

687404

5941

7/4684



[美] B. W. 帕金森 等编著

# 导航星全球定位系统

41

4684

测绘出版社

科技新书目

(47—185)

15039·新264

定 价：2.15 元

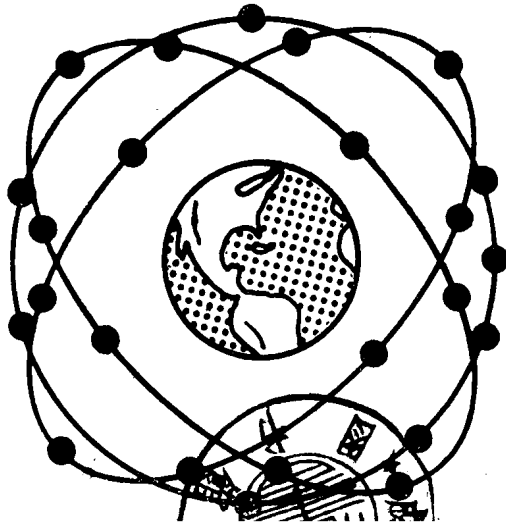
[美]B.W.帕金森等编著

曲广吉 余明生

赵正才 傅德棣 译

王广俊

# 导航星全球定位系统



测绘出版社

全书共分五部分。主要介绍了美国导航星全球定位系统的工作原理、系统特点、卫星技术、地面台站、用户设备、使用操作和广泛应用；该系统由24颗卫星组成，能在全球范围内连续、实时地提供高精度的三维位置、三维速度和精确时间信息。第一部分概述了全球定位系统的发展状况、工作原理、系统特点和试验计划。第二部分详细描述了卫星系统的星上频率标准、导航信号结构和性能特点以及导航电文设计等有关技术。第三部分介绍了由监控站、注入站和主控站组成的地面控制部分的有关技术以及星历和时钟的预报误差、用户误差分析等。第四部分专述了全球定位系统的用户设备，包括接收设备的设计要求、系统组成、性能特点、试验鉴定、操作使用、定位计算、误差分析和改进设计的技术途径。第五部分阐述了全球定位系统的广泛应用，如舰船导航、飞机导航、与惯导组成综合导航系统以及廉价接收机的导航算法等。第二部分卫星部分和第四部分用户设备部分是本书的重点。此外，译序部分对导航星全球定位系统作了较全面系统的综述和讨论。本书可供从事导航卫星设计以及用卫星进行导航定位的广大军民用户的科技人员和高等院校师生参考。

## The NAVSTAR/Global Positioning System

Navigation Journal of The Institute of Navigation, Summer 1978, Volume 25, Number 2

### 导航星全球定位系统

[美]B.W.帕金森 等编著  
曲广吉 余明生 赵正才  
傅德棣 王广俊 译

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 14·字数 323 千字

1983年7月第一版·1983年7月第一次印刷

印数 1—2,000 册·定价 2.15 元

统一书号：15039·新 264

## 译 序

利用人造地球卫星给海上舰船、空中飞机、地面各种用户和目标、飞行中的导弹及卫星飞船进行导航定位，这在卫星应用中占有极其重要的地位。二十多年来，卫星导航技术获得了飞速发展。第一代导航卫星子午仪经历了研究、试验、实用和改进等阶段，今天已成为美国唯一实用的导航卫星系统。目前，美国正在研制试验第二代导航卫星工程——导航星全球定位系统，预计八十年代中后期能组网实用。该系统一旦投入使用，必将大大改善美国陆海空三军和民间用户的导航能力，在世界导航技术发展史上也将写下崭新的篇章。因此，已经引起许多国家的广泛注意和研究。为了使读者更好地理解《导航星全球定位系统》的内容，下面根据本书有关资料和最近一些期刊杂志的报导，就全球定位系统的主要特点、导航方法、系统组成、卫星构造、研制计划、广泛应用和关键技术预先研究等问题作一简要的综述和讨论。

### 一、系统主要特点

人造卫星用于导航的优点已由美国第一代导航卫星子午仪的广泛应用而充分显示出来了。子午仪是低高度导航卫星，它采用上千公里极轨道和双频多普勒测速导航体制。这个由4~5颗卫星组成的导航网，可在全球范围内给核潜艇、导弹测量船、各类海面舰船和海洋考查船进行全天候的高精度的断续的两维定位；此外，还广泛用于海洋石油勘探船的定位、大地测量和卫星授时等。定位精度一般优于40米。但是，由于子午仪在通常情况下只能提供两维定位信息（即经度和纬度），而不能定出高度，同时也不能连续地进行导航，因此，这就大大限制了象飞机之类高动态用户的使用；就是对舰船来说，也只能作为高精度辅助导航手段对惯导系统进行断续的精确修正；另外，从定位精度来看，也受到多普勒测速导航体制本身的限制，尤其是一次定位要用8~10分钟左右，这样洋流的影响也会大大降低航速的测量精度。

为了满足陆海空三军武装部队和民间用户对导航越来越高的要求，继子午仪之后，美国于六十年代后期又提出几种不同的新导航卫星系统，并开展了试验研究，直到一九七三年美国国防部才正式批准陆海空三军共同研制导航星全球定位系统。该系统的主要特点概述如下：

