

免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

GPS 受阻环境下的精确定位、导航和定时

Precision Position, Navigation, and Timing without the Global Positioning System

肯尼斯·A·费舍，美国空军少校 / 博士 (Maj Kenneth A. Fisher, PhD, USAF)

约翰·F·拉切特博士 (Dr. John F. Raquet) *

NAVSTAR 卫星全球定位系统 (GPS) 的出现引发了现代战争的革命性变化。从 2005 年以来，美国的精确制导弹药几乎都是采用了 GPS 的目标定位数据。¹ 武器发射系统因此得以精确打击敌方目标，大幅减少甚至消除附带损伤。并且，几乎所有军事资产，如飞机、坦克、舰船、导弹、迫击炮弹、运输船队，以及深入敌区的战士，无一不依靠 GPS 提供的精确定位功能。

这种定位系统对军事而言有两个重大限制。第一：此系统受限于视线范围，亦即此卫星必须在接收者的天线“视觉”范围内，才能获取信号。这个限制对室内（包括地下）及都市环境而言影响尤其大，对地面部队、遥驾飞机和精确弹药的导航构成严重的挑战。都市中的高楼可能阻断卫星的视线，造成反射或“多径”信号，使接收者困惑。在室内环境，GPS 信号虽可收到，但衰减严重，这意味着受建筑物保护的地面作战部队不容易获得可靠的 GPS 定位信号。

第二：敌人运用简单的技术和现成的设备，就可轻易破坏 GPS 信号。GPS 功率相对较低，敌人只要发射扰乱信号，就能造成“干扰”。据传：中国已经利用公路货车队部署 GPS 干扰器，另外，因特网多个网站也都兜

GPS = 全球定位系统
INS = 惯性导航系统
SoOP = 随机信号

售小型、廉价的装置，可以对抗基于 GPS 的运载平台跟踪。²

还有一种虽然可能性不大但破坏力强大的阻入手段，这就是某些国家运用反卫星技术瘫痪或击毁 GPS 卫星网中的一颗或多颗卫星。目前有三个国家已经拥有这种技术：美国、俄国、中国，其中中国在 2007 年秘而不宣突然击毁本国一颗老化气象卫星，展现了中国的反卫星能力。³

无论出现哪种情况，都可能导致 GPS 能力降低或丧失，在此情况下，军队就需要一种能提供同等精确度和功能的替代导航系统。美国空军理工学院先进导航技术中心正在开发不需要 GPS 但具备类似 GPS 精确度的技术。先进导航技术中心在探索如何运用无线电信标、人造或自然发生随机信号（包括磁场）、以及影像辅助技术，来计算位置。在未来，把这几项技术结合起来，可能形成一种能替代 GPS 的成熟技术。本文对这些非 GPS 定位技术做简要介绍，以助读者理解。

导航原理

什么是导航

人类在早期，主要关注本地导航，即确定自身居住地在附近环境中的位置，主要是依据周围地标和已知位置信息来判断。后来，特别是海洋航行极大拓展了人类的移动能力，旅行者于是需要全球定位手段。⁴ 古代水手保持方向跟踪，记录航行中每一程的距离，从而保持不迷航，这项技术称为“航位推算

* 费舍少校是美国空军理工学院电气工程助理教授，在该院先进导航技术中心任副主任。拉切特博士也是空军理工学院电气工程副教授，在先进导航技术中心任主任。

仪”。⁵ 虽然现在导航技术已有巨大的发展，许多现代系统（比如惯性导航系统 [INS]）仍然基于航位推算仪原理（假定一个起点，然后跟踪位置、速度、方向和 / 或距离经过一段时间后的变化）。

