

Cambridge Wireless Essentials Series
剑桥无线基础系列

CAMBRIDGE

无线电波传播基础

Essentials of Radio Wave Propagation

[英] 克里斯托弗·哈斯利特 著 黄斌科 陈娟 田春明 译

Christopher Haslett



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



郑州大学 *04010813396Z*

Cambridge Wireless Essentials Series
剑桥无线基础系列

Essentials of Radio Wave Propagation

无线电波传播基础

[英] 克里斯托弗·哈斯利特 著
CHRISTOPHER HASLETT

黄斌科 陈娟 田春明 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

TN011
H023

This is a Simplified Chinese translation of the following title published by Cambridge University Press, Essentials of Radio Wave Propagation ISBN 9780521875653
CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS 2008
This Simplified Chinese translation for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.
©Cambridge University Press and Xian Jiaotong University Press 2012
This Simplified Chinese translation is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this Simplified Chinese translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Xian Jiaotong University Press.

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2012-123

图书在版编目(CIP)数据

无线电波传播基础/(英)哈斯利特(Haslett, C.)著;
黄斌科,陈娟,田春明译.—西安:西安交通大学出版社,
2012.6

(剑桥无线基础系列)

书名原文:Essentials of Radio Wave Propagation

ISBN 978-7-5605-4384-0

I. ①无… II. ①哈… ②黄… ③陈… ④田…
III. ①电波传播 IV. ①TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108276 号

书 名	无线电波传播基础
著 者	(英)克里斯托弗·哈斯利特
译 者	黄斌科 陈娟 田春明
出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtupress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心) (029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82669097
印 刷	西安建科印务有限责任公司

开 本	700 mm×1000 mm	1/16	印张	12	字数	143 千字
版次	2012 年 7 月第 1 版		2012 年 7 月第 1 次印刷			
印 数	0001~3000 册					
书 号	ISBN 978-7-5605-4384-0/TN·136					
定 价	36.00 元					

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者序

近年来随着无线通信的快速发展,实际工作环境下的无线电波传播强度预估是该领域的关键问题。目前国内读者关于无线通信中电波传播问题的学习要么基于天线与电波传播课程,其中包含复杂的数学推导,也往往缺乏对工程实际问题的分析;要么基于无线通信课程,缺乏对无线电波传播受实际环境因素各种影响的物理机理解释。

Christopher Haslett 博士是英国通信工业管理部门Ofcom的首席传播理论顾问,主要负责与无线电波传播课题相关的研究工作。Christopher 博士有着多年无线系统规划的经验。他编著的本书 *Essentials of Radio Wave Propagation* 是剑桥无线基础系列读物之一,适合国内信息与通信工程、电磁场与微波技术及相关专业高年级本科生和研究生作为无线电波传播课程的教材或参考书,也可作为无线通信业界专注网络规划、频谱管理等技术的工程师使用。

在西安交通大学出版社的大力支持下,我们翻译本书并推荐给读者的理由如下:

1. 本书用较少的数学推导,重点在无线电波传播概念环境影响机理的解释上,并结合了对实际工程问题的分析,使读者系统全面地掌握各种情形下无线电波强度的预估,非常适合无线电波传播初学者学习和无线通信工程师作为手册使用。

2. 本书对无线电波传播问题的介绍非常注重层次性和系统性。前四章作为基础,研究了自由空间点到点和点到面的无线电波传播,障碍物对电波传播影响和实际环境对波的反射、散射和投射特性等问题。第5章在考虑各种电波传播机理条件下对无线电波传播电平进行预估。考虑到实际无线电波传播环境,第6章介绍了大气效应对电波传播的影响。作为应用,第7章介绍了点对点链路、广播链路、地空通信链路和室内系统四种链路的系统设计和干扰管理。第8章介绍了无线网络设计的应用软件,便于工程使用。
3. 本书非常注重实际工程案例的分析。结合无线电波传播的具体例子,把复杂的问题简单化和具体化,详尽清楚,便于学习和接受,并能应用到解决实际问题中去。

本书共分9章和4个附录。其中前言、第1章、第2章及附录由黄斌科博士翻译;第3章、第4章、第7章由陈娟博士翻译;第5章、第6章、第8章、第9章由田春明博士翻译。黄斌科博士对全书进行了统译和审校。本书在翻译过程中,得到了西安交通大学信息与通信工程系任品毅教授的支持和帮助,在此表示感谢。

