

Engineering Achievements

全球定位系统——建立太空卫星通信，改变地球上的日常生活

Peter Weiss

Senior Technology Writer

1. 序言

1990年年底，海湾战争逼近伊拉克应该从科威特撤出入侵部队的最后期限（1991年1月份）。在沙漠风暴行动的前线，美国军队的士兵开始要求他们的家人从家乡的航海用品供应站购买商用卫星导航接收机，并将这些设备邮寄给身处中东的他们。几十年来，美国军方一直在开发为美军提供全球导航数据的卫星星座，当时这个星座仍然缺少约三分之一的航天器。尽管如此，仍有足够多的卫星绕轨运行并传播位置和时间数据，这可以极大地帮助聚集在阿拉伯半岛及其附近的美国士兵，因为他们可能不久要在单调的沙漠地形上穿行并且战斗。然而，几乎所有人，以及他们的坦克、直升机或其他车辆，都没有装备能够接收精确数据的军用接收机。

但消息已经传出去了。商店里已有的性能较低的民用接收机，可以以足够的精度测量卫星信号。因此，当为渔民和度假的船民制作的导航装备大量应用于军事基地、营地和机场时，步兵用他们的装备藏匿手持接收机，或者把更大的接收机固定在他们的悍马车上（图1），装甲部队的士兵将接收机安装在坦克上，直升机飞行员将接收机安装在驾驶舱的两侧[1,2]。

全球定位系统（GPS）在全部开发完成之前就已经十分具有价值并且应用广泛，这也许暗示了GPS在不久后会对人类社会产生变革性的影响，并在居民生活中起到核心作用。20世纪80年代到90年代早期，在GPS星

座完成的初期，历史上第一次，世界各地拥有GPS接收机的人，即使是在天空中翱翔、登上地球最高的山峰，或在海风中扬起航帆时，都可以立即知道他们在哪里，确切的时间是什么。现在，GPS卫星在全球范围内每秒都会传输高分辨率、高精度的位置和定时数据，从而可以在世界各地进行无数次精确导航、测量、车辆控制和同步操作。

GPS之所以能在现代工程技术成就中脱颖而出，是因为它是第一个能够为所有使用无线电接收机的人提供简单、基本并且实用的确切位置。在人类存在的历史进程中，人们始终努力寻找可靠的手段来获得这个信息，例如，从前从景观或海景的特征或标记、恒星或其他天体的景象以及地图上获取信息，现在GPS已经成为通用的、全球的、可移动的、可靠的、高度准确的技术，并且可以随时免费地为地球上的任何人提供想要的信息。

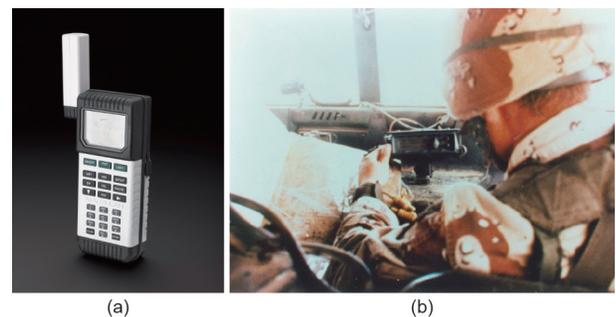


图1. 由他们的家人送到美国驻中东部队的民用GPS接收机，如1991年麦哲伦NAV 1000 (a) 和装在军用车辆上的Trimble Trimpack (b)，在沙漠风暴战役中提供了导航。来源：The Science Museum (CC0); US Army (public domain)。

GPS的另一个影响同样重要，即它可在世界范围内发出纳秒精度的时间信号，这些信号同步了大量的金融交易、通信、电力、控制信号和许多其他数据流。数据流和测量已经成为全球商业、电网、陆地、海上、空运和海运、军事演习、互联网交通以及许多其他活动和服务的核心。

本文叙述了从20世纪50年代末起GPS的发明和发展历史，当时苏联发射了第一颗人造卫星斯普特尼克1号。在这次事件的推动下，美国太空先驱进行了一些研究，他们发现通过对已知太空位置的轨道卫星进行距离测量可以极其精确地计算观测者在地球上的位置。在工程师、科学家和国防承包商的推动下，起初极不情愿的美国军方转而开始努力实现这种定位能力，并说服美国海军（USN）和美国空军（USAF）开展研发各种项目。这些努力推动了世界上第一个（功能有限的）全球卫星导航系统的发射，即USN的“Transit”。GPS产生于USAF的一个计划（当时是机密的，后来被解密了），该计划在先前的Transit和其他项目的进展上进行了扩充，但也在测距和通信信号、太空原子钟、卫星轨道预测、航天器寿命和用户接收机方面进行了关键性的创新。

1991年的海湾战争证明了GPS的军事价值，此后GPS作为一个由24颗卫星加上零部件组成的星座于1995年开始全面运行。25年之后，又有三个全球导航卫星系统（GNSS）加入了太空GPS，其中一个在去年（2020年）开始全面运行，第二个预计在2022年全面运行，所有这些系统都以GPS为模式，能够提供相同的基本服务。自20世纪80年代初以来，GPS在支持和维持普适的变革性技术方面持续发挥主导作用，其在航海、交通、通信、农业、工业、科学、金融以及与现代生活相关的每个方面都推动了民用应用的激增[3]。与它的姐妹星座一起，这一工程成就进一步为目前新兴的技术提供了必要的基础，比如5G（使用GNSS信号），并可能是想象不到的其他重大创新的重要前提。

2. 项目概况

2.1. 协调人类生活

截至2021年1月，目前组成GPS的官方31颗运行卫星（比标称的24颗最小星座多7颗，还有额外的“退役”卫星可以重新启动）在20 200 km的高度（图2）连续环绕地球，并将其无线电信号发送到地表[4]。在那里，

世界各地数十亿的接收者通过手机和许多其他设备可以锁定来自GPS卫星的信号，以及来自俄罗斯、中国和欧盟（EU）等姐妹导航星座的越来越多的信号。GNSS泛指任何一个覆盖整个地球的系统。印度和日本部署了区域系统，以补充GNSS网络提供的覆盖范围。所有这些系统共同构成了世界卫星定位、导航和时间（PNT）基础设施。

这些PNT卫星提供的数据可供室外几乎任何地方和室内轻度屏蔽位置的无线电接收机访问，这有助于确保无数关键的计算机化工具的正确操作[2]。手机和个人电脑需要使用谷歌地图或Waze的位置数据，以及协调微博、Facebook、TikTok和其他娱乐、电子支付、社交媒体、游戏、银行等应用程序以及无数网站、电话运营商和互联网服务的时间数据。除了指导和监控汽车司机、卡车车队、飞机飞行员和船长外，该系统还可以在全世界持续同步、发送和实时追踪（根据需要）数十亿的日常数据传输。如果没有PNT信号，金融交易、电网电流的分布、移动电话以及大量由数字驱动的其他人类活动就不可能正常进行。此外，该系统能在军事上起到作用，武装部队依靠PNT信号来协调士兵和武器，精确瞄准火炮、炸弹和导弹发射，以及营救被击落的战友。总的来说，GPS和其他GNSS数



图2. 24颗（最小）GPS卫星追踪轨道设计在地球周围空间和时间上均匀分布，以确保从地球上任何地方任何时间都能同时观测4个或更多的航天器。该系统在全球传输位置和定时数据，从而能够使精确测量位置和纳秒同步。自1995年以来，GPS是第一个提供这些功能的GNSS；如今，另外三个以GPS为模型的GNSS加入太空。来源：National Air and Space Museum, Smithsonian Institution (public domain)。

据的可用性（不间断、即时、免费、准确、可靠、普适）已经成为地球上近80亿人口中大约一半人的日常生活基础[5]。

“所有这些都使GPS成为一项革命性的技术”，退役的美国空军上校Bradford W. Parkinson博士说，他领导了第一个6年（1972—1978年）的GPS项目。在此期间，该系统的设计变得具体化，Parkinson和他的同事们开始建造和发射现有系统的卫星。本文主要参考Parkinson的研究，他将GPS技术描述为“隐形的”，以此形容它是如何安静地促成和推动了如此巨大的变化。在人类历史的大部分时间里，我们很难准确地知道我们在哪里，现在是什么时候。“但现在我们只要拿出手机，马上就能知道我们在哪里，”Parkinson说，“不过，总的来说，大多数人都不知道GPS是如何工作的。”

2.2. 开创性

鉴于GPS是几十年来的第一个GNSS，也是唯一实现和支持当今网络化、数据沉浸式世界的PNT基础设施，它是最重要的现代工程成就之一。2003年，美国国家工程学院（NAE）将查尔斯·斯塔克·德雷珀奖（该奖被许多工程界人士认为是该领域的诺贝尔奖）授予Parkinson和该开创性系统的倡导者、航空航天公司（Aerospace Corporation）已故前总裁伊万·格特，该公司作为国防承包商密切地参与了GPS的发明和发展[6]。这一开创性的技术以及数百名工程师和其他参与开发的人也共同获得了许多其他荣誉。

这些荣誉大多是因为GPS是一项重大工程成就而取得的，并没有与发明者的动机和梦想、他们研究过程中克服的困难和挑战，以及他们克服这些障碍的方法有关。这些荣誉是明智的事后反应，不同于从20世纪60年代初到1991年海湾战争中首次广泛使用GPS时的怀疑和不感兴趣。

卫星导航系统的想法起源于军方：USN和马里兰州巴尔的摩市附近的约翰霍普金斯大学应用光学实验室（JHUAPL）设计并建造了第一个全球卫星导航系统Transit。虽然其能力受到某些原因的限制，但Transit还是取得了巨大的成功。尽管如此，GPS作为比Transit更快、更准确、更普及、更通用的系统，其最终实现的可行性和军事价值在美军领导人的观念中几乎不存在。在第一个GPS星座的几乎整个开发过程中，军事指挥官基本上将这项技术视为对其预算的一种不必要的、不受欢迎的竞争。Parkinson说：“如果让空军自己动手，这个

项目就会因为缺乏预算而终止。”