1. **全球连续覆盖** 该系统能为全球任何地点或近地空间的用户提供连续的全球导航能力；而子午仪只能进行断续定位，平均定位间隔为1.5小时左右。

2. **高精度三维定位** 该系统能连续地为各类用户提供三维位置、三维速度和精确时间信息，与子午仪相比，不但能定出经纬度，而且还能给出高度，同时定位精度有可能提高一个数量级。试验表明，定位精度优于10米，测速精度优于0.1米/秒，计时精度优于

10 毫微秒（相对全球定位系统计时系统），而相对协调时（UTC）的授时精度优于 1 微秒，将来有可能提高到 100 毫微秒。

3. **近乎实时导航** 该系统一次定位时间只要几秒至多几十秒就可以完成，这对高动态用户具有很大意义；而子午仪一次定位需要 8~10 分钟左右，这对飞机来说，定位期间飞机飞行距离可达几十乃至几百公里，加上不能给出高度信息，因此子午仪不适用于飞机导航。

4. **抗干扰能力强** 由于采用了伪随机噪声码技术，虽然导航信号被埋在强噪声之中，也就是导航信号表面看来是随机噪声信号，然而实际上都是由预先确定的数学公式经过编码而产生的信号，借助于很强的自相关特性，因此具有抗干扰能力强、保密性好的优点。

5. **被动式全天候导航** 用户只需装备接收设备就可以接收该系统信号进行导航和定位，而不要求用户发射任何信号，这种被动式导航不但隐蔽性好，而且可容纳无数用户。

6. **通用全球导航系统** 这一点也许是全球定位系统的最重要特点之一。由于子午仪只能作为辅助导航手段为舰船等用户提供断续定位，所以，用户还必须装备其它连续提供导航信号的设备，如惯导系统等。而全球定位系统能向全球任何地点和近地空间的用户独立地提供连续的高精度导航信息，并给出用户在全球定位系统坐标系中的位置、速度和时间，因此，该系统能克服其它各种导航手段的局限性，甚至取代其它各类导航系统，而成为未来真正独立的通用全球导航系统。也就是说，任何用户只要装备导航星接收设备就能在全球范围内航行，这就有可能从根本上解决各种导航设备种类繁多和费用不断增加的问题。

7. **地面控制站全部设在国内** 这就克服了覆盖全球的同步导航星座需要在国外设站的种种问题，既独立自主，又安全可靠。整个系统在战时不易受到破坏而完全丧失导航能力，即使在平时也可以免受不稳定的国际政局影响。

## 二、导航方法和系统组成

导航星全球定位系统采用被动式双频伪随机测距导航体制，其基本原理就是根据时间测距进行导航定位。每颗导航星都装有高稳定度原子钟，可以为卫星导航信号提供精确计时信息。因为导航星连续发射 L 波段双频伪随机噪声导航信号，因此如果用户接收设备也装有同卫星时钟同步的精确时钟，则可确定接收卫星信号时的精确时间，从而测出导航信号从卫星到用户的传播时间，再乘上电波传播速度，就可计算出卫星发射机到用户接收机之间的距离。要是同时接收能提供最佳几何图形的三颗卫星发射的导航信号，就能分别求出到三颗卫星的距离。因为导航信号中包括卫星星历表、时钟校正参数、传播延迟参数及其它信息，所以，可以求出卫星发射导航信号时的精确位置。如果分别以每颗卫星为圆心，以卫星到用户距离为半径作圆球，就获得三个球体，其交点正是用户所在的位置。

应该指出，用三颗星定位有一个不利之点，就是用户必须装备精确而昂贵的原子钟。但是，如果用户同时接收四颗卫星发射的导航信号，就可放宽要求，也就是说，用户不必装备精确的原子钟，也能精确地定出用户位置，同时还可给出用户不精确时钟的偏差。全

球定位系统的导航原理见本书第15页图1，图中测得的距离不是真正用户到卫星的距离，其中还包括卫星时钟偏差、用户时钟偏差以及信号传播延迟引起的测距误差，所以叫“伪距离”。利用双频测量可以校正电离层传播延迟，而测量多普勒频移还可给出用户的速度数据。

全球定位系统由空间卫星网、地面控制站和用户设备三大部分组成（见本书第100页图1）。导航星座由24颗卫星组成，配置在三个轨道面内，每个轨道面有八颗卫星，采用二万公里左右的中等高度圆轨道，倾角为 $63^\circ$ ，周期为12小时。这样的星座可使全球任何地点的用户至少能同时看到六颗卫星，平均可看见九颗，最多达11颗，这就保证了导航星的全球导航覆盖和三维定位能力，全球定位系统的轨道配置见本书第46页图1-4。地面控制站全设在美国本土，由四个监控站、一个注入站和一个主控站构成。主控站设在范登堡空军基地，这里还有注入站和监控站；其余三个监控站分别设在夏威夷、阿拉斯加和关岛，并且是无人值守的，由主控站进行遥控。地面站主要负责对卫星进行跟踪测轨，并对卫星轨道进行计算预报，然后将轨道预报参数和时钟修正参数注入给卫星，以保证卫星能不间断地向用户发射导航电文；这样的测轨预报每天至少进行一次。用户设备由天线、接收机、计算机和控制显示设备构成；目前正研制出供各类不同用户使用的机载式、弹载式、星载式、舰载式、车载式以及便携式等接收设备样机，并在亚利桑那州尤马试验场进行飞行试验。

