AIR & SPACE POWER JOURNAL

中文（简体）

空天力量杂志

2007年冬季刊 — 第1卷第3期



破解战术卫星的神话
The Myth of the Tactical Satellite

埃德·汤墨，美国空军退役中校（Lt Col Edward B. Tomme）

提要：许多支持者认为“战术”卫星必不可少，理由是它们为战术作战人员提供作战空间中可感受到的重要优势。但汤墨中校却唱反调，他认为：发展、资助和生产这类卫星有可能误导战地指挥官，使他们以为卫星的作用仅仅是为战场服务。作者并提出，“战术”卫星的支持者应把目光移向战略领域，因为卫星在这个领域中可发挥更大作用。本文裁减于作者所著的内容更为详尽，资料更为丰富的另一篇论文，题为“战术卫星的战略实质”，全文刊登在美国马克斯威尔空军基地空中力量研究所网站：https://research.maxwell.af.mil/papers/ay2006/CADRE/tomme.pdf。



多年来，我们一直在构想着如何响应战场需要将战术任务载荷迅速而廉价地送入卫星轨道。[1] 快速响应型发射能力尚待由构想变为现实，不过已为期不远。造价低、排期短、快速升空，这种能力的必要性毋庸争辩。

然而，开发能利用响应型发射能力的“战术”卫星与开发快速响应型发射器本身是两个不同的概念。轨道力学对卫星有一定的物理制约，卫星在太空中所能执行的作战任务又与期待有一定差距，受此两者限制，在可

预见的将来，卫星在太空中执行战术任务的可能性微乎其微，即便能，也只是些最初步的任务，而其经济代价却达每小时几十万乃至几百万美金之钜，显然超出战术甚至战区指挥官的承受能力。所谓战术卫星能给地面战场带来战术效应是一种误导，以这种错误观念为指导，继续为战术卫星项目提供资金，将使原本紧张的预算雪上加霜，使真正有效的项目面临资金枯竭。

战术卫星的神话就神在“战术”二字上。就目前而言，战术卫星还没有在哪次任务中提供重要的战术效果。[2] 在计算机编程语言中，“战术”一词属保守词汇。当你使用该词向沙场将士推销一种程序时，后者对该词有着非常具体的理解 — 它表示适用于规模小、时间短、通常只涉及参战人员的事件。

响应战场需要及时发射小卫星，这种能力自有其用途。但是，战术卫星项目需要更名易辙，需要调整侧重点，因为它的作用在冲突的频谱中更接近战略这一侧。侧重点的改变将使快速响应型发射能力用于战略场合，在那里发挥更大的作用。战术卫星眼下的情况好比是方枘配圆凿 — 好钢不用在刀刃上。

背景

下表列举出在一合理圆轨高度上卫星经过地球表面某一区域的最多次数、经过时间及间隔时间。选择这个例子，是因为先进概念技术演示（ACTD）计划中所设想的所有战术卫星最高可在此轨道高度上运行。[3] 生成这些结果所依据的参数也对本文取用的“战术卫星项目”做出定义。[4] 每颗卫星和助推器的目标价格不超过 2000 万美元，[5] 设计寿命为半年至一年以降低生产成本。[6] 这些数字并非本人为推断出不利于战术卫星的结果而预设，它们都得到战术卫星支持者们的认可。

从表中可以看出，信号情报（SIGINT）和通信 / 蓝军跟踪（comm/BFT）任务的效率比卫星成像要理想得多，这一差异是由卫星在执行图像拍摄任务时其可覆盖的地域（field

巴格达上空 500 公里圆轨道接触时间及费用数据

任务	500公里高度圆轨				
	每日平均经过次数	平均经过时间	平均间隔时间	过顶期内有用时间%（负载周期）	过顶每小时成本（美元）
	单颗卫星				
信号情报	9.7	7分47秒	2小时20分	5.6	43,000
通信/蓝军跟踪	8.7	6分12秒	2小时39分	3.9	61,000
卫星成像	4.6	1分40秒	5小时10分	0.5	429,000
	五星星座				
信号情报	48.6	7分47秒	28 分	27.8	43,000
通信/蓝军跟踪	43.5	6分12秒	32 分	19.4	61,000
卫星成像	23.0	1分40秒	1小时2分	2.7	429,000

注：在本表中，单颗卫星和五星星座的小时成本相同，理由是增加一颗卫星后覆盖时间加倍而成本也加倍。

of regard，即 FOR）受到极大限制所造成的。图 1 显示卫星遥感器在 500 公里高的轨道上所覆盖的面积，即相对覆盖域。轨道越高，则覆盖域越大。[7] 任何从事战术作战的人员都可以看出，表中所显示的覆盖程度并不能满足战术作战的需要。战术作战人员需要卫星提供连续不断的图像，而每隔一小时左右才有一张快照在战术上并无多大用处。

信息情报和通信 / 蓝军跟踪这两种任务从近地轨道（LEO）上执行，效果均不够理想。谁也不敢在明知每小时只有 5 分钟通信时间的情况下把自己的将士派往战场。由 66 颗卫星组成的铱星系统或类似的较大卫星网能够提供很好的视域覆盖，但这样做代价昂贵。即使按每年每颗卫星花费两千万美元这样相对便宜的价格计算，建立和维持这类卫星网络的支出远远超出战术级指挥员所能承受的范围。[8]