面对阿波罗计划十年及之后的政治挑战，人们对太空时代的兴奋和好奇聚焦于月球上，一群有远见的工程师为实现这项未经验证的太空技术迈出了第一步。在这一过程中，他们取得了许多重要的技术进步，从将系统所有卫星的信息编码到单个射频载波的方案中，到开发世界上第一个能抵抗辐射和温度变化的微型原子钟。这些和其他进步最终导致了一场隐形的革命，这些技术很容易被认为是理所应当的，但却是我们日益实现数字化世界的关键所在。

2.3. 两个“火花”

在1957年秋天，两个“火花”在无意中同时点燃了其发明者和建设者对GPS目标的追求。其中之一是世界上第一颗人造卫星（苏联的斯普特尼克1号）的发射，它开启了太空时代。另一个是在JHUAPL的非正式实验，其灵感来自苏联航天器（图3）。

斯普特尼克1号于1957年10月4日星期五发射进入轨道。到接下来的星期一，两位年轻的JHUAPL物理学家William Guier和George Weiffenbach用一个临时的接收机装置接收了卫星的无线电信号。当卫星接近时，他们开始测量其20 MHz和40 MHz无线电传输脉冲的多普勒频移，然后卫星从他们身边远离，每一次都高高越过头顶。他们发现自己可以粗略地从这些移动中测量航天器的速度和其他轨道信息，这类似于交警通过雷达枪测量从车辆反射回来的光束频率的变化，来测量经过车辆的速度。在接下来的几个月里，JHUAPL的研究人员和其他机构的同事致力于完善他们对斯普特尼克1号轨道路径的估测。

随着他们对轨道的估测越来越精确，实验室主任Frank McClure提出了一个问题，该问题改变了这个即兴项目的研究方向。他想知道，假设对斯普特尼克轨道的估测是正确的，那么科学家根据其对该轨道的了解以及航天器与自身之间的信号频率来计算出他们自己在地球上的位置的准确度有多高。“第一次模拟显示了很高的准确性，这是难以置信的准确性！”Guier和Weiffenbach在几年后的回忆中说道[7]。McClure的问题指明了GPS背后的本质含义：在太空中绕轨道运行的人造物体可以用来精确定位地球上的位置。

2.4. Transit 卫星

McClure提出的问题不仅仅是出于求知欲。USN当

时正在为其拥有核武器的北极星舰队中的潜艇寻找一种可靠的方法，以精确定位它们的地理位置。当McClure和数学家Richard Kershner得知Guier和Weiffenbach的精确结果时，他们将McClure的头脑风暴转化为世界上第一个导航卫星阵列的设计。随后，Kershner在JHUAPL成立了一个新的航天部门，为USN制作原型，测试并建造了名为Transit的系统。当完全运行时，5~8颗卫星和备用卫星均在跨极地轨道上，提供全球覆盖系统（图4）。Transit于1964年投入运营，几年后，JHUAPL将最后一批生产Transit卫星的制造工作移交给了美国无线电公司。

利用Transit，一艘位于水面的潜艇能够以比当时领先的地面无线电导航系统（如Loran）更高的精度来定位。Transit定位是利用一颗卫星进行多普勒测量得出，需要等待10~16 min，直到该星座的一颗卫星能够在潜艇位置的视野范围内被探测到。Transit具有一定的局限性，它只提供了两个维度的坐标，没有高度信息，此外，除非用户的速度被精确指定，否则它可能会严重错误地定位移动的用户。尽管如此，该系统能在世界各地海洋的任意地点提供25m的定位，这在当时是非常准确的。从1967年到1996年，它成功地为USN船只和民用用户提供导航帮助。

1962年左右，当USN和JHUAPL正在创建Transit时，美国空军启动了一个名为“621B”的秘密项目，旨在研究和测试一个以东南亚为中心的区域卫星导航系统的概念。这个项目引起了一场军种间的竞争，阻止了GPS多年的发展。美国空军设想了一个比Transit更有能力的系统，它可以提供三维的、精确到几米的瞬时定位。下一代系统还将提供同步到30 ns内的全球时间测量。

这一增强的性能将使超声速军用喷气式飞机的快速、反复、途中定位变得可行，以指导在越南的精确空袭和其他行动，因为美国在越南的军事参与愈加深入。虽然该系统最初的目的只是提供东南亚地球同步轨道卫星的区域覆盖范围，但其规划者也认为，它是迈向全球卫星导航网络的第一步（该网络最终在30多年后由GPS实现）。

从20世纪60年代初开始，航空航天公司的Ivan Getting提出了一种更快、更复杂的卫星导航系统的概念，该系统可以为用户提供五角大楼高级官员的三维定位。在美国空军的资助下，航空航天公司为621B项目进行了大约90项探索性卫星导航研究，包括公司两位顶级太空系统工程师James Woodford和Hideyoshi Nakamura在1964—1966年间的分析[8]。在这项非保密的工作中，James Woodford和Hideyoshi Nakamura探索了十几个不同的系统概念，包括通信类型、计时和计算设备，以及卫星、用户和地面站可能使用的方法。

当时还不清楚该系统的卫星及其用户是否都需要原子钟，原子钟又大又重，而且价格十分昂贵。然而，在James Woodford和Hideyoshi Nakamura的试验最好的场景中，通信只能从卫星到用户，利用智能计算机，卫星的数量和分布足以让每一个用户始终同时看到至少四颗卫星。要使这种全天候的“四视”（four-in-view）条件在全球范围内应用，至少需要有24颗卫星连续运行。只有位于美国领土的主控站才能向航天器发送任何信号，如用于卫星位置和时间校准的信号。

工程师们的工作表明，如果这样一个系统被证明可行，那么回报可能会很大。首先，用户的接收机可以在几乎任何时间或地点，立即从卫星的连续传播中提取到所需的四颗卫星（或更多的卫星，以提高精度）的确切

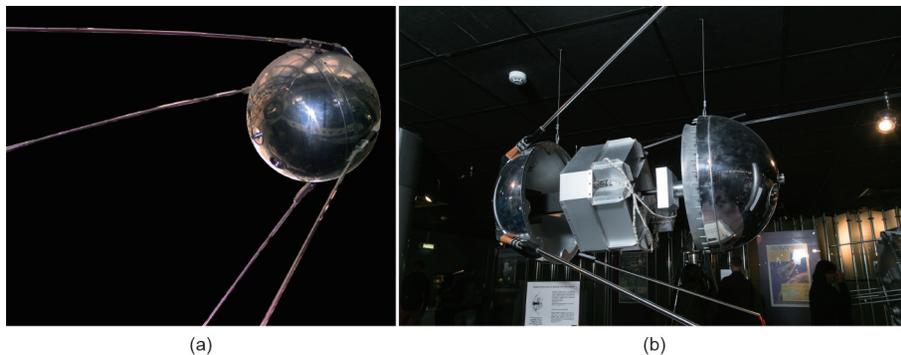


图3. (a) 人造卫星1号的复制品展示了四个后掠天线，使苏联的先驱航天器（世界上第一颗人造卫星）在1957年10月发射后，能够向几乎所有的地球人居区域发射射频脉冲。(b) 右边的模型显示了卫星的内部，它以约 $29\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($8100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的速度飞行，每96 min完整走过一次轨道。该卫星在太空运行21 d后电池耗尽，无线电脉冲停止发射。在轨道上运行三个月后，斯普特尼克1号于1958年1月4日重返地球大气层时被烧毁。来源：National Aeronautics and Space Administration (NASA; public domain); Wikimedia Commons (CC0 1.0)。

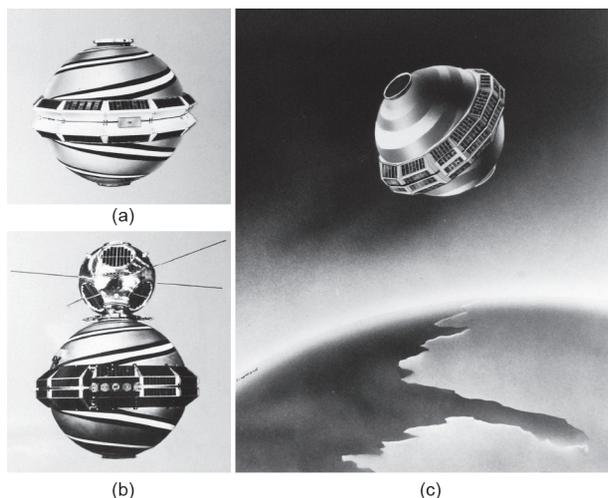


图4. 利用插图描绘了USN的Transit导航系统中的前两颗卫星——1-B (a)和2-A (b)，后者的顶部搭载了美国海军研究实验室的一颗卫星进入太空；第三颗卫星3-A (c)在1960年11月29日发射后以800 km的高度环绕地球运行。这颗0.91 m高、大约90 kg重的3-A型卫星搭载的卫星与2-A型卫星搭载的卫星类似。来源：Roger Simmons, National Archives (public domain)。

时间和同步距离。这将是用户计算精确的三维位置所需的唯一信息 (图5)。其次，该系统将只服务于“被动”用户，这些用户在设计上不需要传输任何可能导致敌人找到他们的电磁信号。这样一个系统可以为所有军事资产 (包括作战士兵、巡逻艇和战术轰炸机) 提供全天候的无风险的位置和时间信息。当所有用户都是被动的，同时用户数量变为无限大时，所有人都可以使用该服务。

最后，Woodford和Nakamura得出结论，虽然卫星需要配备原子钟 (或从地面获取的准确时间) 才能达到所需的定时和定位精度，但用户的接收机并不需要先进、笨重和昂贵的计时设备。得益于四视图卫星，地面仪器可以确定位置和准确的时间，且其计时器不会比在数字电子设备中广泛使用的小型、廉价的石英钟更复杂 [9]。

2.5. 技术障碍

在JHUAPL的Transit系统全面启动后，华盛顿特区附近的另一个美国军事研究和开发机构——美国海军研究实验室 (NRL) ——的工程师和科学家由物理学家Roger L. Easton领导开始建造和测试天基导航系统的原型卫星，旨在超越Transit。除了精确的定位，被称为Timation的NRL概念旨在为用户提供精确的通用时间。据Parkinson说，NRL的工作人员可能不知道仍然保密的美国空军621B项目的细节，该计划也打算提供一个