导航发展趋势

现代惯性导航系统在短期内相当精确，但若在大范围精确航行和协调，则需要极其严格的定位信息，因此催生出 GPS 技术。GPS 技术已经成为现代导航的中坚，在过去 20—30 年中不断改进，不仅极大提高了导航精确度，可以将导航中定位偏差精确到英尺甚至英寸，而且可将各种运作系统和设备同步，从而获得前所未有的效率。军事用户因此可以更经济运用作战资源、集中优势兵力和开展突然打击，将这种效率转变成作战优势。国防部和民间使用的许多系统越来越多地依赖可靠卫星导航，这些系统中的许多运载平台互相依存和协同，以（经常自动地）完成各种任务和使命。事实上，许多系统不仅仅需要靠 GPS 导航，还需要靠 GPS 才能运行，GPS 对这些系统而言已经是不可缺少的功能。并且，GPS 的精确度（包括设备本身精确度和支持设备运行的算法语言，如差分 GPS）不断提高，可以排除掉信号中的大多数错误。现在，用户在某些应用中，如军用飞机精确降落，以及不久将来的自动空中加油等，可以方便地获得近乎厘米级精确度的定位。随着 GPS 技术的潜在“客户”群体不断扩大，市场正在推出各种低成本、小体积的接收器，以满足需求。GPS 的无所不在特征，使用户（尤其是军事用户），包括参加作战的每一名军人、每一件机场设备、每一件运载平台等，越来越倾向于依赖 GPS 功能来执行跟踪和发现。在过去，由于传统导航装置和早期 GPS 接收器庞大而昂贵，我们只

能跟踪飞机等大型装备。而今，可以说每一名战士的背包中都配有一个 GPS 接收器。

军队和民间对 GPS 的依赖在增加，GPS 系统被干扰或毁坏的风险也相应加大。因此，用户需要配备具备导航和同步能力的备用设备，以备 GPS 系统发生问题。空军首席科学家最近把“GPS 中断环境下的 PNT（定位、导航、定时的词头缩写）”列为我军近期未来的 12 项科研重点之一（按重要程度排序）。⁶ 先进导航技术中心的研究人员正就这个问题进行攻关，努力研制出不依赖 GPS 的导航手段。

由于 GPS 系统在大多数情况下提供精确的 PNT，那么理想的替代技术通常需要运用导航算法把两个或更多的传感器结合起来。本文以下部分解释导航算法和传感器整合技术基本概念，然后介绍先进导航技术中心目前正在探讨的四种非 GPS 导航方法。

导航算法和传感器整合

导航算法是把信息按规则混合，通常通过预测—观测—比较流程来表达（见图 1）。图中右下处的“导航状态”表示用户当前的导航状态，或者说是有此用户当前位置、速度等的所有信息以及对此组信息质量的评定。我们可以认为这个状态是系统对用户位置的最佳猜定，以及系统对这种猜定之精确性的评定。图中的“传感器”框为整个系统测量或观测数据，从而了解用户的导航状态。对 GPS 而言，该系统观测的是到某一颗卫星的距离。它还运用真实世界的一个模型，称为“世界模型”框。在 GPS 中，这个模型可能由 GPS 所有卫星的位置（轨道）组成。

在“预测”阶段，该系统使用世界模型和导航状态来预测此系统应观测到什么；图

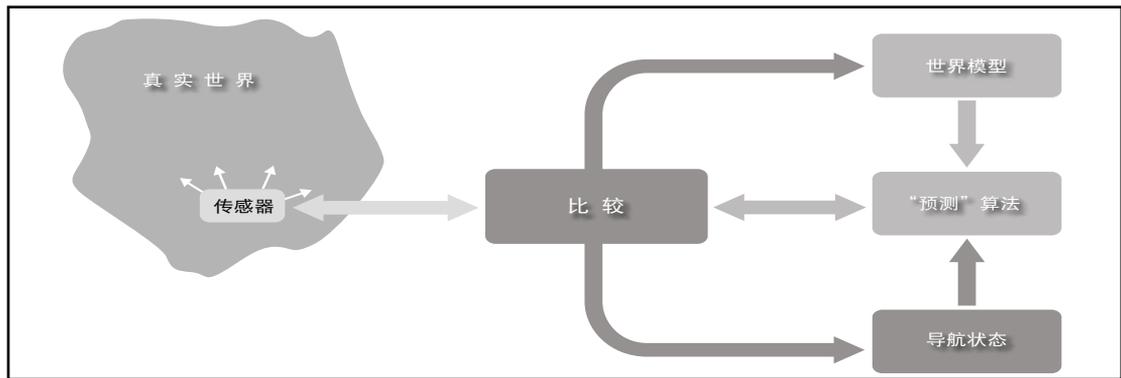


图 1：导航算法示意图

中的“预测算法”框表示这个过程。在“观测”阶段,该系统接收一个来自真实世界的噪声—蚀损测量值。在“比较阶段”,算法将预测值与实际值进行匹配对比,然后运用差值来修正导航状态,并可能修正世界模型。

