

无线电航海仪器

—无线电定位系统—



上海海洋学院

一九

目 录

第一章 绪 论

.....	(1)
一、无线电导航系统的分类.....	(1)
二、无线电波的分类.....	(3)
三、无线电波传播概要.....	(5)
四、无线电波传播方式.....	(5)
五、地波传播.....	(5)
六、天波传播.....	(8)
七、无线电频谱的分配和各频段的特点.....	(12)
八、天线.....	(13)
九、天线的种类.....	(13)
十、天线的有效高(长)度.....	(15)
十一、天线的等效电路.....	(16)

第二章 无线电测向仪

一、概述.....	(17)
二、无线电测向的工作原理.....	(17)
三、天线的方向性.....	(17)
四、无线电测向仪的分类.....	(21)
五、测向仪基本工作原理.....	(22)
六、旋转式环状天线测向仪.....	(22)
七、固定式环状天线测向仪.....	(23)
八、目测式测向仪.....	(23)
九、各种测向仪实例.....	(29)
一〇、国产红旗测向-1型自动无线电测向仪.....	(29)
一一、北极星 (LODESTAR) 2464 A 型自动测向仪.....	(33)
一二、日本 KS-321-UA 自动测向仪.....	(35)
一三、ITT ADF2200型船用全自动测向仪.....	(40)
一四、无线电自差和测向定位的精度.....	(42)
一五、无线电自差.....	(42)

二、自差的测定	(42)
三、无线电测向定位的精度	(45)
四、定位计算方法	(46)

第三章 罗兰A导航系统

第一节 罗兰A导航系统概述	(47)
一、脉冲测距差式双曲线定位原理	(48)
二、罗兰A导航系统的特点	(50)
三、罗兰A导航系统的设置	(50)
四、罗兰A电波的传播	(54)
五、罗兰A导航系统的误差	(58)
第二节 罗兰A定位接收机	(59)
一、罗兰A接收机测定时差的原理	(59)
二、罗兰A接收机的基本组成	(63)
三、罗兰A接收机的技术性能要求	(65)
四、LR-747 罗兰接收机的技术性能	(65)
五、LR-747 罗兰接收机方框图	(66)
六、LR-747 罗兰接收机的操作和使用	(72)
七、LR-747 罗兰接收机的检查和调整	(78)
八、LR-747 罗兰接收机的故障寻迹和修理	(87)

第四章 罗兰C导航系统

第一节 罗兰C导航系统概述	(97)
一、罗兰C导航系统的特点	(97)
二、罗兰C导航系统的设置	(100)
三、罗兰C电波的传播	(109)
四、罗兰C导航系统的误差	(113)
第二节 罗兰C定位接收机	(114)
一、罗兰C定位接收机的分类	(114)
二、LR-747 罗兰接收机测量罗兰C信号的操作	(115)
三、LR-777 罗兰C接收机	(116)
四、LR-777 罗兰C接收机自动搜索、周期选择(三波检测)和自动跟踪的原理	(123)
五、LR-777 罗兰C接收机的使用和操作	(127)
六、LR-777 罗兰C接收机的维护和检查	(134)
七、LR-777 罗兰C接收机的故障寻迹	(136)
八、罗兰双曲线坐标转换器	(138)
第三节 罗兰C系统的其它应用	(143)

一、差罗兰 C (DIFFERENTIAL LORAN C).....	(142)
二、罗兰 D (Loran D).....	(143)
三、罗兰 C 授时.....	(144)

第五章 奥米加导航系统

第一节 奥米加导航系统的概述.....	(145)
一、相位测距差系统的工作原理.....	(145)
二、奥米加导航系统的特点.....	(147)
三、奥米加导航系统的设置.....	(148)
四、奥米加电波的传播.....	(150)
五、奥米加导航系统的误差.....	(159)
第二节 奥米加接收机.....	(159)
一、奥米加接收机概述.....	(159)
二、JLA-101 奥米加接收机的技术性能.....	(162)
三、JLA-101 奥米加接收机的方框图.....	(165)
四、JLA-101 奥米加接收机的操作和使用.....	(165)
五、巷识别方法.....	(168)
六、奥米加记录器及奥米加记录的使用.....	(170)
七、JLA-101 奥米加接收机的维修和检查.....	(173)
八、TDO-1000 型自动奥米加导航接收机.....	(174)
第三节 奥米加系统的其它应用.....	(180)
一、差奥米加 (DIFFERENTIAL OMEGA).....	(180)
二、微奥米加 (MICRO OMEGA).....	(181)
三、阿尔法奥米加 (α - Ω).....	(181)
四、OPLE 系统.....	(182)