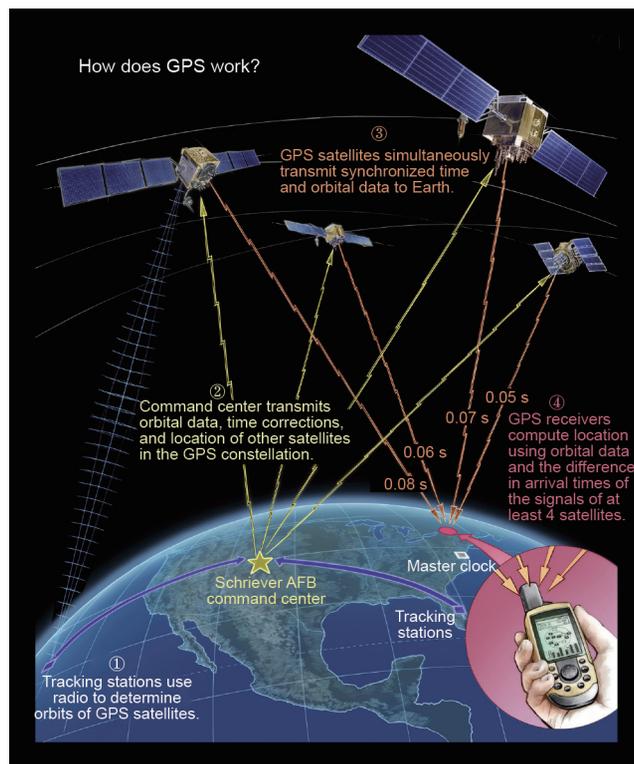


图5. GPS导航是如何工作的？手持接收机 (右下角) 追踪来自至少四颗卫星信号的到达时间，以确定其与这些卫星的距离。将这些距离计算与卫星所传播的精确的卫星位置和定时校正信息结合起来，使用户设备能够计算其在地球上的位置。该系统包括观测卫星轨道的跟踪站，为向星座发送必要更新和校正的指挥中心收集数据。这些更新和校正确保每颗卫星传播精确的系统时间和经核实的观测、轨道位置，保证它们作为空间参考点，以便在地面上精确地确定用户位置。Schriever AFB: 史瑞弗空军基地。来源：Bruce Morser, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution (public domain)。

高精度、可重复的时间信号。虽然NRL和621B的概念在关键方面有所不同，但这两个概念也有很大的共通之处。

到1969年，NRL为评估Timation建造并发射的一系列测试卫星中的第二颗已经为固定 (非移动) 位置的用户展示了约60 m的位置精度，该精确度很高，但没有超过Transit的精度。与此同时，美国空军在1972年任命了一名621B专业项目的新负责人：Bradford Parkinson。当时，Parkinson是一位年轻的上校，负责美国空军弹道导弹再入计划的工程设计，他的资历引起了一位想支持陷入困境的621B项目的将军的关注。Parkinson曾在越南执行战斗任务，毕业于斯坦福大学，获得航天工程博士学位，并担任美国空军学院航天系主任。在担任再入计划的工程负责人之前，他在惯性导航方面工作了三年，并在麻省理工学院的德雷珀博士 (与NAE的德雷珀奖同名) 实验室学习了两年的惯性导航，德雷珀博士成功发明了第一个惯性导航系统。

作为621B项目的新领导，Parkinson招募了大约25名拥有高级工程学位和工作经验的美国空军军官，以此提高了完成该项目的能力。在讨论其项目的全球导航概念的复杂技术过程中，Parkinson很快与物理学家Malcolm Currie博士结下不解之缘，后者是五角大楼新任命的高级文职人员。这是GPS思想的奇遇。Currie离开休斯飞机公司，成为国防研究和工程总监，这是美国国防部中第三大的职位。“我叫他教父，”Parkinson说，“如果五角大楼出了什么问题，他会尽力为我们解决的。”

尽管美国空军和海军的竞争导致了美国军方高层几年未能决定发展何种项目，但1973年12月，由Currie主持的一个由各军种高级军官组成的委员会批准了一个价值1.5亿美元、由四颗卫星组成的621B概念的原理验证演示。作为Currie当时设想的新的合作安排的一部分，卫星导航工作成为DoD中第一个联合军种发展项目。该委员会设立了GPS联合项目办公室（JPO），其在Parkinson的领导下由美国空军运作，将美国海军的卫星导航行动计划置于其管辖之下。来自其他军事部门的官员（包括海军、陆军、海军陆战队和国防测绘局）作为副项目经理分担项目的管理。

为了设计、建造、发射和验证其未完全发展的四颗卫星演示系统（1979年完成），JPO面临着数十个技术障碍，该系统最终成为一个拥有地面站和基本用户设备的功能齐全的全球星座（1995年完成）。在开始进行这些努力的时候，卫星和火箭还处于起步阶段，计算机和其他电子设备都过于笨重、缓慢且耗电，而原子钟都太大、太脆弱，无法飞入太空。为了克服需要解决的技术障碍，五项工程的进展成为GPS成功的关键：①从卫星到地面用户接收机的准确可靠的测距信号；②太空适用的原子钟；③稳健、使用期长的卫星；④卫星轨道的精确预测；⑤实际的用户接收设备[10]。

3. 突出的技术和创新

3.1. 数据传输

在所有的技术进步中，GPS先驱普遍认为该系统设计的开创性的测距信号能在系统完成后25年保持不变，是对GPS的成功实施及整体性能、多功能性和有效性的最大贡献。Woodford和Nakamura为他们的评估奠定了基础，即四视星座的被动用户不需要庞大、昂贵的原子钟。这个概念要求每颗卫星不仅传输自己的轨道信息和

位置坐标，还传输系统时间、航天器的发射机状态、电离层延迟模型，甚至是星座中所有其他运行的姐妹卫星的轨道和位置细节等。

然而，连续传播只能以微弱的数据速率传输所有信息，以确保有足够的功率用于关键测距信号。由于GPS预算有限，JPO最初选择使用翻新的洲际弹道导弹进行卫星发射，这节省了数百万美元。那些成本相对较低的Atlas-F助推器的推力能力限制了每个卫星的发射重量，因此也限制了其太阳电池阵的大小，并最终限制了可用的发射机功率。GPS开发人员只能为地球提供可靠的一亿亿分之一瓦特的信号强度。因此，该系统的规格保证接收机的功率不超过 10^{-16} W，而卫星利用其有限的功率，以每秒50 bits的速度传输数据。

每颗GPS卫星将通过调制两个高频载波信号（1.2276 GHz和1.57542 GHz）向用户连续传输其信息。早期Transit系统的JHUAPL设计者和建造者率先使用了这种“双频率”方法，以直接测量通过电离层的卫星信号的频率相关延迟。“幸运的是，延迟与载波信号频率的平方成反比，”科罗拉多大学博尔德分校的GNSS专家、航空航天工程科学教授Penny Axelrad说，“通过在两个或三个不同频率上接收信号，GPS接收机可以很容易地纠正这种效应。”当今智能手机中廉价的GPS芯片也可以执行类似的解决方案。以更多的频率发射会消耗卫星宝贵的能量，但这项技术支持独立的测距信号，并让用户能够有效、精确地计算到星座卫星的距离，从而非常精确地定位。

在20世纪60年代末和70年代，电子电路正从模拟电子技术向低功耗、紧凑、长寿命的数字组件过渡，最终演变为今天的集成电路，使计算得到了巨大的改进。由数学家和计算机科学家在内的创新团体发现了数字信号的新处理能力，并将其应用于通信、传感、控制系统和其他领域。在621B计划的范围内，当最初的四颗卫星演示获得批准时，这些无线电测距技术的硬件演示模拟已经在新墨西哥沙漠进行（下文将进一步说明）。

为了满足不断发展的GPS的工作需求，来自行业的内部工程师和数字信号处理专家开始专注于一种被称为码分多址（CDMA）的通信协议。通过为每个卫星分配一个不同的代码，CDMA协议使所有卫星能够在相同的频率上传播，而不会造成相互干扰或数据丢失。同时，所有的用户接收机都可以通过准确地测量四颗或更多颗卫星的到达时间，进行同步测距。

在1971—1973年新墨西哥州白沙导弹靶场进行的基于CDMA的方案在现场测试中，621B项目团队部署了两种由电子工业公司建造的CDMA接收机。这些接收机检测到并处理了来自四个“伪卫星”的信号，这些“伪卫星”是模拟GPS卫星传播的地面发射机。然后，工程师将计算出的位置与激光器测量仪器的实际位置进行了比较。在三个维度上，计算出的位置和激光精确定位的位置都在5 m以内（圆概率误差）。这些发现使四颗卫星演示获得了批准，解决了五角大楼一些人的疑虑，并证实了一个由真正的四颗卫星组成的全球系统是可行的，该系统具有四视图可访问性和CDMA，能够提供JPO所声称的位置准确度。

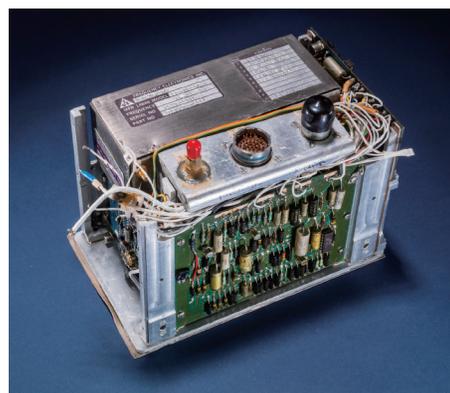
3.2. 沿轨道运行的原子钟

20世纪70年代末，该项目的工程师已经开始为关键的四颗卫星测试做准备，但GPS所需的时钟技术还未实现。虽然四视卫星条件消除了在每个GPS接收机中安装原子钟的需要，但这种好处是有代价的。整个星座需要将它的信号同步到纳秒级（十亿分之一秒）。虽然这可以通过GPS地面控制网络的连续信号来实现，但更好的解决方案是在每个GPS卫星上安装非常稳定的“飞轮”（flywheel）时钟，并每天进行一次或两次校准。