由于译者水平有限,译文中有不妥之处,敬请广大读者不吝指正。最后感谢西安交通大学出版社对本书翻译工作的大力支持。

译者

2012-06-09

前 言

本书的目标是帮助读者预测特定无线发射机产生的接收信号功率。前面两章分别对点到点及点到面的自由空间传播展开介绍,同时对不同目的的天线特性进行了讨论。在第3章,讨论了建筑物和山脉等障碍物的影响,也提出了障碍物阴影区信号强度预测的解析方法。接下来的第4章研究了反射特性以及反射对接收信号的影响。第5章给出了在考虑所有传播机理时,如何对接收信号的电平进行预测。第6章介绍了大气结构及降雨等对无线电波的诸多影响效应。第7章给出利用已有的内容,如何设计点对点无线链路、广播系统、地空系统以及室内系统。在第8章,说明了利用软件工具规划各种无线网络的重要性。

致 谢

我相信对像无线电波传播这样主题的理解需要长达多年的积累,而不是像有些问题一样可短时间迅速掌握。这得益于经常和此领域中其他人的讨论和思考。在这样的讨论和思考中,我尤其要感谢 David Bacon, Les Barclay, Ken Craig, Martin Hall, Malcolm Hamer, Tim Hewitt, Mireille Levy, John Pahl, James Richardson, Richard Rudd, Mike Willis 和 Charles Wrench。

目 录

译者序

前言

致谢

第 1 章 自由空间波传播和口径天线	(1)
1.1 电磁波在自由空间的传播:简单解释	(1)
1.2 口径天线:简单解释	(2)
1.3 进一步说明和计算	(3)
1.4 点到点传输	(8)
1.4.1 发射,定向和捕获功率	(9)
1.4.2 实际天线间的传输损耗	(11)
1.4.3 确定要求功率	(12)
1.4.4 计算例子	(14)
1.4.5 等效全向辐射功率(EIRP)	(16)
1.5 近场效应:简单解释	(16)
1.5.1 近场问题的深入	(17)
1.6 极化	(21)
1.7 小结	(22)
第 2 章 点到面的传输	(23)
2.1 概述	(23)
2.2 功率密度和电场强度	(24)
2.3 场强转化为接收信号功率	(26)
2.4 预测一定距离处的场强	(27)
2.5 频率影响	(30)

2.6	数字移动通信的预测方法	(31)
2.6.1	Okumura-Hata 模型	(31)
2.6.2	900 MHz 和 1800 MHz 电波传播比较	(33)
2.7	基站天线	(34)
2.7.1	扇形天线	(39)
2.8	移动站天线	(42)
2.9	干扰和噪声本底	(42)
2.10	小结	(43)
第 3 章	障碍物的影响	(45)
3.1	刃峰绕射	(45)
3.1.1	惠更斯原理和考纽螺线	(47)
3.2	余隙要求	(54)
3.3	假设和近似概述	(54)
3.4	口径绕射	(55)
3.5	有限大平面的反射	(56)
3.6	天线辐射方向图	(59)
3.6.1	口径天线的辐射图	(59)
3.7	多峰绕射	(61)
3.7.1	各种方法的比较	(62)
3.8	实际障碍物的绕射	(67)
3.9	GTD/UTD	(68)
3.10	余隙要求和菲涅耳区	(68)
3.11	小结	(70)
第 4 章	反射、散射和透射	(71)
4.1	引言	(71)
4.2	驻波图	(73)
4.3	反射系数的确定	(76)
4.4	波在平面上的传播	(78)
4.5	波在水面上的传播	(80)
4.6	瑞利和莱斯多经环境	(82)