第六章 台卡导航系统

第一节 台卡导航系统概述.....	(183)
一、台卡导航系统的特点.....	(183)
二、台卡导航系统的设置.....	(184)
三、台卡导航系统的误差.....	(194)
第二节 台卡定位接收机.....	(196)
一、台卡接收机的基本工作原理.....	(196)
二、MK-12 台卡接收机.....	(197)
三、MK-12 台卡接收机的使用和操作的方法.....	(200)
四、MK-21 台卡接收机.....	(202)
五、MK-21 台卡接收机的使用和操作的方法.....	(210)

第七章 卫星导航系统

第一节 “子午仪”卫星导航系统的概述	(214)
一、“子午仪”系统的定位原理	(215)
二、“子午仪”卫星的信号结构	(219)
三、“子午仪”系统的设置	(222)
四、“子午仪”系统的定位误差	(227)
第二节 “子午仪”卫星导航仪	(237)
一、“子午仪”卫星导航仪的分类	(237)
二、MX-1112 卫星导航仪的设备和性能	(237)
三、MX-1112 的功能框图介绍	(240)
四、MX-1112 的操作和使用	(248)
五、MX-1112 的维修	(263)
第三节 “导航星”全球定位系统 (GPS)	(272)
一、概述	(272)
二、系统设置与实施计划	(275)
三、GPS系统工作原理	(280)
四、GPS系统导航信号的结构和性能	(282)
五、适用于商船定位和导航用的“Z”接收机	(286)

第八章 综合导航系统

第一节 概述	(291)
一、问题的提出	(291)
二、综合导航系统	(293)
第二节 综合导航系统	(293)
一、计算机	(294)
二、自动定位系统	(296)
第三节 几种综合导航系统	(296)
一、IBM 综合导航系统	(298)
二、东京计器-斯伯利综合导航系统	(298)
三、挪威 NORCONTROL 公司的“数据驾驶台”(DATA BRIDGE)	(298)
四、日本三菱公司 TONOC 综合导航系统	(303)

第一章 绪 论

引 言

无线电导航原理是建立在无线电波三个基本传播特性的基础上的，即：

1. 无线电波在任何两种媒质的边界面上必然产生反射。
2. 在理想均匀媒质中，无线电波传播是沿直线进行的。
3. 在理想均匀媒质中，无线电波传播速度是常数。

根据这些性质，在测得其电气参数后，便可获得航行体在平面或空间内的位置。

与其它导航手段相比，无线电导航的优点是：不受时间、气象条件的限制，随时可以使用；设备较为简单；测量工作迅速；精度和可靠性较高。其主要缺点是易受自然或人为的干扰。

自第二次世界大战以来，舰船无线电导航系统获得了很大的发展。今天，无线电导航的任务已不限于精确确定船位和引导船舶安全可靠地到达目的地，还要适应诸如交通管制、海洋测量和开发、武器制导、以及若干战术和特殊方面的需要。

尽管近年来船用无线电导航系统得到飞跃发展，各种系统种类繁多，然而至今尚找不到一种真正能使航海人员感到满意的系统。各种系统虽然都有其独特的长处，但却都还存在着不足之处和使用上的局限性。

目前无线电导航技术的发展方向是：

1. 实现设备的微型化、数字化和全自动化。
2. 采用多模多功能的组合体制。这种组合体制一般都采用数字计算机和卡尔曼滤波技术，具有多功能、适应性强和可靠性高等优点。
3. 实现具有全球覆盖、全天候、高精度和适于各种用户等优点的卫星导航系统。
4. 综合利用。实现除完成导航任务外，还能完成通信、监视、武器制导、授时等任务的无线电导航系统。

本书仅就航海使用的角度对目前广泛使用的几种无线电导航系统作一介绍，其中包括：无线电测向、罗兰 A、罗兰 C、奥米加、台卡、卫星导航、以及组合导航系统。除了阐述各系统的工作原理外，着重介绍用户设备的使用、维护和检查。为便于读者学习起见，本章首先对各种导航系统的分类、工作频段的划分、无线电波传播以及天线等基础知识作简要叙述，然后分章讨论上述各种导航系统。

第一节 无线电导航系统的分类

目前无线电导航系统种类繁多，大致可分为：

- 一、按作用距离和完成任务的不同可分为：

1. 近程导航系统(飞机约为100~500公里; 舰船约为50~100海里);
2. 中程导航系统(飞机约为500~1000公里; 舰船约为300~600海里);
3. 远程导航系统(飞机约为2000~3000公里; 舰船约为1500海里);
4. 超远程导航系统(大于10,000公里);
5. 着陆引导;
6. 河港导航;
7. 空中或海上交通管制。

二、按提供位置线的形式可分为:

1. 测向系统(亦叫测角系统);
2. 测距系统(亦叫园系统);
3. 测距差系统(亦叫双曲线系统);
4. 测距和系统(亦叫椭圆系统);
5. 混合系统(如测向/测距系统; 园/双曲线系统; 椭圆/双曲线系统)。

三、按测量电信号的不同参量可分为:

