

【专题一】卫星导航系统性能指标体系

——概 述

1 引言

独立的全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 是建设强大国防、维护国家安全的重要手段, 具有重要战略意义。自美国全球定位系统 (GPS) 出现以来, 卫星导航技术在军用和民用领域发挥着越来越重要的作用。出于军事安全以及商业利益的考虑, 世界主要军事大国及经济体都已经或正在发展自己的导航系统, 目前已经建成或正在建设的全球卫星导航系统有美国 GPS 系统、俄罗斯 GLONASS 系统, 欧盟 Galileo 系统和我国北斗卫星导航系统 (BDS), 此外, 日本的准天顶卫星导航系统 (QZSS)、印度的区域卫星导航系统 (IRNSS) 也是正在发展的具有各自特色的区域卫星导航系统。在如此竞争激烈的导航应用中脱颖而出的制胜法宝无疑就是提供高性能的系统服务, 因此卫星导航系统性能已经成为卫星导航应用领域竞争的制高点, 现在对于性能的关注已经超越以往任何一个阶段。

随着 GNSS 及其相关技术的快速发展, 不仅促使性能指标得到了发展, 由性能指标构成的评价体系也逐渐得到了发展和完善, 目前民用航空界所公认的用来评价卫星导航系统性能的指标参数是国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 提出的航空无线电导航必备性能 RNP (Required Navigation Performance), 主要包括精度、完好性、连续性和可用性四大性能指标。四大性能指标中, 精度一直都受到重视, 国内外都已开展了深入研究, 但对于完好性 (包括可用性、连续性) 在导航系统建设的初期并没有受到充分重视, 然而在使用过程中却表现出极其重要的作用, 尤其是对导航定位系统完好性要求较高的领域, 如民用航空导航、战机导航以及武器制导等方面。因此, 正在建设中的 GNSS 系统如 Galileo、“北斗二代”等, 以及在 GPS、GLONASS 现代改进中, 都将系统性能指标检测与评估作为关键内容之一。

2 GNSS 性能指标体系发展过程

目前四大卫星导航系统中，GPS 发展最为成熟，也是最早开展导航系统性能评估的，其特点是既继承了无线电导航领域（在 GPS 之前主要是陆基无线电导航导航）的部分用以评定精度的一般方法，又在此基础上根据卫星导航系统本身的一些特点发展或者修改了部分指标的定义。初步的性能评估理论与算法以及结果体现在 1993 年第一版的 GPS 标准定位服务性能标准（GPS Standard Positioning Service Performance Standard，简称 GPS SPS PS）文档中，而后又相继发布新版本对性能评估标准做了部分修订，从图 2-1 中可清楚看出 SPS PS 文件中性能指标体系的演变过程。随着 GPS 系统的相关理论和技术的快速发展，系统性能水平和性能评估理论都在不断地完善。

GPS SPS PS 已经建立了一套比较完善的卫星导航系统性能评估体系，已成为卫星导航系统标准定位性能评估的标准，除此之外，美国防部发布的 PNT 政策报告、美国交通部发布的 GPS 民用监测性能标准以及国际民航组织发布的 GNSS 必备导航性能说明等官方正式文献都对 GPS 的性能概念、性能标准进行了全面说明和给出了相应的指标，初步形成了相对完整的卫星导航性能评估指标体系。

