

И. С. 阿斯塔包維契

С. А. 卡布蘭



# 人造地球卫星的 目視觀測

# 人造地球卫星的目视观测

И. С. АСТАПОВИЧ  
С. А. КАПЛАН 著

陈晓中 张之本 译  
馮和生

汪 家 詠 校

科 学 出 版 社

1959

И. С. АСТАПОВИЧ, С. А. КАПЛАН  
ВИЗУАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ  
ИСКУССТВЕННЫХ  
СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ  
ГОСТЕХИЗДАТ 1957

內 容 簡 介

本书敘述了人造地球卫星运动的力学原理基本知識，以及人造地球卫星的可見条件和目視观测方法。运用书中的方法，我們就能够近似地决定人造卫星的軌道，計算和预报它經過某一地点的方位、高度和时刻。最后一章敘述了人造卫星光学观测站的組織和设备的問題。本书可供天文爱好者及全国人造卫星光学观测站工作人員閱讀。

人造地球卫星的目視观测

И. С. 阿斯塔包維契 著  
С. А. 卡 布 兰 著  
陈 晓 中 等譯  
汪 家 詠 校

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)  
北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1959 年 9 月 第 一 版 书号：1860 字數：53,000  
1959 年 9 月 第 一 次 印 刷 开本：787 × 1092 1/32  
(京) 0001—3,000 印张：2 1/2

定价：0.32 元

## 前 言

1957年10月4日，苏联在人类历史上最先发射了人造地球卫星。这个在近年来科学和技术上的巨大事件，引起了世界上各界人士的广泛注意。11月3日又发射了第二颗苏联的人造地球卫星。

发射人造地球卫星对科学的意义是无法估价的。利用人造地球卫星进行科学研究的最近任务，是和国际地球物理年（1957年—1958年）相联系的，但是创造和发射人造地球卫星问题的广阔范围，已经远远地超过地球物理以及和它相邻的学科；这是人类在掌握宇宙空间路程上的第一步。

前两颗人造地球卫星的发射，显示出了苏联的科学和技术与各资本主义国家的科学和技术相比的先进性，以及它们解决最复杂、最困难的科学技术问题的能力。

参加和发射前两颗人造地球卫星有关的研究者、有苏联和外国的各个不同专业的科学家。今后的苏联人造地球卫星的发射，将更为扩大这些研究的课题。

主要问题之一，就是利用无线电技术、目视观测、照相观测以及其他方法对人造地球卫星的运行进行研究。其中特别是目视光学观测具有重大的意义。

目视光学观测，是借助于小型光学望远镜（双筒望远镜、双目镜、单筒望远镜等）用肉眼来进行的，它有着本身的优点和缺点。

目视光学观测最明显的表征，是它的简单性和群众性。利用简单的光学仪器，例如双筒望远镜看人造地球卫星，而对

大的人造地球卫星則直接用肉眼，这是每个人都能作到的。在分散于世界上各个地方的几十个甚至几百个人造地球卫星目視光学观测站中，每个站已經有和将要有 20—30 个观测者已經进行和将要进行工作。因此，专门观测人造地球卫星的观测者的总人数将有几千。

本书的讀者对象，是已經参加和今后愿意参加前两顆苏联人造地球卫星目視光学观测項目的观测者和爱好者。书中敘述了关于人造地球卫星运行的主要資料、它的可見条件和目視观测方法等，也就是人造地球卫星观测者起碼需要懂的一些东西。建議讀者了解一下高等学校課程的普通天文学，特别是必須要了解以力学概念为基础的球面天文学原理。讀者也必須了解星等的概念<sup>1)</sup>。