在20世纪50年代首次开发使用铯原子束的商业原子钟可以满足GPS的计时规范。遗憾的是，太空飞行的温度波动会损害这些为实验室使用而建造的时钟的准确性。此外，GPS轨道区域的强烈电离层辐射将会在不到1 min内杀死没有保护的人类，也会迅速摧毁时钟。而且，这些复杂的仪器会占用太多的空间，且重量太大，无法满足卫星的体积和重量要求。所以GPS需要更小的时钟，并且不受极端太空环境的影响。

Woodford和Nakamura 1966年的报告鼓励美国空军发起一个完成上述目标的开发计划，而在USN的Easton小组已经开始了这项工作。在测试卫星上，NRL评估位置精度和估算系统的其他方面，该实验室包括简单石英钟的实验：德国慕尼黑的小公司Efratom Elektronik（后来在加利福尼亚开设了办事处）制造的新型小型铷钟实验；马萨诸塞州丹佛斯的小型承包商Frequency and Time Systems（FTS）公司制作的紧凑型铯钟（图6）。

NRL于1967年开始了长达十年的太空时钟试验，卫星三维方向（姿态）的不稳定性始终困扰着测试。这些问题包括：变化在哪里；从什么角度变化；什么时候阳



(a)



(b)

图6. (a) 由德国Efratom Elektronik公司与Rockwell国际公司合作设计制造的轻型、紧凑、低功率的铷钟，使第一个四卫星GPS示范项目取得了里程碑式的发展。(b) 第一个五卫星GPS携带了这样一个紧凑的、太空加固的铯钟，由Danvers, MA、承包商Frequency and Time Systems公司建造。来源：Dane A. Penland, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution (public domain)。

光会最强烈地照射航天器，使内部温度变化，导致石英钟即使在有了机载温度补偿的情况下频率也会发生变化。这些试验结果表明，简单的石英设备不能够满足GPS的要求。同时，原子钟还没有为应对温度、辐射或机械应力的极端情况进行加固，这些不稳定的条件使试验没有结果。

当时由一个大公司制造的典型铷钟高约30 cm，宽48 cm，安装在工业电子机架上。相反，Efratom公司制造重量轻、紧凑、低功率的铷钟被固定在一个边长10 cm的立方体中，它封装了铷原子和其他气体的蒸气作为其定时源。到1974年，NRL在对一对铷钟进行现场评估得出了不明确的结果时，四颗卫星示范项目已经获得批准，JPO已聘请加利福尼亚州锡尔比奇的Rockwell国际公司建造了第一颗GPS卫星。随着1978年发射日期的确定，Rockwell直接与Efratom合作，生产铷钟的太空加固版本。与此同时，FTS正在开发一种经过太空加固的铯束钟原型，1977年NRL将

其放在所发射的另一颗卫星上进行了测试，但结果也不确定，到其电源在评估12 h后耗尽过程中，只有一个时钟良好工作。

尽管如此，微型的、太空加固的、Efratom/Rockwell铷钟满足了稳定性和稳健性的要求，使得第一个四卫星GPS示范项目实现了里程碑式的发展。“原子钟，一个小小的原子钟，就像GPS一样，是一个改变世界的大钟”，Hugo Fruehauf说道，他是当时Rockwell的GPS首席工程师[1]。由于其德语非常流利，Fruehauf与Efratom合作开发者密切合作。在1980年发射的第五颗GPS卫星上，一个太空加固的FTS铯钟终于在太空中取得了成功，这是第一个具有太空价值的铯钟。实验证明，它与使GPS能够满足其所有设计目标的铷钟一样稳定[9,11]。

尽管新制造的原子钟具有极高的精度和稳定性，但卫星系统仍然必须弥补由于相对论效应而造成的不可避免的时间差异。正如广义相对论所预测的那样，由于轨道时钟在海拔22 200 km处的重力场较弱，太空时钟比控制站和地球上的用户接收机中的地面时钟运行得更快。如果对这种速率差异没有采取任何措施，卫星的时钟将超过地面时钟约 $45 \mu\text{s}\cdot\text{d}^{-1}$ 。此外，根据狭义相对论，太空时钟的高速扩大了它们的时间间隔，与地面计时器相比，它们的“滴答”声变慢了。这将时间的不匹配度减少到了约 $38.6 \mu\text{s}\cdot\text{d}^{-1}$ 。为了消除剩余的差异，GPS操作员将发射前卫星上原子钟10 MHz的频率稍微降低了大约0.006 Hz。如果没有这种调整，GPS的定位误差将超出约 $10 \text{ km}\cdot\text{d}^{-1}$ ，且这一误差只会随着时间的推移而增长。

3.3. 寿命较长的卫星

由于替代卫星的建造和发射成本很高，因此短寿命的卫星可能会使太空计划破产。例如，苏联的第一个GLONASS卫星平均寿命只有2~3年。这一寿命时长使得每年都需要发射8~12颗新卫星，以保持GLONASS的24卫星星座的全面运行。

Rockwell国际公司从一开始就针对GPS卫星的长寿命采取了质量控制措施，包括去除最容易发生故障的部件，减少使用性能不佳的部件，在飞行中对大范围部件进行监控，以及对设备故障进行分析。这些努力取得了成果，最初的10颗GPS卫星的平均寿命为7.6年（图7）。在GPS II时代，卫星平均寿命达到10~12年，每年需要更换2~3次。最新的GPS III卫星于2018年年底开始发



图7. 1978年，工程师在发射前对第三个GPS卫星原型进行了测试。来源：The Aerospace Corporation (public domain)。

射，其预计寿命为15年，截至2020年11月将有4颗卫星进入轨道。

3.4. 精准预测

设计Transit系统的工程师和科学家开创了预测其卫星轨道方向的先进技术。这是Transit成功发展的关键需求，且对GPS的目标有更严格的要求。例如，导航卫星的行星环绕路径可以使它们从活跃的地面站消失数小时，这些地面站将更新后的坐标上传到星座。以Transit为例，随着轨道卫星名单被挤满，Guier和JHUAPL的其他科学家利用对航天器轨迹的观测来完善地球的引力模型。然后，他们将改进后的数据输入卫星轨道并进行地面位置计算。虽然早期Transit系统的定位精度偏差高达1 km，但随着模型的改进，误差幅度下降到99 m，这明显优于该项目规定的185 m精度的目标。随着程序发展，静态水平误差可以下降到25 m（Transit未提供垂直位置）[12]。

在Transit成功的基础上，GPS开发人员优化了轨道模型，用于预测星历（轨迹），这些星历（轨迹）解释了行星的引力场和潮汐、太阳和地球辐射以及行星自旋轴的漂移位置，其变化可达15 m左右。此外，为实现GPS卫星时间同步而开发的太空加固时钟，进一步提高了轨道预测精度。为了使GPS能够在 $1.45 \times 10^8 \text{ m}$ 轨道行程中提供预期的位置精度，其卫星轨道预测的基础模型对接收机的卫星测距可以增加不超过几米的误差[11]。由于GPS还需要比Transit系统更快地重新计算其模型，

其开发团队必须设计一种新的数学方法，以接近实时生成预期的轨道路径。

3.5. 授权用户使用权限

一场令人心碎的悲剧，以及后来的第一次伊拉克战争，使GPS企业迎来了5个关键工程挑战中的最后一个：开发廉价的用户设备，以提供对PNT数据的快速访问。这一进步将推动该项技术最终被全世界军方和平民所接受和采用。

这起悲剧发生在1983年，当时苏联将韩国的偏离航线的客机007误认为是间谍机并将其击落，导致机上269人全部遇难。作为对此事的回应，美国总统罗纳德·里根承诺GPS民用信号可供全球使用。虽然GPS民用信号从一开始就可以免费获取，但当时它们的获取并没有得到保障。早期的GPS系统已经实现了“选择可用性技术”，这意味着它传播了两个不同的信号：一个用于军事；另一个用于民用。尽管任何人都可以获取准确度较低的民用信号，但只有美国军队才能获取准确度最高的信号（以确保其在战斗中的优势）。不过，民用信号的获取将足以避免像007航班那样的严重导航事故。里根还承诺，如果系统关闭，美方将至少提前10年发出系统关闭的通知。显然，里根的承诺让电子产品公司对GPS的未来前景感到放心。电子产品公司开始开发和制造更多的GPS接收机，然而这些设备，特别是为军队设计的，最初都是昂贵的专业产品，这也降低了它们的使用率。

JPO曾试图通过签订合同来满足军队的需求，希望能创建一系列军事接收机标准件，以满足一系列不同的目标、尺寸和价格需求。程序设计和建立的9种用户仪器数量有限，往往是笨重的，且需要大功率的电力（图8）。最大的设备是一个比人高的大型军用控制台，它是用来安装在大型飞机上的，它具有5个频道，能让两名操作员坐在一排有5人宽的电子机架前。这个装置证明了GPS可以不受距离其下方几千英尺的敌军干扰器（1 kW）的影响而正常运行。较小的设备都有一个较粗的圆柱天线，包括一个11 kg的“便携式”的接收设备，挂在士兵的背上，另一个版本安装在军用吉普车上，以及一个时钟收音机大小的民用样机。

在沙漠风暴行动开始之前，由于缺少军用级别的接收机，国防部开始大量订购民用接收机，这补充了由士兵的家人和朋友寄往中东的接收机的数量。美国空军的GPS操作人员也暂时关闭了选择可用性技术，使民用信号降级，从而允许部队完全精确地使用民用装备。最终，

美国武装部队在沙漠风暴中使用了近90%的民用接收机；DoD从Trimble Naviga购买了10 000台，从Magellan系统购买了3000台[2]。

当1991年1月中旬战斗开始时，电视前的观众看到了美方利用发射精度极高的武器摧毁了伊拉克空军。GPS的广泛使用也使美国军队能够成功在单调的沙漠中以毁灭性的准确性瞄准敌人的炮兵部队。PNT通过在战斗中表现出的巨大价值（GPS开发者曾承诺的）最终说服了曾经不愿参与该系统创建的军事部门。