### 三、导航星本体构造

实用导航星的样星称为导航研究卫星，由洛克韦尔国际公司空间部研制，并由宇宙神F-SVS运载火箭发射。附图一表示导航星结构外形，卫星发射重量774公斤，轨道重量464公斤（包括发动机壳体结构重量24.9公斤），星上远地点发动机内装燃料310公斤。卫星采用铝蜂窝结构，主体呈柱形，直径为1.5米；星体两侧伸出两块双叶对日定向太阳能电池帆板，全长5.33米。能源系统主要由太阳能电池给卫星供电，太阳帆板总面积达5平方米，初期功率为580瓦，即使寿命末期也能提供410瓦；卫星进入阴影区时由三组15安时镉镍蓄电池供电。卫星姿态控制是采用四个倾斜安装的反作用轮三轴稳定系统，并用反作用喷气控制系统给反作用气轮卸载；同时，卫星还采用对日定向控制系统，可以使帆板始终定向太阳。另外，卫星还装有肼推进轨道保持系统，通过速度控制提供轨道保持和机动能力。在导航星底部装有多波束定向天线，这是一种由12个单元构成的成形波束螺旋天线阵，能为发射L波段导航信号提供所要求的覆球波束的天线方向图；此外，在星体两个端面装有全向遥控遥测天线。星体两侧面装有热管式主动温控系统，作为载荷的散热面。卫星顶部突出部分是远地点发动机喷管，型号为TE-M-616，最大推力为2935公斤，总冲为85650公斤秒，用来将卫星从大椭圆转移轨道变换为二万公里的圆轨道。卫星设计寿命为五年，用于姿态和轨道控制的肼喷气系统携带的燃料至少可供使用七年，而实用导航星的设计寿命将增加到接近八年。附图三给出导航星各系统组成的分解图。

导航星除上述列举的基本系统外，还有专用导航分系统，其中包括导航电文存储器、高稳定度原子钟以及L波段双频发射机等。原子钟的频率稳定度一般高达 $1 \times 10^{-11}$ ，这

比晶体钟至少要高两三个数量级。目前已研制成铷钟、铯钟和氢脉塞时钟三种类型原子钟。卫星采用两个L波段频率(1575.42兆赫和1227.60兆赫)来发射伪随机噪声导航信号。这种相干产生的导航信号可校正电离层引起的信号延迟。导航信号又用两种码进行调制,一种叫P码,另一种叫C/A码,两种码的主要用途是用来识别卫星和测量导航信号的传播时间。P码是一种长的精确码,码钟速率为10.23兆比特/秒,7天重复一次,不易捕获,主要用来精确测量导航信号的传播时间,从而确定伪距离,进行精确定位;C/A码是一种短的粗捕获码,码钟速率为1.023兆比特/秒,1毫秒重复一次,主要用来快速捕获导航信号,也可供民间用户进行粗略的测距定位。定向天线阵辐射信号的功率电平: $L_1$ 波段的P码为-163分贝瓦, $L_1$ 波段的C/A码为-160分贝瓦;而 $L_2$ 波段只调制P码,其功率电平为-166分贝瓦。卫星连续发射的导航电文包括卫星星历表、时钟偏差校正参数、信号传播延迟参数、卫星状态信息、从C/A码转换到P码的时间同步信息及卫星识别信息等。导航电文由五个子帧组成一个主帧,也叫数据帧,长度为30秒,共1500比特,导航数据以50比特/秒的速率连续向用户发射,永远不归零,并同P码和C/A码共同使用 $L_1$ 和 $L_2$ 信道。此外,实用导航卫星还计划增加卫星通信转发器和探测秘密核武器试验的敏感器,而导航星装备的单通道通信转发器将成为美国空军卫星通信系统的组成部分。

导航星进入轨道要经过一系列复杂的飞行程序,同发射同步卫星差不多。宇宙神-F将卫星送入停泊轨道后就与运载火箭分离,这时导航星与末级火箭自旋稳定,转速100转/分左右。然后末级火箭点火,将卫星送入远地点达二万公里的大椭圆转移轨道。导航星与末级火箭分离后,卫星在转移轨道要运行二、三天,章动阻尼器阻尼卫星章动,并通过地面测控站对卫星进行测轨和姿态测量,然后使卫星在轨道平面内作 $180^\circ$ 进动机动运动,以获得远地点发动机点火时所必需的准确方位。远地点发动机点火后,卫星作第二次机动运动,进动角度为 $90^\circ$ ,以使卫星底面天线阵指向地球。然后卫星消旋到1转/分左右,导航星捕获地球,三轴稳定系统使卫星对地定向。同时通过肼喷气系统进行轨道调整。最后太阳帆板展开,并捕获太阳实现对日定向。

