



► 21世纪通信网络技术丛书

移动通信前沿技术系列

流星余迹 通信理论与应用

◎ 李赞 刘增基 沈健 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
电子信息科技专著出版专项资金

21世纪通信网络技术丛书
——移动通信前沿技术系列

流星余迹通信理论与应用

李赞 刘增基 沈健 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书源于作者及相关研究机构长期从事流星余迹通信理论研究的提炼和总结,对流星余迹通信领域所涉及的基本理论、基本方法、最新研究进展和应用等方面进行了全面的总结和系统的比较分析。

全书共分 11 章,涵盖了以下内容:流星余迹通信基本原理;从数学和物理学的角度给出了流星信道的传播特性和余迹分布参数,并讨论了相关的传输模式;从通信链路的角度出发给出了系统链路组成和基本工作方式,讨论了流星余迹通信的性能指标、影响因素、链路计算等;流星信道的建模方法;流星余迹通信传输关键技术,如调制解调、同步与捕获、信道编译码和差错控制;改善流星余迹信道传输性能的关键技术,如信道估计与均衡、自适应功率控制、自适应噪声抑制以及分集技术;针对流星信道的衰落特性,重点讨论了基于自适应码元速率、自适应调制方式、自适应编码效率和自适应扩频等各类自适应变速率传输的基本原理、实现算法和性能分析;流星余迹通信协议与组网方面的知识,包括流星余迹信道的通信方式、协议设计、链路控制协议,以及多址接入技术和路由选择技术等;流星余迹通信专用天线的基本原理及其设计过程;流星余迹通信系统的组成及其应用实例;流星余迹通信的发展和应用。

本书层次清晰,内容丰富,可读性强,既可以作为各高等院校通信专业、电子工程专业的本科生、研究生的参考教材,也可以作为从事相关领域研究的科研人员和工程技术人员的参考用书。

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

流星余迹通信理论与应用 / 李赞等著. —北京:电子工业出版社, 2011.4
(21 世纪通信网络技术丛书. 移动通信前沿技术系列)

ISBN 978-7-121-13220-9

I. ①流... II. ①李... III. ①流星余迹—散射通信 IV. ①TN926

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 055139 号

策划编辑:王春宁

责任编辑:田宏峰 特约编辑:刘 涛

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:26.75 字数:680 千字

印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:88.00 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。

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。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

近年来,随着社会的不断发展和全球范围内突发事件的与日俱增,人们对于应急通信的需求越来越迫切,对应急通信提出的要求也越来越高。作为现代通信的重要组成部分之一,应急通信在通信领域中已经扮演着越来越重要的角色,具有特殊的战略意义。从美国纽约的“9·11”事件到2004年的对伊战争,再到英国伦敦的炸弹恐怖袭击,从印度洋海啸到我国的雪灾冻雨和“5·12”汶川特大地震……在突如其来的恶劣自然灾害、恐怖事件和军事打击等紧急状况下,最低限度的预警和应急通信体系对于保障人民生命财产和国家安全至关重要。流星余迹通信是一种在受到核爆、强电子干扰、地震、海啸和极地弧光等电子或物理攻击而导致常规通信中断的情况下,能够正常通信的最低限度通信保障手段,在应急通信中具有极其重要的特殊地位。

由于信道传播机理的特殊性,流星余迹通信具有显著的特点:首先,隐蔽好、可靠性高、抗核爆和抗干扰能力强;其次,通信距离远,可支持大规模组网;再次,使用地域广,可支持全时域、全天候工作;此外,其设备成本和维护费用低。鉴于以上特点,国外发达国家已经建立了用于最低限度应急通信保障的流星余迹通信网络体系。作为较早开始研究流星余迹通信的国家之一,20世纪70年代我国研制出第一代流星余迹通信系统,并一直跟踪国外最新研究进展。本书源于作者及相关研究机构长期从事流星余迹通信理论研究的提炼和总结,同时包含了近年来该领域的最新研究成果,既注重理论介绍,又强调实际应用,希望能够为国内同行提供从事这一领域理论研究和实际应用的基础。