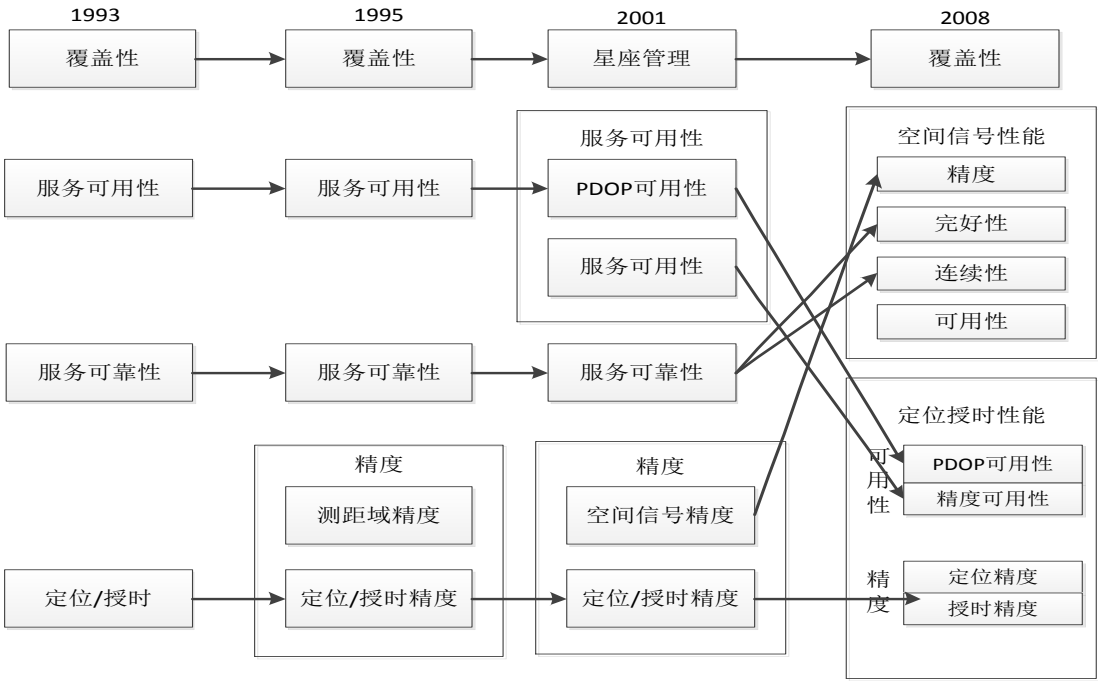


图 2-1 GPS SPS PS 标准定位性能指标体系演变图

3 GNSS 性能指标体系概述

精度、完好性、连续性和可用性这四大性能指标反映了卫星导航系统的基本性能,因此,可称为基础性能指标,随着新型卫星导航系统以及相关技术的发展,用户还提出了更多、更高的性能需求,统称为高维性能,包括导航系统的自主导航能力、安全性以及系统之间的兼容与互操作性等。

从不同的视角出发,卫星导航的系统性能描述也不同。从系统建设和维护的角度,卫星导航系统的性能与系统的组成部分密切相关,目前卫星导航系统的性能体系可以用图 3-1 来描述。而对于用户而言,最为关心系统的服务性能,不需要从星座和信号层面对系统性能进行关注。因此,从用户的角度,卫星导航系统的性能体系可以用图 3-2 来描述。对比两图可发现,卫星导航系统的服务性能取决于星座性能和 SIS (Signal-In-Space, 空间信号)性能的综合作用。

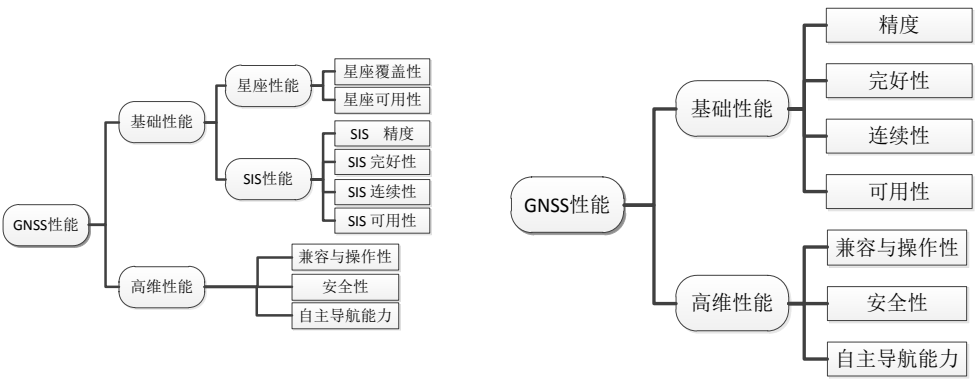


图 3- 1 卫星导航系统性能体系（一）

图 3- 2 卫星导航系统性能体系（二）

图 3-1 和图 3-2 中仅列出了部分高维性能。可以预计,随着新的卫星导航应用模式、对卫星导航新的性能需求以及新的相关技术的发展,还会产生很多新的高维性能。然而,必须清楚,一方面高维性能离不开基础性能,另一方面高维性能对基础性能具有一定影响,同时高维性能之间也会通过某种作用而发生性能改善和提升。例如,考虑了系统间兼容与互操作之后的基础性能各项指标应该具有全新的概念和含义。因此,从这个角度讲,卫星导航系统的性能及其描述指标都会在不久的将来发生新的变化。

4 四大性能指标概念

4.1 精度

精度是指 GNSS 系统为载体所提供的位置和载体当时真实位置的重合度。除了定位精度外，GNSS 导航的精度还包括测速精度和授时精度。

4.2 完好性

完好性指的是 GNSS 在使用过程中，发生故障或性能变坏所导致的误差超过可能接受的限定值（告警阈值）时，为用户提供及时、有效告警信息的能力。它包括两方面的涵义，一是对于超过告警阈值的故障都要在给定的告警时间内提出报警；二是对于导航位置信息超过了告警阈值，而该事件被漏检的概率（也称为完好性风险）。因此卫星导航系统的完好性可用三个量化参数来描述：告警阈值、告警时间和完好性风险。