1. 振幅式无线电导航系统;
2. 频率式无线电导航系统;
3. 相位式无线电导航系统;
4. 脉冲式无线电导航系统;
5. 混合式(如脉冲/相位)无线电导航系统。

四、按系统中有无地面设备可分为:

1. 他备式导航系统(亦称地面基准式导航系统);
2. 自备式导航系统(亦称自主式导航系统)。

目前世界上航海使用的无线电导航系统见表1-1。

表1-1 船用无线电导航系统概况

分 类	系统名称	研制时间	工作频率		精度(海里)	基线长 (海里)	工作原理
			(千赫)	有效距离(海里)			
近 程 导航系统	台卡 (Decca)	1944年	70~130	白天600 夜间300	数米~2	80~200	测相位差
	哈菲克斯 (Hi-Fix)	1960年	750~2000	25~50	基线上为 0.8米	10~60	测相位差
	罗兰A (Loran-A)	1943年	1750~1950	白天 700(地波) 夜间1400(天波)	1~3	300~500	测脉冲时差
中 程 导航系统	罗兰D (Loran-D)	1968年	90~110	500~800	1/4	非固定	用脉冲包络粗测时差, 用载频相位精测时差。
	康索尔 (Consol)	1946年	200~500	1000	$\pm 0.4^\circ$	5~6公里	测向

分类	系统名称	研制时间	工作频率 (千赫)	有效距离(海里)	精度(海里)	基线长 (海里)	工作原理
远程 导航系统	罗兰C (Loran-C)	1957年	90~110	白天1200(地波) 夜间2300(天波)	1/4~3	600~800	同罗兰D
超远程 导航系统	奥米加 (Omega)	1960年	10~14	7000	1~2	5000	测相位差
	“子午仪”卫 星导航系统 (Transit)	1964年	150兆赫 400兆赫	全球	白天±0.3 夜间±0.1		测多普勒 频移求距 离变化率
	导航星全球 定位系统 (NAVSTAR GPS)	1984年	L ₁ = 1575兆 赫 L ₂ = 1227兆 赫	全球	单通道C/A码 200米 双通道P码10 米		测伪距离

第二节 无线电波的分类

无线电波通常可按以下四种方式进行分类:

一、按照发射形式分类:

1. 等幅波——连续发射一定振幅的电波。
2. 断续等幅波——断续发射一定振幅的电波。
3. 衰减波——振幅逐渐衰减的电波。
4. 脉冲波——在极短时间内发射的振幅一定的电波。

以上四种电波的波形如图1-1所示。

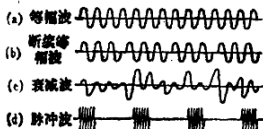


图1-1 按照发射形式的电波分类。

二、按照频率或波长分类:

若设波长为 λ , 频率为 f , 电磁波的传播速度为 C , 则波长和频率有如下关系式:

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{3 \times 10^8}{f} \text{ (米)}$$

如果按照频率或波长区分电波，则如表1—2所示。

表1—2 根据国际电报电话咨询委员会划分电波表

频率名称	代号	频率范围	波长范围	波长名称	导航上用途	
甚低频	VLF	3~30千赫	100~10千米	超长波	奥米加	
低频	LF	30~300千赫	10~1千米	长波	罗兰C, 台卡	
中频	MF	300~3000千赫(3兆赫)	1千米~100米	中波	罗兰A, 测向	
高频	HF	3~30兆赫	100~10米	短波		
甚高频	VHF	30~300兆赫	10~1米	米波	卫星导航	
特高频	UHF	300~3000兆赫(3千兆赫)	1米~10厘米	微波 {	卫星导航	
超高频	SHF	3~30千兆赫	10~1厘米		厘米波	船用雷达
极高频	EHF	30~300千兆赫	1厘米~1毫米		毫米波	

三、按照极化形式分类：

在空间传播的电磁波都是极化波，并由电场方向决定它的形式。

1. 直线极化波：

它是电场在平面上振动而向前传播的电磁波。沿水平方向振动传播的电磁波称作水平极化波，沿垂直方向振动传播的电磁波称作垂直极化波。当天线水平设置时，可得水平极化波；当天线垂直设置时，可得垂直极化波。

2. 圆极化波：

它是电场在1个波长内一面向左或右旋转360°，一面向前传播的电磁波。

3. 椭圆极化波：

它是由水平极化波和垂直极化波合成产生的电磁波，由于振幅比随时间变动，所以画出椭圆。当电磁波由电离层反射回来时，产生椭圆极化波。

四、按照传播方式分类：

电波按照传播方式分类如下：

1. 直接波：

直接波是从发射台到接收点直接传播的电波，有时也称为直射波。

2. 大地反射波：

大地反射波是发射台发射的电波经地面反射传播到接收点的电波。

3. 地波(地表波)：

地波是沿大地表面传播的电波，亦称地表波。

4. 电离层反射波(天波)：

它是由电离层反射传播的电磁波，一般称作天波。由电离层E层一次反射传播的电磁波，称作一次反射天波，记作E₁波。

以上各种波的传播方式如图1—2所示。

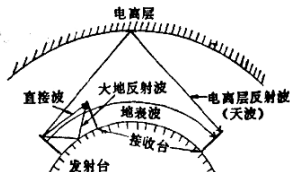


图1-2 电波的传播方式。

第三节 无线电波传播概要

一、无线电波传播方式:

