

船舶电子导航

〔美〕斯·弗·阿普尔亚德 著

李新江 王永勤 译 杨守仁 丁子明 校

A B



人民交通出版社

船舶电子导航

〔美〕斯·弗·阿普尔亚德 著

李新江 王永勤 译

杨守仁 丁子明 校

人民交通出版社

船舶电子导航

〔美〕斯·弗·阿普尔亚德 著

李新江 王永勤 译

杨守仁 丁子明 校

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：850×1168 1/32 印张：7.25 插页：1 字数：141 千

1983年8月 第1版

1983年8月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3,900册 定价：1.35元

前 言

《船舶电子导航》是根据1980年英文原版翻译的。

著者曾长期从事舰船电子导航仪器的使用及技术管理工作，为撰写该书进行了十余年准备工作。

该书从技术使用管理人员的需要出发，对目前船上采用的电子导航仪器所涉及的共同基础理论，即发射与传播、时间的测量、误差概念等进行了较详尽的论述，还为读者提供了必要的数据。本书就无线电测向、康索、双曲线导航、劳兰 A、劳兰 C、台卡、奥米加、卫星导航、G.P.S 全球定位、声纳、靠泊系统、组合导航等十二种无线电导航系统从设备的使用、基本原理及优缺点三方面做了详细介绍，并对如何有效、正确地应用提出了见解。

本书可供海运院校师生、航海无线电科技人员及船舶驾驶人员参考，也适用于具有中专以上文化水平的读者自学提高。

目 录

1. 发射和传播.....	1
2. 时间的测量.....	10
3. 误差.....	13
4. 无线电测向.....	19
5. 康索.....	61
6. 双曲线导航.....	66
7. 劳兰A	73
8. 劳兰C	76
9. 台卡.....	100
10. 奥米加导航系统	114
11. 海军导航卫星系统	158
12. 导航星系-全球定位系统.....	189
13. 声纳导航	195
14. 靠泊系统	214
15. 组合导航系统	222

1. 发射和传播

了解无线电波从辐射源到接收点传播过程中的特性，对于理解所有无线电导航系统都是十分重要的。尤其关系到对其局限性的正确评价，因为传播效应总是主要的误差源。

1.1 电 磁 波

如同光是电磁辐射总能谱中的一个部分一样，无线电波也是其中的一个特定部分。可以将电磁波看作是在空间传播的电力波动，它总是不可分割地伴随有一个与之在平面内相垂直的磁力波动(见图 1-1)。电场在空间的平面决定波的极化。通常将具有垂直电场的波叫做垂直极化波。