本书从理论应用的角度和当前的研究需求出发,在编写思路和目录结构上注重整体的合理布局 and 关键技术的关键论述,体现出整体的逻辑条理性 and 系统化结构。按照深入浅出、重点突出、理论与实际系统相结合的思路,对流星余迹通信领域所涉及的基本理论、基本方法、最新研究进展 and 适用性等进行了全面的总结 and 系统的比较分析。在全书的整体结构安排上,首先介绍了流星余迹通信的基本原理 and 信道特性,让读者了解流星余迹通信的基本概念 and 信道传播机理;然后介绍了流星余迹通信的系统组成 and 链路特性,为系统建模 and 理论分析打下基础;随后着重讨论了流星余迹通信的各项关键技术,包括传输体制、自适应变速率等,使读者能够清楚地了解支撑流星余迹通信的核心理论;最后给出了流星余迹通信系统的具体实例,并介绍了国内外发展和实际应用状况,使读者了解到流星余迹通信目前的发展状况及其应用前景。

全书的主要内容共分11章,第1~4章是流星余迹通信原理 and 信道特性,第5~9章是流星余迹通信传输关键技术和理论,第10、11章是流星余迹通信系统实例以及流星余迹通信的发展 and 应用。以下是各章的编写思路 and 内容简介:

第1章介绍了流星余迹通信基本原理,首先从物理学的角度引出流星余迹的形成,然后给出了流星余迹通信的原理 and 特点,以及系统组成 and 网络结构,通过物理现象的描述 and 讨论,引发读者对于该领域的兴趣;第2章基于数学 and 物理学的角度,给出了流星信道的传播特性和余迹分布参数,并讨论了相关的其他传输模式,使得读者对于流星余迹信道有了具体 and 定

量的认识；第3章从通信链路的角度出发，给出了系统链路组成和基本工作方式，使读者对完整的流星余迹通信系统有了具体的概念和形象的认识；讨论了流星余迹通信的性能指标、影响因素、链路计算等，为后续的流星余迹通信关键技术分析打下了基础；第4章首先给出国内外现有的流星余迹信道模型，然后重点介绍了基于SPW平台的流星余迹信道建模过程并对模型进行了仿真与分析，为实际流星通信系统的设计提供了理论依据。

第5章是流星余迹通信传输关键技术，包括调制/解调、同步与捕获、信道编/译码和差错控制，既分析了现有系统已采用的技术，又整理了国际上最新的理论和方法，为系统设计提供了参考依据；第6章结合国内外相关研究成果，讨论了针对流星信道快衰落、多径、噪声等的信道估计与均衡、自适应功率控制、自适应噪声抑制、分集技术和混合传输模式，为进一步提高系统性能探索方向；第7章针对流星信道特性的自适应变速率技术，重点讨论了基于自适应码元速率、自适应调制方式、自适应编码效率和自适应扩频的几种典型的变速率传输，是流星余迹通信自适应传输体制的理论基础；第8章是流星余迹通信协议与组网方面的介绍，让读者充分了解这种通信手段与现有的其他通信手段在传输方式和协议设计上的差异，进一步了解流星余迹通信的特殊性；第9章介绍了流星余迹通信专用天线基本原理和设计过程。

第10章首先分别对主站和从站的设计、设备安装进行了讨论，然后以MCC公司的典型流星余迹通信设备为例，详细介绍了其系统结构、具体参数、技术指标等，为流星通信系统设计和实现提供了设备参考；第11章首先介绍了流星余迹通信的国内外发展状况，然后从国外已应用并形成规模和影响的典型系统入手，分别讨论了流星余迹通信在民用和军用方面的具体应用情况，通过比较和分析，客观地说明了开展流星通信研究的重要性、必要性和迫切性。

本书是国内流星余迹通信的第一部专业著作，内容丰富、分析严谨，注重理论和工程应用的紧密结合，希望使广大读者对流星余迹通信系统有一个比较深刻、全面的认识和了解，对国内该领域的研究工作起到一定的借鉴和指导作用。

自六十年代起，我国一代又一代专家、学者和科研人员长期工作在流星余迹通信事业的第一线，本书是他们辛勤付出和长期积累的成果结晶。在此，非常感谢杨千里部长、金力军教授、李建东教授、龚书喜教授、傅光教授、蔡觉平副教授、司江勃博士等为本书的基础工作提供了有力的技术支撑，特别感谢陆建勋院士、童志鹏院士和胡光镇院士为本书撰写提出的宝贵意见。本书在编写的过程中，得到了综合业务网理论及关键技术（ISN）国家重点实验室各位领导和专家的大力支持，以及郝本建、陈小军、刘英挺、张望远、尹德、王一峰、刘和碧、李直、刘鑫、王斌、谢梦、雷赟、刘坤、王志伟、王达丰、赵晋宇等博士、硕士们的积极参与和投入，在此表示最衷心的感谢！本书的出版得到了国家自然科学基金（61072070）、国家863高技术研究发展计划（2009AA01Z237）和新世纪优秀人才支持计划（NCET-07-0653）的资助。最后，特别感谢电子工业出版社王春宁博士在本书出版过程中给予的热情支持和帮助！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作者
于古城西安