现代无线电所使用的频率范围从10千赫直至300兆赫(相应波长从30,000米到1毫米)。电波传播的方式和频率有很大关系。某一种传播方式往往对某一段频率的电波特别有利,因此,这种方式也就成为该频段传播的主要方式。

无线电波传播的主要方式有下列几种:

1. 地波传播:

无线电波沿地表面传播, 参见图1-2。

2. 天波传播:

无线电波向天空辐射, 由电离层反射到接收点, 称为天波传播, 参见图1-2。

3. 视距传播:

发射天线和接收天线在视距以内, 无线电波的传播是直接波和大地或海面反射波之和, 参见图1-2。

4. 散射传播:

无线电波由对流层或电离层的不均匀性而散射传播至接收点, 前者称为对流层散射传播, 后者称为电离层散射传播, 如图1-3所示。

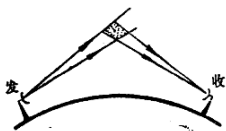


图 1-3 散射传播。

其它还有绕射以及平流层反射等, 但主要的传播方式就是上述几种。实际上一个天线辐射出的电波, 其传播方式往往不是单一的, 如既有地波, 也有天波等等, 但是总有一种方式是主要的。不同波段电波的主要传播方式也不同, 这就是各个波段适用于不同的通信导航业务的主要原因。

由于视距传播和散射传播二种方式和本书涉及的导航系统关系不大, 故下面我们仅介绍地波传播和天波传播。

二、地波传播:

1. 地波传播的物理过程:

无线电波沿地球表面传播, 这种情况称为地波传播。当发射天线为低架天线(当天线架设的高度远比波长为小时, 称为低架天线), 且最大辐射方向沿地表进行时, 这时主要是地波传播。例如, 使用直立的鞭状天线就是这种情况。

当电波沿地表传播时, 无线电波不断地被地面所吸收, 也就是电磁波的一部分能量向地下传播, 因而电磁波在传播途径上不断被衰减, 衰减因子和地面的电气参数有关, 同时也和电波的频率和极化形式有关。

现在让我们来讨论一下电波在地面被吸收的物理过程。因为地面是导电的, 假设它的导电率为 σ , 则电磁波必然要在地面上引起电流。假设电波是水平极化波, 即电场方向和地面平行, 由于方向和地面平行, 必然在地面上引起较大的传导电流, 所以构成很大的损耗, 也就是说地面对水平极化波吸收很大。因此地波不宜采用水平极化波。

对于垂直极化波来说, 即电场方向和地面垂直, 也同样存在地面吸收问题。由于电场方向和地面垂直, 它在地面上要产生感应电荷(参见图1-4a)。这些电荷随着电波前进方向向

前运动。因此可以简单地这样理解：这些感应电荷要产生电流，电流在地面要产生损耗，但是比起水平极化波来是小得多了。所以地波传播应该选用垂直极化波最为有利。

同时，由于地面是有电阻的，电流在地表面流过，必然要产生水平方向的电场分量，因此，在地表面上下还存在电场的水平分量，这就在地面上面构成地波的波前倾斜的现象。波前倾斜现象与大地导电率有很大关系，导电率越小（即电阻越大），波前倾斜越厉害。这个波前倾斜现象对我们用水平接收天线接收垂直极化的地波是有意义的（图1-4b）。由于波前倾斜，因此在贴近地面的部分存在水平的电场分量，所以用水平接收天线仍可以接收垂直极化的地波。

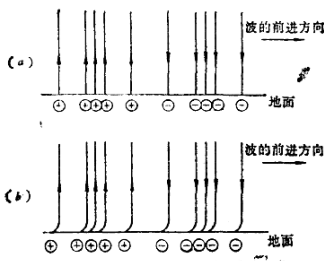


图1-4 垂直极化波在地面传播时的波前倾斜
(a) 理想导电地面；(b) 大地有损耗时。

另一方面，进入地表以下的电波将遭受很大的衰减，但是它进入地下后主要变成水平极化波（水平分量的电场成为主要的），这就告诉我们，使用埋地天线接收地波时应采用水平天线，并应设置在导电率差的土壤中才比较有效。因为在地表面以下，当土壤导电率愈差时，这个分量才愈大。实际上也可以这样理解：当地波沿地表传播时，如果土壤的导电率愈小，即电阻愈大，则地面的吸收愈大，即电波进入土壤部分增大。因此，当天线埋在地下时，我们当然希望电波进入土壤部分愈大愈好。另一方面，如果应用地波作地面通信，这时希望电波进入土壤愈少愈好。海水的导电率比陆地高，因而其吸收电波小。