4.7	粗糙面的反射	(85)
4.8	波的透射	(89)
4.9	小结	(91)
第 5 章	复杂环境下接收信号强度估计	(93)
5.1	多种影响贡献的综合	(93)
第 6 章	大气效应	(99)
6.1	大气中的多径传播	(99)
6.2	大气波导效应	(100)
6.3	k 因子和标准大气	(101)
6.4	非规则传播和多径衰落	(102)
6.5	分集技术	(106)
6.5.1	空间分集	(108)
6.5.2	频率分集	(109)
6.5.3	角度分集	(110)
6.5.4	极化分集	(110)
6.5.5	固定链路分集技术小结	(110)
6.5.6	分集技术在移动通信中的应用	(111)
6.6	绕射衰落	(111)
6.7	长距离、高容量微波链路中的选择性衰落	(113)
6.8	点到面系统中的波导效应和干扰	(115)
6.9	雨衰	(118)
6.10	大气吸收	(121)
6.11	大气效应和地空链路	(122)
6.12	噪声和温度效应	(124)
6.12.1	地空系统中的噪声计算	(125)
6.13	小结	(127)
第 7 章	系统设计和干扰管理	(129)
7.1	特定服务下最佳频带的确定	(129)
7.2	系统设计	(130)

7.2.1 陆地点对点系统设计	(131)
7.2.2 广播系统	(139)
7.2.3 地空系统	(142)
7.2.4 室内系统	(144)
7.3 小结	(145)
第8章 软件工具	(147)
8.1 固定链路网络的管理软件	(147)
8.2 公共移动网络的规划工具	(148)
8.3 不确定性减小	(150)
8.3.1 统计方法	(151)
8.4 小结	(155)
第9章 总结	(156)
附录1 分贝单位	(159)
附录2 相量计算和相量图	(161)
附录3 公式表	(164)
附录4 链路预算说明	(167)
深入阅读资料	(168)
参考文献	(169)
国际电信联盟(ITU)无线通信管理局标准	(170)
作者简介	(171)
索引	(172)

第 1 章 自由空间波传播和口径天线

本章介绍无线电波传播的基本概念。为了便于理解,以口径^{1①}天线为例来展开说明。在介绍天线的过程中,引出了一些工程师常用的方程。虽然这一章是介绍性的,却引出了一些实际的例子。所采取的介绍方法是在前两个小节以一种简单的方式介绍基本内容和一些很重要的公式,然后提出很多的细节。在此之后,重点是研究预测点对点链接的接收信号功率,并给出一些重要信息如路径长度、频率、天线大小和发射功率等。

1.1 电磁波在自由空间的传播:简单解释

无线电波在自由空间中以光速传播(约为 3.0×10^8 m/s)。从字面上讲,“自由空间”指的是真空,事实上,均匀的大气可以近似地看作真空。我们感兴趣的是功率如何从一个天线传输到另一个天线。由于天线种类繁多,为简便起见,有必要定义一种参考天线,来和其它天线作比较。通常用来作为参考的一种天线是各向同性天线,它的辐射功率在各个方向是相等的。用线性单位确定接收功率与发射功率的比值是可行的,但更常见的表示单位为分贝(dB)。关于分贝单位的进一步资料在本书后面的附录中给出。若以各向同性天线作为发射和接收天线,则以分贝(dB)为单位的路径损耗为

$$\text{损耗} = 32.4 + 20\log d + 20\log f \quad (1.1)$$

其中 d 为路径长度,单位为 km, f 为频率,单位为 MHz。介于自²

^①此数字为原书页码,书末索引条目中的页码指向此处。

由空间上两个各向同性参考天线之间的损耗被称为“自由空间损耗”或者“基本传输损耗”。在任意点对点系统中发射功率与接收功率之间的差别(“链路损耗”)是自由空间损耗,它小于任意天线增益与杂散损耗之和。为保持一致,任何天线增益必须以各向同性天线为参考。同样,用分贝来表示的话,增益的单位为“dBi”,其中“i”表明我们利用各向同性作为参考天线:

$$\text{链路损耗} = 32.4 + 20\log d + 20\log f - G_t - G_r + L_m \quad (1.2)$$

其中 G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线增益,单位为 dBi, L_m 表示系统中的任意杂散损耗(如馈电或连接损耗),单位为 dB。

