment Study, Final Report, published by the Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, January 1999.
- [4] Vulnerability Assessment of the Transportation Infrastructure Relying on the Global Positioning System, Final Report, published by the Volpe National Transportation System Center, 29 August 2001.
- [5] Impact on Compatibility of UK Commercial Services Resulting from Loss of GPS Signals, Qinetiq, October 2001, commissioned by the UK Radio Agency.
- [6] Ionospheric Research Issues for SBAS, SBAS Ionospheric Working Group, September, 2002.

— 完 —