

信息科学与工程系列专著

对流层散射通信工程

Tropospheric Scatter Communication Engineering

李志勇 秦建存 梁进波 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

信息科学与工程系列专著

对流层散射通信工程

李志勇 秦建存 梁进波 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书包括 3 部分内容。第一部分介绍对流层散射通信的基本原理、信道模拟方法、传输损耗计算与站型设计流程、分集合并的理论和应用；第二部分介绍散射通信的高速、低速两类波形的变换方法；最后一部分按时间顺序介绍国内外散射通信应用的变革历史，给出典型频段、典型站型的一些设计实例。

本书以多条散射通信线路设计和实施经验为基础，结合国外主流厂商和科研机构的设计资料编写而成，内容联系实践紧密，算法和设计公式针对性鲜明，适合对流层散射通信、地面微波通信技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业研究生的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

对流层散射通信工程 / 李志勇, 秦建存, 梁进波著. —北京: 电子工业出版社, 2017.6
ISBN 978-7-121-31491-9

I. ①对… II. ①李… ②秦… ③梁… III. ①对流层散射通信—通信工程 IV. ①TN929.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 098746 号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 竺南直

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15 字数: 384 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版

印 次: 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: davidzhu@phei.com.cn。

序

无线通信信号,在传输过程中被对流层大气作用,使得其中一小部分能量弯折传输到超视距的前方,实现散射通信。因此对流层散射通信因对流层的存在而存在,是本星球独特的通信方式。到达信宿的散射通信信号,经历巨大的路径传输损耗,由于散射体的无源“再加工”处理,具有每秒数十次的快速波动性,高达近 20 dB 变化范围的振幅波动性,高达数微秒的多射线时延展宽特性。因此对流层散射通信站,较之微波视距通信站,需要配备大功率的发射机(常用两部),高增益天线,形成多重分集接收。

散射通信问世于 20 世纪中期,迄今已逾六十年。初期因为卫星通信尚未应用,长距离的多跳段的干线通信由散射独撑。卫星通信崛起之后,散射通信由其取代,地位显著下降。直到 20 世纪下半叶,美军的三军联合战术通信系统 TRI-TAC 问世,标志着散射通信应用的第一次跃升:用于战区师级以上指挥所间的多路话音和数据通信,传输信息速率高达 2 Mb/s,大大缓解或避开了卫星通信由资源紧张、通信时延大以及“三抗”能力差的弱势而带来的战区应用困境。此间具有代表性的散射通信站,是美国雷声公司的 AN/TRC-170 系列(VII 及 VIII),至 20 世纪 90 年代已生产数百套之多。

从 20 世纪末到现在,对流层散射通信再次跃升,主要特征是:散射通信设备不断轻量化和小型化,出现了各种形式的包装箱站,甚至出现了便携式散射通信台;传递的业务由群路话音扩展到 ISR 信息、图像以及 IP 数据;在使用频段上,增加了 Ku (14~16 GHz) 和 X (7~9 GHz,现在国际市场上仅中国提供)两段;商品化的散射通信设备传输速率达到 50Mb/s; C 和 Ku 频段都推出了单天线双波束的角分集站型;设备的工作参数灵活可变,适应性广;广泛采用高效的信道纠错方式,有多种码率可供选用;并且,卫星通信和散射通信两种方式“一站双模”问世。

中国的对流层散射通信发展历程与国际上大同小异。20 世纪 60 年代初已推出低频段的模拟调制的散射通信设备,70 年代中期开始高频段的数字信息传输的固定散射通信站的研究。80 年代中期,建成 S 频段、大功率(10 kW)、大天线(20 m 广告牌式)、大跨越(500 km)、中速率(500 kb/s)的链路。90 年代完成双天线和载车一体化的移动 C 频段站型的研发,供国内及国外十几个国家的用户使用。近期,向国外批量供货的散射通信站频段更加丰富。

