

高等学校教材

电波传播工程计算

肖景明 王元坤



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书在对各种传播方式和各个波段的传播特性进行介绍的基础上,着重介绍电波传播中的工程计算与设计中的有关问题。

全书共分七章。第一章介绍一些电波传播工程计算中的基本概念,其余各章分别讨论了长波、中波、短波、超短波和微波等不同波段,以及移动通信、对流层散射、卫星通信中的有关传播特点与电波电路的工程设计与计算。在内容的安排上,有较多的计算举例和较丰富的图表曲线,是该书的一大特色。

本书除可作为电磁场与微波技术、无线电物理、通信等专业的教科书外,亦可作为雷达、导航、无线电技术等专业师生以及有关科技人员的参考书。

高等学校教材

电波传播工程计算

肖景明 王元坤

责任编辑 云立实

西安电子科技大学出版社出版

西安电子科技大学印刷厂印刷

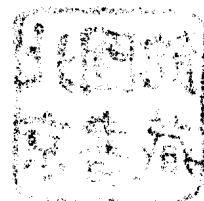
陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 496 千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷 印数 1—1400

ISBN 7-5606-0071-9/TN·0026

定价: 4.15 元



出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制定了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处。希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划, 由电磁场与微波技术教材编审委员会天线电波编审小组组织征稿、评选, 并推荐出版的。

本教材由西安电子科技大学肖景明副教授担任主编, 武汉大学侯杰昌教授担任主审。

本课程的参考学时数为 60~80 学时, 其主要内容是介绍各种传播方式中与电波传播工程计算有关的问题。全书共分七章。第一章, 电波传播工程计算中的一些基本概念, 主要介绍与全书内容有关的一些基本概念与定义。第二章简单介绍 LF 与 VLF 频段电波传播的一些特点与场强的计算方法。第三章主要介绍中波、短波传播的基本特点以及中、短波无线电通信电路的工程计算, 如传播模式, 电路几何参数与场强的计算, 频率预测等。第四章为超短波与移动通信的电路计算, 主要讨论光滑平面、球面与山峰等条件下电波传播有关问题的计算。在移动通信电路计算中主要介绍了奥村模式与 Egli 模式等各种计算方法。最后讨论广播、电视系统中 VHF 与 UHF 频段场强预测与覆盖区域的计算, 并简单介绍了隧道中移动通信的一些问题。第五章比较详细地讨论了微波中继通信中的电波传播工程计算与一些参数测量方法。第六章是对流层散射电路的计算。第七章介绍卫星通信中有关传播特点及一些工程计算等问题。

本教材着重介绍在各种传播方式中通信电路的电波传播工程计算问题, 因此以与电波传播有关的内容为主, 而不涉及通信系统的全面设计。此外也不对电波传播的一些传播机理进行深入的研究与讨论, 必要时读者可参阅有关电波传播的专著。

本教材由南京通信工程学院王元坤编写绪论, 第一、三、四章; 西安电子科技大学肖景明编写第二、五、六、七章; 由肖景明统编全稿。参加审阅工作的谢处方教授、汪茂光教授、林宗琦教授、周朝栋教授、赵姚同副教授与单秋山副教授等, 都对本书提出了许多宝贵意见, 在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限, 书中难免还存在一些缺点和错误, 殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1988 年 5 月

目 录

绪论	1	的计算	164
第一章 电波传播工程计算中的一些基本概念		5-4 大气折射率的统计特性	170
1-1 无线电通信信道的表述方法	4	5-5 等效地球半径因子 K 值的计算与测试	173
1-2 传输损耗	5	5-6 发射角与到达角的计算及路由参数对其的影响	180
1-3 多径传输	7	5-7 地球凸起高度与传播余隙的计算与选择	183
1-4 衰落	9	5-8 反射点的计算与反射点位置的变化	193
1-5 干扰与噪声	18	5-9 微波中继通信电路中的同频道干扰	199
第二章 低频与甚低频工程计算简介		5-10 大气衰减、雨、雾、雪等对电波的影响	201
2-1 低频与甚低频电波传播的机制	26	5-11 衰落的统计与储备	209
2-2 传播特点	27	5-12 电路的噪声指标	217
2-3 场强的计算	32	5-13 减小衰落的措施与分集接收	227
第三章 中、短波无线电通信电路的工程计算		5-14 无源反射板	240
3-1 中波传播特点及场强计算	43	5-15 数字微波接力通信系统	242
3-2 短波信道的传输模式	47	第六章 对流层散射电路的计算	
3-3 短波信道特点	48	6-1 对流层散射机理与传播特点	248
3-4 短波电路几何参数的计算	53	6-2 对流层散射信号的衰落特性及其测量	251
3-5 短波信道的频率预测(长期预测) ...	58	6-3 传输损耗的计算	262
3-6 基本传输损耗的估算	76	6-4 传输带宽与最佳使用频率	272
3-7 接收点必需最小信号电平的计算 ...	88	6-5 分集接收	276
3-8 收发设备的综合考虑	94	6-6 系统损耗与传播可靠度	283
3-9 接收点场强及电路可靠度的计算 ...	98	6-7 站址选择与电路的几何参数计算	286
第四章 超短波与移动通信电路计算		6-8 电路的设计与计算举例	289
4-1 光滑地面上的电波传播	102	第七章 卫星通信电路的计算	
4-2 山峰绕射	113	7-1 卫星通信的一些特点	294
4-3 陆上(汽车)移动通信系统中的电波传播	121	7-2 同步卫星的通信区域	295
4-4 移动通信中的干扰与噪声	141	7-3 地球站相对同步卫星的方位角、仰角与距离的计算	297
4-5 移动通信电波传播工程计算	144		
4-6 广播电视系统 VHF、UHF 频段场强预测与区域覆盖	149		
4-7 隧道中的移动通信	154		
第五章 微波中继通信电路的计算			
5-1 微波传播的一些特点	157		
5-2 传播主区与地面反射	158		
5-3 地面反射波的影响及天线高度			