出版说明

为了促进和推动我国通信产业的发展,迎合国家在 21 世纪的中长期信息通信技术的发展规划,电子工业出版社通信出版分社特策划了一套《21 世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的技术应用层面,又细分为 4 个系列:《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》、《物联网技术与应用开发系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是以移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况为导向,结合新一代移动宽带系统(4G 技术)的逐步建立,全面介绍当今移动通信领域涉及的前沿关键技术与热点技术,以理论创新和技术突破为主。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 TD-LTE、WCDMA-LTE、cdma2000-LTE、WiMAX-LTE 的新技术与新标准为主攻方向,以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和实现为主。LTE 作为无线通信技术的一个重要的长期演进计划,代表了国内外无线通信领域的最新发展需求和解决方案。以新一代移动宽带通信技术为主。

《物联网技术与应用开发系列》是下一代 ICT(信息通信技术)产业的新增长点之一。将物联网技术与应用开发单独列为一个系列主要是从无处不在的应用宽泛性和无所不能的移动互联网对人们生活和工作的深刻影响而构建的。物联网是互联网的自然延伸,以 IP 技术为核心,是一种架构在基于 IPv4/IPv6 的各种网络上的综合应用和通信能力。根据它的四个层面—感知、传输、处理和应用,通过技术与应用开发的紧密结合去推动物联网工程应用的进一步发展。以物联网技术开发应用为主。

《网络通信与工程应用系列》是以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的成功案例所提出来的。以移动通信网络工程应用为主。

为了提升本套丛书的影响力,依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各科研院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的一线研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出;理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员,供他们阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信出版分社

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 流星余迹通信基本原理	1
1.1.1 什么是流星余迹通信	2
1.1.2 流星余迹通信机理	2
1.1.3 流星余迹通信基本工作过程	3
1.2 流星余迹通信的发展历史和趋势	4
1.2.1 流星余迹通信发展历程	4
1.2.2 流星余迹通信研究趋势	6
1.3 流星余迹通信的特点和应用	6
1.3.1 流星余迹通信的特点	6
1.3.2 流星余迹通信的应用	8
1.4 流星余迹通信的系统组成和网络结构	9
1.4.1 系统结构	9
1.4.2 流星余迹通信组网	10
参考文献	11
第 2 章 流星余迹信道	13
2.1 流星和流星余迹	13
2.1.1 流星现象及其物理特性	13
2.1.2 流星余迹及其物理特性	19
2.2 流星余迹的电波传播机理	24
2.2.1 流星余迹的分类	25
2.2.2 欠密类余迹电波传播机理	25
2.2.3 过密类余迹电波传播机理	26
2.2.4 数学模型相关参数	28
2.3 流星余迹前向散射信道的统计特性	32
2.3.1 余迹出现的统计规律	32
2.3.2 流星到达率的昼夜、季节变化	33
2.3.3 信号振幅分布	37
2.4 流星余迹信道的其他特性	38
2.4.1 偏路径效应与“热区”	38
2.4.2 余迹散射的方向性与“足迹”	41
2.4.3 信道特性与天线方向性的关系	43
2.5 其他传播模式	44

2.5.1	超短波视距传播	45
2.5.2	离散 E 层 (Es 层) 反射	46
2.5.3	电离层散射	47
	参考文献	48
第 3 章	流星余迹通信链路	50
3.1	链路系统组成	50
3.1.1	基带处理设备	51
3.1.2	射频设备	53
3.1.3	网络管理与控制设备	55
3.1.4	用户终端与显示设备	55
3.2	工作方式	56
3.2.1	全双工方式	56
3.2.2	半双工方式	57
3.2.3	不同双工方式的比较	58
3.2.4	门限控制与差错控制	59
3.3	链路传输性能参数	59
3.3.1	通信距离	60
3.3.2	通信持续时间	62
3.3.3	等待时间	66
3.3.4	占空因子	68
3.3.5	信息吞吐量	69
3.4	设备指标与传输性能的关系	70
3.4.1	工作频率	70
3.4.2	信息传输速率	71
3.4.3	发射功率	72
3.4.4	接收机门限	75
3.4.5	天线增益	75
3.5	影响传输性能的因素	76
3.5.1	多径效应	77
3.5.2	噪声与干扰	79
3.5.3	多普勒频移	82
3.5.4	法拉第旋转	83
3.5.5	太阳黑子	84
3.6	链路传输性能估算	84
3.6.1	路径传输损耗	85
3.6.2	突发链路功率估算	87
3.6.3	链路性能分析	88
3.6.4	两种链路分析方法	89
	参考文献	90