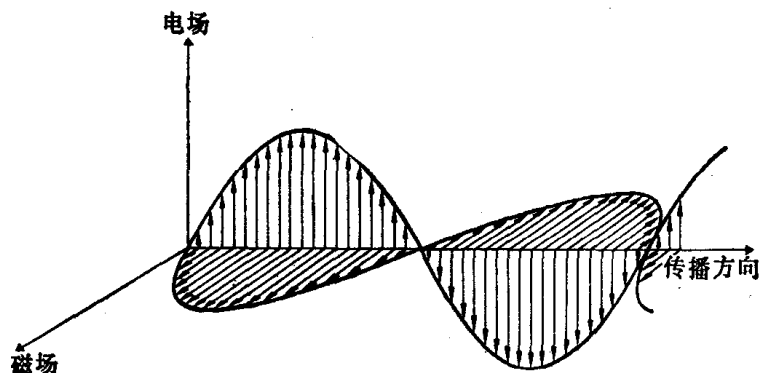


图1-1 说明电磁波的电场、磁场和传播方向间的关系

图 1-2 说明无线电波与其它电磁辐射波谱的关系。无线电波通常用其频率来定义。频率与波长关系可表示为：

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

式中的 c 是电磁辐射在真空中(自由空间)的传播速度,其测定值为 299792 千米/秒,在上式(1.1)中常取近似值为 3×10^8 千米/秒。

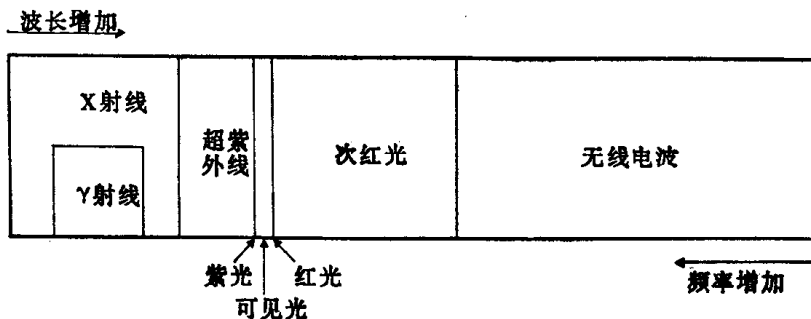


图1-2 电磁辐射波谱

频率以赫芝(Hz)为单位,在电磁辐射光谱中,无线电波部分的频率是从 3×10^3 赫芝到 30×10^9 赫芝(尽管没有严格的界限)。由于所包含的数目很大,故作如下规定:

10^3 赫芝 = 1 千赫芝(kHz)

10^6 赫芝 = 1 兆赫芝(MHz)

10^9 赫芝 = 1 千兆赫芝(GHz)

图 1-3 说明不同无线电助航仪器在电波波谱中的位置,以及它们与其它无线电波源的关系。

1.2 传 播

无线电波的特性及从发射到接收过程中会对之起作用的影响均取决于它的频率。在一定频段内的所有无线电波,不论其用途如何,都具有相同的传播特性。因此,下述对传播的解释,同样适用于同一频段或相邻频率的其它无线电信号。

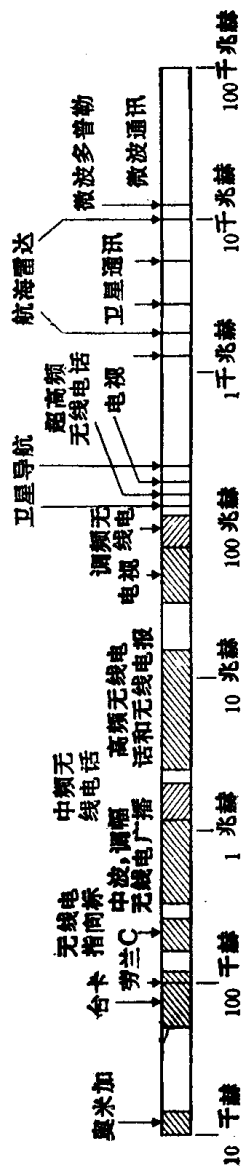


图1-3 无线电波波谱

当电磁能经无定向性的发射天线辐射时，一部分能量将离开地球表面传播，而一部分能量将沿着与地面平行的方向传播。在说明传播过程时，这两个方向可分开考虑，并分别称为天波和地波。天、地波的相对重要性取决于许多因素，其中包括：

1. 发射频率；
2. 一天的不同时刻；
3. 发射和接收间的距离。

1.2.1 地波

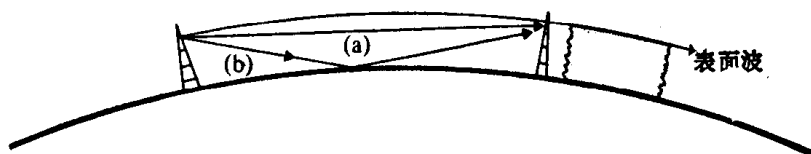


图1-4 地波传播的两个分量：空间波和表面波。空间波的两个分量(a)直达波，(b)地面反射波

地波可分为空间波和表面波两个分量，空间波可进一步分成直达波和地面反射波，图 1-4 中表明的后两种波与本书涉及到的各无线电导航系统关系不大，因为它们的传播距离短而且在许多情况下这两种波在接收处会互相抵消。

重要的是表面波，在这种情况下，地球表面和低层大气会对这种波产生影响，使其沿地表曲率传播。由于能量会由这种波传递给地面，所以这种波传播的距离取决于发射频率和传播时所途经的地表特性。