本书中，完全未談到用于发射人造地球卫星的火箭的結構的技术問題，以及人造地球卫星內部結構的可能形式。因此，我們將不去探討那些和安装在人造地球卫星上各种不同仪器有关的一些問題。从一方面来看，就是从人造地球卫星目視光学观测的角度来看，发射人造地球卫星的一切技术特性，或人造地球卫星的結構都是不关重要的(仅需知道它的形状、大小和它表面的反射能力)；而从另一方面来看，目前已經有大量的書籍(例如 [2]、[13])，其中敘述到发射人造地球卫星問題，以及利用安装在它上面的仪器进行的科学研究等各种不同的观点。因此，作为天文专业工作者的本书作者，在本书中将只限于敘述与目視光学观测——天文学的方法和它应用的仪器等直接有关的一些問題。

---

1) 人造地球卫星观测者必备的有关天文学的知識，讀者可从 П. Г. 庫利科夫斯基編的“天文爱好者手冊”(該手冊已有中譯本，科学出版社出版——譯者)一书中查到。以后在本书中將以 [1] 表示該手冊。对天文学原理不够十分了解的观测者，該手冊是本书必需的补充參考讀物。

大家都知道,当发射第一顆苏联人造地球卫星时,它的运载火箭也被射到前者的軌道上去。由于运载火箭的体积很大,能够很不費力地看到它,特别是用肉眼便可以很容易观测到。

用肉眼也可以很容易看到 1957 年 11 月 3 日发射的、体积更大的第二顆苏联人造地球卫星,当发射这顆人造地球卫星时,本书已經付印。

本书中所敘述的人造地球卫星目視观测方法,可以进一步归結到适用于小体积的人造地球卫星。完全可以理解,这些方法也完全适用于观测一些大的人造地球卫星,由于大的人造地球卫星具有較大的可見亮度,观测起来更为簡便。关于这一点,特别是表現在照相观测方面。然而,即使是大的人造地球卫星,如果它們是在很高的高空运行,它們的亮度也是很微弱的。因此,本书中所敘述的一些观测方法是相当一般的,作者希望它們能应用在所有的人造地球卫星的观测上。

作者应向本书讀者說明,在写这本书的期間,第一顆和第二顆苏联人造地球卫星还很稳定地运行在它們的軌道上;所以,我們还未掌握有关人造地球卫星軌道的計算和观测分析的最終数据。一方面由于在不久的将来还将要发射人造地球卫星;而另一方面,現在已經可以肯定,本书中所敘述的目視光学观测方法的基本面貌在今后未必会有所改变;因此,才决定現在出版这本书,而不去等待前两顆苏联人造地球卫星观测的最終数据。

作者向对本书提出宝贵建議的 A. M. 罗金斯基同志表示感謝,作者在写本书时曾經多次採納了他的建議。

# 目 录

前言	( i )
緒言	( 1 )
人造地球卫星目視光学观测的意义	( 1 )
第一章 人造地球卫星的运动	( 3 )
§ 1 人造地球卫星的軌道参数	( 3 )
§ 2 大气阻力对人造地球卫星运动的影响	( 13 )
§ 3 地球的扁率和地壳结构的不均匀性对人造地球卫星运动的影响	( 23 )
§ 4 人造地球卫星再次經過給定的緯度	( 29 )
第二章 人造地球卫星的观测条件	( 38 )
§ 5 人造地球卫星的視星等	( 38 )
§ 6 晨昏朦影現象	( 43 )
§ 7 人造地球卫星的可見条件	( 45 )
§ 8 人造地球卫星的照相和光电观测的可能性	( 48 )
第三章 人造地球卫星的目視光学观测站	( 51 )
§ 9 目視光学观测站的远鏡排	( 51 )
§ 10 人造地球卫星目視光学观测站的設備	( 55 )
§ 11 人造地球卫星的目視观测方法	( 61 )
§ 12 利用目視光学观测站研究流星	( 67 )
参考文献	( 72 )

