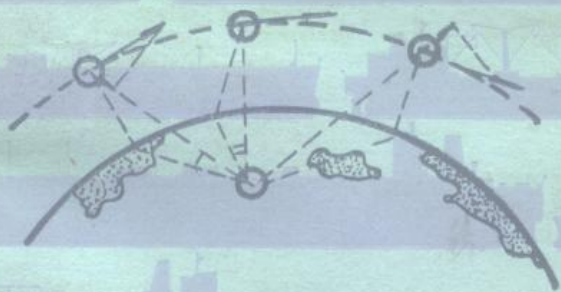


航海业务知识丛书
(航海仪器部分)

卫星导航定位

方祥麟 冯孝礼 编



人民交通出版社

航海业务知识丛书

(航海仪器部分)

卫星导航定位

Weixing Daohang Dingwei

方祥麟 冯孝礼 编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要介绍导航卫星定位的基本原理及其在航海上的实际应用。全书共分四章：导航卫星定位原理、人造地球卫星运动的几何基础、海军导航卫星系统（NNSS）及卫星导航仪的操作使用。根据船舶驾驶人员的需要，书中着重从使用的角度简明地介绍了实际应用的多普勒法的定位原理、海军导航卫星系统及我国运输和工程等船舶上广为装备的MX-1112卫星导航仪的基本操作使用方法。

本书可供航海人员、港航监督人员以及大专院校船舶驾驶专业师生参考。

航海业务知识丛书

（航海仪器部分）

卫 星 导 航 定 位

方祥麟 冯孝礼 编

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：8 字数：60千

1983年7月 第1版

1983年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,500册 定价：0.57元

前 言

随着交通运输事业的发展，迫切需要有一支与其相适应的、具有一定科学文化水平的职工队伍。搞好全员培训、加强职工技术教育，实为当务之急。当前矛盾是：学习不能都进学校，在职自学又缺少合适的书籍。因此中国航海学会为普及和提高广大海员的航海科学技术水平，以适应航海事业现代化的需要，特倡议组织编写航海知识丛书。中国航海学会编辑委员会与人民交通出版社于1980年在上海组成了航海知识丛书编审委员会，由陈有义、印文甫分别担任正副主任，王世忠、赵国维任秘书。编审委员会开展工作以来，已组织了企事业、学校专业人员在业余时间分别进行编写，丛书将先后出版，陆续与读者见面。

航海知识丛书根据专业性质分为《航海业务知识丛书》和《轮机业务知识丛书》两套丛书。为了方便海员学习，力求结合实际，通俗易懂，并以小册子形式分专题出版。希望这两套丛书能不断为海员们业务技术学习作出贡献，同时也希望广大海员和航运单位大家共同来支持它和扶植它，使这两套丛书在不断更新中成为广大海员所喜爱的读物。

《航海知识丛书》编审委员会

目 录

第一章 导航卫星定位原理	1
第一节 X 轴指向格林经线与赤道的交点的地心赤道面直角坐标系.....	2
第二节 多普勒效应和多普勒频移.....	4
第三节 多普勒频移与船位间的关系.....	6
第四节 用多普勒频移积分值求距离差.....	10
第二章 人造地球卫星运动的几何基础	14
第一节 导航卫星的运动规律.....	14
第二节 卫星轨道及其特性.....	18
第三章 海军导航卫星系统 (NNSS)	28
第一节 概述.....	28
第二节 定位和计算.....	31
第三节 平均观测时间间隔.....	38
第四节 海军导航卫星系统的定位误差.....	40
第五节 基准测地坐标系统的计算.....	47
第四章 卫星导航仪的操作使用	49
第一节 卫星导航仪的组成.....	49
第二节 卫星导航仪的功能.....	60
第三节 卫星导航仪的启动操作和显示.....	61
第四节 卫星定位类的操作和显示.....	75
第五节 航海计算类的操作和显示.....	80
第六节 其它功能的操作和显示.....	85
第七节 关机操作.....	88
参考书目	89

第一章 导航卫星定位原理

导航卫星是一种用于测定船舶、飞机或其它运动体位置的人造地球卫星。利用导航卫星定位是一门新颖的科学技术。目前，只有美国的海军导航卫星系统开放民用，简称“NNSS”系统。该系统自1967年7月开放民用以来，运转情况良好，工作可靠，而且具有全球、全天候、自动化程度高、定位精度高等优点。导航卫星系统和其它任何仪器一样，都不可避免地有这样或那样的缺点。例如，它不能连续和随时定位，还必须与其它航海仪器相配合。但随着定位性能的逐步提高，导航卫星定位正被广泛地应用于军事、航运、海洋资源调查以及大地测量等部门。因此，它是一种有价值的、有广阔前景的定位系统。

