第1章

绪　论

1.1　引言

现代高科技战争条件下，军事通信系统的作战环境面临越来越恶劣的现状，部分国家的作战条令规定：战前要干扰和破坏敌方通信设施的50%～70%，第一次火力打击要摧毁其中的40%。因此，如何提高军事通信系统的生存能力，以确保在最险恶的作战环境中通信联络的不间断，成了一个亟待解决的现实问题。

美国在20世纪70—80年代热衷于卫星通信的研究与使用，但在海湾战争中发现短波通信仍有重要价值，其注意力有所转移，美国海军用了上亿美元更新其舰艇短波通信装备就是一个例证。美国国防部的一个防卫威胁研究机构在2000年的军用关键技术——信息技术部分还特别强调，短波通信技术仍然是战场或战役甚至更大范围防卫或作战的一种不可或缺的通信指挥手段。欧洲各国对短波通信的研究也不遗余力，2000年欧洲议会的一个专门委员会建议短波以及超宽带(ultra wide band，UWB)通信技术仍然是军事通信的主要技术之一，尤其是在某些特定场合会成为最为关键的通信技术。

近年来，短波通信领域里的研究非常活跃，国际上出现了许多的研究机构，例如：IEEE在近几年的时间里已经连续举办了8次“短波通信系统与技术”的会议，IEEE每年都召开“MILCOM”会议，大量学者开展了短波通信技术方面的研究工作；美国成立了“短波通信工业协会”(HFIA)，有诸多大公司，如Harris，Motorola，Rockell，Halcomm，Thales，Mobicomm等参加，每年召开2～3次短波技术交流的会议；另外，世界上还有其他的一些相关组织也开展了该方面的研究工作，如北欧无线电协会(NRS)、加拿大的通信研究中心(CRC)、英国兰卡斯特大学的电离层和电波传输研究小组等。这表明经过20世纪五六十年代卫星通信带来的短暂冲击后，短波通信又重新唤起了人们的研究热情，在技术方面也获得了很大进展。

短波通信在我军也有较为广泛的应用。例如将短波通信系统应用于担负特殊作战使命的无人机上，可实现在远距离、低空高速环境下信息的实时可靠传输。无人机作战升空后，将以低空突防的形式掠海飞临目标上空，在远离基地几百千米以上的低空区域高速遂行任务。受地球曲率的影响，我方对空雷达难以捕捉到飞机的飞行状态和任务信息，放飞后难以跟踪飞机的位置和判断执行任务的态势，无法评估作战效能和决策是否进行补充攻击等。因此，实时传输飞机飞行和遂行任务的状态信息，对作战指挥尤为重要。

长波所需要的发射天线长，超短波与微波需在视距范围内通信，在机载平台、低空环境下，无法使用长波、超短波、微波实现远距离通信；而卫星通信资源受控，目前部分开放的、具有区域导航和短信息报文功能的“北斗一代”终端设备，受信息传输量、实时性和机载北斗设备价格等因素的限制。在综合考虑各类通信信道基础上，针对搭建成本低、实时性高的通信系统的需求，基于短波信道设计的机载短波通信系统可实现飞机任务状态信息的远距离、低空高速环境下的可靠回传，最大限度发挥战机的作战效能。

1.2 短波与短波通信



短波通信概述

按照国际无线电咨询委员会的规定，短波是指频率为 3～30MHz、对应波长为 100～10m 的无线电波。在实际使用中，为了充分利用短波近距离通信的优势，通常将 1.5～3MHz 的频率也纳入短波通信的频率范围，因此，实际使用的短波频率通常是 1.5～30MHz。

国内通常以电磁波的波长区分不同的频率，比短波频段更低的频段，有中波、长波；比短波频段更高的频段，按照波长的量级可分为米波、分米波、厘米波、毫米波等，如图 1.2.1 所示；介于 300～3000GHz 的频段，是近年来比较热门的太赫兹，最高频率接近远红外线，这个频段的信号既具有无线电信号的特性，又具有光信号的特性。