7-4 折射效应与闪烁	300	损耗	312
7-5 衰减与分集接收	303	7-8 噪声	317
7-6 正交极化	311	7-9 地球站的性能指标与站址选择 ...	322
7-7 天线增益、传播时延与传输		参考文献	325

表 1 各无线电频段的主要传播特性及业务分配

频段名称	主要传播方式	基本传播特性	业务分配
极低频 (ELF) 几赫兹~3 kHz	地面-电离层波 导传播		水下核潜艇通信; 导航。
甚低频 (VLF) 3~30 kHz	地面波 天 波 地面-电离层波 导传播	传播损耗小, 作用距离远; 传播相位稳定, 有良好的可预测性; 受电离层扰动影响小, 传播情况稳定; 有较强穿透海水和土壤的能力; 大气噪声电平高, 频带窄。	远距离无线电导航及可靠通信; 标准频率和时间信号的广播; 陆地对潜艇的通信; 地下、水下通信。
低 频 (LF) 30~300 kHz	地面波 天 波	与甚低频传播特性类似, 但衰减率比 VLF 大。通常用于中距离(1000~5000 km)的传播。	无线电导航及可靠通信; 标准频率和时间信号的广播。
中 频 (MF) 0.3~3 MHz	地面波 天 波	白天中波主要靠地波传播, 夜晚中波可以通过电离层(E 层)反射而到达较远距离。	近距离广播与无线电导航。
高 频 (HF) 3~30 MHz	地面波(低频端) 天 波	传输损耗小, 可以较小功率进行远距离传播; 衰落严重; 有静区; 电离层暴及突然骚扰会使短波传播遭受严重影响, 甚至通信中断。	国际广播; 中远距离通信; 船岸间的航海移动通信; 飞机地面间的航空移动通信等。
甚高频 (VHF) 30~300 MHz	视距传播; 对流层、电离层散射传播; 在某种情况下也可用障碍物绕射传播。	30~70 MHz 电波在太阳活动高年, 仍可利用电离层反射传播方式; 高频段衰落现象严重, 绕射能力较弱。	调频广播; 电视广播; 定点、移动通信等。
超高频 (UHF) 300 MHz ~3 GHz	视距传播 对流层散射传播 行星际空间传播	视距传播, 微波衰落显著; 大气波导及降水散射会产生干扰; 10 GHz 以上电波, 大气气体吸收和雨衰减严重, 并会引起电波的去极化效应。	定点、移动通信; 导航; 雷达; 卫星通信; 中继通信等。
特高频 (SHF) 3~30 GHz			
极高频 (EHF) 30~300 GHz			

的误码率来表征。可靠性(这里不包括系统设备的平均无故障时间)通常是指通信电路接收端的信噪比 γ 高于某个可以接收的最小信噪比 $\gamma_{\min}$ 的时间百分比。如系统的通信可靠性为

99.9%，这说明在一天内有 1.44 分钟，或一年内有 8.76 小时的时间 $\gamma \leq \gamma_{\min}$ 。在进行电路设计时，需同时满足电路要求的通信质量和可靠性的指标。如短波数据传输电路，要求可靠性为 90% 的条件下误码率小于 10^{-5} 。这意味着在平均 90% 的时间内，允许误码率为 10^{-5} ，即接收 100000 个数据码中，误码数仅允许有一个。在电路的工程计算与设计，对技术指标的要求要适当，若指标过高，或难以实现，或设备的成本成倍增加，故要同时考虑到电路的经济性。

设计一条通信电路应考虑的基本内容一般包括有：多项技术指标的确定与分配；设备的选择(收发高频部分、终端、天线系统等)；传输特性的估算(传输损耗、干扰噪声电平、衰落、时延、交叉极化特性等)。在信道计算的基础上，再结合成本、使用等方面的要求综合考虑，以期获得最佳设计。同样地，对于一条已建立的通信电路，当收发设备、终端机、天线系统以及所传输消息的型式都已给定时，也可以通过信道计算，核算所能保证的通信质量和可靠性。由于某些媒质电参数的随机时变性，或由于求解电磁场边值问题严格解的复杂性等原因，欲精确地计算出接收点场强值及其它技术指标是一项相当困难和异常复杂的工作。本书偏重于工程计算，通常所使用的方法，是以理论计算、经验数据或者从大量传播试验中综合得出的统计曲线为基础进行的。限于本书的篇幅，只介绍一些国内外设计中通用性较强、可靠度较高的计算方法。此外本教材以与电波传播有关的内容为主，而不涉及通信系统的全面设计。为突出重点而又避免过于重复，本书对电波传播的基础知识不作详细的叙述，必要时读者可参阅有关电波传播的书籍。