导航卫星是现代科学技术的产物，它按一定的轨道和一定的周期绕地球有规律地运转着。既然它是在天空中按规律运行的，当然和其它天体一样，也可以用来测定船位了。

用导航卫星测定船位和其它定位方法一样，必须具备两个条件：一要准确地知道卫星的位置；二要确定测者和卫星间的相对位置关系。卫星的位置是用 X 轴指向格林经线和赤道的交点的地心赤道面直角坐标系表示的，可根据它的轨道参数计算得出。从理论上讲，确定测者和卫星间的相对位置关系，可以有好几种方法：方位法、距离法、高度法以及距离变化率法（多普勒频移法）。但是，多年研究表明，考虑到既要满足系统的高精度要求，又要保证在现代工业技术水平下能够制造得出来，所以，目前仅多普勒频移法付诸实

现。由观测卫星所得的多普勒频移值，计算出相隔两分钟的两个相邻卫星位置到相应时刻测者位置的距离差，从而得出距离差位置线，再根据两条以上的这样的位置线相交求得船位。为此，必须介绍地心直角坐标系和一些有关多普勒效应的概念。

第一节 X 轴指向格林经线与 赤道的交点的地心赤 道面直角坐标系

为了计算上的需要，而采用 X 轴指向格林经线与赤道的交点的地心赤道面直角坐标系来表示卫星和地球上的测者在空间的位置。

该坐标系的原点是地球质量中心 O ，X 轴指向格林午圈和赤道的交点，Y 轴在 X 轴以东 90° 的赤道面上，Z 轴与地轴重合并指向 p_N 方向（图 1）。

如图 1 所示，卫星 S 在空间的位置可用 x_s, y_s, z_s 表示。 x_s, y_s, z_s 的值可根据卫星所发播的轨道参数计算求得。

同样，测者的地理位置也应用地心直角坐标系表示，只要将测者的地理坐标转换为直角坐标即可，转换可用下式：

$$\left. \begin{aligned} x_n &= \left[\frac{R_0^2}{D_K} + h \right] \cos \varphi_n \cos \lambda_n \\ y_n &= \left[\frac{R_0^2}{D_K} + h \right] \cos \varphi_n \sin \lambda_n \\ z_n &= \left[\frac{R_0^2 (1-C)^2}{D_K} + h \right] \sin \varphi_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $D_K = R_0 [\cos^2 \varphi_n + (1-C)^2 \sin^2 \varphi_n]^{\frac{1}{2}}$ ，