设想一个简化导航示例:用户希望确定自己距一堵墙的位置。他用目测判断距离,预测为约 30 英尺(此时,导航状态为 30 英尺但不确定性高)。用户进一步通过测量或观测,即使用精密激光测距仪得到实际距离为 31.2 英尺。他将预测值和观测值进行比较,马上丢弃前者而相信后者,因为他显然更信任基于激光测距仪的测量值,而非(基于目测)的当前导航状态。

把预测和观测混合起来,构成了最令我们感兴趣的方法,但有时候用户对预测值和观测值同等信任,即使两者有差异。为处理好混合,典型的 INS/GPS 混合应用是采用 Kalman 过滤器来执行预测—观测—比较流程。⁷ INS 通过跟踪用户的移动来预测其位置;然后 GPS 接收器运用来自系统卫星的测量值来“观测”用户的位置;最后 Kalman 过滤器把 INS 预测值和 GPS 观测值对比,生成基于这两个结果之相对质量的混合解决方案。

典型的现代导航系统都是混合 INS 与 GPS 更新值来产生可信的导航估算值——之所以说“可信”,是因为这两个输入值互相补偿。INS 提供运载平台在运动中的近乎连续的准确估算,但误差总会随着时间而加大。例如,即使是最精确的 INS,在最初能生成非常接近真实位置的估算值,但误差积累到最后将导致其位置估算值不可再用。GPS 正好相反,它不频繁更新估算,从而也无误差积累。按串行方式,INS 可在短期中提供准确的导航估算值,GPS 则能在长期中提供准确数值。换言之,GPS 传感器约束了 INS 的漂移误差。

在 GPS 中断环境中进行定位、导航、定时的四种可能导航方法

用无线电信标导航

无线电信标(即人造信号源为导航目的进行广播以增强或替代 GPS 信号)可以在信号薄弱或被蓄意干扰的环境下发挥作用。美国国防先进研究局启动了一个计划,以“展示机载假卫星的应用前景,假卫星是由飞机运载的一种高功率、类似 GPS 的发射机,用于广播强大的 GPS 替代信号,此信号可以‘烧

穿’干扰器,恢复 GPS 在作战区域的导航。”⁸ 实际现场试验表明,机载假卫星可以取代卫星广播,能向 GPS 军事用户提供优质导航信号,只需对接收器的软件程序稍做修改即可。

还有研究人员运用信标来发射独特信号,其接收机需要专门设计,以能根据这些信号进行导航。有一家公司在某局部地区设置地面信标装置,用于辅助 GPS,或者在没有 GPS 的情况下独立导航。⁹ 人们甚至可以使用这些信标装置来判定地下复杂采矿坑道中矿工的位置。进一步,这些装置有可能辅助地面部队在封闭环境中开展行动。从军事行动角度来看,这种方法需要把发射机部署在地面或飞机平台上。

用人造随机信号导航

GPS 是通过跟踪卫星发射的信号实现导航,用人造随机信号 (SoOP) 导航也是根据相同原理,不同点在于 SoOP 导航所跟踪的信号不是那些以导航为目的所发射的信号,而是为其他特定目的发射的信号,如调幅和调频无线电、卫星无线电、电视、手机发射网、无线电脑网,以及其他多种卫星信号。先进导航技术中心已经研究了电视信号、调幅无线电信号、数字音频/视频广播,以及无线网络等各种可行选择。¹⁰ 由于 SoOP 选择很多,研究人员开发了一种数学工具来确定这些信号对导航的可用性。¹¹

SoOP 导航相对 GPS 导航有若干优势。首先,SoOP 选择很多,可以保证导航用户需要定位和需要减少定位误差时有大量可用信号存在。第二,SoOP 的接收信号强度经常高于 GPS 信号。¹² (我们还经常可在室内环境接收到调频无线电台或手机网发射的可用信号,此点亦强于 GPS 信号。) 并且,采用 SoOP 导航的用户不必考虑设备部署或运行费

用。(当然,移动接收器,就像 GPS 接收器一样,需要专门设计和制造后才可投用。)