在本文中，我将把战术卫星计划作尽可能积极的设想：假定所有卫星都运作正常；它们可随时被送放到期望的最佳轨道上；它们在整个运行周期都能圆满完成各项任务，也不造成资金上的入不敷出；对覆盖域的要求尽可能笼统；另一方面，我们还可假定环

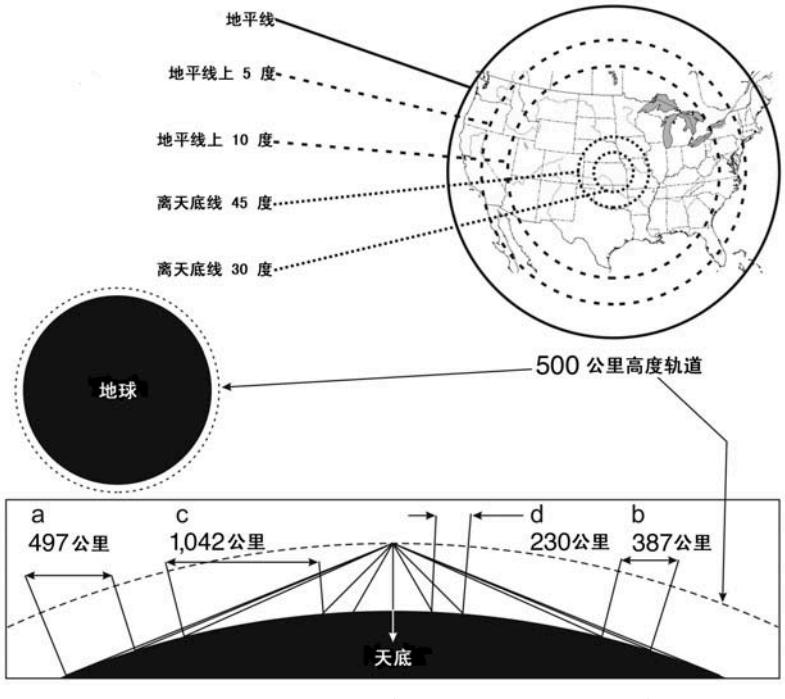


图 1：各种覆盖域在 500 公里上空的对比状况。此图初看起来提供两种视角（即高于地平线的地基视角和离开天底线的星基视角），其实它们的落点是相同的。在任何特定的高度，任何星基覆盖域可换算成地基覆盖域，反之亦然。换算办法主要取决于卫星的高度，过程比较复杂。地基和星基覆盖域这两种术语经常被用来描述不同形式的任务。

注：在该图的上半部分，点线代表卫星成像涉及到的覆盖域，虚线代表与通信 / 蓝军跟踪有关的覆盖域，实线则代表与信号情报有关的覆盖域。图内中左实心黑圆显示地球和 500 公里高度轨道的比例。图下部是 500 公里高度轨道覆盖域的放大平视图。距离“a”等于地平圈半径覆盖域与离地平上 5 度覆盖域之间的差；“b”等于地平线上 5 度与 10 度覆盖域之间的差；“c”等于地平线上 10 度与天底线下 45 度处覆盖域之间的差；“d”等于天底线下 45 度和 30 度处覆盖域之间的差。

境条件十分理想，因此卫星上的遥感器总是处于最佳工作状态，能顺利完成信息情报搜集、图像拍摄、通信联络，及蓝军跟踪等任务。作以上种种假设的目的是想说明，即使所有系统的工作状况比宣传所说的还好，战术卫星计划还是不能为地面提供有效的战术支持。假设过程中的容忍度之大，只是表明战术卫星计划达不到战术目的的原因并不在于工程技术上的缺陷，技术缺陷可通过多投资得到解决；而在于无法克服的物理限制，这个限制只有当卫星的价格便宜到能允许同时部署数百颗卫星构成星座时才能解决。在假设功效完善的技术产品确实存在之后，我们方可集中精力评估本论题的操作实用性的一面。

在此，有必要对“功效完善的技术产品”做一些澄清。从战术卫星支持者所发表的各种介绍和文章来看，一般战术卫星计划的目的不外乎把相当于 **1,000 磅重的任务载荷送**入地球上空 **100 海里 (185 公里) 的圆轨道，**[9] 并打算让卫星在空中逗留六个月至一年，每颗卫星与相应助推器的购置价格在 **2,000 万**美元左右。[10] **表中的计算结果是以设想中的**最佳轨道为基础，该轨道能使卫星提供最长的过顶时间，或称“接触时间”。[11] 通过优化接触时间，我们可使卫星每天的经过次数达到最多，经过时间最长，并缩短卫星不在头顶上空的时间，或称“间隔时间”，同时尽量降低过顶期间的小时成本。这些轨道不一定具备最佳可操作性，因为真正最佳可操作性轨道还要考虑到其他限制因素，比如应该选择始终有阳光的恒角。无论如何，本文假设的轨道只以时间和成本来衡量，在此两个衡量指标上表现不佳的任何其他轨道都被排除在外。

对轨道物体的物理制约

关于轨道有几条无需求证的常理，现陈述如下。首先，为了尽量增加接触时间，轨道卫星的倾角应当非常接近目标物的纬度。第二，增加轨道高度可以增加接触时间。[12] 这是由两种原因造成的：最简单的道理是登高而望远，[13] **增加轨道的高度能扩大视野覆**盖区的面积，从而对延长接触时间有积极作用。再者，卫星轨道越高，每圈速度就更慢，与地球的自转速度更加接近，其视野覆盖区也会以较慢的速度移过目标区域，从而延长接触时间。最后，按照常理，接近赤道和两极地区的目标比中纬度上的目标可受到卫星更好的光顾。