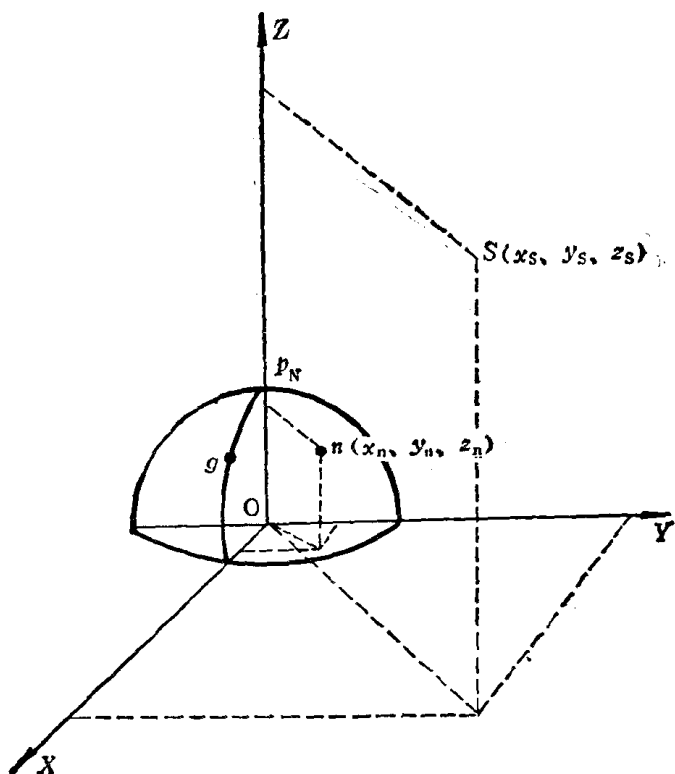


图 1

h ——观测天线在平均海面上的高度 + 大地水准面偏离地球椭圆体的高度；

C ——地球扁率 $\frac{1}{298.25}$ ；

R_0 ——地球赤道半径 (3442.934海里)；

φ_n ——测者的地理纬度；

λ_n ——测者的地理经度。

(公式证明从略，读者可参阅其它有关书籍)。

第二节 多普勒效应和多普勒频移

当我们站在火车站的月台上，一列长鸣着汽笛的火车风驰电掣地从面前驶过的时候，我们会感觉到汽笛声的声调突然由尖变粗。声调的粗细表明声波频率的高低。声波频率越高，声调越尖，声波频率越低，声调越粗。所以听到的声调由尖变粗，实际上是反应了声波的频率由高变低。这种现象就是多普勒效应。

多普勒效应是奥地利物理、天文学家赫利斯蒂安·多普勒于1842年发现的。

多普勒效应不仅适用于声波，同样适用于无线电波。电波比起声波来，尽管电波的频率高，传播速度快，但当发射稳定频率（399.968MC和149.988MC两种）电磁波的导航卫星在其轨道上以每秒7公里以上的速度通过测者上空时，这种现象仍很明显。

如图2(a)所示，在地球上某点M接收卫星发来的电波，当卫星接近时，接收到的电波频率比卫星的发射频率高；卫星到达最接近（测者M）点时，接收频率与发射频率相等；随着卫星离去，接收频率反而比发射频率低。

在物理学中，可证得：

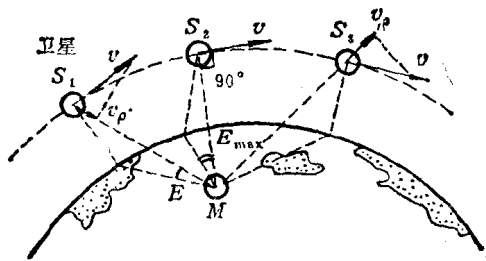
$$f = f_0 \frac{1}{1 \mp \frac{v_s}{c}} \quad (\text{卫星接近时，取} - ; \text{离去时，取} +)$$

式中： f ——接收到的频率；

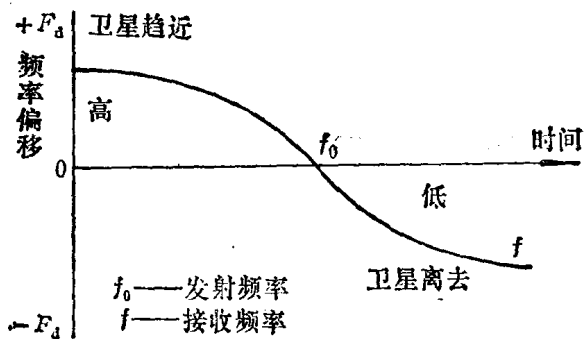
f_0 ——卫星发射的稳定频率；

c ——光速；

v_s ——卫星接近（或远离）测者的运动速度。



(a)



(b)

图 2

由上式看出：

(1) 当卫星接近测者时，式中的 $1 - \frac{v_D}{c} < 1$ ，则 $f > f_0$ ，即接收频率高；

(2) 当卫星远离测者时，式中的 $1 + \frac{v_D}{c} > 1$ ，则 $f < f_0$ ，即接收频率低。

由图2(a)可见，卫星在其轨道上运行时，接近或远离测者

的速度 v_{ρ} 是变化的。卫星由 S_1 至 S_2 运行期间，接近速度 v_{ρ} 由大变小；至 S_2 位置时， v_{ρ} 为零；再由 S_2 向 S_3 运行时，远离速度 v_{ρ} 由小变大。

由于卫星在其轨道上运行时，对测者的接近速度和远离速度是变化的，所以测者所接收的卫星 f 值也是变化的。当卫星接近时， $f_{\text{接收}}$ 总是大于卫星的 $f_{\text{发射}}$ ，但随着卫星的逐渐接近而减少，直至卫星高度（仰角）最大时， $f_{\text{接收}}$ 和 $f_{\text{发射}}$ 相等，如图2(a)中的 S_2 位置。当卫星远离测者时，接收频率逐渐减少。