把 SoOP 用于导航也有缺点。信号发射系统既然不是有意把这些信号用于导航,其定时也就不会互相连接或同步。再者,导航用户可能不清楚发射的是什么信号。为减轻这两个问题,在典型的 SoOP 导航模式中,通常包括一个基地台,亦即一个在用户接收机附近的已知地点存在一个接收装置。基地台允许用户装置提取 SoOP 中的某些特征,从而减轻定时问题。大多数算法还假设 SoOP 发射机(例如无线电台塔或无线路由器)设在已知地点,有关确定这个地点信息的方法也已研制出来。SoOP 导航中发生错误的主要根源是多路或反射信号,这个问题很难解决。

正交频率分配多路传输用于数字音频/视频广播和许多无线网络装置,是一种最具潜力的 SoOP 信号结构。这些信号表现出其他信号所缺乏的导航用途优势,例如信号中含有冗余信息,用户可通过监听(被动收听一个信号)而获得导航数据,而不必使用基地台。¹³ 与此紧密相关的研究还有如何使用无线电频率指纹来把每个信号联系到某个特定的发射台。¹⁴

SoOP 导航法中,除了通过跟踪一个 SoOP 而获得定时信息(类似于 GPS 导航)之外,还有其他方式可供考虑。例如:我们可以使用角度到达数据(主要通过使用多个天线获得)进行导航,即把多个到达角进行等分,运用三角测量系来确定接收器的位置。另外,我们也可使用 SoOP 的信号接收强度来估算与其发射源的大致距离。有一家民间公司甚至提供无线网络位置和发射功率数据库,用于信号接收强度计算。¹⁵

用自然发生随机信号导航

虽然人造 SoOP 非常值得研究，自然发生 SoOP 也到处存在。从根本上说，凡能帮助一个人区别地球上的某一位置相对于另一个位置的任何源都可用于导航。一种现象对定位有多大用处，经常取决于我们对其所做的测量是否可靠，以及这种测量与用户的位置是否紧密相关，传感器的大小、重量和功率也都有关。许多自然发生的 SoOP，如磁场、重力场、闪电等都可能用于导航，其中尤以磁场导航最具军事应用潜力。

磁场强度各异，但遍布整个地球。除了地球的主磁场之外，其他类似的磁场可发生在任何导电材料中（如建筑钢筋、墙内加强钢筋、金属管道、导线等）。因此磁场的强度在某个建筑物内各不同走廊各不同部位都不相同。先进导航技术中心已经测试了运用这些强度来辅助导航系统在室内环境工作的可行性，他们首先把从小型磁力仪（一幅扑克牌大小）获得的测量值与先前确定的此室内磁场分布图进行对比。¹⁶ 然后在磁场分布图上找出与磁力仪测量值最相关的地点，从而确定用户的位置。此实验结果证明很有前途，但仍有两处需要加强研究。第一：这个系统必须依靠已经制成的磁场图，我们不可能让战士们对现场进行勘测，因此研究人员正在研究移动过程中逐步建立这份磁场图的方法。第二：研究人员正在探索磁场经过一段时间后的变化，以及磁场导航算法在已观测磁场发生重大变化情况（磁场变化可因现场增加或撤除金属物体而引起）下的不适用性。

影像辅助导航

影像辅助导航是用照相机生成一种替代性的高度互补的系统，来限制惯性漂移。影像系统不是直接计算运载平台本身的位置，而是采用从图像传感器看到的运动来辅助惯

性导航系统。例如，假设一个人坐在椅子上旋转，生理上的前庭系统会感觉到这种旋转，但是视力通过观察运动的影像提示，来辅助对这种旋转的估算。影像传感器即以相近原理辅助惯性导航系统，从而提高导航精度。

影像辅助导航系统除了改善导航精度之外，还有其他多种优点。第一：计算机影像技术不受制于那些能有效瘫痪 GPS 的攻击（虽然基于影像的工具也面对其他制约因素，如雨雾和烟雾等）。第二：随着照相机和计算机功能更强大而成本更低，计算机影像迅速成为可以实现的及成本效益比可行的选择。第三：用于导航的照相机还可顺便收集情报。同样，用于情报收集的照相机也能顺便用于导航。还有，我们可以把数据信息与国家地理空间情报局或谷歌等商业地图提供商提供的地图信息进行整合。