## 緒 言

### 人造地球卫星目視光学观测的意义

人造地球卫星目視光学观测的基本任务，就是要获得人造地球卫星轨道的一次近似計算和星曆表的資料。实际上，根据发射的一些条件，很难預先获得人造地球卫星的一定的轨道：它的轨道的参数将取决于人造地球卫星的初速度随計算值的大小和方向而改变可能发生的偏差。因此，人造地球卫星目視光学观测对于最初阶段，就是当还不能以足够的精确度了解它的轨道时，是非常重要的。

确定了人造地球卫星的近似轨道以后，将考虑到一切的摄动而計算它的精确轨道。根据人造地球卫星精确轨道的数值，我們便可以解决这样一些极重要的問題：象确定地壳（根据人造地球卫星运行的局部摄动）的结构，或是象建立把各大洲的大地测量网联結为整体的世界大地测量网。为了解决这些問題，必須以达几十米的精确度来确定人造地球卫星的位置。目視光学观测是不能获得这样的精确度的；精确度这样高的人造地球卫星的位置，将要利用照相或无綫电干涉法来确定。但是这些相应的装置非常复杂，而且更主要的是，它們只能用在这种情形下，就是当人造地球卫星的近似轨道了解得十分清楚时，才能做到。因此，确定着人造地球卫星轨道的目視光学观测，将一直保持它的作用到研究人造地球卫星的最后阶段。特别是当人造地球卫星的“生命”就要結束的最后阶段，目視光学观测的作用将会更为增大。首先，由于装設在人造地球卫星上的电池組的使用期限的限制，它的无綫电观



測最終將成為不可能的。其次，隨着人造地球衛星逐漸進入空氣密度更大的地球大氣層的同時，它的軌道的參數將改變得越來越快，因此軌道的預算以及照相方法的應用將成為不可能。這時，目視光學觀測幾乎成為人造地球衛星觀測的唯一方法。必須指出，在人造地球衛星的“生命”就要結束的最後階段研究它的運行，對於確定高空的大氣性質以及空氣的密度有着很大的意義。

最後要說的一點有着重大的意義。精確確定人造地球衛星位置的裝置（如照相觀測及無線電干涉觀測裝置），因為它們複雜和價格昂貴，只能裝設在為數極少的幾個地方，因此，有時由於某種偶然的原因（有雲、人造地球衛星的無線電發射機發生故障、磁攝動、未精確地知道軌道等），漏過人造地球衛星的或然率就很大。但是，不需要高度熟練的科學工作者、配備簡單的儀器的人造地球衛星目視光學觀測站網卻可以分布得很密（目前，在世界上已經有幾百個人造地球衛星目視光學觀測站），再考慮到這些觀測的特點（建立遠鏡排），我們便能使人造地球衛星通過而沒有記錄的數目成為最少。天文愛好者參加目視光學觀測的可能性，將使這個觀測成為羣眾性了。

這樣一來，目視光學觀測在利用人造地球衛星所進行研究的項目當中占有十分重要的地位。儘管這些觀測在許多情形下並不能獲得所要求的精確度，但是由我們上面所講的它的一些特點，使它成為一種必需的、其他各種觀測所無法代替的一種觀測方法。

## 第一章 人造地球卫星的运动

### § 1 人造地球卫星的軌道参数

为了研究人造地球卫星的观测条件,首先,我們必需要知道它的运动規律。換句話說,就是要能定出它的軌道或者运动路綫。显然,地球的引力是决定人造地球卫星軌道最主要的力。此外,空气的阻力也关系到它的运动。对于十分靠近地球的人造卫星來說,月亮和太阳引力的影响是很小的,所以今后我們不再去考虑它。

在第一次近似中,可以把地球当作一个球状对称体。也就是說,忽略去它与球体的差别,并且不計及地球内部密度的非球状对称分布。如所周知,这时地球的引力就相当于一个位于地球中心、质量为地球质量的质点所具有的引力。在这种情况下,人造地球卫星将和所有其他卫星一样,沿着一椭圆軌道运动,并且遵循克普勒定律。然而,由于地球的非球状、空气阻力以及其他一些原因,人造卫星的实际运动将和克普勒軌道有点偏差,不过这个偏差通常是不大的,而且可以把它們作为摄动来考虑;在以下几节的討論中,我們就是这样进行的。