第一章 电波传播工程计算中的一些基本概念

1-1 无线电通信信道的表述方法

无线电波是在各种不同媒质空间中传播的, 信号通过任何传输媒质都不可避免的会产生衰减、时延、畸变等, 特别是通过对流层、电离层等随机时变媒质时, 将受到更复杂的影响。此外, 信号在开放性的空间场所内传播时, 有用信号与无用信号相互干扰以及噪声的引入, 也会使信息传输质量下降。因此研究各种媒质对信号传输的作用是电波学科的重点研究内容之一。从电子系统设计的角度考虑, 本书不再更多地关心电波传播的物理过程, 而是着眼于媒质对所传输信号的最终作用结果。

所谓信道, 是指传输信息的媒质或通道。如对流层就是超短波及微波对流层散射传播的信道, 电离层是短波天波传播的信道。通常人们将这种仅指传播媒质而言的信道称为狭义信道。

为了便于研究信道对信息传输的影响, 首先引入信道模型来表征信道的一般特性。人们经过对各种信道的考察, 发现它们具有如下的主要共性: (1) 所有信道均具有输入端; (2) 所有信道均具有输出端; (3) 即使信道输入端无信号输入, 在输出端也存在着噪声输出; (4) 信号在传输过程中均遭受衰减和时延, 或受到其它影响, 如衰落、畸变等; (5) 绝大多数信道是线性的, 满足叠加

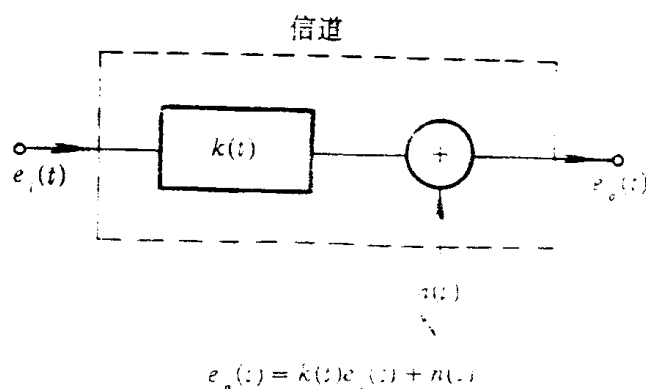


图 1-1 信道模型

原理。最简单的信道模型如图 1-1 所示, 图 $e_i(t)$ 为信道输入端已调制信号, $e_o(t)$ 是输出信号。一般地说, 信道对信号的影响可用两个因子来表示: 一是乘以 $k(t)$ 因子来表示作用于所传输的信号, 另一个是混迹于信号之中一定数量的噪声干扰 $n(t)$ 。前者称为乘性干扰因子, 后者称为加性干扰因子。因此信道的输出输入的关系为

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad (1-1)$$

加性干扰 $n(t)$ 与输入信号 $e_i(t)$ 彼此独立不发生依从关系, 即使信道没有信号输入, 干扰在输出端仍然存在。乘性干扰是与 $e_i(t)$ 共存的一种干扰, $k(t)e_i(t)$ 则反映了信道对信号的最终作用效果。不同特点的信道, 就反映在信道模型中具有不同特性的 $k(t)$ 和 $n(t)$ 。

乘性干扰因子 $k(t)$ 一般是一个复杂的函数。但是, 经过大量的观测表明, 有些信道的 $k(t)$ 随时间变化极为缓慢或基本不变, 而有些信道的 $k(t)$ 则是随机快变化的。因此在分析研究乘性干扰时, 从相对意义上可把信道分为两大类: 一类称为恒参信道, 即可把 $k(t)$ 看成不随时间变化或基本上不随时间变化。如地波传播、星际空间传播等信道均属此类。另一类则称为随参信道或称随机时变信道, 即 $k(t)$ 是随机函数。随参信道一般有

三个主要特点：(1) 传输衰减不稳定，信号有慢衰落现象；(2) 信号传输时延不稳定；(3) 多径传输，使接收信号有快衰落与频率选择性衰落。典型的随参信道有短波电离层反射信道、对流层散射信道等。显然，对随参信道的分析要比恒参信道复杂得多。

以下各节将对无线电通信信道的几项基本传输特性——传输损耗、衰落特性、多径效应等作一扼要的介绍。

1-2 传输损耗

信号在信道中传输时，总是有衰减的。一方面是随着电波传播距离的增加，由于球面波自然扩散而引起的；另一方面传输媒质以及障碍物等对电波的吸收、散射、绕射或反射等作用也会使信号产生衰减。通常用传输损耗来度量信道的衰减特性。众所周知，前者是指自由空间传输损耗，而后者统称为媒质传输损耗。

对于某一具体的传输电路，定义发射天线输入功率 P_i 与接收天线输出功率 P_r (匹配时)之比为该电路的系统传输损耗 L_{sm} ，若以分贝表示，则为

$$L_{sm} = 10 \lg(P_i / P_r) = P_i (\text{dBW}) - P_r (\text{dBW}) \quad (\text{dB}) \quad (1-2)$$

由电波传播基本理论可知，接收点场强 E (有效值)的表示式为

$$E = E_0 A = \frac{\sqrt{30 P_i (\text{W}) G_i}}{r (\text{m})} A \quad (\text{V/m}) \quad (1-3)$$

接收点的功率流密度 S (即波印亭矢量值)及接收天线输出功率 P_r 分别为

$$S = \frac{P_i G_i}{4\pi r^2} A^2 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-4)$$

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 A^2 P_i G_i G_r \quad (\text{W}) \quad (1-5)$$