由于计算上的复杂性，典型的影像辅助算法一般取用图像中的一些特征而非整个图像。此算法将连续图像中的特征进行对比，从而估算运载平台的相对运动位置。特征对比和匹配的质量好坏，取决于对后续图像序列的特征提取和识别。我们可以把分析集中在图像的一小块上，以进一步降低计算复杂性。这些计算上的改进可允许我们采用设置在相对较小平台上的影像系统。先进导航技术中心已经把一种速度更快但可信性稍差的特征跟踪算法与一种商用级惯性导航系统结合起来，在一种小型室内遥驾飞机上获得实时导航功能。¹⁷

从照相机到某特征之间的距离（即感知深度）是图像辅助导航的关键。先进导航技术中心采用两台照相机模仿人类视力，研制出立体影像辅助导航原型机，并证明其算法能接近实时。¹⁸ 美中不足的是，这种方法要

求两台照像机互相隔开一定距离，因此尚不能马上用于小型应用场合（例如装入一个微型航空器）中。

如果用一台小型常平激光测距传感器来增强一台照相机，就可免除制造立体影像系统原型机。先进导航技术中心已经使用这种传感器来测量照相机视场内的任何近物体的深度。¹⁹ 这些传感器，连同惯性传感器，可以帮助导航一架微型航空器，而不必依赖 GPS。这种技术对于室内探测和绘制地图特别有用。这种体型小重量轻的传感器组合装置除了提供非 GPS 导航功能之外，还能发现和拍摄物体目标，以用于情报或目标锁定用途。

和以上选择特征的做法不同，影像辅助导航的另一个活跃研究领域，称为预测透绘（predictive rendering），采用对物体的认知来估计运载平台的运动。先进导航技术中心正在试验把这种方法应用到空中加油技术中。具体而言，就是我们可以从一架加油机的三维模型，在计算机上从受油飞机的视角预测加油机的图像。在照相机捕获到真实图像之后，我们通过算法来将预测图像和真实图像进行对比。这种导航方式使用图像处理技术，从而简化在预测和真实图像之间建立相关（即两类图像互相匹配的程度）的过程。²⁰

把通信/导航装置与影像辅助惯性导航系统结合起来

这种设计概念是把通信和导航结合起来，形成一个战场用手握式装置。深入敌区的战士目前通常把手握式无线电通信机和 GPS 接收器都带在身上。如能把二者合一，我们的战士就能利用无线电通信机之间的通信链接进行定位，减少对 GPS 的依赖。进一步，机

载式影像辅助惯性导航系统可提供短时稳定和姿态信息。正如 GPS 辅助的惯性导航系统是把 GPS 的长期稳定性与惯性导航系统的短期稳定性相结合一样，以上所建议的设计概念也有可能获得 GPS 受阻环境下的相对长期、精确的导航。

先进导航技术中心和雷声公司的研究人员正在验证使用基于雷声公司的 DH-500 手握式通信机获得的测距值来确定用户的位置，而不依赖 GPS。²¹ 这种袋装式无线电系统不仅是成熟的通信工具，还具有测距功能。最近，先进导航技术中心把雷声 DH-500 无线电通信机的测距功能与立体影像辅助惯性导航系统相结合，获得 GPS 受阻环境下的精确导航能力。²²

这类研究有可能为解决更广泛的问题提供出路，例如，运用导航/通信一体化手握式装置，再辅之以其他传感器，可以做到同时导航和通信。这些装置还可能允许多平台在同一网络中合作，提供有助于导航的更多信息。

一副药方不能包治百病

只要 GPS（或者 GPS + 惯性导航系统）保持正常运作，就能满足大多数军事行动中的导航需要。但是如果 GPS 不可用，我们就必须转而使用上述讨论的替代导航技术。这些技术和 GPS 相比较，各自都有重大缺点。例如，基于无线电信标的导航不能全球使用，并需要设置信标装置；SoOP 导航需要能够接触到正确类型的信号（还容易受前述讨论的其他缺点的影响）；影像辅助导航在雨雾天气或海洋环境中效果欠佳；基于无线电测距的导航只能在多运载平台环境中工作。因此，任何单项技术都无法在所有环境中完全取代