#### 四、导航星研制试验计划

一九六四年前后美国空军和海军开始研究时间测距卫星导航系统的可能性,并分别提出621B计划和蒂马申计划。621B计划拟采用3~4个星座覆盖全球,每个星座由4~5颗星组成,中间一颗用同步定点轨道,其余几颗用倾斜24小时轨道,从地面看来呈“Y”形或“X”形星座,每天旋转一周。621B计划的主要问题有两个,一个是极区覆盖有问题,二是国外设站有问题。蒂马申计划拟采用一万多公里中高度圆轨道,周期8小时,用12~18颗星构成全球导航网。一九六七年发射了蒂马申-1,发射高度500英里,重量39公升,功率6瓦,用单频400兆赫发射机,对单颗卫星进行重复测距试验,定位精度为几百米;一九六九年发射了蒂马申-2,轨道高度500英里,重量57公斤,功率18瓦,采用150和400兆赫双频发射机,定位精度达100米。一九七三年十二月美国国防部正式批准陆海空三军共同研制国防导航卫星系统——导航星全球定位系统,放弃了621B计划,采



用类似蒂马申计划的全球定位系统方案，并开始了试验计划。一九七四年发射了蒂马申-3，这是全球定位系统第一颗试验星，叫导航技术卫星-1；卫星呈八面柱体，直径1.22米，有四块固定太阳帆板，采用重力梯度稳定；轨道高度13500公里，重量295公斤，功率125瓦，增加了L波段（1575兆赫）伪随机噪声技术试验和两台铷原子钟，频率稳定度达 $1 \times 10^{-12}$ ；此外还进行激光跟踪试验及太阳能电池抗辐射试验等。一九七七年六月发射了导航技术卫星-2，这是为全球定位系统设计制造的第一颗卫星；同导航星一样进入12小时轨道，卫星呈八面柱体，直径为1.65米，重量达440公斤，装有两块对日定向帆板，能提供400瓦功率；星上装有为导航星设计的L波段伪随机噪声导航系统，还有两台铯原子钟，其稳定度提高到每天 $(1 \sim 2) \times 10^{-13}$ 。但是，导航技术卫星-2在成功地进行了七个月导航试验之后，星上导航系统出了故障。目前正在研制导航技术卫星-3，计划一九八一年发射，将携带氢脉塞原子频标和更先进的铯钟，稳定度要比导航技术卫星-2的铯钟高一个数量级 $(1 \sim 2) \times 10^{-14}$ ，一次轨道预报可使导航星工作八周而无需修正。

导航星计划从方案论证、系统试验到实用组网大致分三个阶段：第一阶段进行方案论证性试验，原计划发射六颗导航星，分布在两个轨道面内，对指定试验区提供4小时覆盖，计划从一九七五年开始到一九七九年结束。实际上，初期星座仅由四颗导航星构成，这就是一九七八年发射的四颗导航研究卫星（见表1）。因为导航研究卫星-1入轨后工作

试验导航卫星发射情况

表 1

计 划	发 射 日 期	运 载 火 箭	发 射 场	近 地 点 (公里)	远 地 点 (公里)	周 期 (分)	倾 角 (度)
蒂马申-1	1967.5.31	雷神·阿吉纳-D	西部试验场	915	926	103.39	69.91
蒂马申-2	1969.9.30	雷神(加大推力) ·阿吉纳-D	西部试验场	906	940	103.39	70.02
导航技术卫星-1	1974.7.14	宇宙神-F-PTS	西部试验场	13445	13767	468.40	125.08
导航技术卫星-2	1977.6.23	宇宙神-F-SVS	西部试验场	19545	20817	705.18	63.28
导航研究卫星-1	1978.2.22	宇宙神-F-SVS	西部试验场	20095	20308	718.67	63.27
导航研究卫星-2	1978.5.13	宇宙神-F-SVS	西部试验场	19958	20094	711.65	63.13
导航研究卫星-3	1978.10.7	宇宙神-F-SVS	西部试验场	20283	20310	722.60	62.81
导航研究卫星-4	1978.12.11	宇宙神-F-SVS	西部试验场	20266	20315	722.39	63.27
导航研究卫星-5	1980.2.	宇宙神-F-SVS	西部试验场				

了六个星期时原子钟线路出了问题而要求修改，再加上卫星和宇宙神-F出现了一些问题，所以推迟了发射，但第一阶段还是成功地进行了导航试验。第二阶段进行系统试验和提供有限导航能力，原计划在第一阶段基础上补发到9~11颗，均匀分布在三个轨道面内，计划八十年代初结束此阶段。实际上，一九七九年中期已结束第一阶段试验，第二阶段将把星座从四颗星扩展为六颗星，并根据要求通过替换发射来保持这样的星座，而用户设备也按实用要求进行研制。导航研究卫星-4对铯钟进行了工程试验，计划从导航研究卫星-7开始正式使用铯频标。一九八〇年二月又发射了导航研究卫星-5。第三阶段进行实用组网，

计划发射 24 颗导航星，均匀分布在三个轨道面内，原计划八十年代中期组网实用。由于初期试验中发现星上原子钟出了故障，再加上其它一些问题，因此，实用组网日期有可能推迟到八十年代后期，开始时实用星座的卫星颗数也将由 24 颗星减少到 18 颗星。实用导航星可以用宇宙神-F 加新的末级进行发射，也可用航天飞机发射。