表面波在受到衰减变得无法接收以前，所能传播的距离从仅几百英尺到数千海里不等。

对低、中频来说，水平极化表面波比垂直极化表面波受到的衰减更大。因此在这种频段中，应将天线设计成能发射和接收垂直极化波。

在本书所述的各种无线电导航仪器的频率范围内，因为空间波不起什么重要作用，所以一般所说的地波就指的是表面波。

1.2.2 天波

可能有人认为离开地表传播的波会消失在空间而不起任何作用。这并不尽然，因为围绕地球的空间存在有电离层，即在地球表面上空从30海里到几百海里处存在着电离气体带。电离层的影响，可以使某些频率的电波折射，最终反射回地球表面。

1.3 电 离 层

白天电离层的稠密区存在于高度为60到600海里的高空。该区域中存在有几个电离度最大的层，分别称为D、E、F层，见图1-5a。白天F层又分裂为F₁和F₂两个层。这些层的电离度与许多因素有关，其中包括：

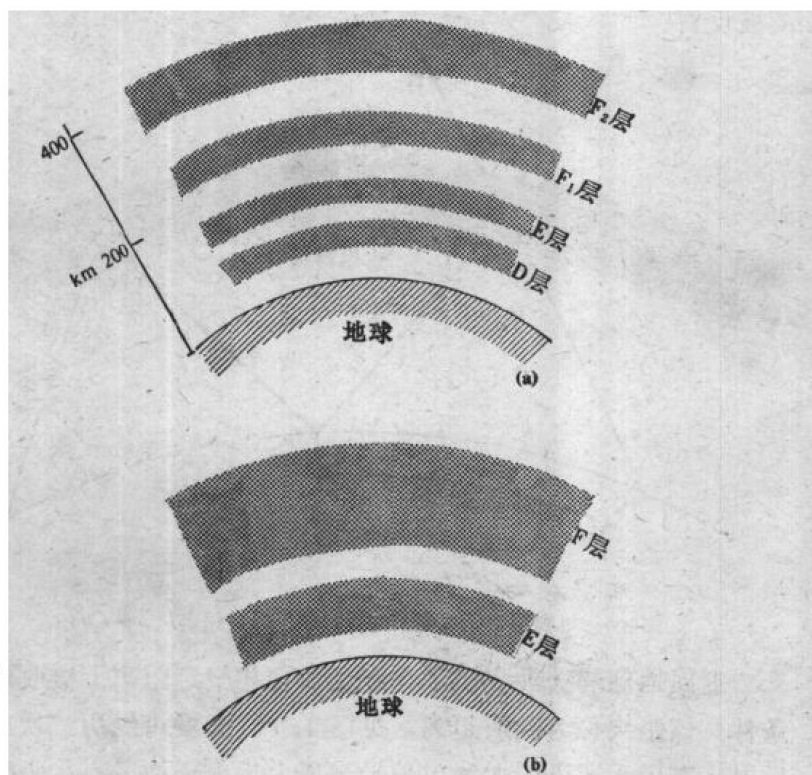


图1-5 电离层

(a)白天;

(b)夜间

1. 一天的不同时间；
2. 季节；
3. 纬度；
4. 11年太阳黑子周期的相位。

夜间所有各电离层的电离均慢慢消失。尤其是D层当日落后很快消失，而当太阳再次升起时它又很快电离(图1-5b)。无论白天或夜间电离层都具有使经过它的无线电波发生折射的影响，而无线电波被折射的量则取决于各层的电离度和无线电波的频率。一般，频率降低折射量增加，直到电波从电离层反射回去，见图1-6。由于电离层的密度每天和每个季节是变化的，所以对于同一频率的电波在某段时间内可以被反射，而在其它时间则不能被反射。