3.6. 困难阻碍

在1979年6月批准建造整个卫星星座之后，直到沙漠风暴之前，人们对卫星导航的担忧和误解以及对其军事价值的怀疑一直存在。事实上，美国国防部长办公室取消了1980—1982年的GPS预算。虽然预算很快又恢复了，但其在1981—1986财政年度预算中削减了30%，即5亿美元。这次资金切断使目标星座的大小减少了四分之一，变成了18颗卫星加上3颗备用卫星。它还减缓了更先进的下一代“Block II”卫星的发展。到1988年，由于担心18颗卫星系统不能正常工作，DoD将该星座的卫星数量恢复到24颗，其中包括3颗备用卫星。“Block II”的卫星计划很快也恢复了[2]。

尽管如此，预算问题仍持续减缓GPS的发展，发展中存在了新的技术和管理问题，并延长了整个GPS系统的建设时间周期。“我们按照Mal Currie的要求，开发了新的完整系统，与测试项目的预算相同。金钱一直是一个问题”，现在已经退役的美国空军上校Gaylord Green回忆说，他是一名导航工程师，在GPS开发的各个阶段都发挥了重要作用[1]。Parkinson最初知道Green是斯坦福大学的研究生，后来Green在美国空军的再入飞行器项目中为他工作，当Parkinson接管621B项目时，他邀请Green加入卫星导航项目。后来Green于1985—1988年担任GPS的项目主任。

尽管如此，GPS的发展还是遭受了一些挫折，这与美军内部的竞争和预算问题无关。1986年的挑战者号航天飞机的发射灾难使1979年分配给航天飞机编队的GPS卫星发射项目中断。此后又花了两年时间才重新使用Delta II火箭进行发射。尽管如此，当其他军事项目发现利用GPS完成自己的目标，并且支持增加导航系统的预算时，其项目仍可以从中受益。当USN需要一种方法在广阔的海洋区域追踪三叉戟导弹的发射测试时，Parkinson和James Spilker（数字通信的先驱和

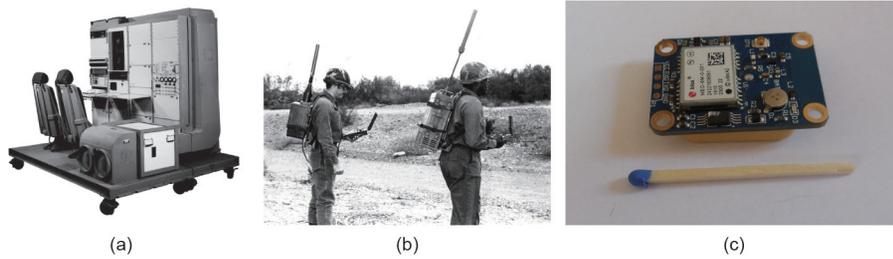


图8. (a) 1977年由Rockwell Collins公司制造的用于飞机上的第一台军用GPS五通道接收机。该装置重量超过120 kg，安装在USAF设备飞行测试板上。(b) 两名士兵于1978年测试了约11 kg的GPS“便携式”接收装置的早期型号，每个装置都有一个较粗的圆柱天线。(c) 2017年最先进的GPS芯片。来源：Rockwell Collins (public domain); USAF (public domain); Wikimedia Commons (CC0 1.0)。

GPS设计的主要贡献者)提出了一种使用GPS信号来完成这项工作的方法。国防部接受这一建议，使演示阶段的四卫星GPS项目的卫星数量增加了两颗并从USN向USAF项目转移了6600万美元。

美国的核裁军计划还通过在卫星上增加核爆炸传感器，增加了GPS的预算。为了帮助评估核打击情况，这些传感器还监测了1968年《核不扩散条约》的遵守情况。根据Green的说法，增加这些传感器不仅仅是增加了资金，他说：“在整个GPS系统获得最终批准之前，预算分析得出的结论是，它不能满足军事需要。但核探测系统能够满足军事需要，从而使GPS计划获得批准。”

3.7. 正常运行

1995年7月，就在沙漠风暴几年后，美国空军宣布全面运行GPS，此时距离1973年批准的概念性四颗卫星演示已经过去了22年[13]。同年，随着苏联解体，俄罗斯通过了GLONASS卫星系统，并宣布24卫星阵列可以完全投入使用（仅供军事使用）。但该星座迅速失修，到2002年就缩小到7颗卫星，于是俄罗斯对其进行了修复，使该系统能够再次全面投入运行[14]。现在，经过25年的运营，GPS除了GLONASS之外还有其他公司。中国完成了名为北斗的GNSS，于2020年6月23日发射，并将该星座的规模扩大到全部卫星。欧盟的伽利略系统建设接近尾声，预计到2022年能够完全运行，其拥有24颗活动卫星和6颗备用卫星。得克萨斯大学奥斯汀分校GNSS专家及航空航天工程和工程力学副教授Todd Humphrey说：“中国的系统和伽利略系统相当于GPS，但就信号质量或定位而言，GLONASS从来都不是GPS的竞争对手。”他是该大学无线电导航实验室的负责人。

1978年从美国空军退休的Parkinson说，如果美国空军支持卫星导航的建设并支持GPS项目，该系统在1985年前后就能完成，而不需要延后到1995年。他进入科罗拉多州柯林斯堡的科罗拉多州立大学担任教授，然后

成为Rockwell公司的副主席，之后成为马萨诸塞州剑桥Intermetrics集团的副总裁。由于他的血液中流淌着GPS的基因，他梦想着卫星系统的民用应用能够在军事机构中慢慢形成，将其中许多想法变成现实（图9）。

1984年，Parkinson回到斯坦福大学，成为航空航天专业的教授。在20世纪90年代，除了其他成就外，他还领导了一个研究小组，设计了一系列高精度民用GPS（其他许多学术机构和私人公司的数百名工程师也是如此）。例如，普通的GPS信号为航空公司和其他民用航空公司提供精确的远程导航，但在黑暗或恶劣天气下引导飞机进入跑道需要更高精度的信号。在使用GPS系统之前，许多机场都用复杂而昂贵的仪器着陆系统来提供导航。由美国联邦航空管理局（FAA）赞助，Parkinson、同事和学生一起帮助开发了广域增强系统（WAAS），现在其被广泛应用于美国、加拿大和墨西哥各地（其他国家已经在其他地区部署了类似的系统）。WAAS在传播信息时，会确保信号的完整性并对自然误差进行小幅度修正，并在6 s内通知用户有故障的卫星信号；其修正定位精度仅有几米误差[15]。

在与斯坦福大学Parkinson研究小组的另一次合作中，美国联邦航空局于1992年向联合航空公司租借了一架波音737，以进行着陆实验。基于GPS的位置传感技术，即差分GPS，使飞机能够以厘米的精度测量自己的位置和姿态，使它的飞行过程达到一个更好的状态[11]。仅使用GPS的测量，Parkinson团队演示了110次“盲”着陆（由自动驾驶仪执行，但由飞行员监控）[16]。今天，联邦航空局正在授权使用GPS进行自动化程度较低（第一类）的精度着陆，并承诺制定专门用于GPS的规范，第三类着陆是可以“盲”着陆的。该机构还将通过卫星导航确定飞机位置的技术作为其正在进行的美国空中交通管制系统（NextGen）现代化的核心内容。这种大规模升级始于21世纪初，并计划至少持续到2025年。

同样在20世纪90年代，Parkinson的斯坦福项目追

求另一种纯地面、高精度的GPS应用，得到了美国农业设备公司John Deere的财政支持和一台拖拉机。学生研究小组改装了拖拉机，增加了基于GPS的导航和控制，并在1996年创造出了世界上第一台全自动农用拖拉机。该控制系统在拖拉机速度为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，实现了 2.54 cm 的无人驾驶转向，并在每个维度对车辆进行了单自由度的姿态测量。这项研究使人们在农业中开始广泛采用GPS的精确定位，有助于农民通过更快、更有效的种植和收获方式来提高作物产量和降低成本（图10）。精确地施用化肥和农药也可以减少种植作物对环境的影响。全球以GPS为基础的自动化农业年销售额已超过10亿美元[17]。

科学家和测量人员开发了新的测量技术以提高GPS系统的标称精度，这需要更多的时间和更复杂的设置，但可以使用毫米精度的GPS进行测量，其精度比正常的GPS定位精度高1000倍。这种精确的GPS测量有助于从地震学、滑坡运动和板块构造到大气和其他环境研究等领域的科学研究[18]（图11）。GNSS的精确测量和制导也已推广到采矿和快速增加的无人机的控制。同时，普通GPS的应用范围不断扩大，包括各种应急响应、救援、

野生动物跟踪、边境执法、捕鱼管制和天气预报等。

2000年，GPS对全世界普通民众的实用性有了巨大的提升。美国总统比尔·克林顿（Bill Clinton）应商业部门的长期呼吁，下令停止选择可用性技术，结束了民用信号的退化（图12）。有了这一决定以及WAAS修正的应用，手机可以在晴天下以 $2\sim 3\text{ m}$ 的精度提供街道导航。事实上，“选择可用性是不正确的行为，它能让任何人获得完全的精度，”Parkinson说，“具有讽刺意味的是，美国海岸警卫队正在发布一个全国性的系统，该系统进行传播误差修正，以消除DoD故意犯下的错误。”

GPS接收机的尺寸、重量、功耗和成本都在急剧下降，这也让它们的应用出现了巨大的飞跃。技术人员根据当时的技术水平，从离散的组件中组装出了早期的大型仪器，因为那时小型、轻便的集成电路技术还处于起步阶段。但在从那之后的大约10年后，这种新型的电路制造方法已经成熟到足以将其迅速转变为更小、更节能、更便宜、功能更强的GPS接收机。第一款GPS接收机虽然试图达到相对用户友好的价格和便携性，但其价格仍超过10万美元，重约 50 kg ，而今天的制造商以不