如上所述,在第一次近似中,人造地球卫星将沿着克普勒軌道运动。因此可以知道: a) 人造地球卫星总是在一个通过地球中心的平面内运动,并且当地球自轉和公轉时,这个面在空間的位置(相对于恆星)是不变的; b) 人造地球卫星的軌道是一个椭圆,地球中心是其焦点之一; B) 人造地球卫星沿軌

道运行的周期  $P$  和半长轴  $a$  (和地球中心的平均距离) 的关系, 由下面克普勒第三定律推导出来的公式来决定:

$$P = \frac{2\pi a^{3/2}}{kM^{1/2}}. \quad (1)$$

这里  $M$  是地球的质量,  $k^2$  是牛顿的万有引力常数. 特别是对于运行在海平面上的所谓“零点的人造卫星”(事实上, 这种人造卫星是不可能存在的), 在公式(1)中, 可以认为  $a = R$ ,  $R$  是地球的赤道半径, 我们将得到:

$$P_0 = \frac{2\pi R^{3/2}}{kM^{1/2}} = 84^m 4. \quad (2)$$

公式(1)和(2)决定了人造地球卫星公转的恒星周期, 即在这段时间间隔里, 对于位于地球中心的观测者来说, 卫星在其轨道上连续两次通过对恒星而言的同一位置. (公转的恒星周期的定义请参考后面文献[1] 164 页.)

现在来确定人造地球卫星的轨道要素; 要素也就是表示轨道形状和它在空间方向的参数. 这样必须首先选择适当的坐标系. 研究人造卫星的运动, 最方便的是赤道坐标系, 因为这种坐标系在空间保持自己不变的方向, 正如遵守克普勒定律的卫星轨道一样. (天文坐标系的定义参考后面文献[1] 164 页.) 我们取地球赤道平面为基本面, 地球自转轴以及从地心指向春分点的直线(在地球赤道面内)为基本线. 虽然, 由于地轴的进动, 这种坐标系相对于恒星来说, 它的位置是在变化着的; 但是, 对于研究存在时间总共才几个月的人造卫星的运动来说, 这种变化是无关紧要的.

在赤道坐标系中人造地球卫星的轨道要素是: 轨道倾角  $i$ ; 升交点的赤经  $\Omega$ ; 近地点的赤纬  $\delta_n$ ; 轨道半长轴  $a$ ; 轨道偏心率  $e$ ; 人造卫星过轨道升交点的时刻  $t_0$ .

一般说来, 这些轨道要素是人造卫星运动方程的六个积

分常数<sup>1)</sup>，現在我們來闡明它們的意義。(軌道要素的確定見參考文獻[1] 200頁。)

前兩個要素——交角和升交點的赤經——決定了軌道在空間的方向，交角  $i$  是軌道平面和地球赤道平面之間的夾角(參看圖 1)。人造衛星和子午圈在緯圈  $\varphi$  (從北點向西或東點算起)的交角  $q$  和交角  $i$  有一定的關係，從球面三角形  $\Omega CB$ <sup>2)</sup> 我們有：

$$\sin q = \cos i \sec \varphi. \quad (3)$$

從(3)式得出：a) 人造衛星以同樣的交角  $q$  經過某一緯圈  $\varphi$ ，b) 具有交角  $i$  的人造衛星不能達到緯度大於  $i$  的緯圈(因為  $\sin q \leq 1$ )。

象在天體力學中一樣，我們稱點  $\Omega$  為升交點，在這一點人造衛星從南半球經過赤道進入北半球(圖 1)，在軌道上與之相對的一點  $\Upsilon$  稱為降交點。通過地球中心和兩個交點的直綫  $\Omega\Upsilon$  稱為交點綫。交點綫與指向春分點  $\Upsilon$  (這點位置在天球赤道上，每年春分那天太陽經過該點)的直綫間的夾角，升交點的赤經(也用  $\Omega$  表示)——是人造衛星的第二個軌道要素，它和交角一起就決定了軌道平面在空間的位置。