本书的著者均是以对流层散射通信系统的研发和应用为主要工作的专家。中国散射通信近 20 年来,他们亲力亲为主持和参与了技术创新、设备与系统研发、国外市场的开发。其中所获得的宝贵经验融入本书中,使之具有较为突出的实用性,使本书对散射通信设备和系统研发人员以及使用人员具有较高的参考价值。散射通信的重新跃升,给其自身和无线通信均带来了新的发展方向,可望本著作与此势相应和。

李文辉

2017 年 3 月于石家庄

前 言

本书的写成首先归功于著者所属的对流层散射通信研究集体。应当看到, 对流层散射通信系统的结构十分复杂, 它所涉及的专业面是如此广泛, 所需要的科研和建设经费投入是如此巨大, 以致在 20 世纪的六七十年代, 我国的散射通信线路建设都未能大范围铺开。然而值得庆幸和振奋的是, 经过几代从事散射通信的科研人员的努力, 这个目前仍然相对冷僻的专业方向被坚持下来并结出丰硕果实。在半个世纪的漫长岁月中, 对流层散射通信的基础理论逐步丰富、日渐成熟, 很多典型的技术手段至今仍然闪耀着当年首创者的智慧光芒。但是, 也有大量与之相关的电路模型、电子器件和测试方法随着科技进步而退出舞台, 这一情况难免使得初涉读者感到困惑。为此, 著者从本科研发团队多年的工程设计实践之中取材, 去粗取精编修成册, 望能初步展示这个复杂专业之概貌。

对流层散射通信的过程本质是一种在信道中进行能量传输的过程, 若要高效、可靠, 必须首先有的放矢地研究信道的特点。散射信道既是无间存在的, 也是随时可供用户免费使用的。它的可用无线频谱范围非常宽, 从炎热的赤道到寒冷的北极圈, 都有这种无线线路建设运行的实例。但是, 散射通信信号又是衰耗巨大、衰落迅速的, 因此若要发现它、研究它、利用它, 必须长期观察, 付出经年的努力才能掌握。本书的第一部分围绕该问题展开, 即散射信号的短时衰落特性, 距离衰减特性, 季节、年传输损耗的变化和预报 (预测)。

在散射信道上实现超视距通信, 既需要能力强大的硬件作为基础, 也需要设计精巧的波形技术。散射通信所需要的大口径天线、上千瓦甚至数千瓦的发射机即是其物理基础, 它是一个国家电子工业实力是否强大、体系是否完备的写照; 而波形设计技术则反映了国家科技创新软实力的水平。本书的第二部分介绍散射通信站型设计的相关知识。作为一种特殊的超视距微波通信手段, 无论是固定站, 还是机动站的工程设计问题都涉及诸多因素, 这些因素的内在关联不是简单的硬件决定波形或波形限制硬件, 而是二者互为依赖的关系, 只有根据用户的需求权衡利弊才能发挥最佳的系统能力。

从 20 世纪 50 年代美国 AT&T 公司成功建成第一条对流层散射固定通信链路开始, 散射通信经历了模拟体制向数字体制, L 频段向更高的 S、C 再到 Ku 频段, 低服务质量的话音通信向高质量数据通信的转变。在该过程中, 美国、欧洲各国和前苏联 (俄罗斯) 都推出了不少经典站型设计, 它们或者结构形式作出革新, 或者波形先进, 或者器件水平超前 (在同一时期), 抑或应用定位独特, 从而长期为人称道。本书最后简单介绍国外散射通信应用发展的历史沿革, 任香凝高工查阅了大量文献, 并对这一部分内容进行了整理, 在此特别表示感谢。无论从事散射通信的技术人员还是相关的用户, 这些宝贵的资料都非常值得借鉴。