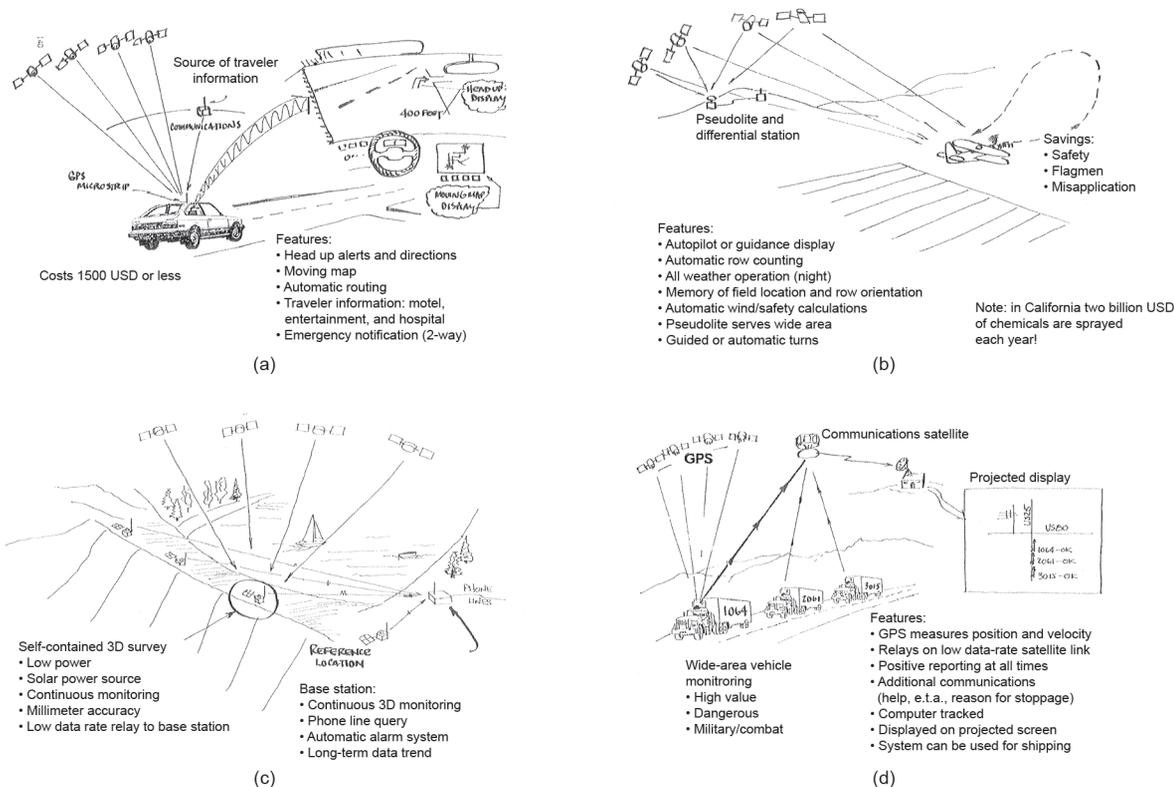


图9. (a) 汽车导航系统；(b) 半自动作物喷洒农药；(c) 大坝故障自动监测；(d) 广域车辆监测。这些草图是由Bradford Parkinson教授在1980年和1981年绘制的，他在1972—1978年担任GPS项目的第一位主任，领导了GPS的倡导、设计和开发。这些草图概述了Parkinson当时设想的GPS的民用应用，包括现在无处不在的汽车和其他车辆的GPS导航系统，如今用手机就可以运行，那些印刷的道路地图基本已经过时了。e.t.a.: 预计到达时间。来源：Bradford Parkinson，已获得许可。



图10. (a) 安装在John Deere 8345 RT拖拉机的雨篷前面的Startfire (D) GPS接收机引导卫星辅助转向系统。(b) 在精确GPS的指导下, Precision Maxes (Lee's Summit, Mo, USA) 在美国马萨诸塞州桑德兰创建了这个玉米迷宫。来源: bdk, Wikimedia Commons (CCBY-SA3.0); Precision Mazes (public domain)。



图11. (a) 2005年, 史密森学会的一名研究人员使用高精度GPS设备在美国加利福尼亚州死亡谷国家公园的伊贝克斯沙丘上测量了一个沙丘。(b) 美国地质调查局(USGS)的一个团队建立了一个便携式“蜘蛛”仪器包, 其中包含高精度GPS装置, 以监测2014年3月美国华盛顿西北部山体滑坡的移动情况。来源: Jim Zimelman, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution (public domain); Jonathan Godt, USGS (public domain)。

到两美元的价格就能购买到智能手机使用的小型GPS芯片。

当GPS在沙漠风暴以及随后的索马里、波斯尼亚和其他地方进行的军事行动都取得成功后, 美国军方最终接受了其卫星导航系统。“突然, 空军有了信仰。他们意识到了他们所拥有的东西”, Parkinson说。从那时起, 开发GPS的航天工程师被嘲笑为“Space weenies”的思想, 成为了DoD武器系统、任务和演习的一个重要组成部分。在2020财政年度报告中, 美国联邦政府对GPS军事和民用应用的年度拨款总额接近18亿美元[19]。

4. 结束意见

4.1. 不可或缺

为维护和改进GPS系统所提供的资金使GPS能够匹配迅速变化的技术。随着旧卫星的退役, 美国不断用升级过的卫星取代星座中的旧卫星(图13)。美国空军于2020年11月5日发射了该系统的第四个GPS III航天器04(图14)。这些最新的太空飞行器正在逐渐取代第二代(“II”)卫星, 包括1989—2016年先后发射的5个不同且

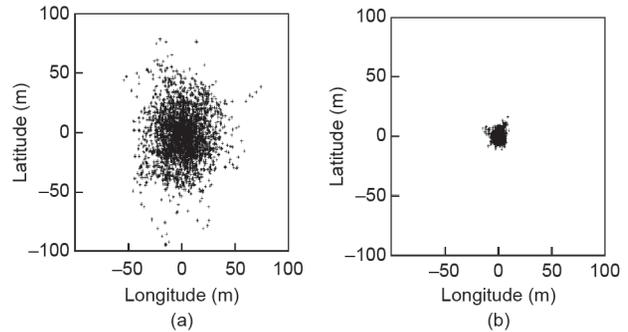


图12. 这两个图比较了GPS有选择可用性(SA)和没有选择可用性的准确性, 两个图分别绘制了24 h的GPS数据——2000年5月2日停止SA的前一天(a)和停止后的第二天(b)。左边有SA的点迹显示精度在约45 m半径内; 右边没有SA的点迹显示精度在约6 m半径内。来源: 阿什利·霍尼什, 国家航空航天博物馆, Ashley Hornish, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution (public domain)。



图13. 艺术家绘制的第二代GPS Block IIA卫星图; 这些卫星在1989—1997年发射, 现在都已退役, 最后一颗卫星在2019年退役。目前的GPS星座大部分由最近的第二代GPS卫星系列组成, 截至2020年8月, 太空中仍有29颗(10颗IIR、7颗IIR-M和12颗IIF)在运行。来源: GPS.gov (public domain)。

更先进的系列子代卫星。对卫星的改进包括更大的尺寸和功率、更新的电子和测距码, 以及更多的传输频率。

然而, 随着GPS系统的价值和关键应用数量的增加, GPS受到了越来越频繁的攻击, 这些攻击被归类为欺骗或干扰[20]。欺骗者用误导性的数据向GPS接收机发送虚假信号来欺骗用户, 而干扰者在相同频率范围内使用强大的、无意义的信号覆盖正常信号。为了应对这种威胁, 美国空军已经更新了带有附加测距信号和特定频率的GPS, 接收机和天线的制造商也应用了更强大的技术来检测欺骗干扰和抵抗干扰。

人们在各种日常活动中日益依赖GNSS的基础建设。美国政府最近发起的一项研究估计, 在1984—2017

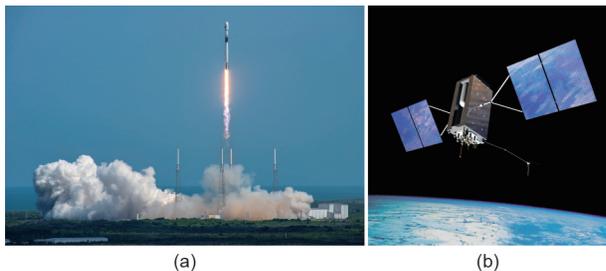


图14. 自2018年以来, 截至2020年11月, 已有4颗第三代(GPS III)卫星加入了GPS星座。(a)一艘太空X猎鹰9号火箭运载着第三颗GPS III卫星SV 03, 于2020年6月从佛罗里达州卡纳维拉尔角空军站升空。(b)艺术家绘制的GPS III卫星图; 这些最新一代卫星的预期寿命为15年。来源: SpaceX (public domain); GPS.gov (public domain)。

年之间, 美国通过GPS获得了1.4万亿美元[21,22]。该研究进一步详细说明了系统中断30天可能导致的后果, 假设的故障也会影响其他GNSS网络——Parkinson认为这种可能性极小。报告指出, 失去GPS服务一个月可能会因为电信网络崩溃而造成大范围的动荡。美国的农作物生产将会被中断, 因为美国农民已经广泛使用了自动化拖拉机、收割机和其他依靠GPS数据来运行的精确移动设备。再加上其他由GPS支持的服务的失效, 这些影响及其后果将在短短30天的时间内对美国造成300亿~450亿美元的经济损失。虽然至少从2004年起, 美国历届总统政府的国会法案和指令就要求实施地面PNT服务, 以支持GPS/GNSS, 但目前还没有这样的通用系统。然而, 在航空运输方面, 联邦航空局计划继续在美国各地运行一套最低限度的无线电导航地面站, 以确保具有备用的飞行路径和着陆制导, 尽管其精度和高度低于GPS和其他GNSS。美国总统于2020年2月12日发布的一项行政命令再次要求政府机构制定基于非GNSS的PNT服务的后备计划[23]。

幸运的是, GNSS星座及其所有后备卫星的增加大大降低了全球甚至部分PNT故障的可能性。它还通过测量四颗以上卫星的距离来提高定位的精度和完整性。Parkinson评论说, 在最近一次徒步到他家附近的加利福尼亚州山区的一座小山峰上, 他看了看自己的手机, 发现它收集了来自11颗卫星的数据。虽然美国联邦通信委员会最近才授权使用欧盟的伽利略系统, 但GNSS芯片制造商已经将全球所有星座以及所有区域增强系统纳入其最新一代芯片。

在今后几十年中, GPS及其姐妹系统GNSS预计将继续作为重要的基础设施, 用于帮助创建新的连接、服务和功能。举例来说, 截至2020年2月, 至少有34个国家已经开始部署5G, 即下一代无线通信。这种新技