1.2 口径天线:简单解释

天线的作用是连接波导(如同轴电缆)和自由空间电磁波。天线的性能不管作为发射器或者接收器是相同的,也可以同时实现收发性能。结构最简单的天线是口径天线。抛物面圆盘口径天线常用于微波通信或卫星地球站。口径天线的增益随天线尺寸和天线频率的增大而增大。一个圆形抛物面天线的增益可近似如下:

$$\text{增益(dBi)} \approx 18 + 20\log D + 20\log f, \quad (1.3)$$

其中 D 为圆盘直径,单位为 m, f 是工作频率,单位为 GHz。由此可见当天线直径或工作频率增大一倍时,增益将增加 6 dB。口径天线必须有精确的指向,因为它们通常有很窄的波束宽度。波束宽度一般用度数来衡量,一个有用的近似表达式是:

$$\text{波束宽度} \approx \frac{22^\circ}{Df} \quad (1.4)$$

其中 D 为口径直径,单位为 m, f 为工作频率,单位为 GHz。因此当口径直径增大时,波束宽度变小,类似的,频率增加,波束宽度变小。

天线是一种互易器件,作为发射和接收时性能等价。高性能

的发射天线可以将所有来自源的功率辐射到周围空间。而对低性能天线来说,来自源的大部分能量可能会以热能耗散掉,或者沿馈源传输线反射回发射机。天线沿馈源将大部分能量反射回去的情形,称之为“失配”。

1.3 进一步说明和计算

假定发射天线是理想的(即来自馈源的功率全部辐射出去),这样可以简化计算。利用线性单位理论,馈源馈入天线的功率为 P_t , 单位为 W。该功率在空间产生功率密度 P_d , 单位为 W/m^2 。在无线电波传播研究中一个非常有用的概念是众所周知的“各向同性天线”。这种(虚拟)天线在所有方向上的辐射功率是相等的,可以直接预测它在某一距离的功率密度。为了阐述这一点,我们借助一个“想象实验”。假定一个各向同性天线位于球的中心,由于天线在所有方向上辐射是相同的,那么球面各处辐射功率也相等。另外,由于天线被球所包围,天线辐射的所有功率必须通过这个球。综合这两方面,且已知半径为 r m 的球的表面积为 $4\pi r^2 \text{ m}^2$, 因此有下面方程:

$$P_d = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (1.5)$$

该方程揭示了无线电波传播中一个有用的规律:“平方反比”定律,即天线在空间的功率密度随距离的平方减小。该定律在自由空间是正确的,而科学家们更关心实际环境和这个理想情况的偏离。

下面我们看下天线作为接收器的情况。前面讲到,天线可以同时具有收发性能。因此,实际中也经常用到天线的这种特性。当用作接收时,天线将自由空间传播的电磁波转换为沿馈线传播的电磁波。考虑具有特定功率密度 P_d 的无线电波在自由空间传播。现在考虑有一口径能够把进入它的功率传递到馈线电缆。进入口径的功率(接收功率 P_r)依赖于口径大小,用 A_e 表示,单位为 m^2 (对接收天线角标 e 代表“等效”),那么有下面的关系:

$$P_r = P_d A_e \quad (1.6)$$

由 P_d 与 P_t 的关系,我们有:

$$P_r = \frac{P_t A_e}{4\pi r^2} \quad (1.7)$$

上面方程给出了当各向同性天线发射功率为 P_t 时,等效口径为 $A_e \text{ m}^2$ 的接收天线在距离 $r \text{ m}$ 处的接收功率 P_r 。

我们需要又一次将我们的注意力转向发射天线,到目前为止,我们考虑的天线发射功率在各个方向上是相等的(各向同性的)。实际天线并非如此,事实上天线具有方向性,导致具有天线增益这一现象。

当提到一个器件拥有“增益”时,大多数工程师认为相对其吸收功率,该器件输出更多的信号功率。而天线作为无源器件,不可能实现这一点。对天线来说,它能输出的最大功率是将从馈源接收的功率全部辐射出去。我们讨论一个天线的增益时,实际上指方向性,即将功率集中到某一特定的方向。因此,若将天线封闭在一个球内,天线位于球中心,那么球面上所有点的功率密度并不相等。我们将球面上功率密度最大的方向称为天线的“主瓣方向”。功率密度 P_d 通常由下式给出:

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \quad (1.8)$$

其中 G_t 是发射天线在任意方向的增益,而我们关注的最大增益是指主瓣方向上的增益。利用我们修正的功率密度方程,可以对接收功率密度方程进行修正:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{er}}{4\pi r^2} \quad (1.9)$$