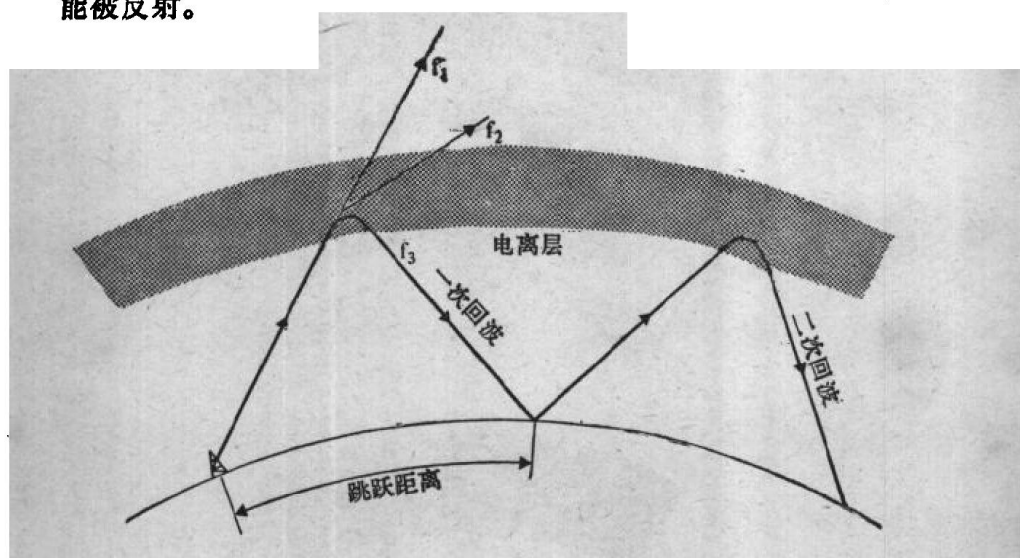


图1-6 电离层对无线电波的折射和反射，频率 $f_1 > f_2 > f_3$ 。

返回地球的天波提供了在距发射台相当远距离上接收信号的条件。该距离称为跳跃距离，见图1-6。天波可经历二次或多次反射。对于通讯的无线电信号来说，反射天波具有很大价值，因为它可使通讯距离达到几千海里，远远大于地波信号范围。因此通讯频率常选择为能最佳利用天波信号的频率。

无线电导航系统的情况一般与此相反，因为导航系统依赖于精确地知道信号由发射机到接收机的传播时间。对于通讯目的，对既定频率信号，可以对存在天波反射进行准确的电离层预测。但是对于电离层引起的精确时间延迟是很难进行精确预测的。在某些情况下，天波得到推广应用，劳兰 C 就是一例。但定位精度与通常用地波获得的船位相比则大为降低。天波的存在往往是一个不利的因素，而且在一些极端情况下，会因天波对地波的干扰使得定位系统变得不能使用。

劳兰 C(100 kHz)、台卡(70-130 kHz)和无线电指向标(直到 350 kHz)的传播方式基本是相类似的。白天 D 层对到达 E 层之前和由 E 层反射回来的天波都有衰减作用。跳跃距离降到地波范围以内，但是天波已被衰减到不足以对地波产生严重干扰的程度。

夜间，D 层消失。因此天波的衰减变小了，从 E 层和 F 层均发生反射，使得一些信号回到地波作用范围以内，而有些信号则超过地波范围。这些天波对各种无线电导航设备的确切影响，将在具体的导航系统中讨论。

1.4 甚低频(VLF)的传播

对于甚低频(<30 kHz)用描述和分析天波传播的射线方法就变得麻烦了，因为距发射地 1000 公里以外信号经过了电离层的多次连续反射。波导理论是描述甚低频传播的一种方便的方法。波导的一个壁是地球表面，另一个壁是低层电离层。波导的有效高度随时间和季节变化，大约介于白天 70 公里，夜间 90 公里之间。对于甚低频导航系统奥米加的频率(10.2~13.6 kHz)，这个高度相当于 2~4 个波长。

两个分量波沿波导壁斜着传播的正规波导理论，完全适用于地球-电离层波导。沿着双通路跨过波导并返回，而且在两个波导壁间进行反射的波，其本身必须是连贯的。这一点仅仅对波面