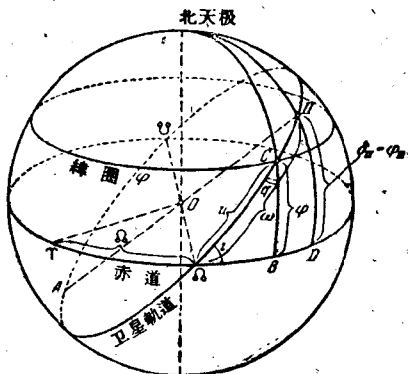


圖 1 人造地球衛星軌道角度要素：  
 $i$  是傾角， $\Omega$  是升交點的赤經，  
 $\delta_{\Omega}$  是近地點赤緯。表示符號  $\Omega C = \omega$ ，  
 $\Omega \Pi = \omega$ ， $\angle \Omega CB = q$ ，  
 $\Omega \Upsilon$  是交點綫， $A \Pi$  是拱綫。

- 1) 應該指出，軌道要素的選擇並不是唯一的；例如文獻[4]就應用另一種要素。
- 2) 球面三角學的基本概念，文獻[1]第 153 頁或文獻[3]。

人造卫星的第三个要素是近地点的赤緯  $\delta_n$ ，它决定了轨道本身在轨道平面内的方位（图 1）。人造卫星离地球中心最近的一点称为近地点；相应地离地球中心最远的一点称为远地点。由于人造卫星的克普勒轨道在空间保持一定的方位，近地点和地球赤道面之间的角距应该是不变的。所以升交点的赤緯作为第三个要素是很方便。升交点的赤緯在数值上等于它投影到地球表面时那点的地理緯度。同样也可以用角  $\omega$  作为第三个要素， $\omega$  为交点綫和拱綫（近地点和远地点的連綫）之间的夹角，在轨道平面内計量。显然， $\omega$  和  $\delta_n$  有以下的关系，这可以直接从球面三角形  $\Omega PD$  得到：

$$\sin \omega = \sin \delta_n \operatorname{cosec} i. \quad (4)$$

下一个轨道要素——长半軸  $a$ ——我們曾經定义过。它等于卫星和地球中心的平均距离，也就是表示了轨道的大小。第五个要素——轨道偏心率  $e$ ——它表示轨道扁的程度。这两个要素可以和近地点和远地点的地面高度联系起来。从圆锥曲綫的理論知道：

$$\left. \begin{aligned} r_{\text{近地点}} &= a(1 - e) = R + H_n, \\ r_{\text{远地点}} &= a(1 + e) = R + H_A. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从(5)式得出

$$a = R + \frac{H_A + H_n}{2} \quad (6)$$

和

$$e = \frac{H_A - H_n}{2a} \approx \frac{H_A - H_n}{2R}, \quad (7)$$

因为最近发射的人造卫星的  $H_A + H_n \ll R$ 。从(7)式得出，卫星轨道偏心率总是比較小的，尽管它的近地点和远地点的高度可能彼此相差很显著。其实为了获得最好的观测条件，应该在最低的高度发射人造卫星（当然，还要使它能够在相当长的时间内运行）。空气的密度到 300 公里以上的高空才充分小。

因此,  $H_n \geq 300$  公里. 另一方面, 远地点的高度不应该大于  $(3-4)H_n$ , 否则人造卫星在远地点的视亮度将非常小. 所以对于光学观测, 应该

$$e \lesssim \frac{1}{15}, \quad (8)$$

也就是人造卫星的轨道应该非常接近于圆. 特别从(7)式知道, 苏联第一颗人造地球卫星的  $e = \frac{1}{20}$ .