GPS。通过研究开发使用非 GPS 信号的导航能力有其必要性，应该继续下去。但是，仅仅获得更多替代技术选择并不能形成全面的解决方案。

未来方向：全源导航

美国空军必须采纳全源导航方式，来解决 GPS 受阻环境下的精确导航需要。²³ 全源导航算法运用所有可用信息，能根据承载平台的动态变化而计算出精确的结果。图 2 表现一个依赖惯性导航系统的概念，此系统使用以下多种传感器信息：GPS、SoOP、影像、光线测定和测距、磁场、重力、以及雷达。请注意，此处我们有意把 GPS 包括在内（因为既然是全源导航，只要 GPS 信号可用，就应以 GPS 为主）。这样，这个完整系统结合所有可用信息，当某些传感器不可用时，仍可使用其他信号源。

美国空军理工学院先进导航技术中心正在开发相关系统，做到能通过最合适的传感器方便地按局部环境条件提供导航。例如，基于图像的导航可能在都市环境白昼条件下发挥良好效果；基于重力场的导航虽然精度稍差，但在大洋中可能最有效。显然，对不

同的环境需要配置不同的传感器。目前面临的问题是，当前的组合结构无法做到自由切换或调换导航传感器。大多数组合性导航系统都是按照具体客户的具体要求设计的，这些系统由规定的传感器组成，若增加传感器，需要做大量的调整。把各种 GPS 和非 GPS 传感器组合到同一个系统中并非不可能，只是这样的系统在体积、重量、功率等方面将极为庞大，算法将极为复杂。从现实角度考虑，不同的任务需要不同的传感器组合，如果任务发生变化，则传感器组合也应相应变化。理想的设计是，首先有一个核心整合处理器，然后按照具体的任务需要搭配合适的导航传感器，来满足这项任务的能力需求。

要制造出这样的“即插即用”式导航系统，需要我们开展大量的科研工作，研究出一套基本整合算法和整合搭配结构（包括所有硬软件），以能连接并结合来自多个物理传感器的输入数据。导航研究界对此课题兴趣越来越浓。例如：国防先研局最近发布一个广域研究项目通告，项目要求达到的目的是“开发出能够快速整合和重新搭配任何传感器组合所需的结构、抽象法，以及导航过滤算法语言。”²⁴ 自不必说，研制灵活系统整合是一项艰巨的挑战，但意义重大，如果这种系统

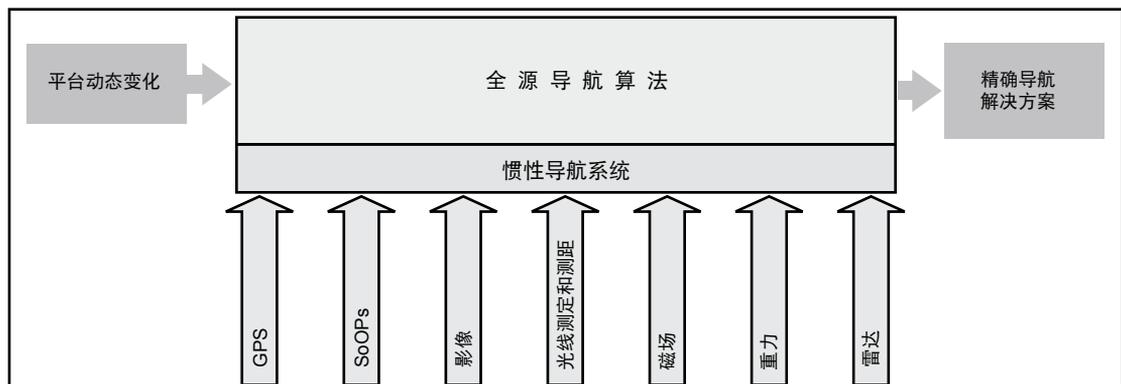


图 2：全源导航算法示意图

能在几乎任何环境中提供导航，将对军事用户有巨大作用。当然，此系统在体积、重量、功率和成本等方面都必须降到可接受的范围。

先进导航技术中心已经研制出相关技术，可以开始制造全源导航算法和部署全源导航

系统所需的传感器组合包。美国空军若想在 GPS 系统受阻的环境中保持精确导航能力，就必须继续提供投资，保证技术人员继续在整合算法、传感器能力和模块化等领域开展研究。♣