式(1-3)~(1-5)中 E_0 为自由空间接收点场强， A 为该电路的衰减因子， G_i 与 G_r 分别为发射天线和接收天线的增益， r 为收发天线间的距离， λ 为电波波长。将式(1-5)代入式(1-2)中得

$$L_{sm} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - A (\text{dB}) - G_i (\text{dB}) - G_r (\text{dB}) \quad (\text{dB}) \quad (1-6)$$

由于衰减因子 A 通常小于1，故 A (dB)为负值， $-A$ (dB)则为正值，体现了媒质对电波作用而引起的传输损耗，由上式可以看出，系统传输损耗 L_{sm} 与工作频率、传输距离、传播方式、媒质特性以及收发天线增益等因素有关，一般为几十至200 dB左右。

在式(1-6)中，若令 $G_i (\text{dB}) = G_r (\text{dB}) = 0$ ，即假设收发天线是无方向的，所得表示式为

$$L_b = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) - A (\text{dB}) \quad (\text{dB}) \quad (1-7)$$

由于 L_b 与天线增益无关，仅决定于电路的传输情况，故称它为基本传输损耗或称为路径损耗。

若假设电波是在自由空间内传播, 由式(1-3)可知, $A = 1$ 即衰减因子 A (dB) = 0, 代入式(1-7)中, 就可得到自由空间传输损耗 L_{bf} 表示式, 即

$$L_{bf} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) \\ = 32.45 + 20 \lg f(\text{MHz}) + 20 \lg r(\text{km}) \quad (\text{dB}) \quad (1-8)$$

当然自由空间是理想介质, 不吸收电磁能量。所谓自由空间传输损耗是指球面波在传播过程中, 随着传播距离的增加, 能量的自然扩散而引起的损耗。由式(1-8)可知, L_{bf} 只与电波频率 f 及传播距离 r 有关, 当频率提高 1 倍或距离扩大 1 倍时, L_{bf} 分别增加 6 dB。

衰减因子 A 也是一个很重要的物理量, 它是相对于自由空间的传输损耗。由式(1-3)得出

$$A = 20 \lg \frac{|E|}{|E_0|} \quad (\text{dB}) \quad (1-9a)$$

一般情况下, $E < E_0$, 故 A (dB) 为一负值。但在习惯上, 往往采用下列表示方法, 即

$$A = L_b - L_{bf} \quad (\text{dB}) \quad (1-9b)$$

由于传输情况不同, 媒质传输损耗 A (dB) 可能包含有下列部分:

吸收损耗(由地面、电离层、大气气体分子或水汽凝结物吸收所引起);

反射影响或散射吸收(如电离层内, 由反射曲面的聚焦或散焦作用引起; 反射面的有限面积的边缘效应引起, 或由不均匀媒质对电波的散射作用引起等等);

极化耦合损失(由传输过程中的极化面旋转引起);

孔径-介质耦合损耗(由于电波传播的散射效应, 使接收天线口面上非平面波而引起的附加损耗);

波的干涉效应(由地面或障碍物产生的反射波与直射波的干涉作用而引起的)。

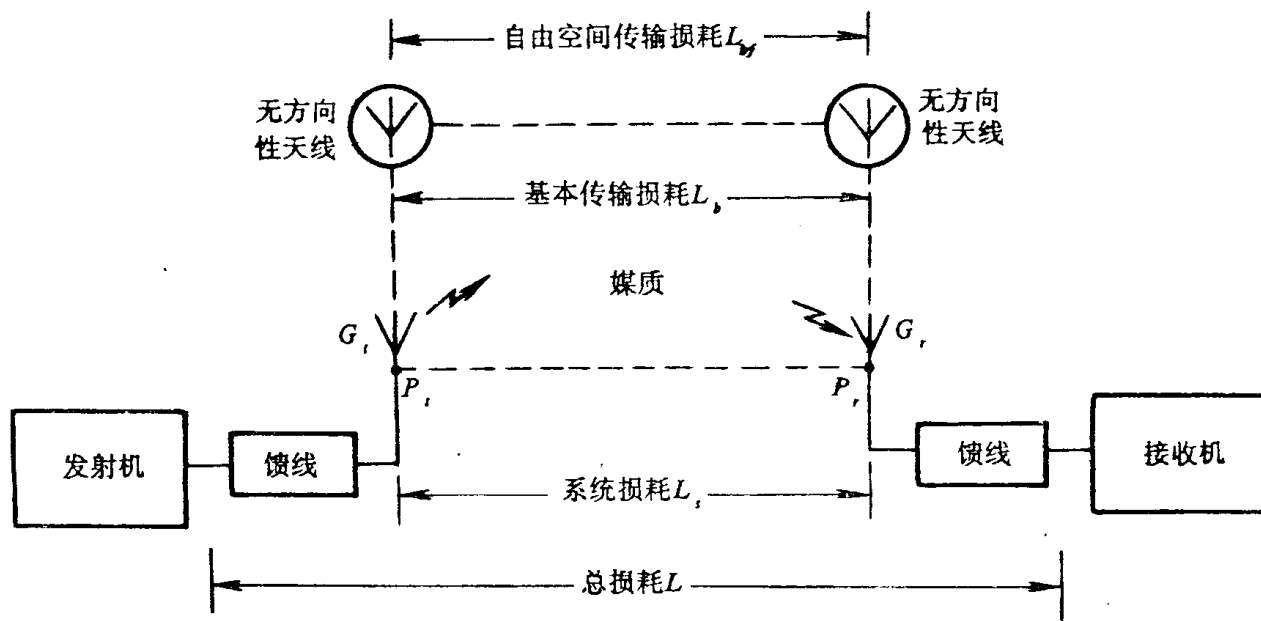


图 1-2 通信电路的传输损耗

根据不同的传输方式, A 值计算可能取上述诸项中的一项或几项, 视具体信道而

定。计算 A 值是多种信道电波传播工程计算的重要内容之一。

图 1-2 示出了通信电路传输损耗示意图，它清楚地表达了各种传输损耗间的关系。

1-3 多径传输

在随机时变信道中，由发射点发出的电波可能通过多条路径到达接收点，这种现象称为多径传输。就每条路径的信号而言，它的衰耗和时延都是随机变化的。经多径传输后的接收信号将是多径随机信号的合成。设信道输入端的信号为