## 五、导航星的广泛应用

由于导航星全球定位系统能在全球范围内连续地实时地提供高精度的三维位置和速度信息，因此，其应用相当广泛。

**1. 舰船导航** 各种军用舰船、商用船只只要装上导航星接收设备，就可以在全球任何地点通过接收导航星信号进行高精度定位和测速，这对海上协同作战、交通管制、海洋测量、石油勘探、海洋捕鱼、建立浮标、管道铺设、浅滩测量、暗礁定位和海港领航等都有重大意义。舰船根据导航星信号测得的相对地球速度和用水压计程仪测出相对水的速度之差，就可以直接算出海洋洋流速度，以保证舰船在适宜的洋流区航行；此外，利用导航星的定位和测速信息，船只可始终沿大圆航线精确航行，以节省燃料和时间。用导航星给大型油船导航，横渡大西洋一次就能节省费用几万美元。对海上交通管制，在狭窄航道和汇流区域，特别在雾天和黑夜造成能见度下降情况下，导航星能使碰撞减至最少。对海上石油钻机定位，通过连续定位，可使定位精度按时间平均达 1~2 米。

**2. 飞机导航** 飞机属于高速飞行的动态用户，要是装上导航星接收设备，在全球范围内（或局部区域内）不但可获得连续实时的导航能力，而且还能得到高精度三维定位和测速信息，这对飞机进场、着陆、中途导航、飞机会合和空中加油、武器准确投掷及空中交通管制都具有重大意义。对于空军来说，在协同作战中，利用导航星可为陆军提供精确的空军支援、空中侦察、接近敌方工事、在简易机场安全着陆以及准确地空投补给品、空降伞兵部队、投掷武器和定点轰炸等。对空中交通管制，利用导航星可缩小空中交通拥挤区域的航线间隔，获得的高精度时间信号可使所有飞机有可能在同一精确时间内发出无线电调音脉冲信号，以测出在视野范围内到附近各飞机的距离，并根据多普勒频移算出接近速度，这对空中航道拥挤区域导航以及机场附近飞机进场，下降时避免碰撞是非常有意义的。

**3. 陆地用户定位** 导航星用于地面定位包括各种车辆、坦克、陆军部队、甚至步兵一类用户，还可用于大地测量、摄影绘图和勘探定位等。通过导航星定位，陆军能按照命令准确地将部队调动到新的地点，机动炮兵部队也可迅速地进行勘测和定位，在联合演习或战争期间，可以帮助陆军同海空军协同作战。测绘部门、地质部门和资源调查部门可以利用导航星进行精确勘测定位，特别是进入人烟稀少的沙漠地区、原始森林和深山野岭的小分队，只要带一台背负式设备就可通过导航星定位而不致迷路。

**4. 导弹武器定位** 这包括弹道导弹中途导航和未制导修正，战术导弹制导系统的修正等。如果在洲际导弹上装上弹载式导航星接收设备，就可在飞行中借助导航星进行导航定位，并制导导弹按照预定弹道飞行，以提高命中目标的精度。对各种类型战术导弹来说，也将大大提高制导系统的控制精度。此外，在导弹武器试验中，导航星具有很大的应

用价值，弹载导航星接收设备可以精确地测出导弹飞行弹道，并通过弹上发射机将数据发回地面，这对改进导弹武器制导和控制系统的的设计具有很大意义。

**5. 空间飞行器导航定位** 卫星、飞船和宇宙探测器要是装上导航星接收设备，就可利用导航星进行导航定位。美国目前正在研制陆地卫星-D，星上装有星跟踪仪和导航星接收设备，以提高高精度的卫星姿态和位置信息，并同遥感信息一起经数据中继卫星发回地面处理，以提高图象的定位精度。此外，如果深空探测器装上导航星接收设备，就可利用全球定位系统在地月之间的范围内进行星上自主导航。对于航天飞机来说，该系统将成为最完善的导航定位系统。

**6. 其它应用方面** 导航星还可用于高精度全球授时（精度可达1微秒，将来可能提高到0.1微秒）和其它科研生产方面。

由此可见，导航星应用价值极高，因此得到了美国政府和三军的高度重视，并列为美国重点空间计划之一，预计总费用为42.5亿美元，这是继阿波罗计划（花费约250亿美元）、航天飞机计划（预计100亿美元）之后的一个庞大空间计划。

## 六、关键技术的预先研究

综上所述，导航星全球定位系统的出现，必将对人类社会活动产生深远的影响，它标志着导航技术已经发展到更高更完善的阶段，并有可能成为二十世纪一项重大的技术变革而载入史册。因此，许多国家对导航星的关键技术和广泛应用正在有计划有重点地开展预先研究工作。在全球定位系统研制试验过程中，美国是非常重视关键技术的预先研究和导航星的应用研究工作的。归纳起来有以下几个方面：

**1. 伪随机测距导航体制研究** 全球定位系统进行定位的基础是时间测距，美国于六十年代就开始了预先研究。海军通过发射蒂马申卫星进行这种被动测距技术试验，蒂马申（Timation）的英文原意就是时间导航；另外，海军还通过子午仪改进计划进行伪随机测距技术试验。空军不是发射卫星，而是使用一种巧妙的“反向测距技术”成功地进行了试验。这种技术是通过在地面布站来产生类似于卫星发射的测距信号，以供飞机定位试验。在尤马试验场建立了反向测距控制中心，按三角形布局配置了四台发射机来模拟四颗导航星星座，并配备了由三台激光跟踪仪组成的高精度自动跟踪系统，以对反向测距系统的试验结果进行鉴定。