术承载数据下载速度可达每秒20 GB, 比4G快数百倍。下一代无线通信对于包括自动驾驶汽车和所谓的“智能城市”在内的新技术至关重要[24]。这些基于5G的新技术越来越依赖于GNSS星座提供的PNT信号。

4.2. 时间线

表1概述了GPS和当前全球GNSS基础设施的发展里程碑, 从1957年10月发射Sputnik 1号到2020年完成第三个全球系统, 即中国的北斗, 以及即将完成的欧盟伽利略系统。

4.3. 继续服役

GPS持续为全人类服务。关于日常传播的GPS信号设计, Parkinson写道:“截至2010年, 大约95%的GPS信息经受住了考验, 不需要任何改变, 这是对1975年设计了信号结构的杰出工程师和科学家的伟大致敬, 它已经持续了35年, 却几乎不需要修改。”他是关于GPS起源的系列文章(由两部分组成)的第一作者, 该系列发表在2010年5月和6月的行业刊物*GPS World*上[9,11]。

GPS为世界上许多目前占主导地位的技术提供了基础设施, 其高精确的位置和时间信息使各种技术成为可能。星座的配置和基本工作方式从根本上促成了我们日益复杂的数字世界。特别是GPS能够同时向无限数量的接收机进行传播的能力, 允许应用程序和用户数量无限增长。这一工程成果经过了现代化和更新, 但基本上没有变化, 它是导航、通信、计算机网络、武器、科学研究、金融、交通和许多其他领域的无数先进应用的核心组成部分[25]。

“革命还在继续,” Parkinson 2020年1月在加利福尼亚州山景城的谷歌发表的演讲中说,“驱动GPS的‘引擎’是工程学。电气工程和计算机科学是其中的核心, 但所有的工程学科都参与其中。”

4.4. 革命家——Bradford W. Parkinson

1972年末, 美国空军上校Parkinson接管了当时保密的GPS项目, 领导了其设计和实施的早期和关键阶段(图15)。现在, Parkinson是位于加利福尼亚州帕洛阿尔托的斯坦福大学航空航天的名誉退休教授, 但他在定位、导航和计时领域仍然非常活跃。1978年Parkinson从美国空军退役后, 在学术界和工业界工作了几年, 然后成为了斯坦福大学的教员, 领导了一个研究小组, 主要开发一个不断扩大的GPS应用阵列。

表1 GPS发展里程碑的时间线

Date	Landmark	Brief description
October 1957	Launch of Sputnik 1	First artificial satellite rockets into orbit from Soviet Union
March 1958	Satellite navigation concept proposed	Sputnik orbital research inspires JHUAPL director Frank McClure
October 1961	Apollo program, first flight	Start of US Moon landing/exploration program, 12 astronauts ultimately reach lunar surface
1962	USAF inaugurates classified “621B” program	Research initiated to explore potential satellite navigation system to support US military operations in Vietnam
1964	USN’s Transit becomes operational	First global satellite navigation system, created to serve US nuclear-armed Polaris submarine fleet
August 1966	Woodford/Nakamura classified report	Secret analysis of advanced navigation system options shapes GPS design; work was declassified in 1979
July 1969	Apollo 11 mission	First humans—Neil Armstrong, and Edwin “Buzz” Aldrin—land and walk on Moon
1971–1973	White Sands Missile Range Experiments	Ground instruments simulating four-satellite array achieve 5 m, 3D position accuracy
December 1972	Final Apollo Moon landing	Harrison Schmidt, 1st scientist on Moon, and Eugene Cernan set up scientific experiments, take photos, collect samples
1972–1973	USAF Colonel Parkinson helms 621B, then JPO	621B satellite demonstration project approved, GPS becomes a joint forces project led by USAF
1978–1979	First four GPS satellites launched	Successful 4-satellite test with Efratom/Rockwell atomic clocks, Pentagon approves full-scale GPS buildout
February 1980	First operational cesium atomic clock	Fifth GPS satellite carries space-hardened, cesium-beam clock to orbit
1981–1986	GPS budget setback	30% cut trims satellites’ heft, upgrades, and system size; partly reinstated by 1988
September 1983	Soviets down Korean Air Flight 007	Tragic killing of all 269 people on off-course airliner prompts US to guarantee GPS civilian signal globally for at least ten years
January 1986	Space Shuttle Challenger disaster	Cancel two years of planned satellite launches; lift-offs resume in 1988 on Delta II rockets
February 1989	Start of GPS II deployment	Second generation satellites launched until 2016; mean design lifespans increase to 12 years
January 1991	Operation Desert Storm begins	GPS navigation and precision weapon guidance strongly aids US and allied armed forces
1992	Boeing 737 “blind” landings	Stanford program under Professor (retired Colonel) Parkinson lands airliner solely under GPS control
July 1995	GPS announced as fully operational	USAF completes 24-satellite system, meeting all performance requirements
Late 1995	Russia declares GLONASS operational	Military-only system; disintegration shrinks constellation to seven satellites in 2002, when restoration begins
1996	USN decommissions Transit	System no longer needed for navigation, satellites subsequently used for ionospheric research
1996	Agricultural equipment automation via GPS	Robo-tractor engineered by Parkinson’s Stanford group steers to 2.5 cm precision and controls 3D attitude to 1°
May 2000	Selective availability ends	GPS precision previously accessible only to US military becomes universally available
February 2003	Top engineering prize awarded to GPS pioneers	Bradford Parkinson and Ivan Getting share 2003 Charles Stark Draper Prize
June 2008	First GPS chip added to an iPhone	Launch of iPhone 3 begins era in which GPS navigation becomes ubiquitous feature of mobile phones
December 2018	First GPS III satellite launch	Third generation GPS satellites with mean design lifespans of 15 years start joining constellation
June 2020	China GNSS BeiDou complete	With June launch, China’s constellation attains planned size with 30 satellites
2022	EU GNSS Galileo complete	Galileo’s constellation of 24 satellites plus 6 spares becomes fully operational

在该项目投入使用25余年之后，将自己称作“革命家”的Parkinson回答了关于这一主要工程成就的问题。

WEISS: 1962年，美国总统约翰·F.肯尼迪发表了一篇著名的演讲，讲述了民用航天机构美国国家航空航天局（NASA）在那十年中的探月计划。美国军方则在那段时间已经设计和建造了第一个卫星导航系统。这两项成就标志着美国太空时代的到来，那么这两个项目之间有联系吗？

PARKINSON: NASA月球工作的重点是载人航天。NASA有自己的一组工程师、与之合作的公司，以及麻省理工学院的Draper实验室为阿波罗计划提供指导。我认识的Draper博士对卫星导航有着狂热的兴趣。因为这是太空中的信号，不是独立的，他说过，“人能生产出来东西，也能摧毁或破坏。”虽然NASA从未参与过GPS的开发、管理或技术研究，但也有一个巧合。我们的GPS卫星是由Rockwell国际公司制造的。Rockwell同时也在建造航天飞机，它是阿波罗号的“直接继承者”。航天飞机和GPS有不同的部门，但如果GPS需要工程师来解决空气动力学、热力学或传热问题，也可以利用Rockwell庞大的工程师队伍，这不是因为他们拥有对航天飞机的相关知识，而是因为他们了解通用技术的基础知识。

WEISS: 许多美国高级军官，即使是在参与GPS项目的美国空军中，也有人不想要卫星导航系统。GPS是如何在这种反对声中幸存下来的呢？

PARKINSON: Malcolm Currie博士是一位拥有物理学博士学位的职员，他负责整个美国国防部的所有研发资金。1972年，Currie来到洛杉矶与我见面。一位招待Currie的将军回想，“我知道如何分配大约三个小时。我会把他送去见Parkinson。他很健谈。”在我们讨论的最

后，一些神奇的事情发生了。Currie博士成为我们项目的拥护者，我们开始了直接且非正式的交流。1978年，我们对四颗卫星演示系统进行了广泛测试并证明其可行性，但是当我们实现了所有的目标时，空军仍然不想资助它。但是五角大楼的领导层（事实上是Currie博士），对此事进行了干预，从根本上迫使空军为其提供资金。但是，空军提供给我们的预算很低，不然GPS的全面运作可能比1995年至少提前十年。

WEISS: 当军方反对GPS项目的时候，是什么让你能够继续前进呢？

PARKINSON: 当时的气氛是令人绝望的。我很快就患上了严重的胃痛，因为我工作了很长时间，喝了太多的咖啡。1972年，作为该项目的负责人，我几乎把我手下所有的人都换掉了，不是因为他们不好，而是这个项目需要一群敬业、不屈不挠而且无私的人。于是我们就变成了这样。我招聘的所有人都讨厌失去。我们不能容忍不去这样做，但在这方面我们势单力薄。除了Currie博士，我们没有很多朋友。同事间的情谊是极端的。不管付出什么代价，你都不能让团队失望。

到每天上午11:30左右，我的脑子里都会有大量的问题。我的解决办法是每天中午去跑步，至少跑四英里。而每到周五，我总是要跑十英里。当我回来的时候，我会精神焕发，积极向上，并想出新的行动方案。我一直是个跑步者，不仅仅是这样。我甚至成为了一名马拉松运动员，我手下的至少十几个人也变成了马拉松运动员。这是我们的应对方式。

此外，每个周五晚上，我们都会去军官俱乐部一起喝啤酒。在那里有笑话和友情，但也有技术讨论，有很多问题都在聚会中得以解决。当我们在奋斗时，我们会在筋疲力尽6个小时后在军官俱乐部聚会。我们这一群人

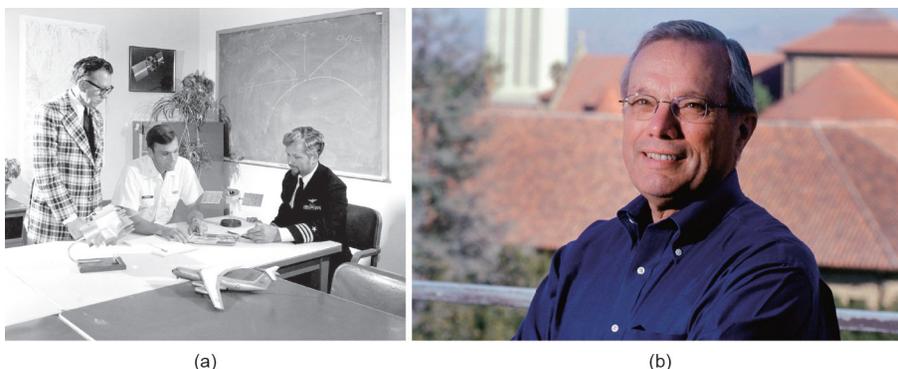


图15. (a) 在这张20世纪70年代的照片中，美国空军上校Bradford Parkinson（中）与航空航天公司的工程师Frank Butterfield（左）和美国海军指挥官Bill Huston（右）讨论GPS。(b) Bradford Parkinson 2016年在美国加利福尼亚州斯坦福大学任教，他仍担任航空航天名誉教授。来源：The Aerospace Corporation (public domain); Courtesy of Brad Parkinson.