根据多普勒效应可知，当卫星和测者相对接近或远离时，测者用专用接收机所接收到的信号频率 f 和卫星发射机所发射（严格确定）的频率 f_0 之间有一个差值，该差值叫多普勒频移，记作 F_d ，即：

$$F_d = f - f_0$$

用导航卫星定位的关键，就是要准确地测得多普勒频移。

第三节 多普勒频移与船位间的关系

由上可知，当卫星接近或远离测者时，接近或远离测者的速度与多普勒频移间存在着很明显的关系。为此，我们可以根据上述原理直接测量多普勒频移并根据以此所得的卫星接近（或远离）速度的大小和方向来确定船位，这种方法叫做多普勒方法。

多普勒效应用于导航卫星系统的实质在于高速运动的卫星发射严格确定的频率 f_0 。如果地面测者（与卫星相比，其运动速度小得多，可看作不动）的接收频率为 f （图2），则发射频率 f_0 与接收频率 f 之差即多普勒频移，为

$$\begin{aligned}
 F_d &= f - f_0 = f_0 \frac{1}{1 - \frac{v_\rho}{c}} - f_0 \\
 &\approx f_0 \left(1 + \frac{v_\rho}{c} \right) - f_0 \\
 &= f_0 \frac{v_\rho}{c} = f_0 \frac{v \cos \alpha}{c} \quad (2)
 \end{aligned}$$

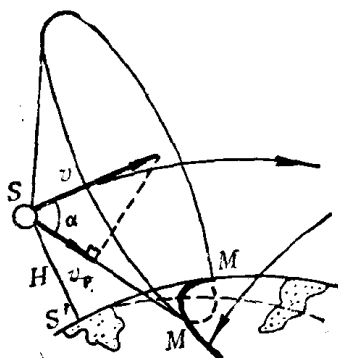


图 3

式中： v ——卫星沿轨道的运动速度；
 c ——无线电波传播速度；
 α ——卫星轨道与测者视线间的夹角；
 λ_0 ——频率为 f_0 的波长。

卫星运行期间，多普勒频移由 $F_{d_{\max}} = \frac{v}{\lambda_0}$ （当 $\alpha = 0$ 时）变到 $F_{d_{\min}} = 0$ （当 $\alpha = 90^\circ$ 时）。 F_d 随时间的变化如图 2(b) 所示。在时间 t_0 ， F_d 变为 0。这时，卫星距测者最近，其距离为 $\rho_{\text{最短}}$ 。

确定多普勒频移的最简单方法是从接收频率与船舶接收机的基准频率之间取出差频。这样一来

$$F_d = f - f_0 = f_B$$

式中： f_B ——拍频。

在公式 (2) 中， $v \cos \alpha = v_\rho$ ， v_ρ 是卫星趋近测者的速度，叫做径向速度（变化率），所以，公式 (2) 可写作

$$F_d = \frac{v_\rho}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_0} \frac{d\rho}{dt} \quad (3)$$

式中： $\frac{d\rho}{dt}$ ——卫星与测者间的距离关于时间的导数，即距离变化率。

如果卫星的发射频率 f_T 与船舶接收机的基准频率相差一常数 δ , 则公式(3)可写作

$$F_d = f_B = \frac{1}{\lambda_0} \frac{d\rho}{dt} + \delta \quad (3a)$$

这样, 未知常数差 δ 便可在“最接近距离”时刻确定,

因为这时 $\alpha = 90^\circ$, 所以 $\frac{1}{\lambda_0} \frac{d\rho}{dt} = \frac{v \cos \alpha}{\lambda_0} = 0$, 于是

$$f_B = \delta$$

由公式(2)、(3)知, $\frac{d\rho}{dt} = F_d \lambda_0 = v \cos \alpha$, 因此, 测

定频率变化, 就是测定距离变化, 也就是测定 α 角。如果 $F_d = \text{常数}$, 则当 v 一定时, $\alpha = \text{常数}$, 因而 $v_\rho = \text{常数}$ 。角 $\alpha = \text{常数}$ 即对应一个空间的圆锥面(图3), 而测者是在张角 α 的圆锥面 (α 为常数的等值面)上。

这样, 测定一个 F_d , 在空间便得出一个确定的圆锥面, 依次测定几个 F_d , 就相应得出几个以各个对应卫星轨道点为顶点的不同 α 角的圆锥面(图4)。

于是, 我们便得到卫星在空间运动的圆锥位置面簇。 F_d 愈大, α 愈小。而两个极端锥面为直线 ($\alpha = 0$, $F_d = \text{max}$) 和平面 ($\alpha = 90^\circ$, $F_d = 0$)。