第 4 章 信道建模与系统仿真	92
4.1 CSC 流星余迹体积分模型.....	93
4.1.1 模型概述.....	93
4.1.2 天线模型.....	93
4.1.3 流星突发信道模型.....	94
4.1.4 链路协议仿真模型.....	96
4.2 流星余迹的信道建模.....	97
4.2.1 信道建模思想.....	97
4.2.2 基于 SPW 仿真软件的流星信道建模.....	98
4.2.3 基于 SPW 流星信道模型的仿真与分析.....	104
4.2.4 流星信道模型在通信系统仿真中的应用.....	107
4.2.5 小结.....	108
参考文献.....	109
第 5 章 信息传输关键技术	110
5.1 调制/解调.....	110
5.1.1 概述.....	110
5.1.2 线性调制技术.....	112
5.1.3 恒包络调制技术.....	117
5.1.4 调制相关技术的结合与应用.....	122
5.2 接收同步.....	129
5.2.1 定义和分类.....	129
5.2.2 同步方法.....	130
5.2.3 适用于流星余迹通信的同步方法.....	135
5.3 信道编/译码.....	142
5.3.1 信道编码概述.....	142
5.3.2 BCH 码在流星余迹通信系统中的应用.....	145
5.3.3 RS 码在流星余迹通信系统中的应用.....	150
5.3.4 TPC 码在流星余迹中的应用.....	155
5.3.5 未来可应用于流星余迹的编码方式.....	159
5.4 差错控制.....	160
5.4.1 流星余迹通信差错控制要求.....	160
5.4.2 差错控制协议的分类与原理.....	161
5.4.3 流星余迹通信差错控制协议设计.....	165
5.4.4 流星余迹通信差错控制协议性能分析.....	166
参考文献.....	172
第 6 章 抗信道衰落与均衡技术	176
6.1 系统传输模型.....	177
6.1.1 影响传输性能的因素.....	177

6.1.2	信道捕获模型	180
6.1.3	信道跟踪与均衡模型	181
6.2	突发信道估计	182
6.2.1	自适应信道参数估计	182
6.2.2	基于相关的信道参数估计	183
6.3	流星余迹通信信道均衡	185
6.3.1	线性均衡 (LE)	185
6.3.2	判决反馈均衡 (DFE)	186
6.3.3	盲均衡 (BE)	189
6.3.4	最大似然均衡 (MLSE)	190
6.4	自适应功率控制	196
6.4.1	发射功率对通信性能的影响	196
6.4.2	自适应功率目标	197
6.4.3	现有的功率控制算法	199
6.4.4	流星余迹通信自适应功率系统实例	199
6.5	自适应噪声抑制	202
6.6	分集技术	203
6.7	多模式混合传输技术	206
6.7.1	与超短波通信兼容	207
6.7.2	与短波通信兼容	208
6.7.3	与电离层散射通信兼容	208
	参考文献	209
第 7 章	自适应变速传输	213
7.1	自适应变速技术概述	213
7.1.1	自适应变速的概念	213
7.1.2	流星余迹通信自适应变速的实现方法	214
7.2	流星余迹信道容量	214
7.2.1	欠密类余迹信道容量	216
7.2.2	过密类余迹信道容量	221
7.2.3	平均日吞吐量	227
7.2.4	固定时间域吞吐量	229
7.3	基于自适应码元速率的变速传输	231
7.3.1	自适应码元变速原理	231
7.3.2	自适应码元变速系统实例	232
7.4	基于自适应调制方式的变速传输	238
7.4.1	基于自适应 QAM 调制的变速方法	239
7.4.2	基于自适应双正交编码调制的变速方法	243
7.5	基于自适应编码的变速传输	250
7.5.1	自适应编码变速原理	250