$$e_i(t) = A_0 \cos \omega_0 t$$

经过 n 条路径传输后，在信道输出端的信号 $e_o(t)$ 则为

$$\begin{aligned} e_o(t) &= \sum_{j=1}^n u_j(t) \cos \omega_0 [t - \tau_j(t)] \\ &= \sum_{j=1}^n u_j(t) \cos [\omega_0 t - \varphi_j(t)] \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中， $u_j(t)$ 是第 j 条路径接收信号的振幅， $\tau_j(t)$ 是第 j 条路径的传输时延， $-\varphi_j(t) = -\omega_0 \tau_j(t)$ 是由 τ_j 引起的滞后相位。通过对实际信道的大量观测结果表明，与发射信号的周期相比， $u_j(t)$ 与 $\varphi_j(t)$ 的变化缓慢得多，即 $u_j(t)$ 与 $\varphi_j(t)$ 可看成是缓慢变化的随机过程。因此式(1-10)可改写成

$$e_o = \sum_{j=1}^n u_j(t) \cos \varphi_j(t) \cos \omega_0 t + \sum_{j=1}^n u_j(t) \sin \varphi_j(t) \sin \omega_0 t$$

令

$$X_C(t) = \sum_{j=1}^n u_j(t) \cos \varphi_j(t)$$

$$X_S(t) = \sum_{j=1}^n u_j(t) \sin \varphi_j(t)$$

代入上式得

$$\begin{aligned} e_o(t) &= X_C(t) \cos \omega_0 t + X_S(t) \sin \omega_0 t \\ &= \tilde{V}(t) \cos [\omega_0 t + \tilde{\varphi}(t)] \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中， $\tilde{V}(t) = \sqrt{X_C^2(t) + X_S^2(t)}$ 表示合成波 $e_o(t)$ 的包络， $\varphi(t) = \arctg[X_S(t)/X_C(t)]$ 表示合成波 $e_o(t)$ 的相位。

由于 $u_j(t)$ 及 $\varphi_j(t)$ 是随机变化的，因而合成波也是一个随机信号。由式(1-11)可以看出：(1)从波形上看，多径传输的结果使单一载频的确定信号 $A_0 \cos \omega_0 t$ 变成了包络和相位都受到调制的窄带信号[见图 1-3(a)]。由于

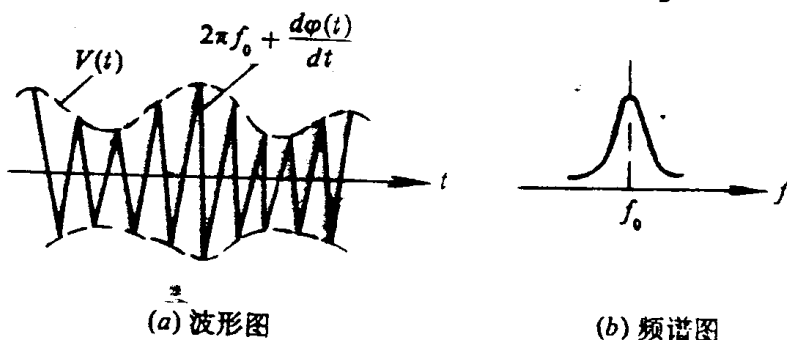


图 1-3 衰落信号波形与频谱

它是大量的独立随机变量之和，因而这样的信号也是衰落信号；(2) 从频谱上看，多径传输引起了频率弥散，即由单一频率变成了一个窄带频谱[见图 1-3(b)]，使信号产生非线性失真。凡具有这种传输特性的信道就称为衰落多径信道，或称时变时延散布信道。

当上述信道传输宽带信号时，会产生频率选择性衰落现象，这是多径传输效应的又一重要特征。为简化分析，设多径传输路径只有两条，且假定到达接收点的两路信号具有相同的幅度，但由于传输路径的长度不同，两路信号之间有时延差 τ 。此时接收点场强是由两条路径传来的，相位差为 $\varphi = \omega\tau$ 的两个信号的叠加[图 1-4(a)]。对所传输信号的不同频率分量而言，相同的 τ 值会引起不同的相位差。例如对频率为 f_1 的分量，若 $\varphi_1 = \omega_1 \tau = \pi$ 时，则因两路电场矢量反相相消而使合成场强呈现最小值；而对 f_2 分量，若 $\varphi_2 = \omega_2 \tau = 2\pi$ 时，则此频率分量的合成场强为最大值；其它频率分量的情况依此类推。很明显，由于多径效应，信道对不同频率的分量有不同的响应，如图 1-4(b) 所示的幅频特性。