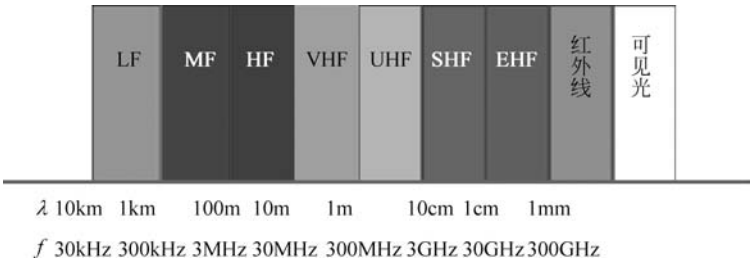


图 1.2.1 电波频率分布图(后附彩图)

短波通信是利用短波作为载体来传送信息的一种通信手段，又称为“高频通信”(HF communication)。其中，载体是指 1.5～30MHz 的无线电波，信息可以是话音、电报，也可以是图像、低速率的数据等。请注意短波通信传输的是低速的数据，不能传输高速数据，比如实时的高清视频。

短波频段的无线电波传播方式与其他频段有很大不同，这也是短波通信区别于其他通信方式的最主要原因。短波通信的传播方式主要有两种：一种是地波传播，另一种是天波传播，如图 1.2.2 所示。

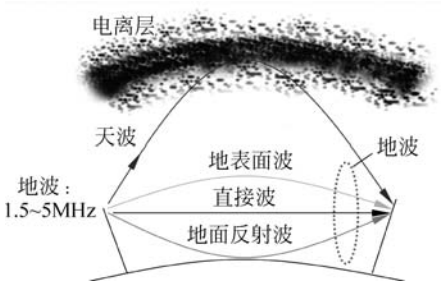


图 1.2.2 短波的传播方式

地波传播的损耗主要是地表吸收损耗，随工作频率的升高而递增，在同样的地面条件下，频率越高，损耗越大；由于地波只适用于近距离通信，其工作频率一般都在 5MHz 以下。地波传播受天气的影响小，信道参数基本不随时间变化，因此地

波传播信道可视为恒参信道。

天波是无线电波经电离层反射回地面的部分，倾斜投射的电磁波经电离层反射后，可以传到几千千米甚至上万千米外的地面。天波的传播损耗比地波小得多，经地面与电离层之间多次反射之后，可以达到极远的地方。利用天波可以进行环球通信，即往东发射一个短波信号，这个信号可以绕地球转一圈，从西面回来，这种特性是其他任何通信方式所不具有的。但天波传播极不稳定，受电离层变化和多径效应的影响，它的信道参数随时间而急剧变化，因此称为“变参信道”。

1921 年，意大利罗马的一次意外火灾事件，使短波被发现可以用于远距离通信。此后，短波通信迅速发展，成为世界各国中远距离通信的主要手段。近百年来，卫星通信、光纤通信、无线光通信等新的通信手段不断涌现，但短波通信的地位从未被替代。

短波通信被广泛用于政府、军事、外交、气象、商业等部门，尤其在国际通信、防汛救灾、海难救援以及军事通信等方面发挥着独特的作用。以一个极为典型的非作战行动为例，2008 年汶川大地震中的电力和通信设施被破坏，最常用的手机没有信号、宽带和电话都无法接通，这时短波通信电台和卫星电话传回了灾区的第一手资料，有力支撑了救援工作的开展。

在军队中，世界各军事强国对短波通信定位都是相同的：短波通信始终是军事指挥的重要手段之一。我国的驻外使馆、军事基地、远航编队都配备有短波通信设备。

相对于陆军、空军和火箭军而言，短波通信对于海军来说更为重要。海军部队在大洋上进行远距离通信的主要通信手段有两种：一种是卫星通信，另一种是短波通信。单个卫星的覆盖范围有限，要实现全球通信，至少需要三颗卫星，而且随着导弹反卫星、激光反卫星等技术的发展，通信卫星在真正作战时极易被敌方干扰和摧毁。这时，海军的战略指挥通信手段将只剩短波通信。因此，短波通信是战时海军远距离通信的唯一保底通信手段。也正是因为“远距离通信”和“唯一保底”，短波通信在海军中的地位是其他任何通信方式无法取代的。