注释：

1. John W. Moyle, "The Space and Air Force: One Pathway to the Future" [太空和空军：一条通向未来的路径], Air and Space Power Journal: Chronicles Online Journal, <http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/cc/moyle.html>.
2. Alan Cameron, "Perspectives—June 2008" [视角 — 2008 年 6 月], 24 June 2008, GPS World, <http://www.gpsworld.com/gnss-system/perspectives-june-2008-7254>.
3. Michael P. Pillsbury, PhD, An Assessment of China's Anti-satellite and Space Warfare Programs, Policies and Doctrines [关于中国反卫星及太空战争计划、政策和军事理论的评估], Report to the US-China Economic and Security Review Commission, 19 January 2007, http://www.uscc.gov/researchpapers/2007/FINAL_REPORT_1-19-2007_REVISIED_BY_MPP.pdf.
4. “导航”是指“记录、计划和控制 [船舶或飞机] 的方位和路线。”该词英文“navigate”源自拉丁文“navigare”，其中“navis”表示船舶，“agere”表示指示方向。见 Webster's II: New Riverside University Dictionary, 1988 词典中“navigate”词条。
5. 这是一个广泛使用的方向工具，即磁针罗盘，于 12 世纪在中国出现。人们通常根据船的速度和时间来确定距离。参看 Pratap Misra and Per Enge, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance [全球定位系统：信号、测量和性能], (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2001).
6. United States Air Force Chief Scientist (AF/ST), Report on Technology Horizons: A Vision for Air Force Science and Technology during 2010—2030, vol. 1 [技术地平线报告：2010—2030 空军科技远景，第 1 卷], AF/ST-TR-10-01-PR (Washington, DC: Headquarters US Air Force, Office of the USAF Chief Scientist, 15 May 2010), 76, http://www.aviationweek.com/media/pdf/Check6/USAF_Technology_Horizons_report.pdf.
7. 此过滤器以 Rudolph Kalman 命名，Kalman 在其“线性过滤和预测问题新方法”论文中首先公布其预测—观察—比较算法，参看 Transactions of the ASME [American Society of Mechanical Engineers]—Journal of Basic Engineering 82 (1960): 35—45, <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>.
8. Senate, Statement by Dr. Jane A. Alexander, Acting Director, Defense Advanced Research Projects Agency, before the Subcommittee on Emerging Threats and Capabilities, Committee on Armed Services, United States Senate [国防先进研究项目局代理局长 Jane A. Alexander 博士在美国参议院武装部队委员会新起威胁和能力小组委员会上的陈述], 107th Cong., 1st sess., 5 June 2001, 9, <http://armed-services.senate.gov/statemnt/2001/010605alex.pdf>.
9. 商用提供商 Locata 对基于信标的导航系统有详细说明，参看 Joel Barnes et al. 所著“LocataNet: A New Positioning Technology for High Precision Indoor and Outdoor Positioning” [LocataNet：一种在室内和露天环境中高精确定位的新定位技术], (presentation, 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation, Portland, OR, 9—12 September 2003), 1119—28, <http://www.locatacorp.com/docs/2-%20UNSW%20Locata%20ION%20Paper%20presented%20Portland%20Sep%2011,%202003.pdf>.
10. Ryan J. Eggert and John F. Raquet, "Evaluating the Navigation Potential of the NTSC Analog Television Broadcast Signal" [评说 NTSC 模拟电视广播信号的潜在导航用途], (presentation, Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [ION GNSS 2004], Long Beach, CA, 21—24 September 2004), 2436—46; 另参看 Jonathan McEllroy, John F. Raquet, and Michael A. Temple, "Use of a Software Radio to Evaluate Signals of Opportunity for Navigation" [使用软件无线电来评估随机信号导航], (presentation, Proceedings of ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, 26—29 September 2006); 另参看 Richard K. Martin, Jamie S. Velotta, and John F. Raquet, "Bandwidth Efficient Cooperative TDOA Computation for Multicarrier Signals of Opportunity" [有关多载体随机信号的带宽有效合作 TDOA 计算], IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers] Transactions on Signal Processing 57, no. 6 (June 2009): 2311—