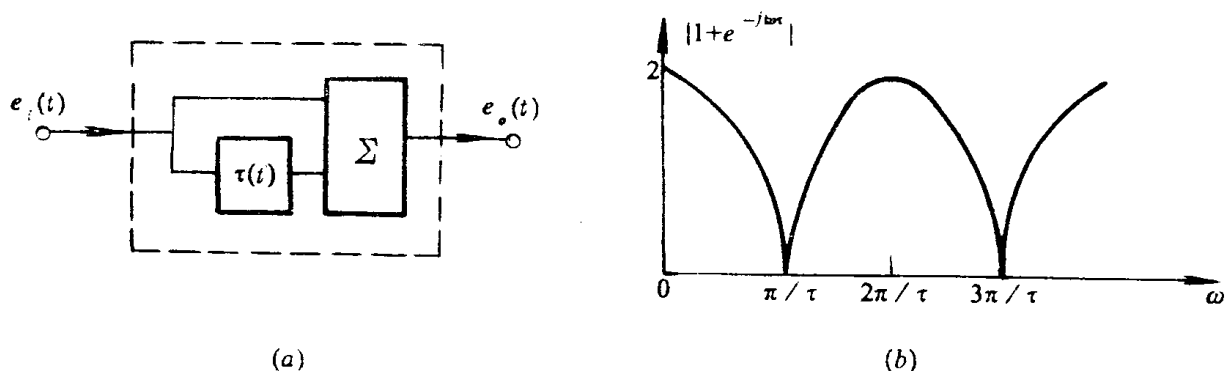


图 1-4 频率选择性衰落

(a) 多径传输等效电路；(b) 幅-频特性 ($n=2$)

图中两相邻零点之间的角频差为 $\delta\omega = 2\pi/\tau$ 。由于信道的时变性，相对时延差 τ 是随机变量，故幅频特性曲线上出现的零点与极点在频率轴上的位置是随机变化的。上述概念可以推广到多径传输情况。显然，接收信号频谱中频率间隔较大的分量，有着不同的且随时间而随机变化的衰减和相移，这种现象就称为频率选择性衰落。

在多径传输情况下，对信号电平有贡献的各分量是经过不同路径，从不同方向到达接收点的，因而具有一个路径时延的散布范围。若令 τ_m 是最长路径与最短路径之间的路径时延差，称它为多径散布。定义多径散布的倒数为信道相关带宽，即

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_m} \quad (1-12)$$

如果传输信号的频谱宽度大于 $1/\tau_m$ ，则信号波形将产生明显的畸变。为此在系统设计中不得不对所传输信号的带宽有所限制。

根据大量的统计资料，表 1-1 中给出了某些信道多径散布的一般数量范围。它与信道类型、通信距离、天线波束宽度、射线仰角等因素有关。但由于随参信道的时变性，不同 τ 值出现的概率也不同。例如短波电离层反射信道，在中等通信距离上，多径时延 $\tau \leq 2\text{ms}$ 的概率大约为 80%，少数情况可达 5ms；而在短距离上， $\tau < 5\text{ms}$ 的概率达 80%，个别情况下大于 8ms。因此若根据 τ_m 来确定信号允许的传输带宽，则条件过于苛刻。通常的方法是根据给定概率的 τ 值及允许的失真度来确定容许的传输带宽。如短波信

道，所传输的信号带宽，一般为 0.5~5 kHz。

表 1-1 若干信道的多径散布

HF 电离层传播(一般条件下)	$10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}$
(急剧衰落时)	$10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}$
VHF 电离层前向散射传播	10^{-4} s
UHF 对流层散射传播	10^{-6} s
地空卫星视距传播	10^{-6} s

1-4 衰 落

一、衰落现象

衰落一般是指接收信号幅度随时间的不规则变化。引起衰落的原因有多种，最常见的有：(1) 干涉型衰落。它是不同传输路径的射线随机干涉的结果，因此又称为多径衰落。(2) 衰耗型衰落。它是由于传输媒质(包括连续性和离散性的媒质，前者如对流层、电离层等，后者如雨、雾、云、雪等)对信号的吸收所引起，故又称吸收型衰落。(3) 极化衰落。这是电波在双折射媒质中传播时特有的衰落。例如当电波通过电离层时，由于电离层是各向异性的随机媒质，使得电波的极化方向随机变化，则接收天线的输出产生相应的衰落，故称为极化衰落。

根据信号衰落周期的长短，有快衰落与慢衰落之分。前者是瞬时信号幅度在短期内的起伏，例如在几秒钟、几分钟内信号幅度即有明显的变动。而后者是指短期信号电平中值(如小时中值、月中值等)在长期内的起伏。

在许多场合中，信号幅度不仅随时间起伏，也随频率和空间起伏，它们分别称为时间选择性衰落、频率选择性衰落和空间选择性衰落。随参信道中的上述几种选择性衰落往往是并存的。

二、衰落特性的统计描述

研究信号的衰落特性时，首先要测得信号的瞬时分布曲线，如图 1-5 所示。从图中可以求出衰落时的最高与最低信号电平、衰落的周期、信号中值及其它分布统计值等。通常使用以下各量来描述衰落特性。

(1) 中值。它是指有 50% 的时间信号电平超过的值。图 1-5 中 E_m 为 T 时间内信号电平 E 的中值，即 $t_1 + t_2 + t_3 = 50\% = t'_1 + t'_2 + t'_3$ 。若 T 取一小时、一天、一个月或一年，