随着我国海洋强国战略的推进，海军部队将走向深蓝、走向远洋战略的发展，对远海短波通信的需求将更加迫切。

1.3 短波电波的传播



短波电波的传播

短波通信之所以能够吸引用户，主要因为它具有不易“摧毁”的“中继系统”——电离层。尽管自然条件可以使这种“中继系统”中断，但不是经常出现，而且中断的时间也非常短；除极区外，这种中断通常发生在太阳发射耀斑后，中断时间一般在半小时左右，一年内也仅发生几次。尽管新通信技术的出现彰显了短波通信的缺点，但短波通信仍是目前不可或缺的辅助通信手段。实践证明采用现代信号处理技术开展的短波通信，能为用户提供高质量、高可通率和廉价的通信服务。短波主要靠电离层传播(称为“天波”)，也可以和长、中波一样靠地波进行短距离传播。

1.3.1 短波的地波传播

沿大地与空气的分界面传播的电波为地表面波，简称“地波”，地波的传播途径主要取决

于地面的电特性。地波在传播过程中，由于能量逐渐被大地吸收，很快衰落（波长越短，衰落越快），所以传播距离近。但地波不受气候影响，可靠性高。地波的传播距离取决于地表介质特性：海面介质的导电特性对于电波传播最为有利；陆地表面介质导电特性差，对电波损耗大；不同的陆地表面介质对电波的损耗程度不同（潮湿土壤地面损耗小，干燥沙石地面损耗大）。短波频段的射频信号沿地面最多只能传播几十千米[1-2]。地波传播不需要经常改变工作频率，但要考虑障碍物的阻挡，短波地波传播示意图如图 1.3.1 所示。



图 1.3.1　地波传播示意图

短波利用地波传播形式的频率范围是 1.5～5MHz。在地波传播中，垂直极化波比水平极化波的衰减小，因此通常采用辐射垂直极化波的垂直天线。图 1.3.2 给出了不同频率电磁波场强与距离的关系，可以看出地波的衰减随着频率的升高而增大，10MHz 的电磁波比 1MHz 的电磁波衰减的快得多。对于 5MHz 的发射频率，即使使用 1000W 的发射功率，陆上传播距离也仅为 100km 左右。所以地波传播不适用于无线电广播或远距离通信，只适用于近距离的传输。

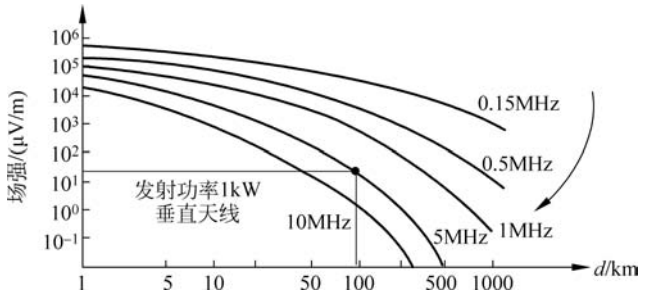


图 1.3.2　不同频率电磁波场强与距离的关系

1.3.2　短波的天波传播

天波是由天线向高空辐射的电磁波遇到电离层反射或折射后返回地面的无线电波。电离层对短波波段的电磁波产生反射和折射作用（见图 1.3.3），天波传播主要用于短波远距离通信。