衷心感谢李文铎研究员，他筹划了本书的框架结构，认真审阅了书稿，对本书的写作提出了很多非常中肯的意见。

如前所述，散射通信涉及多个学科，它不但发展迅速而且应用范围和应用模式也在不断拓展，但作者的知识面有限，不少内容只能奉行拿来主义而无力继续深入，故此敬请不同领域的读者见谅。此外，书中肯定有不少不妥、不足之处，甚至还有错误，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 对流层散射通信的特点	2
1.3 对流层散射通信的应用	4
1.4 本书内容概要	4
第 2 章 对流层散射通信的原理与特点	6
2.1 概述	6
2.2 散射通信的电波传播基本原理	7
2.2.1 散射理论	7
2.2.2 反射理论	8
2.2.3 多模理论	8
2.3 从通信角度对散射信号分类	9
2.4 散射通信的信号衰落特征	11
2.4.1 快衰落	11
2.4.2 快衰落的时间、空间和频率选择性	14
2.4.3 慢衰落	16
2.5 对流层散射信道与移动通信信道的对比	18
2.6 变参信道的一些基本概念	20
2.7 散射通信的信道模拟仿真技术	22
2.7.1 频率选择性慢衰落信道的抽头延迟线模型	22
2.7.2 散射信道模拟器的原理	24
2.8 信道模型的建议	26
参考文献	28
第 3 章 对流层散射通信系统的性能计算	29
3.1 图上作业简述	29
3.1.1 地形有关参数计算	29
3.1.2 图上作业实例	31
3.2 L. P. Yeh 公式	33
3.3 NBS-TN-101 方法简介	34
3.3.1 地形有关参数的修正	35
3.3.2 衰减函数 $F(\theta d)$	35

3.3.3	频率增益函数 H_0	36
3.3.4	散射效率因子 F_0	37
3.3.5	其他修正	37
3.3.6	传播可靠度预报	38
3.4	CCIR 方法简介	39
3.4.1	散射损耗年中值计算	39
3.4.2	传播可靠度预报	40
3.5	54 所的简便计算方法	40
3.5.1	简便算法的必要性	40
3.5.2	链路长期中值传输损耗简便公式	41
3.5.3	链路门限参数的简便计算公式	43
3.5.4	传播可靠度的简便计算公式	45
3.6	典型工程应用示例	47
3.6.1	计算传播可靠度	47
3.6.2	计算最大通信距离	48
	参考文献	49
第 4 章	对流层散射通信的站型设计	50
4.1	工作模式	50
4.1.1	视距工作模式	52
4.1.2	光滑球面绕射模式	55
4.1.3	刃峰绕射模式	57
4.1.4	对流层散射模式	63
4.2	信号分集	64
4.2.1	分集的基本概念	64
4.2.2	空间分集	65
4.2.3	频率分集	67
4.2.4	角分集	69
4.2.5	时分集	71
4.3	合并方法与性能	74
4.3.1	计算模型	74
4.3.2	最大比值合并	74
4.3.3	选择式合并	78
4.3.4	等增益合并	79
4.4	站型工程设计概述	79
4.4.1	固定站与机动站的区别	79
4.4.2	设计开始阶段	80
4.4.3	确定路由方案	81

4.4.4	站址勘测	82
4.4.5	链路设计	83
	参考文献	86
第 5 章	对流层散射通信的低速率波形	88
5.1	散射通信站的系统组成	88
5.1.1	收/发信设备	88
5.1.2	高功率放大器	90
5.1.3	调制解调器	92
5.1.4	复/分接设备	94
5.1.5	其他无源/有源微波设备	95
5.2	散射通信波形的设计要求	96
5.3	DAR	98
5.3.1	二进制信号的最佳接收	99
5.3.2	逆调制	101
5.3.3	梳齿滤波器和周期信号的去噪滤波	102
5.3.4	DAR 原理	104
5.3.5	DAR 的特点	107
5.4	线性调频波形	108
5.4.1	散射信道的分离多径技术	108
5.4.2	Chirp 信号	109
5.4.3	Chirp 信号的匹配滤波	110
5.4.4	散射通信线性调频波形原理	113
5.4.5	线性调频波形的特点	115
5.5	其他特殊低速波形	116
5.5.1	BPSK/QPSK 信号的差分解调	117
5.5.2	多进制 FSK	119
5.5.3	二进制直接序列扩频	121
5.5.4	多进制直接序列扩频	124
	参考文献	125
第 6 章	对流层散射通信的中高速率波形	127
6.1	时域自适应均衡概述	127
6.1.1	问题提出	127
6.1.2	数字维纳滤波器	129
6.1.3	时域自适应均衡示例	131
6.2	最小均方均衡器	135
6.2.1	LMS 算法	135
6.2.2	LMS 算法的特性及应用实例	137