7.5.2	流星余迹通信最优变速编码	251
7.6	基于自适应扩频的变速传输	257
7.6.1	自适应直扩变速原理	257
7.6.2	自适应直扩变速系统	257
7.7	信噪比估计	260
7.7.1	信噪比的定义	260
7.7.2	信噪比估计方法	261
	参考文献	262
第 8 章	流星余迹通信传输协议与组网	264
8.1	流星余迹通信方式	264
8.1.1	点对点方式	265
8.1.2	点对多点方式	267
8.1.3	组网方式	270
8.2	流星余迹通信协议设计	271
8.2.1	流星余迹通信协议设计特点	271
8.2.2	流星余迹通信协议结构体系	273
8.3	流星余迹通信链路控制协议	275
8.3.1	通信帧	275
8.3.2	全双工协议	285
8.3.3	半双工协议	289
8.4	流星余迹通信组网技术	293
8.4.1	网络及站点配置	294
8.4.2	多址接入技术	295
8.4.3	路由选择技术	298
8.4.4	网络性能	301
8.4.5	网络管理	306
	参考文献	307
第 9 章	专用天线	309
9.1	基本电性能参数	309
9.2	流星余迹天线的参数选择	312
9.2.1	工作频率的选择	312
9.2.2	天线增益及波束宽度	313
9.2.3	极化方式	314
9.2.4	架设高度及俯仰角	314
9.3	基于长距和短距的天线性能比较	314
9.3.1	理想天线模式	315
9.3.2	水平极化八木天线	315
9.3.3	水平偶极天线	316

9.3.4	垂直鞭状天线	316
9.3.5	垂直极化八木天线	316
9.3.6	天线性能比较	317
9.4	流星余迹通信的八木天线设计	318
9.4.1	基本工作原理	319
9.4.2	八木天线的分析方法	320
9.4.3	八木天线的设计实现	322
9.4.4	流星余迹通信七单元八木天线的设计	325
9.5	天线新技术	327
9.5.1	天线零位技术	327
9.5.2	波束控制	331
9.5.3	有源天线技术	332
	参考文献	333
第 10 章	站型设计与系统实例	334
10.1	站型设计与设备安装	334
10.1.1	站型设计	334
10.1.2	站址选择与设备安装	336
10.2	实例	343
10.2.1	主站实例	343
10.2.2	从站实例	351
10.2.3	系统实例	363
	参考文献	380
第 11 章	流星余迹通信的发展和应	381
11.1	流星余迹通信的发展	381
11.1.1	国外发展概况	382
11.1.2	国内发展概况	388
11.2	未来发展趋势	393
11.3	流星余迹通信的应用	395
11.3.1	民用系统	395
11.3.2	军用系统	402
11.3.3	未来应用方向	408
	参考文献	409

第1章 概 述



浩瀚夜空，流星划过，给寂寞的星空带来一丝生气与活力，给人类呈现出一道绝美的风景。一个为大家所熟知的古老传说讲到，在流星的光芒余迹未逝之际，如果你能诚心说完一个心愿，它就一定会实现，给这美丽的风景增添了浓厚的神秘气息，也让芸芸众生对流星充满了好奇与敬意。流星的伟大在于它不甘星空的寂寞，为了刹那间的美丽绽放，燃放了生命的全部。

为大家所不知的是，这道美妙而伟大的风景不仅可以让我们欣赏，而且还可以为人类服务。流星划过星际的短暂瞬间，也为人类提供了一种通信的媒介——流星余迹，人类发挥自己的智慧，利用流星突发信道进行通信，从而开启了流星余迹通信的新篇章。作为一种最低限度的应急通信保障手段，流星余迹通信在通信领域中占据着举足轻重的特殊地位。

本章节的安排是，首先从流星的物理现象引出流星余迹通信的定义，给出流星余迹通信机理和系统的基本工作过程；然后分别从该领域的研究背景和现状出发，概括性地总结流星余迹通信的国内外发展历程和未来的研究趋势；在此基础上，分析流星余迹通信作为最低限度应急通信手段所具有的显著特点及其实际应用；最后给出流星余迹通信的系统组成和基本组网结构，为后面的章节打下基础。