如上所述，战术卫星的轨道参数会受到助推器所供动力的限制。能够把 **1000 磅任务**载荷送入离地 **185 公里圆轨道的助推器，同**样可以把 **500 磅任务载荷送入近地点 500 公**里，远地点 **8000 公里处的椭圆度极大的轨**道。[14] **如果定位正确，沿这种“神奇轨道”运**行的卫星可以每天在地球同一地点的上空经过一次，在其部分轨道上提供覆盖面广，移动缓慢的覆盖域，结果是每天的有效覆盖时间从由分钟计提高到由小时计。[15]

现在我们已经理解如何通过完善卫星的圆轨道来最大限度地增加与特定目标的接触时间 — **这就是尽量增加轨道的离地高度，并**使轨道倾角接近观测目标的纬度。优化神奇轨道并不难，只要使用一套特殊的轨道参数将卫星定位在太空中的正确位置即可。下一节的讨论将基于对最佳轨道和最长接触时间的假设，这样的假设可进一步确保我们在探讨战术卫星的操作实用性时，取用的是最理想的背景：发射出去的卫星能完美满足计划目标，其轨道位置最利于战术上的成功。

对最佳轨道的传感器制约

如图 1 所示，任何轨道上的卫星都可以有好几种覆盖域，具体取决于卫星的任务设计。如果覆盖域始终有广阔的地平圈那么大当然最好，但实际上这种情况只对少数信号情报收集任务有效，对其他信号情报任务及通信、蓝军跟踪和图像拍摄任务而言，并无意义。之所以说覆盖域远达地平圈并不见得有用，原因在于传感器的工作要求。在执行信号情报搜集、通信及蓝军跟踪任务过程中，被测的信号发射器与卫星传感器之间的视距必须畅通无阻。

信号情报传感器可以接收和分析所探测到的任何信号，因此一般来说不需要与地平线成一定的角度。如果地形平坦而传感器视距可直达地平线，当然理想。如果有山阻隔，传感器只需等待时机，一旦与信号源之间建立起畅通视距，便可收集信号。基于上述原因，我可以假设直达地平圈的覆盖域对大部分信号情报收集任务有效。

通信、蓝军跟踪、以及图像拍摄任务则另当别论，这类任务是不能采用地平圈覆盖域的。战术层次上的通信 / 蓝军跟踪能力的关键是从不间断。通信 / 蓝军跟踪一般要求卫星平台与地平线至少成 5 度仰角，更以 10 度为普遍。虽然这样做并不保证卫星的覆盖能达到深谷底部，但确实避免了个别树木、房屋或山丘对卫星视距的干扰。如图 1 所示，把覆盖域限制在地平线上方 5 度对最佳轨道的效用有着重要的影响。

成像传感器所受的限制更大。它们不仅要像卫星的其他任务一样依赖于视距畅通，而且不可与垂直线(垂直于天底线)偏离太远，否则问题会层出不穷。这些问题包括图像深度缩小，大气阻隔明显，图像清晰度降低，从而加大图像分析难度，甚至无法分析。而且，许多成像传感器都是在可见光区内工作，黑夜工作极为困难。即使是能够夜视的红外传感器，亦难穿越厚厚的云层。

图 2 显示战术卫星在离地 500 公里的轨道（即增加接触时间的最佳轨道）上时，轨道和传感器制约因素在所有纬度上对卫星的影响所形成的综合后果。如果选用其它轨道来达成任务的目的，其覆盖域必然缩小，费用增加。

表格和图 2 所列数据没有考虑气候和黑夜因素所造成的制约（虽然这些制约因素不应忽略不计），而是取用最优化的数字，反映成像传感器每天 24 小时不间断工作的最理想状态。必须指出，此假设极大夸张了传感器的实际能力。

最佳战术卫星的操作实用性

现在我们讨论太空任务，把国家对卫星的任务要求与以上分析的各种制约因素进行对比分析。美国联合太空准则列出四大太空任务领域：太空战力应用、太空支援、太空控制、太空战力强化。[16] 太空战力应用包括从或通过太空对地面目标实施攻击。太空支援是指为轨道上的设备提供自始至终的维护保养。太空控制表示用攻防手段确保太空为己方和友方所用而拒敌于“天外”。太空军力强化是通过提高战空感知加强联合战力效果，具体包括情侦监（ISR）功能、战术预警和攻击评估、环境监测、通信，以及精确导航和排程定时等诸方面。在本部分的讨论中，我会尽力在这些任务领域为战术卫星寻找发挥作用的合适环节。