其中 A_{er} 为接收天线的有效口径。

注意同一天线可以发射和接收,这样同一天线作为发射天线时具有发射增益,作为接收天线时具有接收有效口径,发射增益和接收等效口径具有联系,我们接下来进行研究。

在接下来构思的实验中,我们将天线假定为常用于微波通信或卫星地球站的抛物面天线。这类“口径天线”的“有效口径”容

易描述,反射圆盘本身是口径。值得注意的是线天线(如地面电视接收和移动设备上的)也具有有效口径,即使从视觉上看线天线的口径不明显。当一个口径天线用于发射,功率从位于焦点的馈源辐射到抛物反射面,再经反射面反射回空间。众所周知,口径天线产生的是窄波束。口径天线的“波束宽度”受下面两个规则影响:抛物面圆盘越大,波束越窄;频率越高,波束越窄。正是这种聚焦能力,或者瞄准(瞄准指能量传播时没有能量扩散,“形成柱状”),能量进入一个窄的波束,使得天线具有增益。

考虑一个理想口径天线,其辐射能量在一个良好的 θ 弧度的锥形波束。若 θ 小,直径为 $r\theta$ 的圆在距离 r 处均匀照射,圆的面积为 $\pi r^2 \theta^2 / 4$ (如图 1.1)。一个各向同性天线将照射一个球的面积为 $4\pi r^2$,口径天线照射一个更小的面积,相同的功率将聚焦到一个更小的面积。照射面积的减小等价于功率密度的增大。正是功率密度的增加我们称之为天线增益。这样天线的增益是和波束宽度有关的:

$$\begin{aligned}\text{增益} &= \frac{4\pi r^2}{\pi r^2 \theta^2 / 4} \\ &= 16/\theta^2\end{aligned}\quad (1.10)$$

记住波束宽度被理想化为一个良好的锥形,对实际天线是不准确的。然而,这并不是一个差的近似。因此,若告诉我们天线的波束宽度,就可以估计其增益,经常见到的是以度为单位的天线波束宽度。

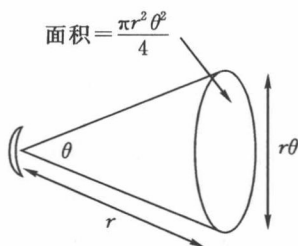


图 1.1 具有良好锥形波束的口径天线所照射的面积

6 第1章 自由空间波传播和口径天线

例:已知天线的波束宽度为 3° , 估计其增益。

解:

$$3^\circ = 3 \times \pi \div 180 = 0.052 \text{ rad}$$

$$\text{增益} = 16/0.052^2 = 5800$$

7 通常用对数单位(dB)来衡量增益:

$$\text{增益(dBi)} = 10\log_{10}(5800) = 37.7 \text{ dBi}$$

附加的后缀“i”指计算的是以各向同性天线为参考的增益。

这样我们估计波束宽度为 3° 的天线增益为 37.7 dBi, 然而, 一个更重要的问题是“这个天线需要多大?”。为了回答此问题, 我们需接受一个关于各向同性天线的关键事实。我们需要知道一个各向同性天线的有效口径。在整本书中, 方程的推导尽可能的简单。各向同性天线有效口径的推导, 虽然重要, 但超出了本书的范围, 这里我们采用别人的证明。各向同性天线的有效口径 A_{ei} , 依赖于波长 λ , 其公式如下:

$$A_{ei} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (1.11)$$

这实质上是一个周长为 λ 的圆的面积。

和波长相比, 更多的是讨论工作频率。以 m 为单位的波长可以转化为以 MHz 为单位的频率 f , 其公式如下:

$$\lambda = \frac{300}{f(\text{MHz})} \text{ m} \quad (1.12)$$

这样, 我们对有效口径以 m^2 为单位, 各向同性天线的有效口径如下:

$$A_{ei} = \frac{300^2}{4\pi f^2} = \frac{7160}{f^2} \text{ m}^2 \quad (1.13)$$

一个天线的增益在数值上等于其有效口径, 该有效口径是感兴趣频率上对应各向同性天线有效口径的倍数。因此, 在某个特定频率上知道各向同性天线的有效口径, 对确定一个天线的增益是至关重要的。

8 辐射方向图, 方向性和增益对天线作为发射和接收是严格相