以上我们已定义了5个轨道要素, 这五个要素分别表征了人造卫星轨道在空间的方向( $i, \Omega$ ), 轨道在轨道面中的方向( $\delta_n$  或  $\omega$ ), 轨道的大小( $a$ ), 轨道的形状( $e$ ). 最后一个要素——第六要素是人造地球卫星经过升交点的时刻  $t_0$ . 这里无须多加解释.

现在我们来叙述决定人造卫星在其轨道上运动的参数形式的方程. 即人造卫星离地球中心的距离  $r$  和轨道平面内的角  $u$  (从升交点起算, 参考图1) 和时间的关系:

$$r = a \left[ 1 - e \cos M - \frac{e^2}{2} (\cos 2M - 1) - \dots \right], \quad (9)$$

$$u = \omega + M + 2e \cos M + \frac{5}{4} e^2 \sin 2M + \dots, \quad (10)$$

这里  $\omega$  决定于公式(4), 而

$$M = \frac{2\pi}{P} (t - t_n), \quad (11)$$

式中  $M$  就是平均近点角 (它的大小和时间成正比),  $t_n$  则为卫星过近地点的时刻. 显然, 在近地点  $M = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, 8\pi, \dots$ ; 而在远地点则  $M = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$ . 为了求得  $t_n$ , 应该在(10)式中置  $u = \omega$  和  $M = M_0 = \frac{2\pi}{P} (t_0 - t_n)$ . 公式(9)和(10)是按参数  $e$  展开的级数. 这些公式读者能够在任何一本

天体力学教程书中找到(例如参考文献[5][6]或[1]中也有同样的推导)(11)中人造卫星公转的恒星周期,这样在(1)和(6)推出的公式:

$$P = \frac{2\pi a^{3/2}}{kM^{1/2}} = \frac{2\pi R^{3/2}}{kM^{1/2}} \left[ 1 + \frac{3}{4} \frac{H_A + H_n}{R} + \dots \right] = P_0 \left[ 1 + \frac{3(H_A + H_n)}{4R} + \dots \right]. \quad (12)$$

从公式(12)能够决定人造卫星的平均高度,如果知道了它的公转周期.例如,苏联第一颗人造卫星开始时的周期是 $96^m.2$ .把这个值代入(12)式,就得到:

$$\frac{1}{2} (H_A + H_n) = \frac{2}{3} \frac{P - P_0}{P_0} R = \frac{2}{3} \frac{96^m.2 - 84^m.4}{84^m.4} \times 6370 \approx 600 \text{ 公里.}$$

公式(9)同样还可写成下述形式,从它马上就能得到人造卫星在地面的高度:

$$H = \frac{1}{2} [H_A + H_n - (H_A - H_n) \cos M + \dots]. \quad (13)$$

在这里我们利用了公式(6)和(7)以及很明显的关系 $H = r - R$ . 最后一个是决定任何给定时刻人造卫星的纬度的公式. 这个公式可以从球面三角形 $\Omega CB$ (图1)得出:

$$\sin \varphi = \sin i \sin u, \quad (14)$$

对于任何一个人造卫星,应用所有引出的公式,使我们能够计算它的克普勒轨道参数和它在任一瞬间的轨道上位置;从而可预算出卫星出现在观测者附近的时刻和决定观测人造卫星的情况(这也就是它的星历表). 这个问题,以后将要研究到. 而现在还要作其他几点补充说明.