太空战力应用不受上述轨道优化讨论的影响，因为目前的战术卫星计划中不考虑轨

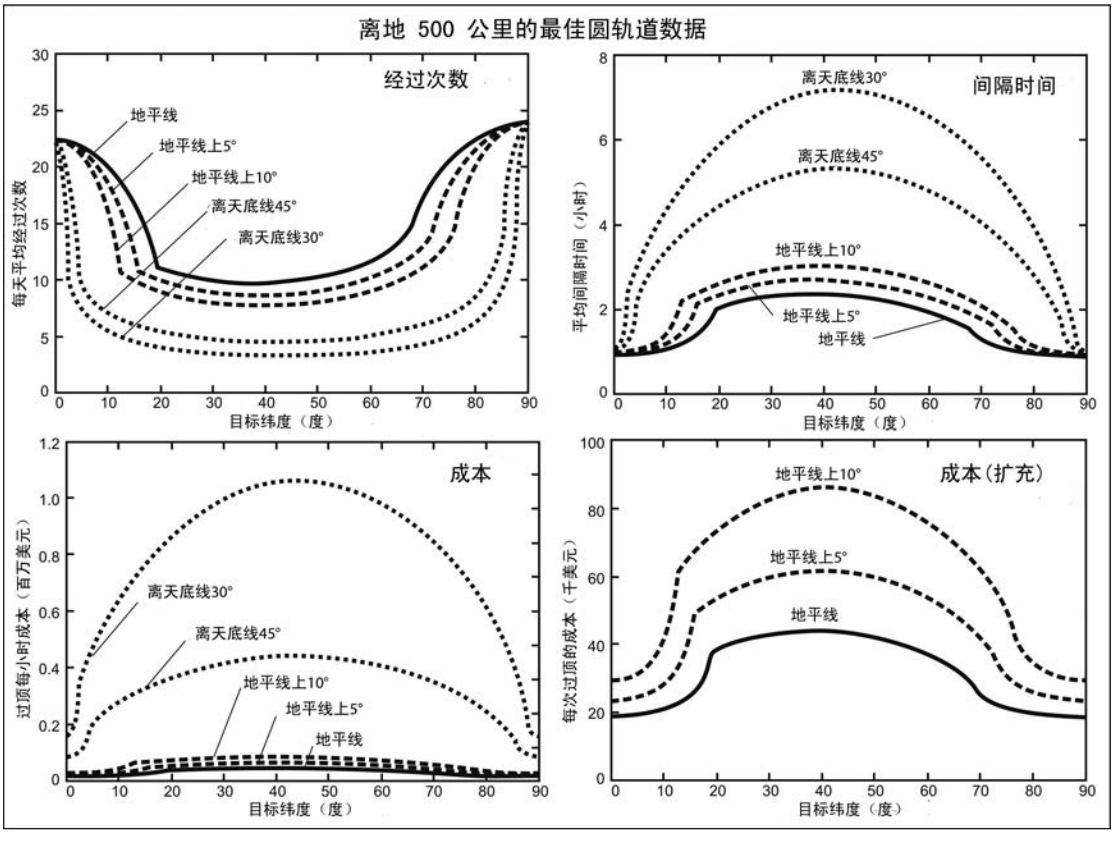


图 2：离地 500 公里轨道上战术卫星的经过次数，平均间隔时间及成本数据。

注：曲线代表三类任务数据：信号情报（实线），通信 / 兰军跟踪（虚线），成像（点线）。成本数据用两个图表显示，因为图像拍摄所用的尺度同其他任务有很大区别。

道武器。那些对地球表面能够产生效应的武器（如激光武器），其重量比 1,000 磅战术卫星的基准重量大得多。常规洲际弹道导弹也许可以提供战术卫星助推器重量范围内的战力应用效应，但它们本身不是卫星，因此不在本文讨论之列。

同样，太空支援并没有作为服务于战术卫星的任务出现在各类文章中。太空支援由发射设备、作战指挥中心、太空通信及控制网等系统组成，这些系统对于建立战术卫星星座不可或缺，但对地面上作战人员没有太大战术意义。战术卫星要求获得但不提供太空支援。值得注意的是，本文没有把任何所需的太空支援系统的耗费计算在内，因为这一耗费在目前还是个未知数；相对而言，战术卫星的支持者已经把卫星和助推器的成本推算为每套 2,000 万美元。

太空控制理所当然属于战术卫星计划的参考能量（即轨道与质量的组合）的范畴。能够响应发射卫星且调动卫星靠近其他卫星，固然意味着对敌国的太空能力拥有了生杀控制权。然而，这种控制权无疑属于战略使命，

可能产生巨大的政治后果和全球影响。使用这种控制权可以为地面上从事战术作战的将士提供优势 — 许多战略行动都有此效果 — 但这种优势只能是间接的。因此，对基于响应发射平台的太空控制这一话题我们不再进一步讨论，因为我们所关心的是怎样在地面上取得战术效果。

在考虑并排除战术卫星的上述三种太空任务之后，剩下的便是看起来最实用、最传统的卫星任务 — 太空战力强化。其实，这也是有关战术卫星的文献中唯一讨论较多的卫星任务。下面我们将把以上所提到过的近地圆轨道和神奇轨道作为参考基准点，对太空军力强化的五项子要素逐一讨论。

战术预警和攻击评估任务旨在向总统和国防部长及时通报敌方使用弹道导弹和核武器的情况。这一任务目前是由地球同步轨道（GEO）上的平台来执行的，这类平台包括数颗属于国防支援计划（DSP）的卫星。[17] 近地轨道无法满足这一任务的要求，除非在轨道上部署数百卫星组成的星座，才能对全球进行必要的不间断监控。虽然神奇轨道的情形有所不同，其卫星应该可以担当此任，但也至少需要 12 至 20 颗卫星才实现不间断的全球监控覆盖，购置费用每年最起码达二亿四千万至四亿美元，相当于一颗国防支援计划卫星的耗费，但后者的使用寿命长得多，其任务的性质也无疑是战略性的。