法线的一些不连续方向是可能的，从而导致一系列不连续的模式。在无损耗系统(loss-free system)中，幅度不会因反射而发生变化，所以连贯性的条件是通过波导和返回(两次反射)的相位的总变化为 2π 弧度的整数倍。

在一般波导中，波导壁是清楚限定的，反射波投射到波导壁的表面，波也能从没有严格确定边界的壁反射，但存在一个折射指数，该折射指数是沿边界连续变化的。电离层情形就是这样，虽然对于奥米加频率，波完全是在 D 层内反射的，但仍可认为 D 层在一定的反射高度上具有不连续的界线，并且具有一个等效反射系数。

当地球-电离层波导被幅射天线激发时，在距天线 500 公里距离内存在许多模型波，因此在该距离内模型理论就变得麻烦了。好在高次模波比低次模波衰减得厉害，因而在超过 500 公里以外的距离上，只须考虑一次和二次模波。

奥米加发射是采用垂直极化天线。这种天线在波导内产生横磁波传播模型(T.M波)，如图 1-7 所示。

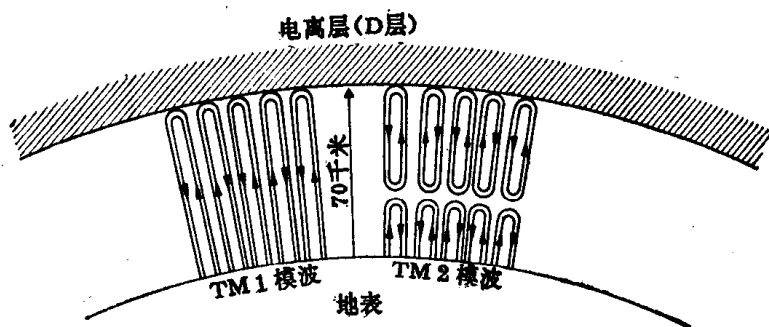


图1-7 两个主要模波 TM_1 和 TM_2 在地表—电离层波导内的甚低频传播

在距天线 1000 公里距离上，只有一次模和二次模的 TM 波还具有大到值得加以注意的强度，在超过 1000 公里时，二次模的振幅比一次模的小，因此只剩下一次模波有意义了。

1.4.1 相速和群速

图 1-8 画出的是一个沿波导纵轴的横向场。该图表示的是某一瞬间传播未调正弦波的波导。如果将图 1-8 再画成能表示几个连续瞬间的图，即可获得变化场的模型，而且会显示出波以速度 V_p 沿 X 轴运动。速度 V_p 叫相速。

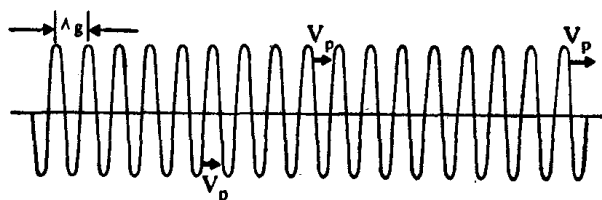


图1-8 波导中的未调正弦波

V_p 值可根据下式求出。图 1-8 中的波在一周中向前运动的距离等于 λ_g ，在单位时间内波向前运动 f 周，即运动 $f\lambda_g$ 距离，此处 f 是波的频率，则：

$$V_p = f\lambda_g$$

与此相似，任何电磁波在自由空间的速度为：

$$c = f\lambda_a$$

上面两个方程相除并同乘 c ，则得：

$$V_p = \frac{\lambda_g}{\lambda_a} \cdot c$$

因此，波导中的相速比光速大，并等于光速乘以波导波长与自由空间波长的比值。尽管从物理原理上说，讯号不能以比光速 c 更大的速度传播，但这样高的 V_p 值仍是可能的。图 1-8 中的波是未经调制的，因此不能发射任何信息。

在地表-电离层波导中的奥米加信号的实际相速，取决于电离层的高度和地面传导性，并且在 $0.9992c \sim 1.0035c$ 之间变化。用以计算奥米加双曲线图网的标准相速为 $1.0026c$ ，其值为 300574 公里/秒。