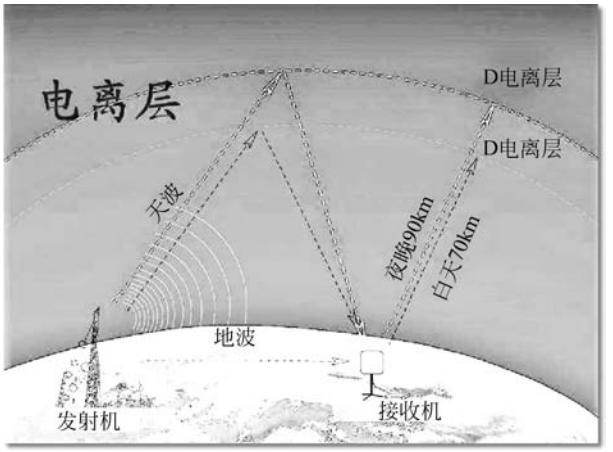


图 1.3.3　天波传播示意图

电离层是影响天波传播的最主要因素。电离层是指从距地面 60～2000km、处于电离状态的高空大气层，上疏下密。在太阳紫外线、太阳日冕的软 X 射线和太阳表面喷出的微粒流作用下，大气气体分子或原子中的电子分裂出来，形成离子和自由电子，这个过程称为“电离”。产生电离的大气层称为“电离层”。电离层的浓度对短波通信工作频率的影响很大，浓度高时反射的频率高，浓度低时反射的频率低。电离层的高度和浓度随地区、季节、时间、太阳黑子活动等因素的变化而变化，这决定了短波通信的频率也必须随之改变。

电离层分为 D 层、E 层和 F 层，其中，F 层又分为 F_1 和 F_2 两层，如图 1.3.4 所示。

(1) D 层：D 层是最低层，出现在地球上空 60～90km 高度处，最大电子密度在 80km 处。D 层出现在太阳升起时，消失在太阳落下后，所以在夜间不再对短波通信产生影响。D 层的电子密度不足以反射短波，所以短波以天波传播时将穿过 D 层。不过，在穿过 D 层时，电磁波将遭受严重的衰减，频率越低，衰减越大。而且 D 层中的衰减远大于 E 层、F 层，所以也称 D 层为“吸收层”。在白天，D 层决定了短波传播的距离，以及为获得良好的传输所必需的发射功率和天线增益。



图 1.3.4 电离层分布示意图

(2) E 层：E 层出现在地球上空 100～120km 高度处，最大电子密度发生在 110km 处，白天基本不变。在通信线路设计和计算时，通常将 110km 作为 E 层高度。和 D 层一样，E 层出现在太阳升起时，在中午电离达到最大值，之后逐渐减小。在太阳落下后，E 层实际上对短波传播不起作用。在电离开始后，E 层可以反射频率高于 1.5MHz 的电磁波。

在 E 层中，有一个偶发 E 层，称为“Es 层”，是偶尔发生在地球上空 120km 高度处的电离层。Es 层虽然是偶尔存在，但是由于它具有很高的电子密度，甚至能将高于短波波段的频率反射回来，在短波通信中希望选用它作为反射层。采用 Es 层需要十分谨慎，因为 Es 层的出现存在很大的不确定性，目前还没有掌握它的规律，过度依赖 Es 层可能导致通信中断。

(3) F 层：对于短波传播，F 层是最重要的，在一般情况下，远距离短波通信都选用 F 层作为反射层。这是由于和 D 层、E 层相比，F 层的高度最高，允许传播的距离最远，所以习惯上称 F 层为“反射层”。

白天 F 层有两层：F_1 层位于地球上空 170～220km 的高度，F_2 层位于地球上空 225～450km 的高度，它们的高度在一天内的不同时刻和在不同季节都是不同的。对 F_2 层来讲，其高度在冬季的白天最低，在夏天的白天最高。F_2 层和其他层不同，在日落以后没有完全消失，仍保持着电离，其原因可能是在夜间，F_2 层的低电子密度复合的速度减慢，而且粒子辐射仍然存在。虽然夜间 F_2 层的电子密度较白天降低了大约一个数量级，但仍足以反射短波频段的电磁波，当然，夜间能反射的频率要低于白天。

图 1.3.5 给出了电离层各层的高度与电子密度的典型值。从图中可以看出，白天电离层包含 D 层，E 层，F_1 层和 F_2 层，夜间只包括 F_2 层，也就是说，若要保持昼夜短波通信，其工作频率必需昼夜更换，而且一般情况下，夜间工作频率远低于白天工作频率。这是因为高的频率能穿过电子密度低的电离层，只有更高电子密度的电离层才能形成反射。所以若不改变昼夜的工作频率，就有可能使电磁波穿出电离层，造成通信中断。