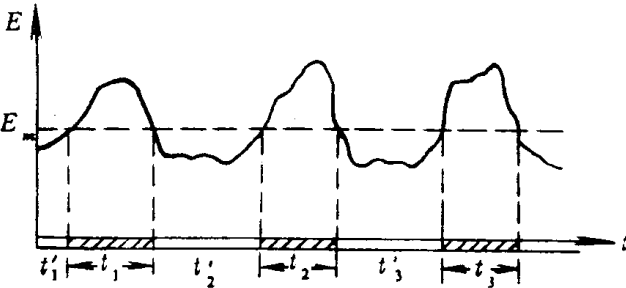


图 1-5 衰落信号瞬时分布曲线

则其相应的中值分别称为小时中值、日中值、月中值或年中值等。但中值不能反映衰落的严重程度，故仅用中值不足以完全描述信号的衰落特性。

(2) 衰落幅度和衰落深度。这两个量是描述随机量的幅度分布的重要参数。通常定义分布概率分别为 90% 和 10% 时相应电平分贝数的差值称为衰落幅度。而衰落深度一般是指分布概率分别为 90% 和 50% 时电平间分贝数之差。它们都用来表征信号幅度衰落的严重程度。

(3) 衰落率。一般是指在单位时间内，信号幅度自上而下通过某给定值的次数，它表征衰落的频繁程度。

(4) 衰落持续时间。它是指信号幅度低于某一给定值时的持续时间，是一随机量，一般用分布函数描述。但有时也用平均衰落持续时间来表示，它是指在给定的统计时间内，信号幅度跌落到某给定值之下的持续时间的平均值。为保证通信的可靠性，特别是对数字通信系统，了解这个参量有着重要意义。

对于随机信号来说，我们无法预知某一信号随时间变化的具体情况，只能通过对大量资料作统计分析，寻找信号随时间变化的统计规律。其中概率分布函数能较全面地描述出信号的衰落特性。

用数学方法表示，概率分布函数就是概率密度函数的积分，即

$$P(x \leq X) = \int_{-\infty}^X p(x) dx \quad (1-13)$$

式中 $p(x)$ 是随机量 x 的概率密度函数，则概率分布函数 $P(x \leq X)$ 就给出了随机量 x 低于某一特定值 X 时的概率。很明显，当 $X = -\infty$ 时， $P(x) = 0$ ， $X = +\infty$ 时， $P(X) = 1$ 。当 X 为其它值时， $P(x \leq X)$ 值在 0~1 之间变化。

如上所述，若用概率分布函数 $P(x \leq X)$ 表示小于 X 的事件概率，则大于 X 的事件的概率为 $1 - P(x \leq X)$ ，即

$$P(x \leq X) = \int_{-\infty}^X p(x) dx \quad (1-14)$$

$$P(x \geq X) = 1 - P(x \leq X) = \int_X^{+\infty} p(x) dx \quad (1-15)$$

在本书中，这两种形式的表示式可能都会遇到。有的书中，概率分布函数又称累积分布函数。

三、几种常用的概率分布函数

1. 正态分布 若随机变量 x 具有下列形式的概率密度函数

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(x - X_0)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (1-16)$$

则称随机变量 x 服从正态分布(又称高斯分布)，式中 X_0 、 σ 为常量。 $p(x)$ 曲线如图 1-6 所示。随机量 x 的主要数字特征有：均值 $\bar{x} = X_0$ ，方差 $\sigma_x^2 = \sigma^2$ 。实用中为方便起见，有时用方差的平方根(取正值) σ 来表征，称作随机变量 x 的均方差，或称为标准偏差。

正态分布的累积分布函数 $P(x)$ 为

$$P(x \leq X_0) = \int_{-\infty}^{X_1} p(x) dx = \int_{-\infty}^{X_1} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(x - X_0)^2 / \sigma^2\right] dx$$