**2. 高稳定度原子频标研究** 要实现被动式时间测距导航方案，其关键技术就是要研制出非常精确的时钟，可以说高稳定度时钟相当于导航星的“心脏”，因此，美国于六十年代就注重发展原子钟技术。从子午仪到蒂马申-2全是使用晶体钟，而全球定位系统要实现高精度导航定位，就必须采用高稳定度原子钟；导航技术卫星-1第一次进行了铷原子钟试验，导航技术卫星-2就进行了铯原子钟试验，并用作导航研究卫星-4的原子频标，而导航技术卫星-3将试验氢脉塞时钟。

**3. 卫星导航系统方案研究** 美国根据全球战略需要，在六十年代中期，空军和海军就分别提出621B计划和蒂马申计划，并经过八年左右的试验研究和方案论证，考虑到政治、军事和技术诸因素，尤其是国外布站不好解决和易受破坏等问题，终于就分歧最大的

轨道高度问题取得一致意见，放弃了空军的同步高度方案，采纳了海军的中等高度方案。但是，从局部区域导航来看，为了满足军民用户对导航要求，积极发展区域性导航，不但非常必要，而且也是可能的。比如，为了解决亚洲太平洋区域卫星导航（兼部分通信）问题，采用同步星座式卫星导航系统方案就比较合适（由4~5颗星组成一个星座）。

**4. 导航星的应用研究** 从子午仪来看，一个新的系统真正推广使用，往往要10~15年时间，导航星也许不会例外，其原因就是对其应用缺乏研究，用户设备跟不上。据报道，导航星用途非常广泛，但其导航信号什么时候解密说不准。另外，子午仪总有一天要退役。因此，许多国家从本国的发展需要，作出发展卫星导航系统的长远规划，并大力研究导航星的广泛应用和有关接收设备，以备将来在允许时可以利用导航星发射的导航信号进行导航定位（商用精度可达100~200米）。

## 七、结束语

最后，应该指出的是全面规划统一领导问题。导航星全球定位系统是美国国防部直接过问和批准的一项重大卫星导航工程，下设导航星联合计划办公室。美国空军是导航星计划抓总单位，海军和陆军参加。海军负责继续研制卫星时钟（晶体钟和原子钟），陆军在尤马试验场进行了新的反向测距试验，还有美国测绘局、海洋局和其它几个政府机构也积极参加并研制它们需要的用户设备。此外，北大西洋公约组织也积极参加了该项计划。根据同空军签订的合同，洛克韦尔国际公司空间部承包了导航星研制任务。随着全球定位系统的建成和应用，该系统将拥有替换现有大部分无线电导航系统的潜力，这将进一步展现出卫星导航无限美好的前景。

译 者

# 目 录

<b>一、 概论</b> .....	( 1 )
导航星全球定位系统概况.....	( 1 )
导航星的工作原理和系统特性.....	( 3 )
导航技术计划.....	( 17 )
<b>二、 空间部分</b> .....	( 24 )
卫星频率标准.....	( 24 )
全球定位系统的信号结构和性能特点.....	( 32 )
全球定位系统的导航电文.....	( 64 )
<b>三、 控制部分</b> .....	( 88 )
控制部分和用户接收设备的性能.....	( 88 )
<b>四、 用户设备</b> .....	( 98 )
全球定位系统接收机的运用.....	( 98 )
第一阶段全球定位系统用户设备.....	( 105 )
提高全球定位系统用户设备性能的技术途径.....	( 127 )
全球定位系统用户设备的误差模型.....	( 134 )
全球定位系统用户设备的试验和鉴定程序.....	( 147 )
全球定位系统第一阶段用户设备的野外试验.....	( 154 )
<b>五、 其它部分</b> .....	( 163 )
全球定位系统的海上民用.....	( 163 )
全球定位系统和惯性导航系统组合的用户设备.....	( 177 )
在全球定位系统的有限运行阶段进行飞机导航试验.....	( 189 )
全球定位系统廉价接收机的导航算法.....	( 203 )
<b>附图</b> .....	( 211 )

# 一、概 论

## 导航星全球定位系统概况

B. W. Parkinson

导航星标志着具有全球定位和导航能力的新时代的到来。应该指出，定位精度不低于 10 米的三维定位确实具有广泛的应用，因此在概述这些应用时要比写介绍性的评论多花些笔墨。

为什么这种带有革命性的全球导航能力可能很快地成为现实呢？主要有如下两个原因：

第一个原因是人们认识到卫星系统在提供导航定位信息方面具有巨大的优越性。应用物理实验室和海军研制的子午仪就是第一代这种类型的导航卫星系统。它已充分显示出卫星导航的优点。导航星能提供七维信息数据，它可能比子午仪的定位精度高一个数量级。这七维信息数据是：三维位置数据、三维速度数据和精确的时间信息。这种导航能力是卫星几何图形、不断改进的星载时钟性能（由海军研究实验的“蒂马申”计划开始）和卫星位置预报技术等这些综合因素的必然结果。

推动导航星研制工作的第二个原因是使用部门已开始注意到现有各种导航手段的局限性。这些现有导航定位设备不仅费用高，而且其性能也是极有限的。因此导航星全球定位系统的优点已经引起人们愈来愈大的重视。