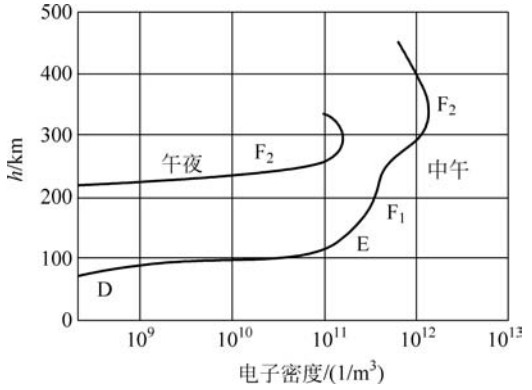


图 1.3.5　电离层各层高度与电子密度的关系曲线

1.4　短波通信的可用频率



短波通信的可用频率

请想一想，光在大气中是沿直线传播的吗？

日常生活中的一个现象可以给出答案。早上太阳升起的时候，整个天空都是红色的，这是因为红色光的频率更低，经过大气层折射后，光线向下弯曲，先进入我们的眼睛；其他颜色的光频率高，当红光进入我们视线时，其他颜色的光还未传播过来。等到七种颜色的光都到折射过来时，阳光就是白色的光了。

电磁波在大气层、电离层中传播时，也会发生折射、反射现象。在电离层中，电子密度随高度增加而增大，介电常数和折射率随高度增加而变小，造成电磁波的折射；而且电离层电子密度的非均匀特性，还会造成电波的散射。电离层的电子密度和高度有关，一定高度下电离层的电子密度是近似均匀的，可以像高等数学中的微积分一样，把整个电离层设想为无数个平行的薄层，各层的电子密度是均匀的。各层的电子浓度 N 随高度增加而增加，电离层的等效相对介电常数 ε_r、折射率 n 亦发生改变，它们与电波频率的关系为

$$n=\sqrt{\varepsilon_r}=\sqrt{1-81\frac{N}{f^2}} \tag{1.4.1}$$

按照上述假设，电磁波通过每一薄片层时都会折射一次，如图 1.4.1 所示。电磁波每次折射的射线，都会进一步偏离法线，入射角逐渐增加。当电波深入到电离层中、电子密度大到使入射角等于 90°时，电磁波就开始全反射。

电磁波在电离层中全反射的条件可以表示为

$$\sin\theta_0=\sqrt{1-81\frac{N_m}{f^2}},\quad \theta_m=90^\circ \tag{1.4.2}$$

从上述分析过程可以得到以下结论：

(1) 电磁波要深入到电离层中，只有电子密度 N 满足式(1.4.2)时才会反射回来，否则会穿过电离层；

(2) 入射角 θ_0 越大，越容易反射；

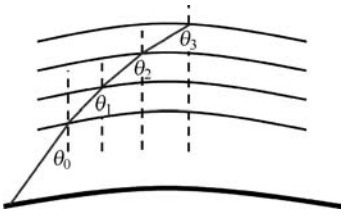


图 1.4.1　电波折射示意图

(3) 入射角 θ_0 越大,电离层能够反射的频率越高;

(4) 在相同频率 f 下,垂直发射的电磁波更能深入电离层;

(5) 当入射角 θ_0 一定时,频率 f 越高,电磁波越深入电离层;

(6) 对于任何入射角 θ_0,都存在最高频率 f_{max},当工作频率 f 高于 f_{max} 时,电磁波就会穿过电离层。

此处的 f_{max} 称为"最高可用频率",是短波通信中的一个重要概念。

1) 最高可用频率

最高可用频率(maximum usable frequency,MUF)是指在实际通信中,能被电离层反射回地面的电磁波的最高频率。若选用的工作频率超过它,电磁波将会穿出电离层,不再返回地面。所以,最高可用频率是短波通信线路设计的重要参数之一,而且是其他参数设置的基础。

为了更形象地说明最高可用频率,以及不同频率的电磁波和传播路径的关系,在此以2000km 通信线路上可能的传播路径为例,如图 1.4.2 所示。从图中可以看出,在给定距离的通信线路上,当选用的频率高于最高可用频率时,电磁波就会穿出电离层,对应图中左侧粗线所示的电磁波;当选用频率低于最高可用频率时,存在两条传播途径,分别对应图中14MHz 和 18MHz 的电磁波。由于这两条路径所需射线的仰角不同,分别称为"高仰角射线"和"低仰角射线"。随着工作频率逐渐接近最高可用频率,高仰角射线和低仰角射线越来越接近,当工作频率等于最高可用频率时,两条射线重合,这时只出现一条传输路径。