如果波形是调制波或者是脉冲波，其波形的相应速度称为群速，其值不会大于光速 c 。

2. 时间的测量

对时间的精确测量一直是航海上的一个十分重要的问题。在这个领域中，人们不断地致力于改进测量时间的能力，历史已有详细记载。

它最终导致了利用原子基本性质来测量时间，从而作到了重新给“秒”定义为相当于铯原子 133 在其基态的两个能量级间跃迁的 9192631770 个辐射周期的时间间隔。

然而驾驶员主要关心的仍是与地球一天旋转有关的时间，该时间与原子时的关系综合如图 2-1 所示。

电子导航中的时间测量更多关心的是两个事件发生的时间间隔。例如回声测深仪发射和接收脉冲之间的时间间隔，或劳兰 C 系统中接收主台和副台信号的时间间隔。

因此，电子导航系统有如下基本要求：

(1) 要有整体的时间源，该时间源在测定时间的过程中应是精确和稳定的。

(2) 要有测量时间间隔的手段。

时间源通常是一个振荡器，振荡器的频率（即是时间，因为 $t = 1/f$ ）在所要求的稳定范围内保持恒定。保持振荡频率稳定的一个方法是利用石英晶体谐振特性，使晶体振荡器的温度保持恒定，就可获得优于 1×10^{-9} /天的频率稳定性。这样的振荡器可用于如图 2-2 所示的时间间隔的测量。在这种情况下，振荡器被精确调整为 1 兆赫的频率，因而其振荡周期为 1 微秒 ($t = 1/f$)。将振荡器的正弦波输出电压转换成脉冲，再将脉冲输给一个脉冲计数电路。脉冲计数在事件 A（如回声测深仪开始发射时等）发生时开始，而在事件 B（回波返回等）开始时结束。所计得的脉冲数，代表以微秒为单位的时间间隔。利用更高频率的振荡器，可获得更好的时间计量结果。