6.3	散射通信的飞行器衰落效应	141
6.4	最小二乘均衡器	144
6.4.1	LS 算法	144
6.4.2	RLS 均衡器及应用实例	148
6.5	移动通信波形在散射通信中的应用	153
6.5.1	多载波传输和 OFDM	153
6.5.2	单载波频域均衡	156
6.5.3	空时编码	157
	参考文献	158
第 7 章	对流层散射信道的纠错编码	160
7.1	散射通信纠错编码应用概况	160
7.1.1	国外散射信道纠错技术发展简史	160
7.1.2	具备 FEC 功能的典型散射通信 modem	162
7.2	慢变瑞利多径信道的纠错理论性能	166
7.2.1	纠错理论性能的计算	166
7.2.2	2 个码型计算实例	168
7.3	LDPC 在散射通信中的应用	170
7.3.1	LDPC 简介	170
7.3.2	LDPC 的译码算法	174
7.3.3	译码器的硬件实现	177
7.3.4	LDPC 的编码	179
7.3.5	散射通信应用 LDPC 注意事项	180
7.4	其他高效纠错编码在散射通信中的应用	181
	参考文献	183
第 8 章	对流层散射通信的工程应用	185
8.1	冷战时期的广泛部署	185
8.1.1	白爱丽丝通信系统 (WACS) [2]	185
8.1.2	北美三条防空预警线的雷达站点间互连通信系统	187
8.1.3	ACE high 通信系统——北约主要的国际通信网 [7]	188
8.1.4	前苏联战略指挥及预警通信系统 [9]	188
8.1.5	冷战时期部署的散射通信系统的特点	189
8.2	20 世纪八九十年代的跃升和实战检验	190
8.2.1	军以上战术级地域公网的远程骨干传输手段	191
8.2.2	军以上战略/战役级指挥通信网的远程骨干传输手段	195
8.2.3	20 世纪八九十年代的散射通信系统的特点	197
8.3	20 世纪末散射通信的缓慢发展	197
8.3.1	防空炮兵和导弹发射阵地之间的互联	198

8.3.2	民用散射通信快速发展	199
8.3.3	轻型的应急通信手段	202
8.3.4	20 世纪末期散射通信系统的特点	203
8.4	21 世纪的实战应用及重新跃升	203
8.4.1	高层指挥所/可部署指挥部战区内连接的主用手段	204
8.4.2	营级及以下机动部队的快速暂停式通信设备	207
8.4.3	当前的散射通信系统的特点	214
8.5	散射通信技术的发展展望	215
	参考文献	216
附录 A	CCIR 方法	218
A.1	确定链路无线电气候区	218
A.2	传输损耗年中值 $L_n(0.5)$	218
A.3	时间百分比为 $q(q \geq 50\%)$ 的平均年中值传输损耗 $L_n(q)$	219
A.4	时间百分比为 $q(q < 50\%)$ 的平均年中值传输损耗 $L_n(q)$	220
A.5	时间百分比大于 50% 的最坏月平均中值传输损耗	220
附录 B	柯林斯方法计算天线介质耦合损耗	222
附录 C	有限域代数基础知识	223
C.1	$GF(2)$ 与 $GF(2^m)$	223
C.2	m 序列	226
C.3	$GF(2)$ 上的线性空间	227