因为船位于地面上, 所以, 船的位置应从锥面与地面的交线中求得。这条曲线叫做等多普勒频移曲线(图5)。显然, 等多普勒频移曲线就是地面上多普勒频移 $F_d = \text{常数}$ 、径向速度 $v_\rho = \text{常数}$ 的等值线。研究证明, 等多普勒频移曲线的形式与球面双曲线相近。图5是卫星覆盖区内等多普勒频移曲线的分布。显然, 卫星移动, 则卫星覆盖区及其相应的等多普勒频移曲线也跟着移动。

要定出船位至少需要两条等多普勒频移曲线。第二条等

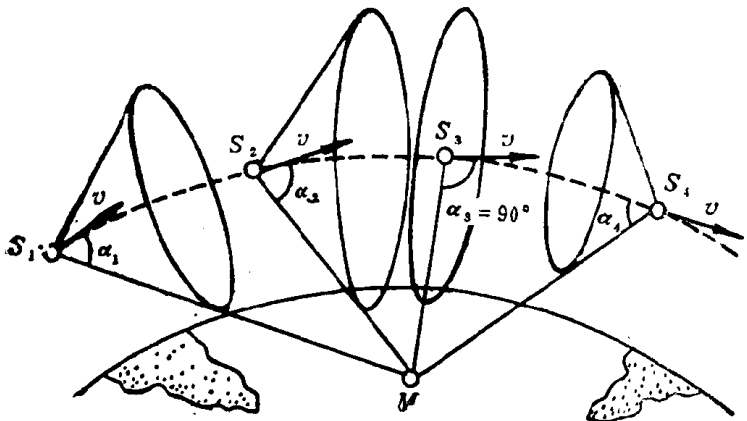


图 4

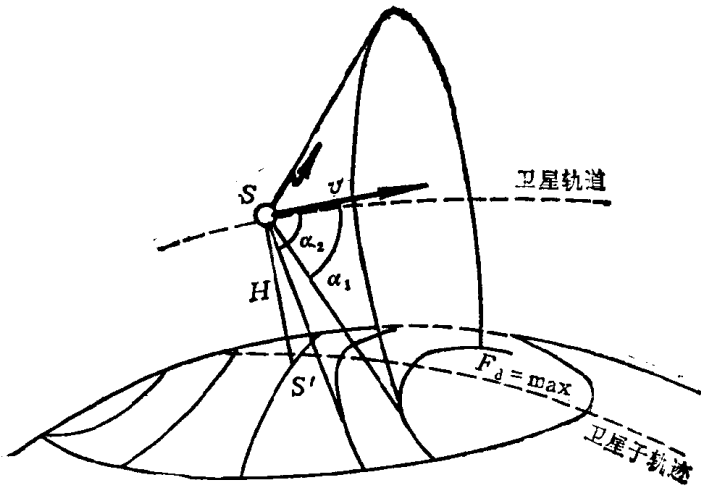


图 5

频移曲线可在测得第一条等频移曲线之后几分钟得到。这些等频移曲线在卫星子轨道（卫星轨道在地面的投影）两侧相交成两点（图5）。双值性可通过推算船位来清除。在 $\alpha = 90^\circ$ （船距卫星最近）的特殊情况下，圆锥面展成平面，等频移曲线变成大圆弧。这时， $F_d = 0$ ，实用上可用不太复杂的技术方法将它定下来。

为提高定位精度，不能只限于测两个多普勒频移，而可多测几个多余的导航参数 $\nu_\rho = F_d \lambda_0$ 。这样，在卫星一次通过的时间内可得一组多普勒等频移曲线。 F_d 的测定通常在卫星通过测者可见区的时间内实现。其测定结果可用最小二乘法在专用电子计算机上进行处理。这样得出的船位当然比仅用两条等频移曲线定位的精度要高得多。