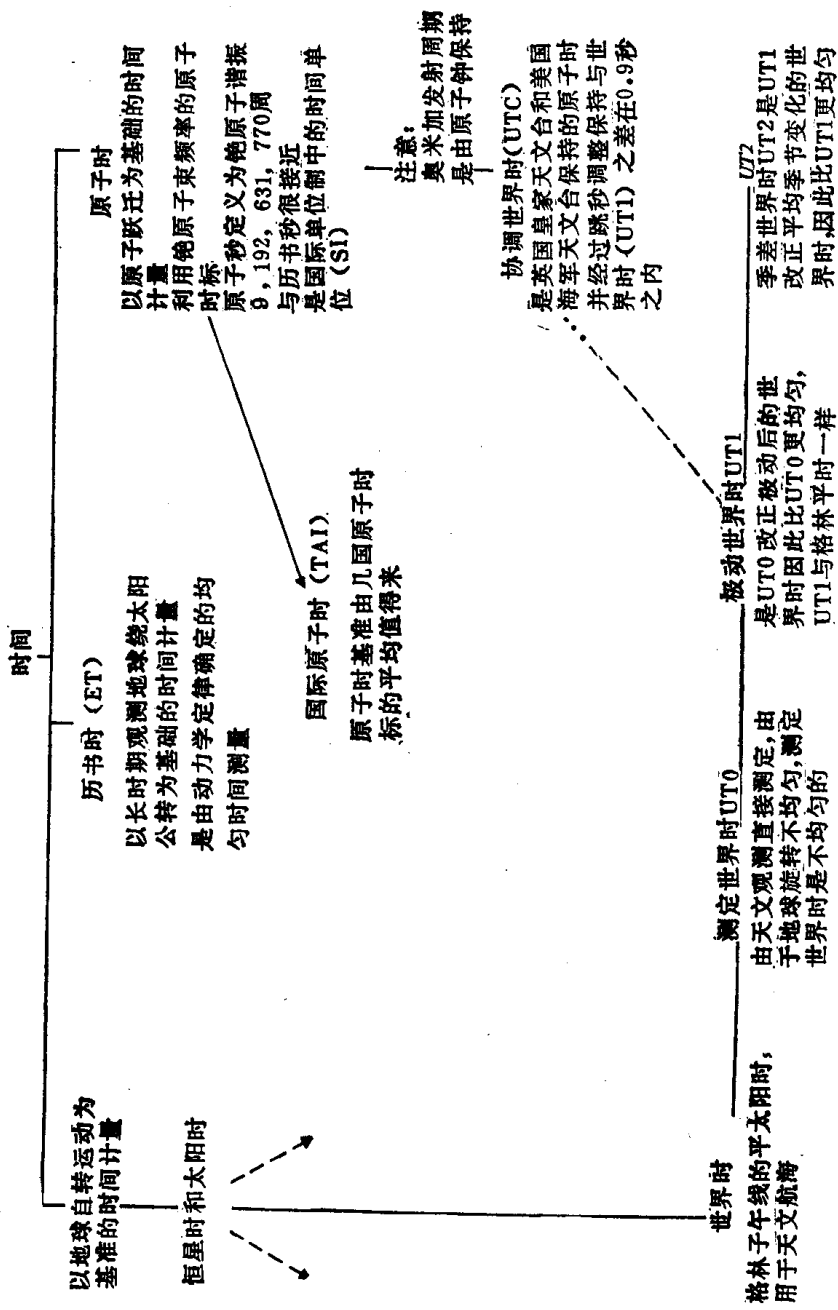


图2-1 时间的各种测量和定义方法之间的内在关系

晶体振荡器不能完全满足与距离-距离航法有关的计时要求。例如，在奥米加作距离-距离定位的情况，接收机的参考振荡器的相位必须保持与发射信号精确同步，以使参考振荡相对于接收信号的任何后来的相位变化只是由船舶运动引起的。

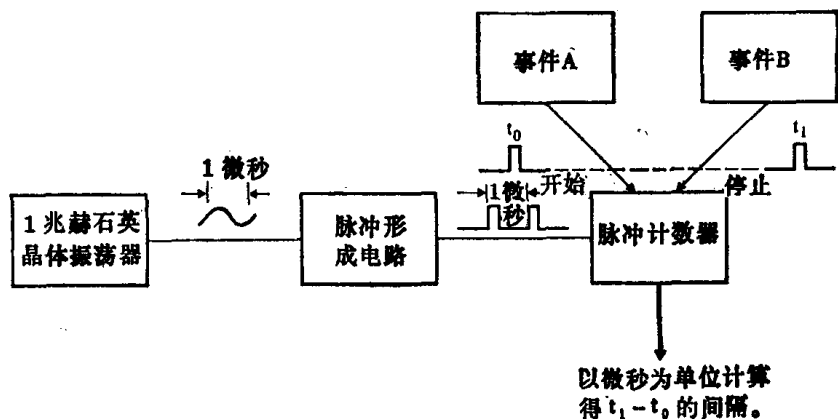


图2-2 电子导航系统时间间隔测量过程简图

为了在几个星期以上的工作周期内仍能获得上述量级的计时精度，需要有比石英晶体振荡器更好的稳定性能。因此，采用原子频率标准（原子频标）。在商业上可应用的有两种基本类型的原子频标：铯频标和铷频标。为了说明它们的基本作用原理，对铯和铷两种频标可以使用同一张简单的方框图。在图 2-3 中，低噪声石英晶体振荡器的输出频率为 f_0 （典型的是 1~10 兆赫），经倍频并与原子振荡频率合成（铷原子 + 6834 兆赫，铯原子 + 9192 兆赫）。通常把信号频率调变扫描通过原子谐振频率，使铯管中产生的波束强度或铷电池的传播光发生变化。将输出信号放大并通过相位检测器控制石英晶体振荡器的频率 f_0 。

经过微波空腔的铯原子恒定谐振频率，可维持铯原子频标输出频率的稳定性达到极高的精度。铯频标是一种基本频标，就是说它不需要其它频标进行校准。商业上实用的频标精度为 $\pm 1 \times 10^{-11}$ ，而且在束射管 (beam tube) 的寿命之内，可达 $\pm 3 \times 10^{-12}$ 的稳定性。