第1章 绪 论

1.1 概 述

从远古时代的鸿雁传书、狼烟烽火到当今社会移动电话与计算机普及到家庭和个人，人类总是在探索中不断追求更加快捷、更加自由的信息交流方式。1873年，英国物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell）在其科学名著《论电与磁》中系统、全面地阐述了电磁场理论，它标志着人类从此开始迈进无线通信的新时代。19世纪末，意大利的马可尼（G. Marconi）、美国（塞尔维亚裔）的特斯拉（N. Tesla）、俄罗斯的波波夫（A. Popov）分别独立地成功开展了无线电通信试验。在此之后，商用无线通信链路越来越多，通信距离越来越远。20世纪30年代，磁控管和速调管放大器被发明，无线发射机的功率越来越大，一些能够实用的雷达站相继建立。

第二次世界大战（二战）之前，人们已经发现了多种超出视距的无线电波传播现象，为人熟知的如中长波地波绕射、短波电离层反射/散射等。但是当时还有一种超视距无线信号被观察到，它的强度虽然很弱，但是全天都能接收到，其频率覆盖了超短波和微波频段。众所周知，在几百 MHz 直至几个 GHz 的频段，电波不可能被电离层反射（或散射）回到地面，而在如此高的频段地波绕射的距离也十分有限。显然，这是一种新的电波传播方式，由于它全年都存在，因而将其简单解释为由大气波导这种偶然的气候现象所造成也不成立。

从20世纪30年代末期到“二”战有很多雷达站相继投入使用，由于雷达具有大功率发射机和高增益天线，使得该信号被更加频繁地观察到。经过分析后研究人员认为，它的出现是由大气层中传播媒介的不均匀性而对电波产生了散射作用之故，其中的前向散射波可以被远端处于地平线之下的天线接收，故而后来此现象被称为无线电波对流层散射。

与电离层散射相比，对流层散射的信道相关带宽非常宽，该信道可靠存在，所以人们很快意识到这将是一种可资利用的远距离通信方式，它在军事上可能有着非常巨大的应用价值。20世纪50年代初，研究人员总结了大量传播试验数据，有关散射传播理论的文献不断发表；1955年，第一条散射通信链路建成；50年代末，美国（和北约）的多跳段大型散射中继通信系统——白爱丽丝（White Alice Communications System）建成并投入运行。此后整个五六十年代，北约和华约组织国家先后建设了几万千米的战略指挥及远程预警散射链路。

散射信号的路径传输损耗非常巨大，所以必须使用大口面天线和高功率发射机才能保证通信的可靠性。早期的站型设计受技术水平制约所采用的频段比较低，常用几十米的广告牌天线、数十千瓦的速调管发射机。到20世纪80年代卫星通信技术发展起来以后，除了高纬度同步轨道卫星覆盖不佳的地区，原来1 GHz以下的散射通信站陆续被关闭停用。

早期的散射通信线路多采用模拟 FM 体制，从20世纪70年代，数字对流层散射通信

得到了非常迅速的发展,原来固定使用的大型站逐渐被可搬移、可车载、可空运的移动站取代,现在的散射通信设备与小口径卫星地面站多有相似。从技术角度看,当前的站型特点为:

- 频段上,从 2GHz、5GHz 到 15GHz 均有成熟的产品供应;
- 很少使用几十米的固定天线,天线口径常为 1~3m,多数可折叠、易收藏,能够自动对准另一端站,某些站型还能快速更换馈源从而切换工作频段;
- 发射功率为几百瓦~2kW,除固定站偶有使用更大功率的发射机外,小功率固态功放更被青睐,但即使是 2~3kW 的速调管发射机,其外观和重量也不比普通的家用分体式空调室外机大;
- 现代数字信号处理技术被广泛采用,如信道均衡、多天线空时编码、前向纠错等都被引入;
- 通信速率可以达到几十 Mb/s,支持高质量的数据通信,话音、图像和流行的 IP 数据等业务类型皆可承载。