地波传播除了与土壤（或海水）的导电率有关外，还和电波的频率有关。频率愈高，土壤的损耗愈大，因此，电波传播的衰减也愈大。这也就是远距离导航往往采用低频或甚低频电波的理由之一。

2. 地波传播的特点

地波传播有如下特点：

(1) 地波传播与电波极化、频率有很大关系。垂直极化、频率低的无线电波传播衰减小，因此地波特别适宜于用作长波和超长波的传播。长波和超长波利用地波可作远距离通信和导航。

(2) 地波传播与地表的导电性质有很大关系。导电率愈高，损耗愈小。海水的导电率(σ)为4姆/米，湿土约为0.01姆/米，干土约为0.001姆/米。因此，地波在海水表面上传播最为有利。所以现在仍使用长波或超长波作为远距离海上导航和通信。

(3) 地波传播比较稳定，基本上不受气候条件的影响。

(4) 地下通信或水下通信时，是应用地波向水下或地下传播的部分。地表的导电率越大，传向地下的部分越小。因此，电波穿入海面很困难，即潜艇在水下通信和利用无线电导航是困难的。根据计算，每衰减 1 分贝的深度 δ 为

$$\delta = \frac{1}{2\pi \times 8.686} \sqrt{\frac{\lambda}{30\sigma}}$$

式中 λ 为波长。因此，使用长波的导航系统，其穿透海水时衰减减小，从而象奥米加和罗兰 C 这样的甚低频和低频系统能为潜艇所用。

(5) 根据实际和理论的分析都表明，地波传播时和整个传播路程的地表电性质有关，而且特别和发射点及接收点的地表性质有关。例如，收发两点位于海上，中间隔着陆地，和同样路程而收发两点位于陆上，而中间隔着海水，则前者的传播损耗要小一些，接收的场强要高一些。这种情况称为地波“起飞”和“着陆”效应。因此，在实际工作时，选择收发地点的条件，对地波传播是很有意义的。

3. 地波场强的计算：

图 1-5 是用来计算地波传播的场强用的曲线。它是设海水的导电率 $\sigma = 4$ 姆/米，介电系数 $\epsilon = 80$ 的条件，以发射功率 P 等于 1 千瓦，用短于四分之一波长的直立天线（其方向系数 $D_1 = 3.28$ ）发射而得出的场强。图中所示为有效值。纵座标有两种单位，一种是用微伏/米表示；另一种是以 1 微伏/米为 0 分贝，用分贝数表示。

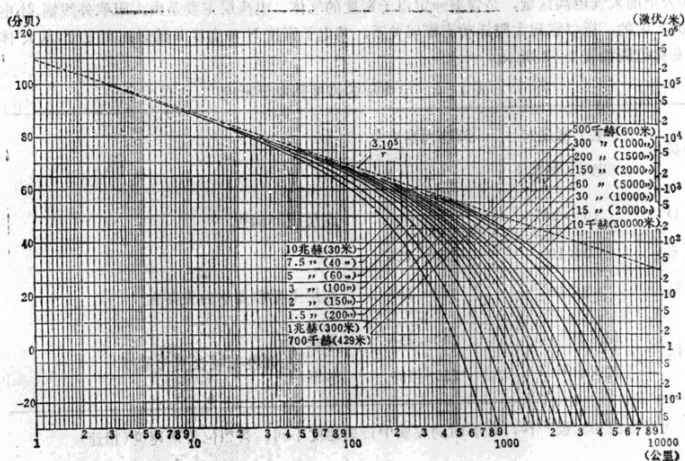


图 1-5 地波传播曲线(海水, $\sigma = 4$ 姆/米, $\epsilon = 80$)。

在使用该图表时，如果功率不是 1 千瓦，则可按 \sqrt{P} (P 为发射功率) 比例关系换算(若使

用的天线不同，也可按 $\sqrt{D_1}$ 比例换算)。

例：工作频率为10兆赫，发射功率为250瓦，在海面上传播。求300公里处的场强(天线用 $\lambda/4$ 鞭状天线)。

解：先查图1-5，在300公里处10兆赫的曲线上读出场强 $E = 31$ 微伏/米。这是1千瓦功率的数值。

因此，对于250瓦的功率应为

$$E = 31 \times \sqrt{\frac{250}{1000}} = 31 \sqrt{0.25} = 15.5 \text{ 微伏/米。}$$

若使用分贝计算，则更为简单。从图读出1千瓦的场强为30分贝。现250瓦的功率比1千瓦功率小四倍，即低6分贝，故场强为24分贝。

图中最上端有一虚线，这是在自由空间传播的场强数值，它等于

$$E_0 = \frac{173 \sqrt{P_{\text{千瓦}} \cdot D_1}}{r_{\text{公里}}} = \frac{173 \sqrt{1 \times 3.28}}{r_{\text{公里}}} = \frac{300}{r_{\text{公里}}} \text{ 毫伏/米，}$$