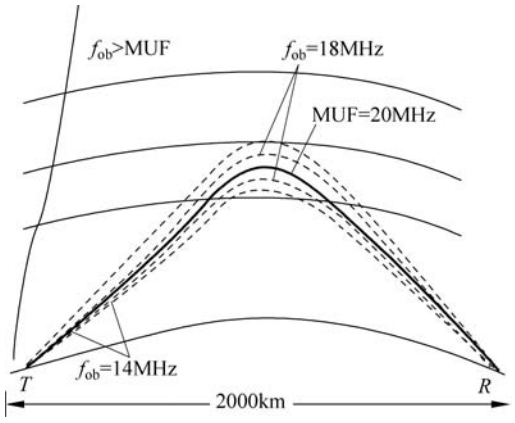


图 1.4.2 2000km 通信线路上电波的传播路径

只有一条传输路径是最理想的情况,没有多径干扰,那么在实际使用中,选用的实际工作频率是不是最高可用频率呢? 由前面的知识可知,电离层的结构、电子密度都是随时间的变化而变化的,当前时刻测得了一个准确的最高可用频率,下一时刻这个频率值就改变了。假设下一时刻的最高可用频率变高了,原来的通信频率还能保证通信,只是传输的路径变多了;但是如果最高可用频率变低了,原来频率的电磁波就会穿过电离层,接收端也就无法接收到信号了。

2) 最佳工作频率

为了保证获得长期、稳定的接收,在确定线路的工作频率时,不是取预报的最高可用频率,而是取低于最高可用频率的最佳工作频率,最佳工作频率用 FOT 表示。在一般情况

下：最佳工作频率等于0.85倍的最高可用频率[3-4]。选用最佳工作频率之后，就能保证短波通信线路的可通率达到90%以上。由于工作频率比最高可用频率下降了15%，接收点的场强损失可以达到10～20dB。可见，为了保证可通率付出的代价是很大的。

综上所述，可以得到以下关于最高可用频率和最佳工作频率的结论：

(1) MUF是指给定通信距离下的最高可用频率。若通信距离改变，对应的最高可用频率也会改变。显然，最高可用频率还和反射层的电离密度有关，所以凡是影响电离密度的因素都将影响最高可用频率。

(2) 当通信线路选用最高可用频率作为工作频率时，由于只有一条传播路径，稳定情况下可能获得最佳接收。

(3) 最高可用频率是随时间变化的。图1.4.3给出了全天最高可用频率和最佳工作频率随时间变化的曲线。由图可以看出，在一天24h中，最高可用频率和最佳工作频率都是不断变化的。实际上，通信线路不需要、也不可能实时地改变工作频率。在一般情况下，白天选用一个较高的频率，夜间选1～2个较低的频率。该图还给出了建议的日频和夜频，日频选用9MHz，夜频选用4.5MHz。

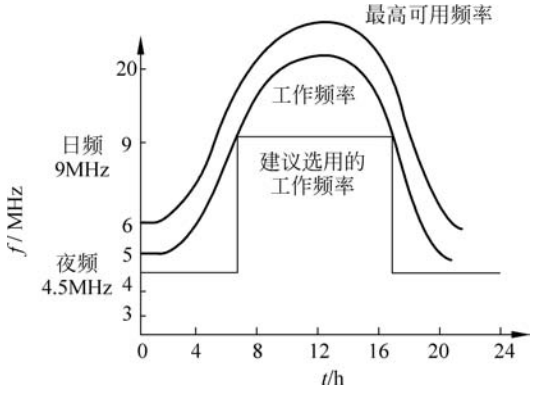


图1.4.3 全天最高可用频率和最佳工作频率随时间变化的曲线

需要特别说明的是，按照最高可用频率日变化曲线确定工作频率，实际上仍不能保证通信线路工作在最优状态。这是由于最高可用频率日变化曲线实际上是一个统计曲线，不能适应电离层参数的随机变化，更不能适应电离层的突然扰动、暴变等异常情况。为解决这一问题，需要实时选频——自动链路建立，自动链路建立是短波通信的一项关键技术，将在下文进行阐述。