1.1 流星余迹通信基本原理

早在 1929 年，位于美国的一家长波传输局在进行电波观测试验时，发现流星群的出现和电波的接收之间有着明显的关系，这是流星对无线电通信的最早报告，但后来很多年都没有流星余迹通信的新进展，直到 1946 年才发表了关于无线电信号与流星余迹的确切关系的报道，从此，流星余迹通信领域有了非常大的发展。1951 年在对电离层散射的观测中也发现流星余迹散射作用在信号的传输中占据了很大的比例，这也大大刺激了该领域的迅速发展。

1.1.1 什么是流星余迹通信

如图 1-1 所示，流星余迹通信在一定的程度上与卫星通信很相似，该通信系统所利用的“反射体”就好像是一颗“自然卫星”一样。

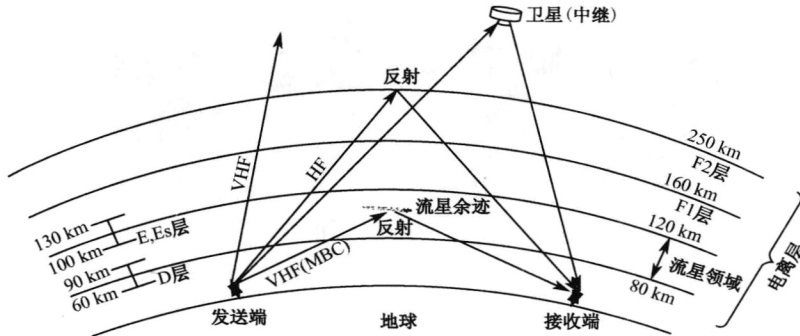


图 1-1 流星余迹通信机制

卫星通信是指从一个地面站发出无线电信号，这个微弱的信号被卫星通信天线接收后，首先在通信转发器中进行变频和功率放大，最后再由卫星的通信天线把放大后的无线电波重新发向另一个地面站，从而实现两个地面站或多个地面站的远距离通信。与卫星通信不同的是，流星余迹通信不是利用通信卫星为中继进行信号传输，而是利用流星体在离地面 80~120 km 的高空形成的流星余迹为媒介进行通信，流星余迹的高度决定了可利用流星余迹实现超视距的远距离通信。

虽然流星进入地球大气层是不均匀的，但每天都有足够数量的流星来支持地球上的任何地点在任何时间内都能够进行通信。这并不是说通信是“实时”的，因为在某个位置能提供一个足够合适的通信路径的流星余迹不会总是连续存在的。一个流星的电离余迹消失之后，到下一个适用的流星出现，通常要等待几秒到几分钟的时间。显然，这种通信方式只能是间断的、突发的。因此，流星突发通信适用于小容量且无实时要求的场合。

据此，我们对流星余迹通信的定义如下：

定义：流星余迹通信（Meteor Burst Communication, MBC）是一种利用流星体射入高空大气层摩擦燃烧后在高空形成的电离余迹，利用 VHF 无线电波的前向散射作用而实现的远距离突发通信方式。

1.1.2 流星余迹通信机理

流星余迹每米中的电子个数称为电子线密度，它是判断流星强弱的标准。按照电子线密度的大小，流星余迹可以分为两类：电子线密度小于 $2 \times 10^{14} \text{ e/m}$ 的称为欠密类流星余迹，电子线密度大于 $2 \times 10^{14} \text{ e/m}$ 的称为过密类流星余迹。不同的流星余迹对于无线电波的反射机理也有所不同。

1.1.2.1 欠密类余迹通信机理

对于欠密类流星余迹，由于其电子线密度较小，无线电波穿透余迹，余迹内各个电子受

到入射无线电波能量的激发成为二次辐射源，它们如同偶极子天线那样，这些二次辐射场在接收点的叠加就形成了接收信号。散射信号在很短的时间内达到峰值，然后随着余迹的扩散，散射信号的强度呈指数率衰减。欠密类余迹持续时间从几百毫秒到几秒不等，一般小于 1 s，但其数量远比过密类多。欠密类余迹散射信号一般较弱。欠密类余迹散射的信号具有强方向性，如图 1-2 所示，只有当散射线与余迹轴的夹角等于入射线与余迹轴的夹角时，即 $\delta = \varphi$ 时，才有足够强的信号，这个条件称为“镜面反射条件”。