环境监测任务为军事行动提供太空和地球的气象数据。国防气象卫星计划（DMSP）是目前承担这一任务的平台之一。[18] 从事战术作战的将士主要依靠该计划所提供的信息来帮助策划他们的军事行动。同样，通过全球定位系统（GPS）实施精确导航和太空任务排期为地面将士提供了巨大的作战优势。担负 GPS 任务的卫星轨道较高，大约离地 11,000 公里，每隔 12 小时左右可完成一次环球运行。[19] 不过毫无疑问，上述两种系统均服务于战略目的，其功能非少量战术卫星所能替代。假如用于国防气象卫星计划或全球定位系统的星座被敌方系统瘫痪，由响应型卫星组成的替代星座同样易受该敌方系统的攻击。

与上述三项子要素形成对比，情监侦（ISR）和通信任务这两项子要素确实需要战术层面上的加强。可惜的是，在近期的未来，所能想象到的任何响应型发射助推器均受成本绩效方面的局限，使战术卫星无法成为强化情监侦和通信系统的选择。这种局限性与近地圆轨道和神奇轨道有关，分述如下。

所有近地轨道战术卫星的基本缺陷是从较小的覆盖域上空经过的时间非常之短，使近地轨道卫星不能提供持久的监测，而这种持久性对地面人员来说极为重要。这一局限甚至对最佳的地平圈覆盖域也构成严重的限制。按照前文所述的道理，要缓解卫星飞越覆盖域太快的情况，就应当提高卫星轨道的离地距离。然而，这一解决办法实际上是以减少任务载荷重量为代价来换取额外高度；除此以外，还存在其他缺点。

提升轨道的高度虽可增加卫星对覆盖域的监测时间和降低过顶小时成本，却对信号强度有着负面的影响。运用有关电磁信号衰减的 1/r2 基本定律就不难看出，如果把轨道提高到足以明显改善卫星的覆盖域和经过时间，那么卫星所收信号强度的衰减程度越发严重。[20]

制造接收无线电信号的大型天线相对来说比较容易，在任务载荷中占用重量也较少。如果要把天线的信号接收能力提高一倍，只

需将天线的面积增加一倍即可，因此弥补近地轨道信号强度的衰减不会导致卫星重量大幅增加。天线的实际尺寸取决于被接收信号的强弱程度，强弱变化幅度非常之大。因此把光学仪器和天线用于近地轨道的战术卫星，这在技术上是可行的。

尽管如此，近地轨道卫星的效应对于战术军事人员来说是否特别重要，仍有待我们讨论后判定。按重要性的程度，最基本的因素依次为覆盖机率、覆盖时间和成本。要对战术作战人员真正有所帮助，卫星的效应必须足以波及敌方的决策圈，就是说，信息情报的提供必需迅速及时，使己方或友方部队在敌方未及反应之前就抢先行动。[21] 但以上图表清楚地显示，即使在巴格达 500 公里高的上空，卫星飞越的间隔时间比战术作战要求的时幅要长得多。

若想在离地 500 公里的轨道上执行全天候不间断信号情报搜集，光这一项任务本身就需要依靠由 80 多颗卫星组成的网络。[22] 显然，即使按战术卫星的最低估算价格和最长使用年限计算，所需卫星的数目之多，仍然使战术卫星的长期部署难成现实。就以上述需求为例，购置这一卫星系统的费用每年至少达 16 亿美元。正是由于这一原因，战术卫星的推崇者们提出了有限卫星系统的建议，也就是由 5 颗或更少的卫星组成一个小型卫星网络，以此提供所谓的“针对性持久监测”。[23] 这种持久性模式充其量也不过是频闪式断续监测，频闪之间仍是大段间隔。

但从战略角度来看，由上述 5 颗卫星组成的星座虽然稀疏，其对敌方通信和运动监测中的大段间隔，并不足以让敌方利用来开展战略行动 — 即时幅相对于卫星回访间隔而言较长的作战行动。在可预见的绝多数情况中，过于频繁地中断这类时幅长的战略行动往往会适得其反。而在战术作战中，时间则以分秒计算，比卫星的回访间隔短得多，卫星所获得的信息往往太迟太少，对友军无多大用处。因此可以说，部署在近地轨道上以收集信号情报和图像拍摄为目的的战术卫星其实对战略使命更有用得多。

用于战术卫星的预算大大超过把现有的有人及无人飞机或仍在建议中的轻于空气的近太空飞行器部署到战空的耗费。这些非轨道平台所提供的持久监测能力完全可按战场节奏调整，而不提供频闪观测器式的伪随机定时通信能力。[24]

以上讨论主要涉及信号情报收集和卫星成像这两种任务。由小型卫星星座所提供的任何情报，虽然零散，尚有一定用处。而部署到近地轨道的稀疏卫星星座根本无法提供有用的战术通信功能。在交战中，将士们必须按照作战需要随时通信，而非按照预期间隔定时通信，本末不可倒置，一如尾巴不可摆狗。零星断续的伪随机定时通信能力满足不了战术任务的需要，战术指挥官对情报的要求是**随需随要**，而不能受制于传感器的间隔。

显而易见，为对付上文所提到的近地轨道的信号覆盖率问题，战术卫星的推崇者们又发明了神奇轨道理论。不错，五六颗卫星可以提供在近地轨道上无法做到的全天候不间断监测，相对延长在目标上空的经过时间。但是此解决办法只是企图克服从太空获得战术优势所遇到的两种制约因素之一，即轨道力学方面的因素。但用拉长轨道离地球距离的方法来延长卫星过顶时间，必然导致另一制约因素复杂化，即对卫星执行任务的能力造成影响。