20 世纪 90 年代,前苏联解体后曾有一段时间国际形势相对缓和,而同期卫星通信的快速发展也使得很多军事投资偏重于它;此间散射通信的地位和作用也一度受到质疑。但是后来的几次局部战争(地区冲突)表明,技术进步已使得散射通信完全能够胜任各种战术通信的角色,特别是它的超视距宽带联通能力是解决卫星转发器带宽不足之问题的利器。因此,美军开始大量升级 80 年代订购的第一代数字散射通信装备,一些原来停滞不前的厂商(如美国雷声公司)又重返散射通信市场,多种型号的新装备再次不断面世。

下面首先简述散射通信的优缺点,而后再分析其主要的应用领域。

1.2 对流层散射通信的特点

对流层散射通信的优点有下述几条。

(1) 单跳跨距远

它是对流层散射通信最显著的特点之一,在温带单跳距离可超过 600 km,而对流层较厚的热带气候区最远可达 800 千米以上;它具有明显的越障能力,能够跨越城市建筑群、山峰丘陵、海岛、沙漠、湖泊、海湾、沼泽等地理屏障。

(2) 可用的无线频段宽

卫星通信出现之前,被广泛利用的几种超视距通信手段如中长波通信、短波电离层反/散射通信以及流星余迹通信等都有一个严重的问题,即只能在某一特定的低频段才可用,一旦用户过多或本地电磁环境被“污染”(或干扰)便无任何切换频段的可能。对流层散射通信是宽谱通信手段,所谓“宽谱”,一是信道宽谱存在,二是设备宽谱实用。就目前的技术水平而言,从上百兆赫兹到 Ka 波段散射通信都完全有可能加以利用;实用装备也已经覆盖了 5~15 GHz 频段。如果不是频谱过于拥挤,原来使用的几百兆赫兹~C 频段以下频谱仍是散射通信优选频段,这一点对于目前绝大部分无线通信方式都是不太可能的。

(3) 通信容量大

作为中远距离无线通信方式,散射通信的容量要比短波、超短波通信大得多。这主要

是由于散射信道的相关带宽很宽,在 C 频段 200 km 的距离上相关带宽可达几兆赫兹,因此允许很高的传信率;如果相关带宽很窄(比如短波通信),则要采用非常复杂的信道均衡措施才能消除严重的码间干扰。最近 10 年间,散射通信的速率已经达到 20Mb/s 以上,目前国际上最先进的 modem 已能支持 100Mb/s 的传信率。

(4) 信道随处可得,无需付费

不但散射通信的可用无线频谱非常宽,而且这种信道还是随手可得的,从炎热的赤道到寒冷的北极圈,都有散射通信线路建设运行的先例。它不像卫星信道需要付费,更为重要的是,其频谱在 2 跳之后又可以再次利用,不会像卫星通信那样一个星位覆盖下数百千米范围内频率不能重用(即一个或一组用户占用的频谱其他用户不能重用),所以散射通信提供的“大量免费”的信道是非常适合密集用户组网应用的。

(5) 长期使用费用较低

散射通信一次性投资和维护费用低于微波视距中继,在不允许建立中继站的军用场合,它的重要性更加突出。与卫星通信相比,散射链路建设与运维费用比长期租赁转发器也要便宜,比如,目前仍有很多海岛、石油钻井平台与大陆之间建有散射线路,当带宽在达到几 Mb/s 以上时,其较低的费效比优势十分明显。

(6) 传播信道可靠存在

对流层传播信道不是突发的特殊自然现象,它支持一年 365 天、一天 24 小时工作;基本不受雷电、极光、磁暴和太阳黑子活动等恶劣自然环境的影响。早年的实验也表明,即使在发生核爆炸后只要设备本身没有被物理摧毁,它还能很快恢复正常。散射通信的这一优势是得天独厚的,因此非常适于军事用途。