式中 $r_{\text{公里}}$ 为以公里数表示的距离。

三、天波传播

1. 电离层反射电波的物理过程：

我们通常所说的天波传播是指电波通过电离层反射来传播的。电离层是在地面上空60~350公里的大气电离区域，是含有一定电子密度的气体。电离层主要是由太阳紫外线辐射电离而产生的，所以它和太阳活动有密切关系，其电子密度 N 和高度 h 随时间而变化，其大体的变化范围如表1-3所示。

表1-3 电离层的高度和电子密度

电离层	电子密度 N (电子/厘米 ³)	离地面高度 h (公里)	附 注
D	$10^3 \sim 10^4$	70~90	此层夜间消失
E	2×10^5	100~120	
F ₁	3×10^5	160~180	此层主要在夏季白天存在
F ₂	$\begin{cases} 1 \times 10^6 \\ 2 \times 10^6 \end{cases}$	$\begin{cases} 300 \sim 450 \\ 250 \sim 350 \end{cases}$	$\left. \begin{matrix} \text{夏季} \\ \text{冬季} \end{matrix} \right\} \text{高度指昼夜变化范围}$

无线电波和光波一样，在不同的媒质中传播速度不同，其相位传播速度(相速)

$$V = \frac{c}{n}$$

式中 C 为真空中的光速，根据最近的测量 $C = 299,792.458 \pm 0.001$ 公里/秒； n 为媒质的折射率。

而折射率 n 取决于介电系数 ϵ , $n = \sqrt{\epsilon}$ 。电离层的介电系数又由下式决定

$$\epsilon_r = 1 - \frac{80.8N}{f^2}$$

$$\therefore n = \sqrt{1 - \frac{80.8N}{f^2}}$$

这说明, 电波在电离层中的传播速度是电子密度的函数: 当电子密度愈大时, n 愈小, 则电波传播速度愈大。

当无线电波射向电离层时, 由于电离层电子密度是自下逐渐向上增加的, 因而折射率是由下逐渐向上减小的, 这就跟光波从光密媒质(n 较大)跑到光疏媒质中去一样, 因此折射角 $\phi_1 >$ 入射角 ϕ_0 ($\because n_1 \sin \phi_0 = n_2 \sin \phi_1$), 所以电波转弯了, 如图 1-6 所示。

如此连续地进行下去, 当电波进到电离层的某一高度, 电波就转平了。再继续下去, 电波就逐步返回到地面。所以电波在电离层内部实际上是一个逐步折射的过程。但就电离层总体来说, 电离层可以看作是能够反射电波的。

由于电离层的折射率还和电波频率有关, 频率愈高, 则折射率愈接近于 1, 也即折射程度愈小。故并不是所有频率的信号都能由电离层反射而回到地面, 频率愈高的无线电波愈难折射, 它需要电子密度大一些的电离层才能折射转平而返回地面。因此, 如果无线电频率过高, 以至于最大电子密度的电离层也不能使它转平, 那它就能穿过电离层。这也就是卫星导航系统必须要用很高的频率(150兆赫和400兆赫)的原因。图1-7表示仰角相同时, 不同频率电波的折射情况。通常, 能返回地面的电波有一个最高可用频率, 凡低于此频率, 电离层都可以反射。

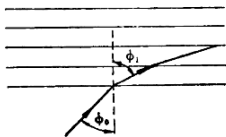


图 1-6 电波在电离层的折射。

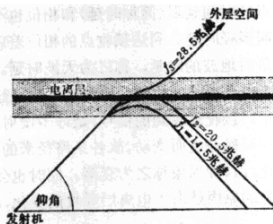


图 1-7 不同频率($f_2 > f_1$)电波的折射情况。

此外, 电波能否折射回来, 还和入射角 ϕ 有关。由图 1-6 可以看出, 入射角 ϕ 愈大, 则电波入射到电离层后很易转平。所以, 入射角愈大, 愈容易反射, 故可用更高些的频率也能返回。当入射角 ϕ 最小等于 0 时, 能返回的最高可用频率是最低的, 称之为电离层的临界频率, 一般为 30 兆赫。

3. 电离层对无线电波的吸收

无线电波经过电离层不但遭到反射, 而且要被电离层吸收一部分能量, 因此, 传播损耗加大。

电离层吸收电波是由于当电波通过电离层时, 电离层中的电子被电场加速而往返振动, 当它与中性分子或离子碰撞时, 就将电波得来的能量传送给中性分子或离子。这就是电离层对电波吸收的物理过程。