如果以离地 500 公里的轨道作为基线，那么神奇轨道离监测目标的平均距离是近地轨道的 17 倍。我们可以举例说明距离增加后对卫星效用所产生的具体影响：从平均 8,500 公里远的神奇轨道上把巴格达市全景摄制在 1 平米的图像上，光学孔径至少需为 5.1 米（相当于加州帕洛马山 [Palomar] 天文台大型望远镜的镜面直径），而从离地 500 公里处拍摄同样尺寸的图像，所需孔径只有 0.36 米。[25] 因此，在神奇轨道上执行常规卫星成像任务似乎也不现实。

同理，神奇轨道上的通信或信息情报天线必须加大面积才能获得近地轨道上的信号敏感度。卫星移动通信是战场上极受欢迎的装备。[26] 卫星电话造型简单，其鞭状天线使用方便，早为许多人所习惯。这类电话通常依靠由 66 颗卫星组成的铱星网络运作，该网络在离地约 780 公里的近地轨道上运行。铱星以 3 套表面积为 1.6 平米的天线为信号接收器，[27] 由于这些卫星离地很近，电话的天线因此不需要准确指向并跟踪快速运行中的卫星。而神奇轨道离地平线的平均高度相当于铱星星座的 11 倍，从地面传来的信号也因此减弱 120 倍。由于重量是影响卫星进入高轨道的关键因素，把天线面积增大到所需的 200 平米显得不切实际，而卫星上如果没有面积相当大的天线，地面上使用鞭状天线的能力就成问题，最后很可能需要启用人们所熟悉的抛物面天线来改善信号接收。

然而，使用高增益抛物面天线更增添了与神奇轨道卫星通信的难度。让行进中的部队停下来架设抛物面天线，并把信号方向对准现有的固定通信卫星，这在目前尚难做到，且为战争所忌。更何况在战术交战中寻找并跟踪神奇轨道上的运动卫星，必然是难上加难。和地面士兵需要手工调节把天线对准卫星的做法相比，许多无人飞行器（UAV）早就通过卫星链接解决了这个问题。虽然与神奇轨道上的卫星进行链接理论上是可能的，但此轨道所处环境极其恶劣，这种固有的恶劣环境可能最终决定和神奇轨道相关的任何方案的最终命运。

神奇轨道上的卫星必须经常穿越含有高密度放射粒子的内范艾伦带（inner Van Allen belt），这给工程设计带来难题，设计中必须考虑如何抵御电子辐射，确保卫星为期一年的工作寿命。抵御的办法有两种，一是使用经过抗辐射硬化处理的太空部件，二是继续使用较廉价的现货电子产品但增加额外防护层。第一种办法肯定会超出项目的财政预算，第二种办法则会大幅度增加卫星的重量，两种办法均不理想。

事实表明，轨道力学引起的制约同传感器覆盖面不足造成的制约，正好是一对无法调和的矛盾。选用高轨道固然能延长卫星过顶时间从而提高监测持久性，但代价是必须极度增加任务载荷的体积、重量及成本以达到效果要求。这是一种“第 22 条军规”式的自相矛盾的情形：若将卫星放在低轨道上，虽然成本低，但过顶时间太短，因此用处不大；反之，将卫星设置在能发挥作用的高轨道上，却又负担不起资金耗费，只有到了战略层面才能考虑。

即使本文所作的各种积极假设成立，战术卫星所能起到的战术作用明显有限。如果是基于不甚乐观（但更为现实的）的假设，那么就更有理由对战术卫星的战术用途提出质疑。综上所述，近地圆轨道和椭圆形神奇轨道卫星所受的物理上的严重制约同战术任务的要求相悖。在这些因素的制约之下，要卫星担当起战术用途的图像拍摄、通信联络、

信号情报收集及蓝军跟踪等任务，即便有一点可能也是极不现实，资金约束使之更加虚无缥缈。

结论

战术卫星支持者们目前所定义的战术卫星其实并无战术性可言。即便发射速度达到战术响应发射要求，即便卫星成本低于其他轨道平台，升空的战术卫星依然发挥不了战术作用。战术卫星若想达到战术卫星支持者们向军队高级领导所建议的计划目标，必须为地面提供和战术相关的效应，其时幅必须满足战术作战的时效要求。

战术卫星计划并非完全走入了死胡同。该计划的许多目标极有价值，必定有益于国家及其国防事业。主体运载器的标准化和即插即用任务载荷的开发，将使太空效应的成本大幅下降。能拥有响应型发射能力将对国家领导人选择太空控制方案产生极为重要的影响；能以低成本巩固和扩充那些昂贵且难以重新配置的国家重要资产将对战略决策者带来重大好处；能将地球同步轨道和近地轨道卫星所收集的信息迅速交叉关联将使许多战略分析家喜不自禁。战术卫星计划本身不错，问题出在误导上。支持者采用“战术”一词，误导沙场将士对计划的实际能力产生不切实际的期盼。战术卫星计划的支持者们应当把注意力转向战略领域，这一领域才是他们所推崇的卫星计划的真正用武之地。