(7) 抗干扰、抗截获能力强

与其他通信手段相比,散射通信在当代电子对抗十分激烈的战场环境下的适应能力更强。它可以使用很高的频段,比如 Ku 频段本身就比几百兆赫兹的电子设备更难被发现和干扰。更关键的一点,散射信道是一种近乎“封闭”的信道,收发天线的波束主瓣宽度常常只有 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$,波束的仰角接近地平线,所以它不易被侦查设备发现和追踪。另外,由于散射路径传输损耗巨大,链路自身尚需大功率发射机才能保证接收电平足够,敌方除非使用更大功率发射机并且瞄准天线主瓣(或第一旁瓣)才有可能有效地实施干扰。如果在信号形式上配合一定的扩频、跳频等抗干扰措施,还可以进一步增强其抗干扰、抗截获能力。

(8) 具有较好的抗毁性

散射链路在上百千米的一跳范围内无需中继、部队补给和站址守护,因此便于集中防卫,它一般不需高架天线,地面布设更易于伪装隐蔽,从而使设备受到破坏的可能性降低。

对流层散射通信也有以下一些不可避免的缺点。

(1) 信道传输损耗非常大

散射通信的路径传输损耗与频率、距离和地形都有关系,以 C 频段为例,200 km 的典型链路年小时中值损耗可达 220 dB。出于此原因,它必须使用大功率发射机和高增益天线。然而散射路径传输损耗对距离的远近比自由空间电波传播更“敏感”,如果两站距离拉近,它的路径损耗也会快速减小。近年来,国外设备供应商正是看到这个特点而推出了很多大容量、小型化的装备,它们不追求太远的通信距离(甚至提出“刚刚超出视距”这一应用

模式),而是尽量减小设备体积和功耗,从而更好地满足当前指挥所之间的 C4ISR 宽带信息汇聚与分发需求。

散射信道的传输损耗有明显的日变化和季节变化,夏季信号电平比冬季要高出 10~20 dB。现在业界已提出了根据信道传输损耗的变化自适应地改变通信速率的概念;但是如果只是链路速率改变,其他配套设备仍为固定速率,则用户体验可能并无太大改善;另外如果将通信速率提高 10~100 倍,目前的频率资源也将成为瓶颈,因此围绕信道的高效利用尚有很多课题待研究。

(2) 信号衰落严重

散射信号不是恒参的,它用 Rayleigh 衰落来描述较契合,信号的衰落速率也和距离、频段有关,典型的衰落速率为几赫兹至十几赫兹,这个特点是多年来影响所有设备方案设计的关键因素之一。为克服信号的快速衰落,空间、频率、时间各个维度的分集措施都被提出、研究和采用,这也是散射通信设备复杂、成本较高的主要原因。

1.3 对流层散射通信的应用

如上文言,即使现在卫星通信和光纤通信已越来越普及,对流层散射通信仍在民用通信中有一席之地。但是也不可否认,它的价值更多地体现在军事应用之中,本书最后一章给出了一个散射站型和应用方式的资料集,这里将其整理成以下几条供读者参考:

(1) 军以上战术级地域通信公网的交换机间的远程链接,在发展中国家或国土面积小的国家,也可作为基础通信设施。

(2) 军以上战略/战役级高层指挥链的长距离多跳、多节点通信(广域骨干通信网),用以组建战区内连接高层指挥所或其它快速部署指挥部的中继链路或链状网,从而有力分担卫星通信的负荷。

(3) 构建边境监视及雷达预警信息的远程传递网络。

(4) 防空炮兵、导弹发射数据低时延传输(雷达与武器平台之间交联),或是作为其他与之类似的时间敏感信息的传输手段。

(5) 营级及以下机动部队的快速暂停式通信设备(又称战术视距通信网的距离扩展),代替目前的多跳微波接力或是 2 个短距离地面站之间的卫星链路。

(6) 岛屿间及岛对岸远程通信,也可作为海域维权的超视距信息传递手段。

(7) 海上能源平台对岸远程通信。

(8) 快速反应的应急通信设备,在第一时间内重新建立或接续受损的线路。

1.4 本书内容概要

本书的内容分为 3 部分,第一部分讲述对流层散射通信的基本原理和站型设计,包括第 2~4 章,其中第 2 章介绍散射信道的特点、分类和模拟;第 3 章为电波传播损耗和可靠度预报,包括几种目前国内外常用的预报方法和中国电子科技集团公司第 54 研究所(以下