$$= \Phi\left(\frac{X_1 - X_0}{\sigma}\right) \quad (1-17)$$

式中 $\Phi(x)$ 称为概率积分函数, 简称概率积分。可借助一般的积分表查出不同 x 值时的

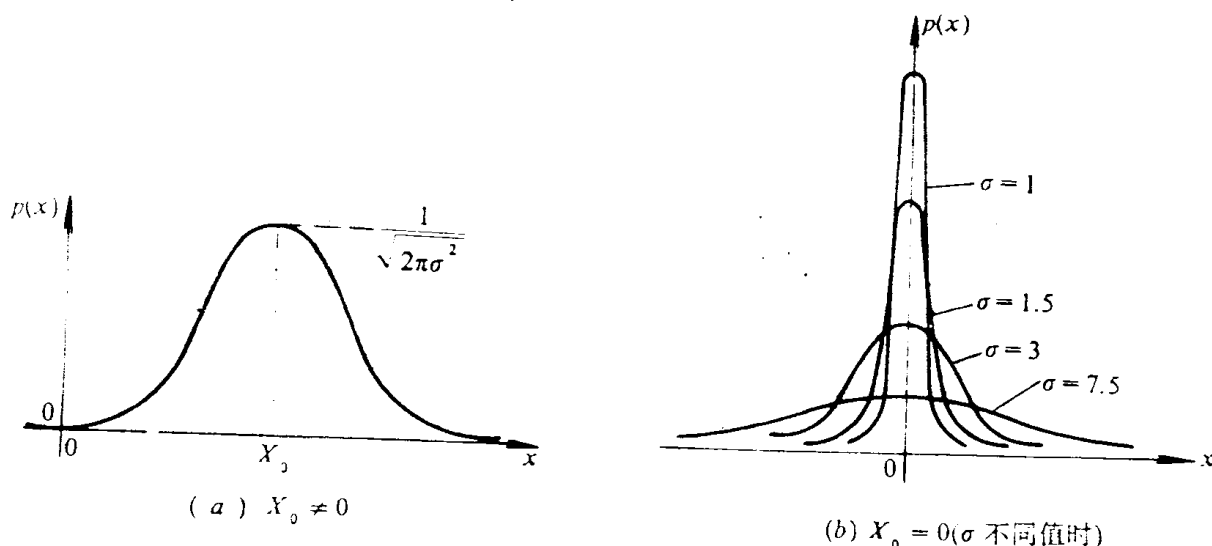


图 1-6 正态分布概率密度函数

$\Phi(x)$ 近似值。正态分布累积分布函数曲线如图 1-7 所示。

2. 对数正态分布 对数正态分布经常被用来描述对流层散射传播、移动通信中信号电平慢衰落的统计特性。对数正态分布即随机量 y 的对数服从正态分布。

令 $x = \ln y$ (或 $y = e^x$), $y \geq 0$ 。式中 x 是服从正态分布的随机量, 则 y 是服从对数正态分布的随机量。令 $\bar{x}$ 、 σ_x 表示正态分布的均值和标准偏差, $\bar{y}$ 与 σ_y 表示对数正态分布的均值及标准偏差。

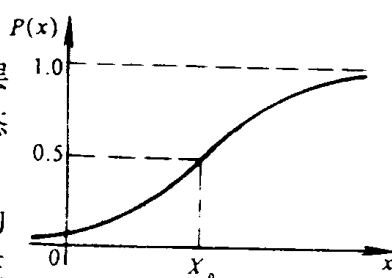


图 1-7 正态分布累积分布函数

已知正态分布的概率密度函数和累积分布函数分别是

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma_x^2\right]$$

$$P(x \leq X_1) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_1} \exp\left[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma_x^2\right] dx \quad (1-18)$$

因为有 $x = \ln y$, $dx = dy / y$, 代入上式中, 则得

$$p(y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(\ln y - \bar{x})^2 / 2\sigma_x^2\right] \quad (1-19a)$$

$$P(y \leq Y_1) = \int_0^{Y_1} p(y) dy = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_0^{Y_1} \frac{1}{y} \exp\left[-(\ln y - \bar{x})^2 / 2\sigma_x^2\right] dy \quad (1-19b)$$

根据均值与均方差的定义, 可以得到

$$\bar{y} = \int_0^{\infty} y p(y) dy = \int_{-\infty}^{\infty} e^x p(x) dx = \exp\left(\bar{x} + \frac{\sigma_x^2}{2}\right) \quad (1-20)$$

$$\sigma_y = \bar{y} \left[\exp(\sigma_x^2) - 1 \right]^{1/2} \quad (1-21)$$

通过计算可知, 随机量 y 的均值 $\bar{y}$ 与其中值 Y_m 是不等的, 它们的比值 $R = \bar{y} / Y_m = \exp(\sigma_x^2 / 2)$ 。特别要注意, 对数正态分布累积分布函数式中出现的均值及标准偏差, 均系指相应正态分布时的参数 $\bar{x}$ 与 σ_x 。

在工程技术中, 对于服从对数正态分布的随机量, 通常习惯于采用其对数形式按正态分布律表示, 即

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(\ln y - \alpha)^2 / 2\sigma^2] \quad (1-22)$$

式中 $x = \ln y$, α 为随机量 $\ln y$ 的均值, σ 为 $\ln y$ 的标准偏差。图 1-8 示出了中值为 0 dB, $\sigma = 8$ dB 时对数正态分布的概率密度函数及累积分布函数曲线, 后者为一直线, 其斜率由 σ 值所确定。

3. 瑞利分布 当不考虑慢衰落时, 随参信道中接收点电场振幅快衰落的统计分布往往服从瑞利分布。

若随机量 x 的概率密度函数具有如下表示式:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp[-x^2 / 2\sigma^2] \quad (x \geq 0) \quad (1-23)$$

则称该随机变量服从瑞利分布。式中 σ 是大于零的常量, $p(x)$ 曲线如图 1-9(a) 所示, 其最大值 $(1/\sigma\sqrt{e})$ 发生在 $x = \sigma$ 处。此外

$$\text{均值} \quad \bar{x} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \quad (1-24)$$

$$\text{均方值} \quad \overline{x^2} = 2\sigma^2 \quad (1-25)$$

累积分布函数 $P(x \leq X_1)$ 为

$$\begin{aligned} P(x \leq X_1) &= \int_0^{X_1} \frac{x}{\sigma^2} \exp(-x^2 / 2\sigma^2) dx \\ &= 1 - \exp\left(-X_1^2 / 2\sigma^2\right) \end{aligned} \quad (1-26)$$

令 $p = 0.5$, 代入上式中, 即

$$0.5 = \exp\left(-X_m^2 / 2\sigma^2\right)$$

$$\text{可求出中值} \quad X_m \approx 1.18\sigma \quad (1-27)$$

累积分布函数曲线如图 1-9(b) 所示。从图中可查出, 瑞利分布的衰落幅度约为 13.4 dB。

4. 莱斯(Rician)分布 在合成场的分布中, 若既有服从瑞利分布的快衰落成分 x_n , 又