首先说明:当人造卫星轨道为圆时,所有公式可以大大地简化. 在这种情况下

$$H = \text{常数}, \quad e = 0, \quad u = \frac{2\pi}{P} (t - t_0). \quad (15)$$

因为我們大家都知道，被用光学观测的人造卫星将沿一个与圆差别很小的轨道上运行，所以在很多情况下，把它列为圆轨道的分析。这个假定的不准确性，只不过是影响到人造卫星地面高度的决定。但是，因为对于给定的地理纬度，人造卫星的高度并不变化，这就是说，每个观测者总是（当人造卫星按克普勒轨道运行）看到卫星在同一高度上，所以真实轨道和圆轨道的差别也就可以不去考虑。

根据人造卫星轨道要素的数值可以进行分类：首先应当区别的是正方向的和反方向的人造地球卫星。前者的运行方向和地球自转方向一致，也就是西升东落；而后者的方向则相反。我们约定：前者的情况是  $0 \leq i \leq 90^\circ$ ；而后者的情况是  $90^\circ \leq i \leq 180^\circ$ 。正方向的人造卫星的好处在于发射的时候，地球自转的线速度（在赤道地方为 462 米/秒）附加在由火箭所获得的速度之上；因而能够在机械推力上得到好处，并使发射人造地球卫星的成本降低。在相反的情况下，就需要抵偿地球的自转速度。那么发射反方向的人造地球卫星，要求火箭具有大的机械推力。然而，在高纬度地区发射时，这个机械推力的差别是不大的（百分之几）。前几个人造地球卫星的轨道可能是正方向的。

显然，发射具有各种不同交角的卫星都是有可能的。当  $i = 0$  时，我们有“赤道卫星”；而  $i = 90^\circ$  时，有“两极卫星”（图2）。从科学的意义来看，赤道卫星是极卫星的。首先因为，它仅仅是

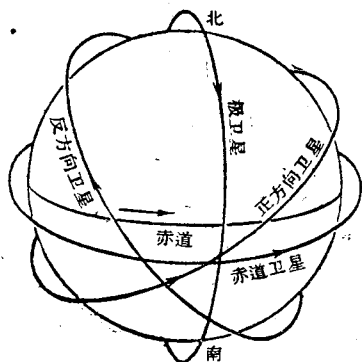


图2 正方向、反方向、极和赤道卫星。



在赤道附近很窄地带内可以观测到。在这范围内不可能分布足够多的观测站（沿赤道很大一部份是海洋）。另外，影响到它的运动的，只是表明地球赤道部份的不均匀性，也就是说，利用它我们只能进行比另外情形多得多的研究。

两极卫星比较有利，因为它将依次飞过地面上任何一部份，影响到它的运动的是整个地壳结构的不均匀性，并且全世界所有观测站都有可能观测到它。此外，利用两极卫星可以研究最有趣的两极地区。然而发射两极卫星在技术方面却是复杂的（例如，要求大的初速度）。

从图3上明显地看得出，如象苏联第一颗人造地球卫星的轨道一样，具有很大的交角（ $i = 65^\circ$ ），经过了地球上很大部份的地区（包括极区）。这样一来，苏联第一颗卫星虽然不是极卫星，但从它所收集到的资料价值来看，它几乎不下于极卫星。

美国预备发射小倾角（ $i = 40^\circ$ ）的人造卫星。一般说来，在国际地球物理年期间内，将可能发射具有不同倾斜度的人造地球卫星。

特别有兴趣的是发射所谓“晨昏”的人造地球卫星，它起初具有这样两个轨道要素：

$$i \approx 90^\circ - \delta_0; \Omega \approx \alpha_0 + 90^\circ, \text{ 或 } \Omega \approx \alpha_0 - 270^\circ^*),$$

式中  $\delta_0$  和  $\alpha_0$  是在发射时太阳的赤纬和赤经。这种人造地球卫星将有好几天连续地处在太阳光照耀之内，而在沿着地球表面上被照耀与没有被照耀的分界线上运行。所以，所有在人造卫星飞过其上空的观测站，都可在黄昏和黎明时看到它。结果，“晨昏”的人造地球卫星的观测条件是最优越的，而且它经常在太阳光的照耀中，保证了人造地球卫星仪器的日光电池

\*) 原书  $i \approx 90^\circ - \delta_0, \Omega = 90^\circ - \alpha_0$  有誤——譯者註。