1.5 影响短波通信的主要因素


影响短波通信的主要因素

短波通信受到诸多因素影响，其中主要因素包括多径干扰和无线电干扰。

1.5.1 多径干扰

多径干扰与短波信号的传播模式直接相关。在远距离短波通信线路的设

计中，为了获得比较小的传输衰减或者避免仰角太小，需要精心选择传输模式。若已知电离层反射点高度和传输距离，由短波线路的路径可以确定传输模式，如图 1.5.1 所示。

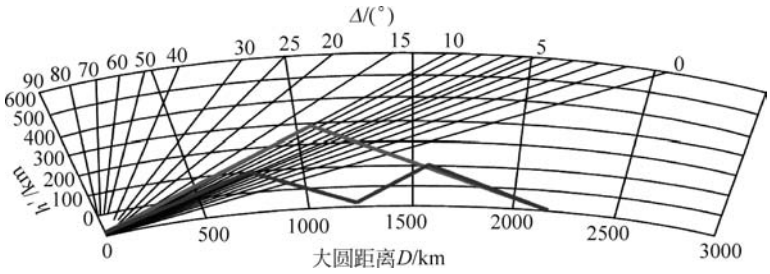


图 1.5.1 短波线路的路径图解(后附彩图)

若要求通信距离为 2200km，利用 F_2 层反射，当反射点高度为 300km 时，选用仰角为 10°的单跳模式，就可满足以上要求，这种传输模式称为“$1F_2$”传输模式。事实上，完成 2200km 的传输还可以利用 E 层两次反射，通常称为“两跳”，即“2E”模式，此时所需的仰角约 4°。当通信距离大于 2500km 时，为了获得较大的仰角，通常采用多跳模式。图 1.5.2 画出了几种可能的传播模式，图 1.5.2(b)所示的 $2F_2$1E 模式是一种三跳模式，线路的两端利用 F_2 层反射，中间地段的反射点可能发生在白天中午，E 层有较高的电离密度，有能力反射所选用的工作频率，线路两端地段已是太阳落下或夜间。

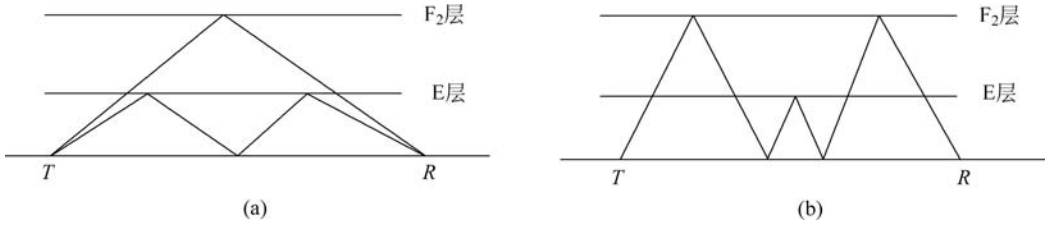


图 1.5.2 多跳远距离通信线路示意图

(a) $1F_2$ 与 2E 传播模式示意图；(b) $2F_2$1E 传播模式示意图

要严格设计这种多跳远距离通信线路，需要分别研究线路中每一地段对应于工作频率的传播特性和所需的仰角，这是很复杂的。一般来讲，严格的计算是不必要的，在设计中只考虑线路两个终端的电波传播情况，就足以确定短波线路对设备的具体要求。

根据上文对短波传播模式的分析可知，短波信号可以通过多条路径或者不同的传输模式到达接收端。由于这些路径的传播距离不同，到达接收端所经历的传播时间也不同，这就引起了多径效应。通过对华盛顿到英格兰 6000km 的传输路径和日本到英格兰 9600km 的传输路径测量表明，不同模式的电磁波到达接收端的时间不同，它们之间的差值在 0.55～4.5ms。图 1.5.3 给出了短波通信线路多径延时差值的统计分布。

纵轴 MRF 表示多径缩减因子，多径缩减因子等于工作频率与最高可用频率的比值。从图 1.5.3 中可以看出，当缩减因子接近 1，即工作频率靠近最高可用频率时，多径时延是最小的；当缩减因子减小，即工作频率偏离最高可用频率时，多径时延逐渐增大。