目前正在研制的全球定位系统已经取得了初步的试验结果，它证明第一代设备已可提供使用。这些试验结果表明，用户设备的三维定位精度可优于 3 米，并表明“导航研究卫星-1”发射的信号是稳定的，可供用户使用。但是，完整的四颗卫星的导航能力尚需验证，然而，所有一切都表明一九七九年将完成导航星的试验鉴定工作。

导航星的用户很广泛，既有军用部门，又有民用部门。在这里，我们仅提出它在几个方面的应用，以便启发我们的想象力，促使大家进一步挖掘导航星的潜力。

在航海应用方面，安装着导航星接收设备的商船使用一种导航设备就能从一个港口航行到另一个港口。根据导航星测得的舰船相对地球的速度和用水压计程仪测得的速度之差，用户就能直接计算出洋流速度，这就可以避开有类似于飞机顶头风的海域，以保证船只在最适宜的洋流区域内航行。此外，用户可以利用导航星的位置和速度信息，使船只始终沿大圆航线精确地航行，这样就能节省时间和燃料。为海事部门进行的一项研究表明，对于一艘巨大的油船来说，每横渡大西洋一次，通过导航星就能节省一万七千美元的费用。对大型油船来说，国际上很关注的一个问题是避免碰撞和保证安全航行。特别是由于

石油溅出所造成的生态学损害更突出了这个问题的重要性。类似于目前空中交通管制的海上交通管制这一天也会到来。如果实现了海上交通管制，就能使商船的碰撞次数减至最少，特别是能解决由于雾或夜间所造成的能见度下降问题。随着导航星的组网使用，这种海上交通管制将成为可能。

导航星还有助于民用飞机的航行，其精确的定位数据将缩小航线间隔。它们能使北大西洋国家的空中交通集中在最有利的航线上(最节省燃料的航线)。导航星将允许飞行员直接计算出飞机相对地面的速度，因此，在飞机上能直接显示风速条件最有利于航行的飞行高度和航线。在飞机驾驶员座舱里，导航星提供的三维位置和速度数据不断显示出来，空中交通管制系统可以从地面来询问。三维速度和位置向量的数据将使自动或半自动空中交通管制系统更加实用可行。导航星的大面积覆盖可供飞机进场和下降时使用，并有可能增加终端区域(许多城市易出交通事故的狭窄地方)的交通量。此外，导航星提供的精确时间信息可用于飞机防撞技术。这项技术的特点是，所有飞机在同一精确时间内发射无线电调音脉冲，而在两个调音之间的间歇期间，所有飞机都将收到其它飞机发射的信号，根据它们发射的信号和收到的信号之间的时间差，即可推断出处于视线范围内所有飞机的距离(时差乘以光速)。另外，根据对收到信号的多普勒频移的计数，即可直接估算出接近的速率。

导航星能极大地提高海上和空中的搜索和救难的工作能力，这是因为遇难飞机或船只在被迫降落或抛弃之前所发出的极精确的位置信息能使营救人员直接赶往出事地点。因此可以加快营救工作，抢救生命财产。

随着我们寻找矿物燃料资源范围的不断扩大，石油钻机正在离开海岸向越来越深的海域钻探。对深海石油勘探来说，一个重要的问题就是自定位。导航星能为钻机提供连续的导航能力，按时间平均，其定位精度有可能达到1~2米。

在科学方面，导航星可承担时间分配系统的任务，对射电天文学和许多其它科学的应用来说，精确的计时是非常重要的。另外，导航星发射的双频信号允许直接测量电离层群延迟，因此，还能在大的几何关系范围内，测出电离层中自由电子的数目。导航星提供的极精确的位置信息，对于高的定位精度可以按时间进行平均，并可用作非常精确的测地定位技术。在设计导航星时，考虑到了射电天文学方面的要求，并在实际工作上做了安排。以上这些仅是导航星几种可能的应用。

在导航星的研制工作中仍面临着几个关键技术问题。我想指出三点：第一，通过联合计划办公室，空军必须保证及时地研制出一个可靠而精确的系统。第二，用户设备的研制者必须尽力研制出用户买得起的接收设备。现代微型电路技术使我们有可能研制出廉价的接收机，而某些商业公司已表示，他们能够研制出不会高于两千美元的用户设备。当然，这应当是努力达到的目标，而对于电子设备的设计者和公司管理人员来说，也是一个挑战。第三个关键问题是针对用户部门而言的，他们必须了解导航星，并要尽快地挖掘其潜力。在过去，使一个新系统投入使用，一般要用10~15年或更长时间。导航星也许不会例外。不过，如果导航星的潜在应用得到充分认识的话，那么，用户就必须与研制者一起，共同探讨并实现它的所有潜在的应用。随着导航星的逐渐组网，人们将会看到仅由于我们想象力的限制才使导航星的潜在应用得不到发展。

# 导航星的工作原理和系统特性

R.J. Milliken 和 C.J. Zollner

**摘要** 导航星全球定位系统将向世界上任何地方的用户提供极精确的三维位置数据和速度信息。导航星的整个星座由 24 颗卫星组成。用户只要测量其中四颗卫星发射的射频信号传播时间就可以进行导航定位,预计其定位精度可达 10 米左右。本文将讨论系统工作的基本原理、导航信号、信号传播时间的测量、误差源、定位精度以及该系统的其它特性。