始终在谈论我们应该做什么，战术是什么，结果是什么。同时我们也在娱乐，享受彼此的尊重。GPS小组周五的啤酒聚会的气氛总是很相似的。跑步和周五的啤酒聚会是一种治疗方法，坦率地说，这对我们正在做的事情至关重要。我以前从没有治好的胃病，也随之消失了。

WEISS: 是什么促使军方提供民用服务的？

PARKINSON: 在我们发射第一颗卫星之前，我向国会提供了证词，说我们将会提供民用信号，但没有保证我会公布使用它的方法。然后每个人都问我，“你是怎么做出那个决定的？”我就是决定了，我没有询问任何人。因为如果我去问别人，会有很多人告诉我不要这样做。所以，我认为它就应该这样。据我所知，第一个GPS的民用装置是由英国利兹大学的学生在Peter Daly教授的指导下建造的。他们表明，我们确实提供了允许非军事用户使用导航系统的规范。

WEISS: 您曾经说过，您惊讶于GPS在民用应用方面的迅速发展。

PARKINSON: 在GPS应用中，GPS对农业方面的市场产生巨大的拉动作用。1996年，我在斯坦福大学的学生设计了第一台由GPS引导的机器人拖拉机，他们通过对商业模型进行改造，使其可以通过卫星信号以极高精度在农田中进行自动导航。农场设备制造商John Deere为我们提供了一辆拖拉机和大量资金，但他们当时对于农民是否想要自动导航持怀疑态度。事实证明，他们的怀疑是错误的。在不到15年的时间里，机械农场装备的市场价值达到了4亿美元。而从那时起至今，这个数字又翻了一倍多。

完全采用GPS控制飞机着陆是一个缓慢的过程。1992年，多亏美国联合航空公司和美国联邦航空局借给我们一架波音737，我们得以演示了110次直接“盲”着陆。它工作得很完美。但是，让这些“Category 3”着陆获得美国联邦航空局的完全认证是一个非常缓慢的过程，他们正在慢慢接受它。你必须证明利用这个系统着陆的失败概率不超过千万分之一。从我们第一次展示那些“盲”着陆到现在已经28年了，这几乎是一个人的职业生涯。

WEISS: 什么事让您感到吃惊？

PARKINSON: 我对那些我曾认为不可行的领域感到惊异，比如用GPS定位飞船。对于低于GPS卫星的轨道来说，这是必然成功的事。但是到目前为止，至少在理论上，已经有一些人在GPS轨道以上的地球同步轨道

上做到了这一点。下一步就可能是一个真正意义上的杰作。一项即将进行的实验将利用GPS卫星的剩余能量为绕月球运行的飞行器进行导航，这些能量从GPS卫星射向地球表面。我也惊讶于研究构造板块的人们是如何测量板块边界两侧的相对运动的，其在三维空间中的精确度能小于1 mm。速度可能是 $10 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，但他们测量速度的精度单位是 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

事后看来，我本应该靠着汽车导航发一笔财的。它是我在1980年左右设想出的6个潜在应用之一（图9）。我的概念是在平视显示器上有一个移动地图，一个小声音会告诉你下一个转弯的时间，还有一个通讯连接。我认为这一切都相当巧妙，但我们当时什么也没做，因为我们没有预料到无处不在的手机的出现。

WEISS: 黑客攻击GPS和其他GNSS的可能性引起了人们对其安全性和可靠性的关注。您的观点是什么？

PARKINSON: 国会和DoD一直在想办法解决干扰和欺骗GPS的问题，所有人都认为这是一个大问题。其实并不是，我们知道如何制造几乎能够抵御这些攻击的GPS接收机。这些接收机比我们的手机要复杂得多，它们可以承受强大的干扰，并完全隔离任何干扰。

1978年，我们用很大一部分预算组装了一个极好的接收机，我在运行这个程序时展示了应对干扰和欺骗的对策。你猜发生了什么？商用飞机没有这些，其中的部分原因是我国的法律禁止出口技术。商业航空电子设备制造商可以制造这种接收机，但他们不能把它们装在出售给某些国家的飞机上。每个人都知道如何建造这样一个安全的接收机。他们可能不明白你能做得有多好，但如果你有至关重要的、有关生命安全的应用或者是大型船舶，你可以获得一个即使在10 000 W的干扰下也能够正常工作的接收机。与手机相比，这样的接收机十分昂贵，大概是10万美元，但与现代油轮的成本相比，这简直不值一提。干扰和欺骗是一个政治问题，而不是一个技术问题。

Acknowledgements

The author thanks David E. Egarter, PhD, for his patient support and editing. He especially thanks, for his time, insights, and willingness to explain, Professor Bradford W. Parkinson, without whom this article—and GPS—might not exist.

References

- [1] Sylvester T. The lonely halls meeting [video]. Raleigh: Pool Room Studios; 2018.
- [2] Pace S, Frost G, Lachow I, Frelinger D, Fossum D, Wassem DK, et al. The global positioning system: assessing national policies. Santa Monica: RAND Corporation; 1995.
- [3] Enge P, Parkinson BW, Spilker JJ Jr, Axelrad P. Global positioning system: theory and applications, 2-volume sets. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.; 1996.
- [4] GPS.gov. Space segment: current and future satellite generations [Internet]. Washington, DC: National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing [cited 2021 Feb 12]. Available from: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>.
- [5] McDougall K. Global positioning system program status [Internet]. Washington, DC: National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing [cited 2020 Jul 31]. Available from: <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2019-11/mcdougall.pdf>.
- [6] US National Academy of Engineering. 2003 Recipients of the Charles Stark Draper Prize [Internet]. Washington, DC: US National Academy of Engineering [cited 2020 Jul 31]. Available from: <https://www.nae.edu/55025/page20038914>.
- [7] Guier WH, Weiffenbach GC. Genesis of satellite navigation. Johns Hopkins APL Tech Dig 1998;19(1):14–7.
- [8] Woodford JB, Nakamura H. Briefing—navigation satellite study. El Segundo: Aerospace Corporation; 1966.
- [9] Parkinson BW, Powers ST. Part 1: the origins of GPS and the pioneers who launched the system [Internet]. Santa Ana: GPS World; 2020 Aug 1 [cited 2020 Aug 1]. Available from: <https://www.gpsworld.com/origins-gps-part-1/>.
- [10] Parkinson BW. History and operation of NAVSTAR, the global positioning system. IEEE Trans Aerosp Electron Syst 1994;30(4):1145–61.
- [11] Parkinson BW, Powers ST. Part 2: the origins of GPS: fighting to survive [Internet]. Santa Ana: GPS World; 2020 Jun 1 [cited 2020 Aug 1]. Available from: <https://www.gpsworld.com/origins-gps-part-2-fighting-survive/>.
- [12] Yionoulis SM. The transit satellite geodesy program. Johns Hopkins APL Tech Dig 1998;19(1):36–42.
- [13] US Coast Guard Navigation Center. GPS fully operational statement of 1995 [Internet]. Alexandria: US Coast Guard Navigation Center; 1995 Jul 17 [updated 2001 May 2; cited 2020 Aug 1]. Available from: <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=global>.
- [14] Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing. GLONASS history [Internet]. Korolev: Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing [cited 2020 Aug 1] Available from: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>.
- [15] Kee C, Parkinson BW. Wide area differential GPS as a future navigation system in the US. In: Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium; 1994 Apr 11–15; Las Vegas, NV, USA; 1994.
- [16] Cohen C, Lawrence D, Pervan B, Cobb S, Barrows A, Powell JD, et al. Flight test results of autocoupled approaches using GPS and integrity beacons. In: Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation; 1994 Sep 20–23; Salt Lake City, UT, USA; 1994.
- [17] O'Connor M, Elkaim G, Parkinson B. Kinematic GPS for closed-loop control or farm and construction vehicles. In: Proceedings of the 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation; 1995 Sep 12–15; Palm Spring, CA, USA; 1995.
- [18] Witze A. GPS is going places [Internet]. Palo Alto: Knowable Magazine; 2019 October 29 [cited 2020 August 1]. Available from: <https://www.knowablemagazine.org/article/physical-world/2019/gps-going-places>.
- [19] GPS.gov. Program funding [Internet]. Washington, DC: National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing [cited 2020 Jul 31]. Available from: <https://www.gps.gov/policy/funding/>.
- [20] Carey T. Society runs on GPS. what happens when it gets hacked? [Internet]. Washington, DC: Freethink Media; 2020 May 17 [cited 2020 Aug 1]. Available from: <https://www.freethink.com/articles/loran-radionavigation>.
- [21] O'Connor AC, Gallaher MP, Clark-Sutton K, Lapidus D, Oliver ZT, Scott TJ, et al. Economic benefits of the global positioning system (GPS). Final report. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2019 Jun. RTI Project No.: 0215471.
- [22] Leslie M. What if the global positioning system didn't work? Engineering 2019;5(6):985–6.
- [23] The White House. Executive order on strengthening national resilience through responsible use of positioning, navigation, and timing services [Internet]. Washington, DC: The White House; 2020 Feb 12 [cited 2020 Aug 1]. Available from: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-strengthening-national-resilience-responsible-use-positioning-navigation-timingservices/>.
- [24] Carlson EK. What will 5G bring? Engineering 2020;6(7):725–7.
- [25] Morton YJ, Van Diggelen F, Spilker JJ Jr, Parkinson BW editors. Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications. Hoboken: Wiley-IEEE Press; 2021.