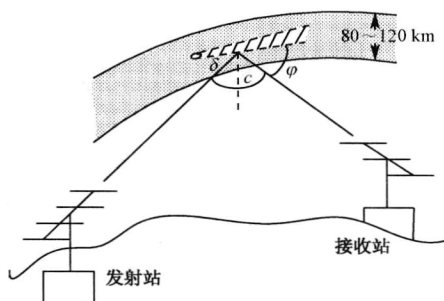


图 1-2 镜面反射条件

1.1.2.2 过密类余迹通信机理

对于过密类流星余迹，由于其电子线密度较大，流星余迹表现为金属反射体。电波无须到达其内部，直接在表面进行反射，反射信号的强度先缓慢地到达峰值，然后再缓慢衰落。余迹因扩散而膨胀后，电子浓度虽开始减少，但还有可能增加，因而信号强度有缓慢上升的相对稳定阶段，然后由于余迹的进一步膨胀，过密类转为欠密类。过密类余迹整个的持续时间为几秒（典型值），大于欠密类流星余迹反射过来信号的持续时间。然而，过密类流星余迹的多径效应和衰落现象要比欠密类流星余迹严重，会影响通信的性能，这是由风的剪切和扰动等情况所致。过密类余迹对无线电信号起反射作用，接收端信号比较强，一般过密类反射的信号持续时间比欠密类要长得多。

1.1.3 流星余迹通信基本工作过程

流星余迹是随机的时变信道，一般采用突发的工作方式。类似于一般的无线通信过程，流星余迹通信基本工作过程可以分为探测、建链、传输、拆链、等待五个工作状态，如图 1-3 所示。一般情况下，工作站通过持续发送探测序列或探测帧来实时探测可用余迹的出现，一旦可用的流星信道建立，则迅速开始信息的传输。与常规通信方式不同的是，流星余迹通信的建立和维持需要依赖可用余迹信道的出现，这一点在通信中表现为接收信噪比的门限判决，即若通信站接收信噪比在预先设定门限值以下，系统认为收到的是噪声信号，不传输有用信息；若通信站接收信噪比在此门限值以上，则按照设定速率传输包含有用信息的数据。值得一提的是，流星余迹通信过程是与自适应变速率传输相结合的，系统会根据接收信噪比的大小来确定相应的传输速率。在通信中断期间，工作站还要不断地发送探测信号来检测流星信道条件的变化，并根据这种变化来控制信息传输的启动和停止。

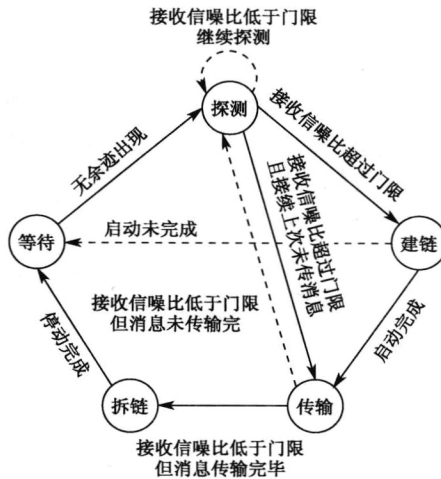


图 1-3 流星余迹通信系统状态图

结合图 1-3 所示的状态图，以传输报文为例简单说明流星余迹通信的基本工作过程。

- 探测状态：为了随时探测可能出现的可用流星余迹，发端发射机（至少是一端）经天线向路径中点 80~120 km 的高空连续发送探测信号，收端接收机亦连续检测接收信噪比的变化，并将待传送的报文送入存储器；
- 建链状态：当接收信噪比大小超过设定门限值时，系统立即转入建链状态。通信双方经过短暂的握手和交互之后，发端迅速取出发送存储器中的报文信息，开始传输；
- 传输状态：发端发送的射频信号经过流星余迹信道传输到接收端，经接收机解调、解交织、译码等处理后，存入接收存储器，并进行组帧，恢复完整报文等，依次执行，直至信噪比下降到门限值以下为止；
- 拆链状态：当流星余迹信道无法支持通信时，系统经过一短暂的停动过程，由传输状态返回到等待状态；
- 等待状态：当通信双方没有进行通信时，系统处于等待状态。一般情况下，等待状态很短，系统也可以根据实际情况不经过等待状态而直接进入探测状态，继续进行下一可用流星余迹探测。

1.2 流星余迹通信的发展历史和趋势

1.2.1 流星余迹通信发展历程

流星余迹通信具有覆盖范围大、电子对抗能力强、抗毁性强和隐蔽性较高等显著特点，在 30~50 MHz 频率范围内综合利用流星余迹与电离层散射、离散 E 层反射等传播媒质，可实现单跳通信距离为 500~2 000 km 的可靠信息传输。因此，可作为最低限度应急通信的重要手段，在国防和自然灾害等应急通信中发挥特殊的作用。