最后，让这种神乎其神的“战术”卫星跟其他以战略为导向的项目去竞争经费也许更为合适。如果不这样做，而是与那些对地面将士确有战术支持潜力的项目抢夺资金，无异于分散国会预算的原定目的。继续把直接服务于战术作战项目的预算经费分出来用于发展战术卫星，只能使纳税人和军人的利益同时受损。 ❑

注释：

1. 例如，可参看 Maj Richard A. Hand, Maj Bonnie Houchen 和 Maj Lou Larson, eds., Space Handbook: A War Fighter’s Guide to Space [太空手册：将士太空指南], vol. 1 (Maxwell AFB, AL: Air University Press, 1993).
2. “空军战术利用国家能力”项目的目的是从包括卫星在内的国家装备中寻找战术利用价值。尽管卫星可能拥有多种战术用途，但轨道的全球性使这些卫星的首要任务都带有战略性质。如 Benjamin S. Lambeth 所说：“空中力量具有抵达全球各地与敌方交战的能力，但太空力量的性质决定了它只能是全球性的。” 见 Benjamin S. Lambeth, Mastering the Ultimate High Ground: Next Steps in the Military Uses of Space [控制最高点：太空军事利用的未来步骤], Rand report MR-1649 (Santa Monica, CA: Rand, 2003), 45.
3. “TacSat-2/RoadRunner Micro Satellite Fact Sheet” [TacSat-2/RoadRunner 微卫星小资料], February 2006, http://www.vs.afrl.af.mil/FactSheets/Road Runner.pdf （accessed 4 April 2006）； 及 “SpaceX Selected for Responsive Space Launch Demonstration under DARPA FALCON Program” [SpaceX 公司被国防部高级研究计划局 FALCON 计划挑选作响应型太空发射演示], SpaceX 公司网站, 20 September 2004, http://www.spacex.com/index.html?section=media &content=http%3A//www.spacex.com/press11.php (accessed 6 November 2005).
4. 没有统一的“战术卫星计划”；相反，空军太空司令部的空间与导弹系统中心（AFSPC/SMC)、空军研究实验室(AFRL)、国防部高级研究计划局（DARPA）及其他一些机构分散地进行着一些研究项目。本文所引目标和参数是来源于以下资料的广义数据。

5. 2004 年公布的战术卫星及其发射的基本花费为 1500 万美元。见国防部发布的“作战响应太空实验：TacSat-1”和美国政府白皮书 (Washington, DC: DOD Office of Force Transformation, 17 October 2003), 2. 至 2005 年初，上述花费为 2000 - 3000 万美元。Andy Pasztor, “Pentagon Envisions Operations with Small Satellites” [五角大楼对小卫星作战的构想], Wall Street Journal, 26 August 2005。正在研制的 TacSat-2 战术卫星项目即使不出现新问题至少也要花费 5000 万美元。Col Pamela Stewart, AFSPC Directorate of Plans and Requirements, “Responsive Space Near-Term Plan” [响应型太空短期计划], (briefing, Air Force Scientific Advisory Board, Colorado Springs, CO, 27 April 2004). 还可参见 Col Rex Kiziah, AFRL, “Joint Warfighting Space” [联合作战太空], (briefing, Schriever III War Game, Nellis AFB, NV, 8 February 2005) 和 “Joint Warfighting Space: Not (Just) an Idea, Not Yet a Program” [联合作战太空：渡过概念阶段，尚未形成计划], Inside the Pentagon，6 May 2004, 1。

6. Kiziah, “Joint Warfighting Space” [联合作战空间]. 另见 T. Ryan Space et al., “Transforming National Security Space Payloads” [转变国家安全太空任务载荷], Paper no. RS2-2004-2001 (Los Angeles: Proceedings of the Second Responsive Space Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 19–22 April 2004); 和 Maj Scott Cook, AFSPC Directorate of Plans and Requirements, “Tactical Satellite (TacSat)/Joint Warfighting Space (JWS) Demonstration Program” [战术卫星（TacSat）/联合作战太空（JWS）演示计划], (briefing, Headquarters AFSPC, Peterson AFB, CO, 6 January 2005)。

7. 表中所列数据是基于对不同任务类型所需覆盖域的乐观估计，这些任务类型是：地平线视野用于信号情报收集，地平线上方 5 度用于通信 / 蓝军跟踪，与天底成 45 度夹角用于卫星成像。如果对覆盖域作更为实际的估计（即地平线上方 10 度用于通信，与天底成 30 度夹角用于卫星成像），那么所列数据就更难被接受。费用数据按整年服务期计算，并基于每颗卫星仅为 2,000 万美元的购买价，不包括基础设施、日常运作或人员开销等费用。得出这些数据的方法及轨道优化计算方式详见本节选文的原文。

8. 参见铱星网页 http://www.iridium.com/, 12 December 2005。

9. 助推器可以给卫星提供一定的动力，该能量为卫星高度与质量之复杂结合。目前预想中的战术卫星助推器为国防部高级研究计划局的 FALCON（猎鹰）号和 SpaceX 公司的 FALCON -1 号，这两种助推器都能将 1,000 磅重的物体送入 100 海里高的轨道。只要任务载荷质量同轨道高度的结合值小于助推器所能提供的动力，那么这种助推器就能将较轻的载物送入更高的轨道。

10. Kiziah, “Joint Warfighting Space” [联合作战空间] 和 Capt Beth Stargardt, AFRL Space Vehicle Directorate, “Tactical Space Employment for Joint Warfare” [联合作战中战术空间的利用], (briefing, Joint Forces Command Joint Space Concept Development and Experimentation Workshop, Norfolk, VA, 31 March 2004).