多径效应的影响在于会引起严重的码间干扰，如图 1.5.4 所示。以单载波串行传输为例，当符号速率为 19.2Kb/s 时，5ms 的多径时延引起的码间串扰，将持续 96 个数据符号，

此时接收端处理的复杂度将大幅增加，处理的效果也会大打折扣，误码率将会变得很差，甚至造成通信中断。

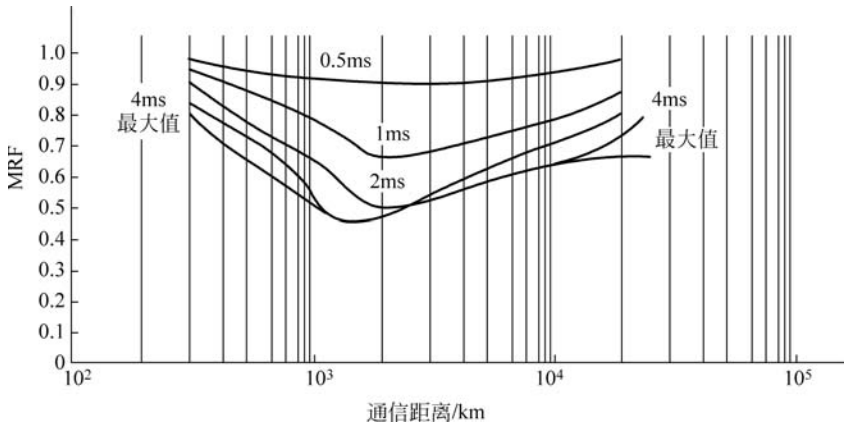


图 1.5.3　短波通信线路多径延时差值的统计分布

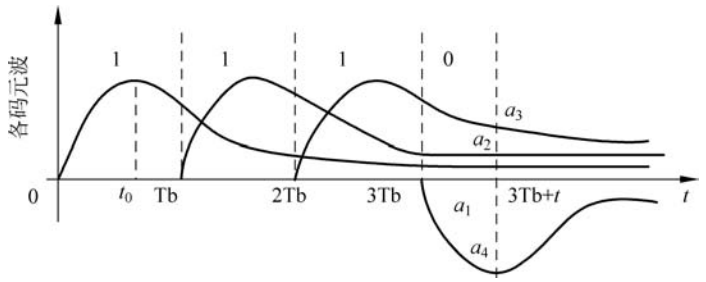


图 1.5.4　码间干扰示意图

多径效应在引起码间干扰的同时，还会引起信号的衰落，即在接收端，信号产生干涉现象，信号的幅值呈现忽大忽小的随机变化。在短波传播中，衰落有快衰落和慢衰落之分。持续时间仅几分之一秒的信号起伏称为“快衰落”，持续时间达 1h 或者更长的衰落称为“慢衰落”。衰落现象在时间轴和频率轴上同时存在，图 1.5.5(a)是衰落随时间变化的曲线，图 1.5.5(b)是衰落随频率变化的曲线。

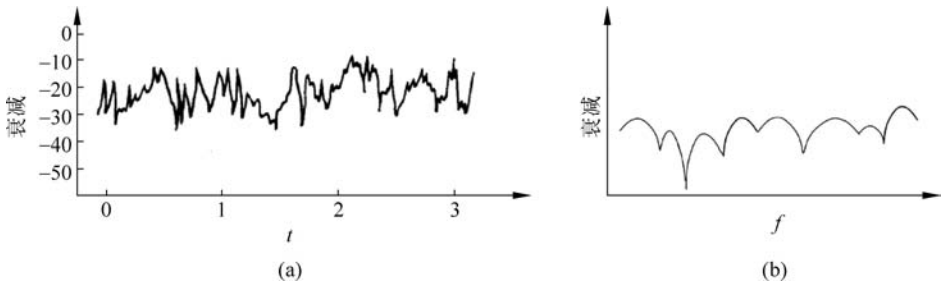


图 1.5.5　衰落随时间和频率的变化

(a) 衰落随时间变化的曲线；(b) 衰落随频率变化的曲线