1930—1940 年间，美国科学家最早发现了电波的异常传播和流星进入地球大气层有关系；1935 年，Skellet.A.M 正确揭示了流星余迹突发通信的原理。作为一种抗干扰能力强的突

发通信方式，从 1953 年第一台流星余迹电报通信系统到可以利用其进行语音和图像传输的 AMBTB 系统，流星余迹通信引起了全世界范围内的广泛关注。如图 1-4 所示，其发展经历了三个主要阶段。

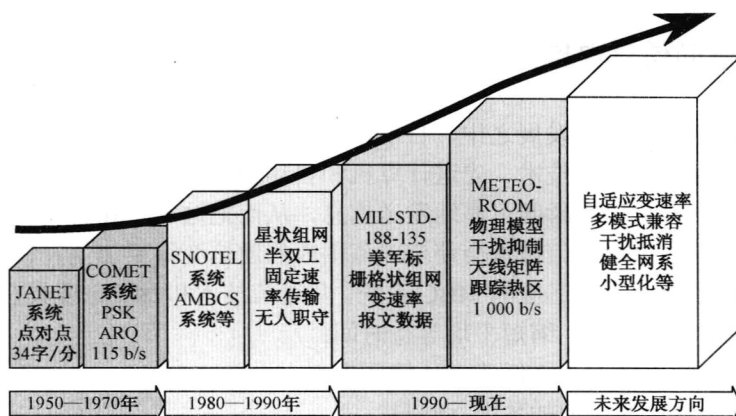


图 1-4 流星余迹通信发展历程

① 20 世纪 60 年代，加拿大的 JANET 通信系统和北约的 COMET 通信系统是最早研制出的第一代流星余迹通信系统，采用固定数据传输速率，平均数据通过率仅为每秒几十比特。

② 20 世纪 70 年代末，随着军事等保密业务需求的进一步加强，美国和欧洲研制出了第二代大规模流星余迹通信系统。其中主要产品有美国的 AMBCS 通信系统、SNOTEL 通信系统、TRANSTRACK 通信系统和英国的 BLOSSOM 通信系统。

③ 第三代流星余迹通信系统以美国的 AMBTB 通信系统（美国自动雷达测绘学会 ARPA，1993 年）和 HPTL 通信系统（美国流星通信公司 MCC，1992 年）为标志。与第一代和第二代系统相比，第三代系统的传输速率从每秒几十个比特提高到 4~8 kb/s，可进行车载接收，支持多媒体业务的传输，并且实现了具有高增益小型天线的小功率流星余迹通信终端，可用于汽车、舰船、飞机上跟踪定位的移动数据传输。同时，已形成的星状接入网和栅格骨干网的网络体系，极大地扩展了流星余迹通信的应用领域。2000 年后，美国 MCC 公司陆续推出了 MCC545~MCC550 等一系列新型流星余迹通信设备和网络终端，传输速率提高到 4~64 kb/s。日本的流星余迹通信设备也已装备海岸警卫队，作为特殊情况下的通信保障系统。日本国立极地研究所在南极的昭和站和我国中山站之间建立流星余迹通信线路，为在南极建立无人观测站打下基础。

相比之下，流星余迹通信的国内发展却不是一帆风顺的。在国内，自 20 世纪 60 年代起最早由西安电子科技大学（原军事电信工程学院）开展了流星余迹通信系统的研究。自 60 年代起至 80 年代，我国研制出 HX-101A~HX-101D 的一系列流星余迹通信设备。1963 年，在北京—西安线路上对流星余迹散射传播进行了连续一年的测试，得到了大量的流星余迹散射信道特性的第一手资料。1976 年，相关系统参加了我国最后一次核效应试验，证明流星余迹通信不受电离层骚动和核爆炸的影响，可以作为特殊情况下的最低限度通信保障系统。2000 年至今，我国在流星余迹通信理论研究和设备研制方面紧跟国际步伐，积极开展流星信道特性、传输体制等方面的深入研究，取得了丰富的研究成果，并研制出基于自适应变速率的流星余迹通信系统，并顺利组织开展了 500~1 500 km 全国范围内的远距离线路试验，为下一步的研究打下基础。我国还先后派遣人员赴南极，参加中国极地研究所与日本国立极地研究