很明显，吸收的强弱和电子密度有关。电子密度愈大，碰撞的电子就愈多，所以吸收愈大。

另外，气体分子密度大，则每个电子在单位时间内的碰撞次数就比在气体分子密度小的情况下要多。因为 E 层和 D 层的高度较低，气体密度大，所以碰撞次数远比 F 层要大(据测量，F 层碰撞次数的数量级约为 10^3 次/秒，E 层则为 10^6 次/秒，D 层为 10^7 次/秒)。所以，虽然 D 层和 E 层的电子密度低，但由于碰撞次数多，因此，主要的吸收层是 D 层和 E 层，而 F 层的吸收与之相比就可忽略不计了。因此，夜间 D 层消失后，吸收显著降低，短波和中波电台的信号增强，但是，此时干扰信号的传播条件也改善了，因而干扰也大为增加。

吸收还和电波频率有很大关系。频率愈高，吸收愈小；频率愈低，吸收愈大。关于这一点可以这样解释：当频率低时，振荡的周期长，所以每个电子受到加速的时间长，因此，电子运动的路径长，碰撞的能量也大，碰撞的机会也多，所以能量消耗大，亦即电离层吸收多。对于高频率来说，情况正好相反。

这就告诉我们，天波传播时应该使用尽可能高的频率。这样，既能为电离层所反射，吸收又最小。但也要注意不能超过电离层反射最高可用频率，否则就会穿过电离层而不反射回来了。

4. 天波传播的多径效应和衰落现象

由于电波从发射点到接收点的传播并非只经过一条路径，往往是既有地波又有天波，且天波也因反射的电离层不同和反射次数不同，传播路径也不同(图1-8)。因此到达接收点电波的场强是各条路径来的电波的矢量和。这就是所谓多径效应。由于传播路径长短不同，故到达接收点的时间延迟(简称时延)和相位也不同，我们把两条路径的时延数值之差称为差分时延，或叫多径时延。到达接收点的相位差就由多径时延值决定。在无线电导航中，我们通常把天波落后地波的时延，称之为天波时延。

由于电离层是变化的，而且又不是理想平整的反射面，因此很容易产生漫射现象，如图1-9所示。接收点收到的信号，是许多漫射波的相互迭加，因各漫射波的传播路径不同，且随着电离层反射高度而变动，故各条路径来的信号不能保持固定的相位差，使迭加后信号的幅度产生变化，这种现象称之为衰落。同时也会造成信号波形的失真，如“分裂”现象等。另一个造成衰落的原因是由于电离层吸收的变化，由于吸收变化较慢，数分钟或数十分钟才有变化。

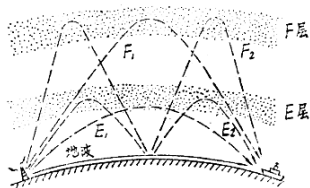


图1-8 电波传播的多径现象。

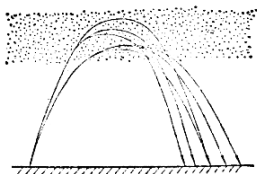


图1-9 电离层的漫射现象

由上可知，由于电离层的不稳定性造成了天波的不稳定性。不稳定性既反映在信号幅度上，同时也反应在天波的时延值上，这对导航系统的精度是十分有害的，故天波一般不用于

精确导航，但有时为了扩大作用距离，仍然使用天波来导航，此时就特别要注意电离层变化的影响以及修正方法。

5. 电离层的变化

由于电离层的主要电离源是太阳的紫外线和微粒辐射，因此，这些情况的任何改变都要影响电离层，从而影响天波的传播。由于太阳照射的情况，昼夜24小时都不一样，同时，不同季节和年份也不同，所以电离层的高度和密度是随时间、季节、年份而变化的，不同地点上空的电离层状况也是不同的。

电离层的变化有两种，即正常变化与不正常变化。

正常变化有：

(1) 日变化：昼夜24小时之间的变化。白天电离层的密度和高度都在变，因此，电离层的临界频率和其吸收也是改变的。

(2) 季变化：每个月份也是变化的，一般说来，夏季的临界频率比冬季高，夏季的天波传播损耗也比冬季大。但是在中纬度地区，冬季的F层密度大于夏季，所以冬季的F层的临界频率和传播损耗反而大于夏季。

(3) 太阳的周期变化：太阳的辐射情况与太阳黑子活动有关，太阳黑子活动的周期约为11.5年。在太阳黑子活动性强时将使传播损耗增大，临界频率也增大。

不正常变化主要有：

(1) 电离层扰动：

由太阳或其它紫外线源突然爆发而产生，使D层的电离密度突然加大，因而对无线电波的吸收突然增加，而造成接收困难。因为它总是由于太阳直接的大量紫外线辐射造成的，所以电离层扰动总是发生在白天。虽然它是属于一种不规则的扰动，但根据经验，一般有如下情况：不是每天都出现扰动，一般在一年中大约约有10~30%的天数会出现，平均每隔2~3天左右出现一次。大部分扰动时间不超过一小时。扰动的程度也不同。这些扰动还有一个27天周期的趋向。