简称中国电科 54 所) 的简算方法; 第 4 章介绍站型设计的基本流程, 给出空间、频率、角度和时间分集的一些常用估算公式和设计实例, 以及分集合并的理论性能计算。

第二部分为散射通信波形设计, 包括第 5~第 7 章, 其中第 5 章介绍散射通信站的设备组成和传信率在 Mb/s 量级以下的低速波形, 本章也枚举了一些国外成功的典型站型; 第 6 章讨论 Mb/s 量级以上高速波形, 包括各种时域或频域的信道均衡算法; 第 7 章分析衰落信道的前向纠错问题, 给出一种慢变瑞利信道的纠错性能计算方法, 本章还以 LDPC 为例展示了接近香农限的好码的作用及编译码过程。

第 8 章为最后一部分, 该章按时间顺序介绍了散射通信应用的历史变革, 包括冷战时期的广泛建设、20 世纪八九十年代的实战检验及后来的缓慢发展、21 世纪的再次跃升几个阶段。如果读者初涉散射通信, 本章也可作工程设计参考之用。

第2章 对流层散射通信的原理与特点

2.1 概 述

人类生活的地球被一层厚厚的大气包围，科学研究人员根据大气温度、湿度和气压的特点将它细分为多个子层，自地面开始，依次为对流层、平流层（同温层）、电离层等。其中，对流层（如图 2-1 所示）是大气层最靠近地面的一层，它的密度和质量在整个大气层中最大，其中的主要成分为氧、氮和少量的二氧化碳，除此之外还含有丰富的水蒸气和水汽凝结形成的小水滴和冰晶。由于太阳辐射能量的不断注入，这一层大气的对流活动最为明显，这种对流活动形成了日常经历的风、云、雨、雷、雪、雾等各种丰富的天气现象。

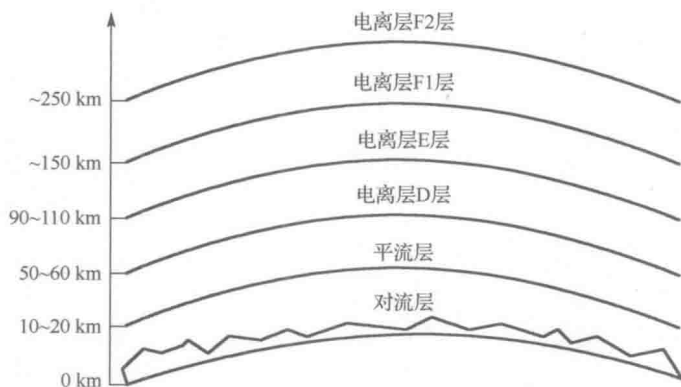


图 2-1 对流层在大气层中的位置

对流层的厚度，也就是对流层顶的高度，在地球上不同的地方有较大差异。在赤道地区，由于大气吸收的太阳辐射能量多，大气之中的水蒸气含量高，大气的对流活动更加剧烈，因而对流层的高度更高，可达 16~20km；在亚热带和温带地区，对流层的高度为 10~16km；在寒带甚至更冷的两极，它的高度降为 8~10km。对流层的厚度是影响对流层通信距离的关键因素，在一年四季中，夏季对流层高度比冬季更高。

对流层中的温度、气压和水蒸气含量等随着高度的升高急剧降低，并且这些气象要素处处不同、随机变化。当无线电波沿着地平线发射时，由于对流层的不均匀性会产生一种主要能量集中于前方的弯管传输现象，这样即使相距百里，或是山川、湖泊相阻，或是沙漠、海峡分隔，远方同样能够收到微弱的无线电信号。对流层散射通信，其原理如图 2-2 所示，即定义为这种利用对流层大气媒介中的不均匀体对电波的前向弯管传输效应而实现的超视距无线通信方式，其单跳的通信距离可从视距一直延伸到数百千米。