4.3 连续性

连续性是指 GNSS 系统在给定的使用条件下及规定的时间内，维持规定性能的概率。GNSS 提供的连续性级别，随着给定应用所规定的性能要求的不同而不同，例如，对一个低精度的时间测量来说，连续性级别要比飞机精密进近的连续性级别低得多，前者只需要一颗可见星，而后者至少需要 5 颗几何分布良好的可见星才能支持完好性监测。

4.4 可用性

指的是 GNSS 系统能为载体提供可用的导航服务的时间的百分比。可用性是系统在某一指定覆盖区域内提供可以使用的导航服务的能力和标志。可以使用的导航服务，是满足一定导航定位精度，同时还满足系统完好性要求的。

某一特定位置、特定时间的 GNSS 可用性，通常与卫星的可见星数、几何分布等有关。

5 性能指标评估模型

四个性能指标在本质上是具有紧密的内在联系的，其中任一性能指标的变化都会影响其他状态。高精度的要求是导航系统为航空飞行提供完好性与连续性的可靠保证；完好性要求导航系统在规定的时间内检测且识别任何故障，避免危及到航空安全；连续性和完好性是一对矛盾体，要求所有告警率要很小；可用性是导航系统工作时为航空飞行定位提供规定精度、完好性和连续性的综合。为了表

述四个基础性能指标之间的关系，K. Kovach 给出了两种模型：球壳模型和金字塔模型两种，如图 5-1 和图 5-2 所示；李作虎在此基础上提出了平行递进模型，如图 5-3 所示。

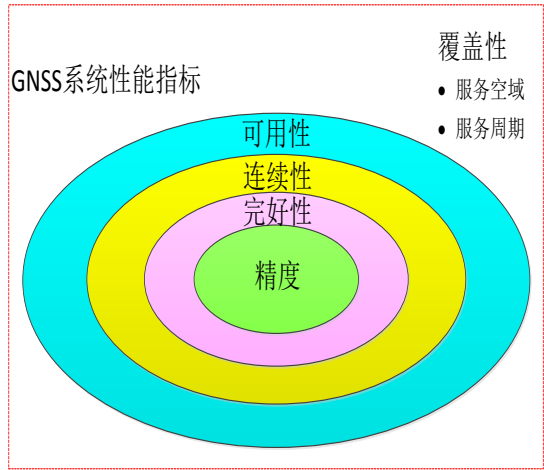


图 5- 1 球壳模型

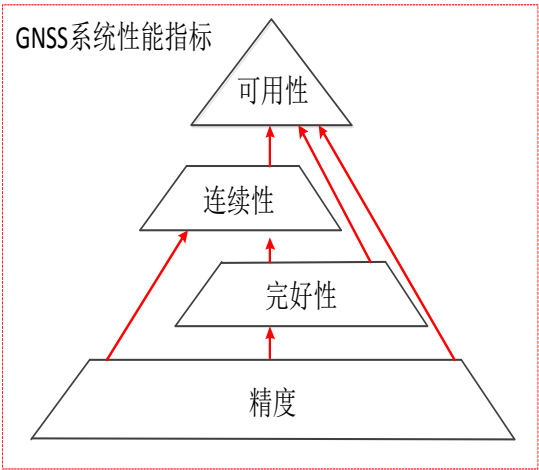


图 5-2 金字塔模型

球壳模型表明，外层性能指标包括内层性能指标，向内包含和向外扩展是四个指标之间最明显的关系。以可用性指标为例，可用性首先直接包含连续性，即只有在连续性满足的基础上可用性才可满足。而同理可得其他类似的关系。该模型一方面描述了四个性能指标的层层包含关系，另一方面也体现了内层性能指标的基础和核心地位，特别是精度指标，构成了整个球壳模型的核心，形象地展现了精度是所有卫星导航系统提供的最基本的服务和功能。另外需要注意的是，所有的性能指标及其关系都基于一定的服务空域和服务周期的，这也是该模型的重要功能与特点之一。

依据球壳模型，四大性能指标除了精度之外都不是独立指标，只有与内层参数一起才具有意义。但与内层参数之间的准确关系并没有细化明确。图 5-2 所示的金字塔模型准确表明了这一关系。金字塔模型从另外一个角度描述了四大性能指标之间的层次关系和相互联系，特别是参数之间的联系描述更为具体。根据该模型，精度与其他每个性能指标之间都建立了联系，并且这种联系包括直接联系和间接联系两种。精度与可用性之间有直接联系，形成了精度的可用性概念，而精度与可用性之间还有间接联系，可以产生精度的完好性的连续性的可用性概念。后者显得较为复杂，而且在性能分析和评估时也很难予以准确描述。