- 22; 另参看 Wilfred Noel, “Indoor Navigation Using OFDM [Orthogonal Frequency-Division Multiplexing] Signals” [把 OFDM (正交频率分配多路传输信号) 用于室内环境导航], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/11-30, March 2011).
11. 此潜在导航用途由 Kenneth A. Fisher 和 John F. Raquet 首先提出, 参看 “Navigation Potential of Signals Modeled with Multipath Effects and Noise” [以多路效应和噪声建模证明信号的潜在导航用途], (presentation, Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of the Institute of Navigation [ION NTM], San Diego, CA, 24—26 January 2005), 320—31.
 12. 有关调幅无线电台导航与 GPS 导航在真实演示中的比较, 参看 Timothy D. Hall, Charles C. Counselman III, and Pratap Misra, “Instantaneous Radiolocation Using AM Broadcast Signals” [用调幅广播信号瞬时无线电定位], (presentation, Proceedings of ION NTM, Long Beach, CA, 22—24 January 2001), 93—99.
 13. Jason Crosby 对此有详细介绍, 参看其硕士论文 “Fusion of Inertial Sensors and Orthogonal Frequency Division Multiplexed (OFDM) Signals of Opportunity for Unassisted Navigation” [惯性传感器和正交频率分配多路传输 (OFDM) 随机信号融合用于无辅助导航], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/09-11, March 2009).
 14. 要利用信号来定位, 应首先知道信号源。无线电频率指纹有助于把信号联系到其特定发射器。参看 William C. Suski et al., “Using Spectral Fingerprints to Improve Wireless Network Security” (presentation, Global Telecommunications Conference [运用频谱指纹改善无线网络安全], 2008: IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, LA, December 2008).
 15. 请访问 Skyhook 网站, <http://www.skyhookwireless.com/howitworks/>.
 16. William F. Storms and John F. Raquet, “Magnetic Field Aided Vehicle Tracking” [磁场辅助运载平台跟踪], (presentation, Proceedings of ION GNSS 2009, Savannah, GA, 22—25 September 2009).
 17. Jeffery Gray and Michael Veth, “Deeply-Integrated Feature Tracking for Embedded Navigation” [深整合特征跟踪用于嵌入导航], (presentation, Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Anaheim, CA, 26—28 January 2009), 1018—25.
 18. Michael Veth and John Raquet, “Fusing Low-Cost Image and Inertial Sensors for Passive Navigation” [低成本图像和惯性传感器融合用于被动导航], Navigation 54, no. 1 (Spring 2007): 11—20.
 19. 2nd Lt Don J. Yates, “Monocular Vision Localization Using a Gimbaled Laser Range Sensor” [运用常平架支承激光距离传感器实现单眼影像定位], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/10-31, March 2010), <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA524323&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.
 20. Capt Adam D. Weaver, “Predictive Rendering: A New Vision-Aided Approach for Autonomous Aerial Refueling” [预测透绘: 自主空中加油新影像辅助法], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/09-45, March 2009).
 21. 雷声公司提供陆地作战用无线电通信系统, 目前装备给在伊拉克作战的第四史崔克旅级作战部队。空军理工学院先进导航技术中心和雷声公司根据研发合作协议开展合作, 研制 GPS 受阻环境下的导航技术。
 22. 2nd Lt Erich Lichtfuss, “Indoor Navigation Using Vision and Radio Ranging” [运用影像和无线电测距进行室内导航], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/11-23, March 2011).
 23. “全源导航”一词衍生自“全源情报”, 后者表示把来自多个平台的情报数据整合处理, 生成比任何单一来源的情报更完整的情报。
 24. Strategic Technology Office, Broad Agency Announcement: All Source Positioning and Navigation (ASPN) [跨机构通告: 全源定位和导航 (ASPN)], DARPA-BAA-11-14 (Arlington, VA: Defense Advanced Research Projects Agency, Strategic Technology Office, November 2010), 5, [https://www.fbo.gov/download/b9e/b9e293bc25ab6cc1f7ad0601415bf5df/DARPA_BAA_11-14_All_Source_Positioning_and_Navigation_\(ASPN\).pdf](https://www.fbo.gov/download/b9e/b9e293bc25ab6cc1f7ad0601415bf5df/DARPA_BAA_11-14_All_Source_Positioning_and_Navigation_(ASPN).pdf).