上述导航卫星定位法又叫多普勒微分法。

目前，在导航卫星定位中，不是使用上述的卫星接近或远离测者的速度，而是利用测量多普勒频移值求距离差的方法。

第四节 用多普勒频移积分值 求距离差

测定船到同一个卫星的相继时刻的两个不同位置间的距离差的方法叫做距离差法。

低高度运行的卫星沿轨道连续通过 S_1 、 S_2 、 S_3 …等点，前后两点间的连线叫做基线（图6），它的长度

$$d = \frac{2\pi(R+H)}{T} t \quad (4)$$

式中： t ——对卫星两次相继观测的时间间隔。

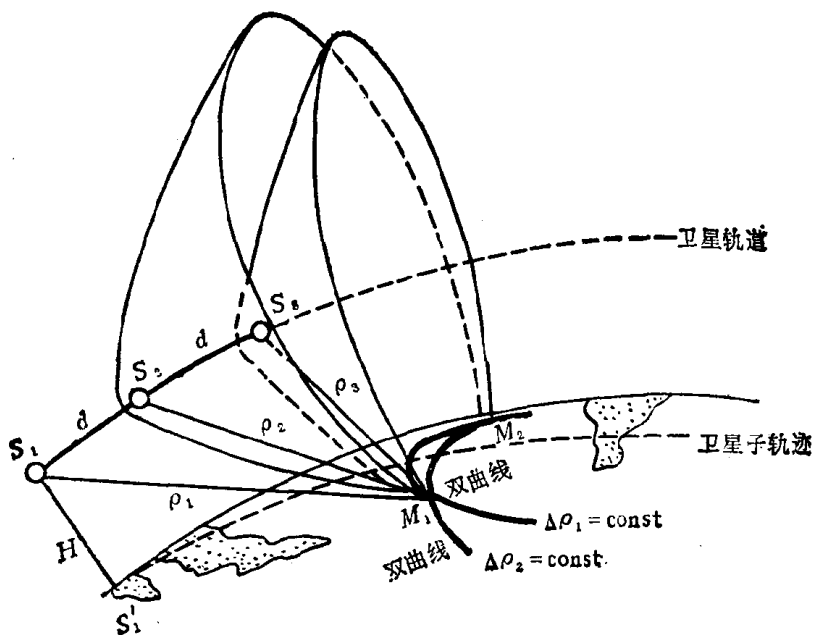


图 6

如果测卫星的两个相继位置的距离差 $\Delta\rho_1 = \rho_1 - \rho_2$ ，那末测者应位于焦点与基线两 endpoint（观测始、末两时刻卫星在轨道上的位置）重合的旋转双曲等值面上。

双曲面与地面相交是一条复杂的曲线，形似球面双曲线^①，船位就应位于该双曲线上。当基线移到新位置 (S_2S_3) 时，测定第二个距离差 $\Delta\rho_2 = \rho_2 - \rho_3$ ，又得对应于 $\Delta\rho_2$ 的第二个双曲面及第二条双曲线。类似地可得对应于 $\Delta\rho_3$ 的双曲面及第三条双曲线等等。这些双曲线的交点便是船位。

距离差 $\Delta\rho_i$ 可用多普勒方法求得，即用卫星通过基线长

①在卫星覆盖区内，可把这样的曲线看作双曲线。

度 d 的时间内的多普勒频率的脉冲计算出来。用数学表示就是多普勒频移在时间区间 $t = t_{i+1} - t_i$ 上的积分，即

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} F_d(t) dt = \frac{1}{\lambda_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{d}{dt} \rho(t) dt \quad (5)$$

因为多普勒频移 F_d 的积分就是 $t = t_{i+1} - t_i$ 时间间隔内的拍频脉冲数 N_{B_i} ，而径向速度 $\frac{d\rho}{dt}$ 关于时间的积分就是在同一时间间隔 t 内船到卫星的距离的改变，即距离差 $\Delta\rho_i$ ，所以

$$N_{B_i} = \frac{1}{\lambda_0} \Delta\rho_i \quad (6)$$

于是

$$\Delta\rho_i = N_{B_i} \lambda_0 \quad (6a)$$

这样，每一个多普勒频率的拍频脉冲数 N_{B_i} 就对应了船到上述时间间隔 t 内卫星的相继两个位置上的距离差。

上述多普勒定位法叫做积分法。

从上述讨论可知，采用多普勒积分方法的卫星导航系统与其他地面双曲线无线电导航系统相类似。卫星在轨道上连续运动，就好象一连串的载波发射台一样。如果对每相继两个卫星位置进行测定，都可求得船到卫星的相继两个位置的距离差。卫星周期地发射轨道参数信息，表示相应时刻卫星在空中的位置。这样，船上测者可通过专用的卫星导航仪借以求得用地理经纬度表示的船位。

实用上，积分区间（上述时间间隔 t ）一般可取 $t = 2$ 分，1分，30秒，23秒中的任一种。

轨道高度 $H = 1075$ 公里、周期 $T = 107$ 分钟的卫星，当积分区间是两分钟时，基线长 $d = 870$ 公里。在卫星通过可见区域的时间内，最多能测得 8 个距离差，即获得 8 根位置