11. 圆轨道的数据由本文作者套用下列文章中的等式计算所得：M. W. Lo, “The Long-Term Forecast of Station View Periods” [太空船地面站观察周期的长期预报], The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-118, April–June 1994 (Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 15 August 1994), 1–13, http://tmo.jpl.nasa.gov/progress_report/42-118/118J.pdf (accessed September 2005); 和 M. W. Lo, Applications of Ergodic Theory to Coverage Analysis [遍历性理论在覆盖率分析中的应用], Paper no. AAS 03-638 (Big Sky, MT: Proceedings of the AAS Astrodynamics Specialist Conference, August 2003).

12. 这一自明之理实际上只适用于一定高度。当卫星高度达到全半球的视距时，高度的进一步跃升对卫星的地面监测接触时间只能有轻微的影响。而且，当地球同步卫星在视距之内时，接触时间为最长，即所谓的 24/7（每天 24 小时每周 7 天不间断）。高度超过地球同步轨道反而会减少接触时间。由于本文的主题是近地轨道上的战术卫星，因此该理论的局限性不在讨论范围之内。

13. T. S. Kelso, “Basics of the Geostationary Orbit” [同步卫星概要], Satellite Times, May 1998, http://celestrak.com/columns/v04n07/ (accessed July 2005). 事实上，只有从无穷远的距离之外才能够看到全半球。处在同步轨道上的卫星大约只能看到地球的百分之四十二，而看不到纬度高于 81 度的地区。

14. James R. Wertz, “Coverage, Responsiveness, and Accessibility for Various ‘Responsive Orbits’ [各种“响应型轨道”的覆盖率、响应性及可达性] , Paper no. RS3-2005-2002 (Los Angeles: Proceedings of the Third Responsive Space Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 25–28 April 2005), http://www.responsivespace.com/Papers/RS3%5CSESSION%20PAPERS%5CSESSION%202%5C2001-WERTZ%5C2001P.pdf (accessed 8 November 2005).

15. Rich Tuttle, “Air Force Studies Unique Orbit for Projected Family of Small Sats” [空军研究小卫星系列之特殊轨道], NetDefense, 11 March 2004.

16. Joint Publication (JP) 3-14, Joint Doctrine for Space Operations [太空作战联合准则], 9 August 2002, ix–x, IV-5–IV-10, and A-1–E-4.

17. “Defense Support Program Satellite Fact Sheet” [国防支援计划卫星小资料], 26 October 2005, http://space.au.af.mil/factsheets/dsp.htm.

18. “Defense Meteorological Satellite Program Fact Sheet” [国防气象卫星计划小资料], 26 October 2005, http://space.au.af.mil/factsheets/dmsp.htm.

19. “Navstar Global Positioning System Fact Sheet” [Navstar 全球定位系统小资料], 26 October 2005, http://space.au.af.mil/factsheets/gps.htm.

20. 理想的电子波以球面状或部分球面状扩散。球面的 π 面积等于 4π r2/3。由于任何特定的波阵面所含的能量最终必须守恒，该波阵面任何一点上的波强必须减弱以抵消波阵面的球面增长。因此，当波阵面增长为 r2 时，波强必须减弱为 1/r2。

21. John R. Boyd, “A Discourse on Winning and Losing” [胜败论], Air University Library document no. MU 43947, August 1987. Unpublished briefing notes and essays.

22. Byron Hays, Responsive Space/Tactical Satellite Utility Analysis [响应型太空 / 战术卫星用途分析], (briefing, Brig Gen William Shelton, director of Plans and Policy, US Strategic Command, April 2004).

23. Kiziah, “Joint Warfighting Space” [联合作战空间].

24. 卫星经过的轨道并非无规可循；如果不考虑大气阻力等各种摄动因素，它们实际上很有规律。然而，对地面部队来说，大部分轨道上的卫星过顶重复规律是难以觉察的。例如，除非对轨道作特意的调整（在这种情况下卫星不可能提供最佳最长的覆盖时间），否则地面人员不会说这样的话：“在未来的两周内我的上空每天有两次卫星经过，一次在中午，另一次在半夜。”卫星过顶的重复模式远比这复杂。为此，我就用“伪随机”这一术语来说明卫星经过地球某点的模式。

25. 这一计算所用波长为 400 纳米（位于覆盖域中间）。距离取自卫星至覆盖域边缘的斜距。要达到所称的分辨率，实际光学要求会高些，因为衍射极限是基于从理论上讲十分完美的可视条件。

26. David Hardy, “TacSat Demo Status: Senior Leader Vector Check” [战术星演示状态：高级领机长向量检查], (briefing, AFRL, Kirtland AFB, NM, 22 September 2004).

27. Visual Satellite Observer’s Web Site, “Catch a *Flaring/Glinting Iridium” [追踪或隐或现的铱星], (updated 6 March 2002), http://satobs.org/iridium.html (accessed 26 October 2005).

The mission of the United States Air Force is to deliver sovereign options for the defense of the United States of America and its global interests—to fly and fight in Air, Space, and Cyberspace.

— USAF Mission Statement

美国空军的使命，是为保卫美国及其全球利益做好一切准备，随时强势出击 — 在天空、太空、网空飞行和战斗。

— 美国空军使命宣言