(2) 磁暴：

磁暴就是地磁场发生突然的、起伏很大的扰动，磁暴通常要引起电离层暴。这个现象是F₂层中电子密度突然减小，因此，它的临界频率突然减小。所以原来使用较高频率的电波就穿透F₂层而不能反射，因此，通信会突然中断。磁暴和电离层暴主要在极区附近严重。

6. 天波传播的特点

天波传播有如下特点：

(1) 利用天波传播工作，选择工作频率是很重要的。频率太高，电离层不能反射；频率太低，电离层吸收增大。最佳工作频率的确定，不仅与年、月、日、时有关，而且与工作距离有关。这个问题对无线电通信和导航系统都是十分重要的，但作为导航用户来说不存在选择工作频率的问题。

(2) 由于电离层的变化，使天波传播不太稳定，衰落严重，且存在天波时延问题，故不宜作精确导航。在系统设计时必须考虑衰落，应使电路设计有足够的余量，因为衰落严重时可达30分贝。在利用天波导航时，还必须作天波传播时延改正。

(3) 对于电离层的稳定性来说，高层要比低层差，故通常无线电定位系统只用低层反射。很明显，多次反射波要比一次反射波的稳定性差，故在无线电导航系统(如罗兰A和罗兰C)

中通常仅使用 E 层的一次反射波。

(4) 天波的稳定性还和工作距离有关，这是因为近距离传播时，电波射入电离层的入射角小，因而进入电离层的深度大，受电离层的变化影响大，如图 1—10 所示，由于 $\alpha_1 < \alpha_2$ ，所以 $d_1 > d_2$ ，故 E_1 的稳定性比 E_2 差。

这就说明，近距离使用天波的稳定性要比远距离使用天波差，因而在无线电导航系统中（如罗兰 A 和罗兰 C），在离发射台较近的距离内不宜使用天波，而尽可能使用地波。

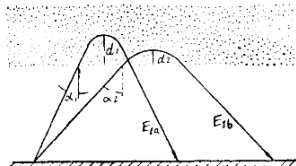


图 1—10 电波进入电离层深度与入射角的关系。

第四节 无线电频率的分配和各频段的特点

现代无线电所使用的频率范围从 10 千赫直至 300 千兆赫，不同频段的无线电波的传播方式和特点各不相同，所以它们的用途也就不同。在无线电频率分配上有一点需要特别注意的，即干扰问题。因为无线电波是按照其频率的特点传播，此外再没什么规律来约束它。因此，若两台台用相同的频率或极其相近的频率工作于同一地区，则必然造成干扰。因此，必须根据不同的业务对使用频率进行分配。因为无线电波是全球传播的，所以需要有国际的协议来解决。

现在进行频率分配工作的世界组织是国际电信联盟 (ITU)。其下设有国际无线电咨询委员会 (CCIR)，以研究有关的各种技术问题并提出建议。由国际频率登记部 (IFRB) 负责国际上使用频率的登记管理工作。

下面我们将按第二节中表 1-2 划分的频段，来讨论各频段的特点及其在导航上的使用。

一、甚低频 (VLF)

该频段包括低于 30 千赫的一段频率。这频率可以用天波和地波传播，而主要以地波传播方式为主。天波是靠电波在地面和电离层 D 层或 E 层之间来回反射而传播。

该频段的特点是：(1) 传播距离远，甚低频地波可长达 4000 至 8000 海里；(2) 甚低频天波从电离层反射时，能量损失较少，因其在电离层内进入的深度较浅；(3) 电离层扰动的影响较小，基本上没有衰落现象；(4) 地或海水对其吸收小，因此适宜于水下和地下通信。

该频段的缺点是：(1) 容量小。因其整个频带宽度仅 20 千赫，因此容量有限；(2) 大气噪声干扰大。因为频率愈低大气噪声干扰电平愈大（大气干扰也和地理位置有关，愈近赤道，干扰愈大）；(3) 需要大的天线。因其波长很长，不易获得良好的天线效果，天线设置价格高，为了确保远距离收发可靠性，需要大功率发射机。

该频段被指定作导航用的频率为 10~14 千赫，目前主要由奥米加导航系统使用。

二、低频 (LF)：

低频波段 (30~300 千赫) 的电波传播特点和甚低频 (VLF) 相近。仅电离层反射效果稍差，地面损耗也略有增加，折射则减小。然而该波段的的天线效果比甚低频段好，地波传播距离可达 1000 海里以上。跟甚低频一样，信号能渗透海水一定深度，例如 10 千赫左右时，信号发送至水面下 40~50 英尺的可靠性很大；100 千赫时，信号仅能渗透海水数英尺。

该波段被指定作导航用的频率为 70~130 千赫，主要由台卡、罗兰 C 和康索尔系统所