## 引 言

导航星全球定位系统的整个星座共有 24 颗卫星,轨道高度为 20183 公里 (10898 海里),周期为 12 小时。全球任何地点的用户在任何时间里都能看到 24 颗卫星中处在地平线  $5^\circ$  或  $5^\circ$  以上仰角里的 6~11 颗卫星。卫星采用两个 L 波段的频率 (1227 和 1575 兆赫) 发射信号,这样就可以校正电离层延迟引起的信号传播时间误差。卫星使用两种码 (P 码和 C/A 码) 来调制导航信号。P 码用于精确的时间测量,而 C/A 码可使用户易于捕获所需要的信号。卫星采用成形波束天线,这种天线向系统用户辐射几乎均匀一致的功率。用  $L_1$  波段的 P 码信号功率电平至少为 -163 分贝瓦,而用  $L_1$  波段的 C/A 码信号的功率电平则为 -160 分贝瓦。仅仅载运 P 码的  $L_2$  的相应功率电平至少为 -166 分贝瓦。导航定位时间为几十秒到几分钟,视接收系统的技术先进程度而定。

## 导 航 技 术

要进行导航,一般需要四颗卫星。用户使用卫星发射的星历表信息,可以手控或自动地通过接收机来选择能提供最佳几何图形的四颗卫星。到四颗卫星的距离可根据信号传播时间乘光速求得。卫星发射的导航电文中有星历表参数,这些参数能使用户计算出每颗卫星在发射信号时的位置。

系统操作要求星载时钟与全球定位系统时间之间精确同步,这是通过每颗卫星采用的原子频率标准和控制部份提供的时钟校正参数实现的。由于要测量到四颗卫星的距离,所以用户就没必要携带精确时钟。如果用户携带着与全球定位系统时间同步的精确时钟,那么仅用三颗卫星就可完成导航任务,这时就可认为用户处于三个圆球的交点上,而圆球的中心则位于卫星上。第四颗卫星可用于估算用户时钟的误差。在这种情况下,用户位置方程式中会有四个未知数,这些未知数是由三个位置分量和用户不精确时钟的误差或固定偏差组



成的，它们可通过同时解这四个方程式求得。下面讨论一下这些方程式的解法。数学推导放在本文的最后部分。

用户使用不精确时钟测量到卫星的距离称“伪距离”，这是因为在每一次的距离估算中，都存在由时钟误差引起的固定量级的偏差。

伪距离由下式确定：

$$\bar{R}_i = R_i + C\Delta t_{A_i} + C(\Delta t_u - \Delta t_{s_i})$$

式中  $\bar{R}_i$  为到卫星的伪距离；

$R_i$  为真距离；

$C$  为光速；

$\Delta t_{s_i}$  为卫星  $i$  的时钟相对全球定位系统时间的偏差；

$\Delta t_u$  为用户时钟相对全球定位系统时间的偏差；

$\Delta t_{A_i}$  为传播延迟和其它误差。

图 1 为伪距离测量示意图。

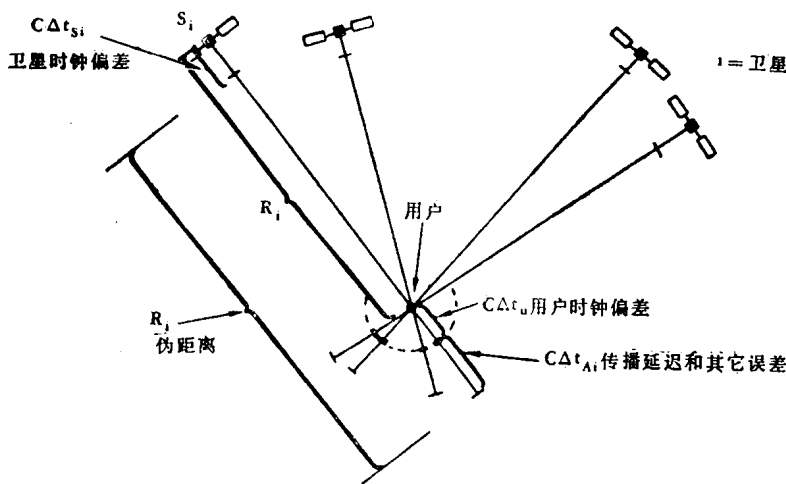


图 1 伪距离测量示意图

全球定位系统的用户通过测量相同的伪距离噪声码的相移，来测量伪距离传播时间，而伪距离噪声码是由卫星和用户接收机产生的，它们都与各自的时钟同步。用户接收机的本地码在这两种码达到最大相关之前一直在移动，移动时间就是接收机测量的伪距离时间。

图 2 表示出在三维情况下用三颗卫星来测定用户位置的导航方案，这种方案可以消除由于每次距离估算所产生的固定距离偏差。从该图可以看出，三颗卫星的伪距离半径不相交于一点，而是形成一个三角形。但是，总可以找到一个固定距离值  $\Delta t_u C$ ，当从伪距离中减去这一个固定值（或加上这一个固定值）时，该值可使三颗卫星的伪距离半径相交于一点，此点即用户的位置。 $\Delta t_u C$  的值表示用户时钟误差的等效距离。如果伪距离中存在其它的误差（大小不相等，我们把这些误差叫做独立误差），仍可找到一个固定值；当从