金字塔模型除了这种具体关系之外，也形象地描述了精度的基础地位。精度

位于金字塔底，构成了其他性能指标的基础，也就是说其他性能指标可以视为精度指标的扩展。不仅如此，该模型还展示了性能指标间的层次关系。可用性位于模型的最顶层，一方面说明可用性的向下包容性，另一方面也说明了可用性的综合性。

基于金字塔模型，可用性可以从以下两个层次去理解。其一，只有卫星导航系统在满足精度、完好性和连续性时，系统才是可用的，即可认为可用性具有一定的条件性。这种理解层次较高，性能分析和评估亦较复杂。其二，将可用性具体化，即具体化为精度的可用性、完好性的可用性和连续性的可用性。

球壳模型和金字塔模型指标间的部分关系缺乏严密推理，无法形成科学合理的扩展概念，同时也无法为指标评估方法的具体实现提供支撑。图 5-3 的平行递进模型将四大性能指标分为基础性能层和扩展性能层，基础性能层包括精度和完好性，扩展性能层包括连续性和可用性，这种平行递进模型的分层方式有以下几个优势：

- 1) 明确了同层之间的关系。精度和完好性都属于基础性能，是卫星导航系统应该具备的基本功能，在地位上是相同的；连续性和可用性属于扩展性能，是对基础性能在时域和空域上的统计性能，是对基础性能的一种扩展和递进。
- 2) 明确了层次之间的关系，精度与连续性和可用性之间都存在直接关系，完好性与连续性和可用性之间也都存在直接关系。
- 3) 该模型明确了具体指标间的扩展性和递进性，更符合 GNSS 的精度和完好性与系统建设更为密切，连续性和可用性与系统运维管理更为密切的事实。

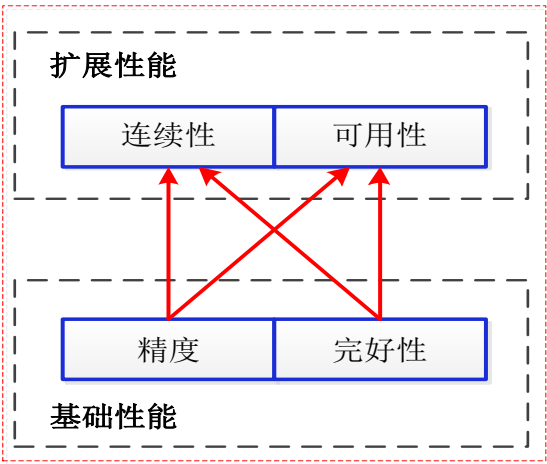


图 5-3 平行递进模型

基于“平行递进模型”，自然会有精度的连续性和精度的可用性概念，同理也会有完好性的连续性和完好性的可用性概念。下面我们以完好性为例来说明该模型产生的扩展概念的具体含义。

连续性，顾名思义，指的是系统正常工作提供既定性能服务的持续能力。完好性的连续性即指卫星导航系统正常工作提供完好性服务的持续能力；具体来讲，就是在评估周期内卫星导航系统完好性故障发生的频度。可用性，指的是系统正常工作提供既定性能服务的时间百分比。完好性的可用性即指卫星导航系统正常工作提供完好性服务的时间百分比，具体来讲，就是在评估周期内卫星导航系统完好性故障持续时间所占的比率。从故障的角度讲，在一定评估周期内，完好性故障导致系统损失完好性而产生完好性风险的事件肯定会对系统的完好性的连续性和完好性的可用性产生影响。其中，完好性损失事件发生的频率会对完好性的连续性产生影响，而完好性事件持续的总时间会对完好性的可用性产生影响。这就是完好性的连续性和完好性的可用性之间的差异。这种差异也表明，完好性的连续性和完好性的可用性分别从不同的角度对完好性进行了描述，丰富和扩展了完好性概念。同理，精度的连续性和精度的可用性亦可以通过上述方法予以分析和说明，并可得到相似的结论。

上述分析同时也说明了连续性和可用性之间的共性以及精度和完好性之间的共性，从另一个角度论证了“平行递进模型”的合理性。不仅如此，上述分析还说明了精度和完好性扩展性能的评估方法，而且评估方法类似，都是对精度和完好性在时域和空域上的对于故障发生的频度和持续时间的统计分析，这也从另外一个角度论证了“平行递进模型”的合理性，而相关的评估方法在后续的专题中会做详细介绍。

参考文献

- [1] 宋小勇. COMPASS 导航卫星定轨研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
- [2] 杨宇. GNSS 中星间链路分配方法的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [3] 陈倩. 卫星定位应用系统及标准展望[J]. 信息技术与标准化, 2004(5):4-6.
- [4] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D]. 北京:解放军信息工程大学, 2012.
- [5] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉:武汉大学, 2013.
- [6] 刘海颖、王惠南、陈志明. 卫星导航原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.