



王俊峰 孙富春 李 磊 著

空间信息网络组网技术



科学出版社

空间信息网络组网技术

王俊峰 孙富春 李 磊 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了空间信息网络的概念和发展现状;重点介绍空间信息网络组网方面的各种通信协议和关键技术,内容涉及物理层、数据链路层、网络层、传输层的协议和标准,以及组网及星座方案的设计;最后探讨了卫星仿真平台的构建方案,基于 Google Earth 设计并实现了空间信息网络可视化仿真系统。本书反映了近几年来空间信息网络方面的最新研究成果,并提供了详尽的参考文献。

本书结构清晰、重点突出、内容充实,集科学性、先进性和实用性于一体,既可作为高等院校通信、网络、计算机等专业研究生相关课程的教材,也可作为从事空间信息网络相关领域研究、开发和管理的人员了解空间信息网络技术的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

空间信息网络组网技术/王俊峰,孙富春,李磊著. —北京:科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-041085-6

I. ①空… II. ①王…②孙…③李… III. ①卫星通信系统 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 129797 号

责任编辑:张海娜 高慧元 / 责任校对:朱光兰

责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:327 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

空间信息网络是以空间平台(如同步卫星,中、低轨道卫星,平流层飞艇和有人或无人驾驶航空器等)为载体,实时获取、传输和处理空间信息的网络系统。其骨干通信网一般由在轨运行的多颗卫星及卫星星座组成,可为各种空间任务如气象、环境与灾害监测、资源勘察、地形测绘、侦察、通信广播和科学探测等提供集成的通信服务。空间信息网络的核心是卫星通信网,是单一卫星通信系统的进一步发展,同时也是 Ad Hoc 网络在空间方向上的拓展。

通信卫星作为空间信息基础设施的重要组成部分,对国民经济的发展起到重要的推动作用。例如,我国 2007 年为尼日利亚成功发射了通信卫星一号,据测算,该卫星可为尼日利亚提供超过 15 万个与通信运营相关的工作机会,为尼日利亚宽带用户每年节约超过 9500 万美元,为非洲用户节约电话中继和数据交换业务费超过 6.6 亿美元,卫星在轨服务的 15 年里,直接收益至少达 9 亿美元(而该项目投资为 2 亿美元)。

另外,随着对太空资源争夺的日益激烈和军事航天技术的飞速发展,世界各主要国家均加大空间信息系统的建设力度。作为空间攻防与信息对抗系统的重要载体,空间信息网络实现天、空、地一体化武器装备与作战体系的有效接入、互联互通、信息融合、传输分发、信息对抗;为实现对空间目标、地面目标的信息截获和目标跟踪,对敌方信息链路实施干扰、引导远程精确打击力量,进而支持一体化武器装备的信息化联合作战提供最基本的信息传输基础设施方面的支持。空间信息网络是实现由“平台中心战”向“网络中心战”演进的重要前提,是国防信息化建设的重要内容。

近年来,我国加快了空间信息系统的研究与建设进度。国家自然科学基金、863 计划等科技计划都部署了相关研究和关键技术攻关工作。在系统层面,除进行“鑫诺”系列通信卫星发射,2012 年 10 月 25 日,第 16 颗北斗导航卫星成功发射并实现了区域组网,到 2020 年左右,将建成覆盖全球的北斗卫星导航系统。此外,我国将研制近 100 颗空间飞行器,包括通信卫星、地球资源卫星、气象卫星、导航卫星等。其中,60~70 颗卫星构建空间信息系统。

从组网、路由与传输的角度来看,空间信息网络的主要特点如下:

(1) 网络资源有限。空间节点一般计算能力和存储能力有限,对组网过程中协议或算法的复杂度要求尽可能低,同时网络带宽资源差异性大,高带宽链路(星-

地、星-星等)和窄带链路(星-地、空-地等)共存,需要有差异性、有针对性地利用网络的带宽资源。

(2) 网络结构动态性与高度异构性。空间信息网络中节点类型众多,在天、空、地运行时的功能、轨迹、接入或传输能力等方面差异显著,使网络成为异构、动态的复杂巨系统。

(3) 支撑业务的多样性。空间信息网络中,传输的业务类型多样,不同类型业务对 QoS 要求与传输效率要求不同,网络需要有应对不同应用需求的保障能力。

(4) 面临蓄意攻击与破坏等安全威胁。空间信息网络的无线传输特性、组网结构、软硬件设计和实现缺陷、节点处理能力和存储能力有限、空间环境随机干扰,使得它更易受到敌方的窃听、假冒、信息重放以及破坏和攻击,这些都是网络的主要脆弱点。

组网及路由、传输协议是空间信息网络建设前必须突破的关键技术,也是目前需要迫切解决的关键。自 2003 年以来,作者及所在的研究团队开展了空间信息网络组网方面的研究,主要包括协议体系结构、组网及星座方案、路由及传输协议、网络管理、仿真及试验等方面的工作,也取得了一定的研究成果。本书系统地总结了作者近年来在空间信息网络组网研究方面的工作。

本书共 7 章,具体结构如下:第 1 章分析了空间环境对卫星通信网络通信链路的影响;第 2 章讲述了空间信息网络链路切换与保护方案;第 3 章阐述了空间信息网络中的可靠单播路由协议;第 4 章介绍了空间信息网络可靠组播路由协议方案;第 5 章研究了几种空间信息网络可靠传输协议;第 6 章以 LEO 卫星星座为例探讨了卫星仿真平台方案;第 7 章初步尝试了基于 Google Earth 的空间信息网络可视化仿真系统设计与实现。

本书相关的研究工作得到了国家自然科学基金项目(91338107)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0604)、教育部博士点基金项目(20130181110095)等的大力资助,在此一并致谢。

由于空间信息网络一直处于发展变化中,且作者学识及经验有限,书中难免会有疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 空间环境对卫星通信网络通信链路的影响研究	1
1.1 引言	1
1.2 影响通信链路的主要因素	1
1.3 卫星通信系统基本参量	4
1.4 空间环境对卫星链路的影响	5
1.4.1 卫星链路质量评定方法	5
1.4.2 仿真实验	5
1.5 小结	13
参考文献	13
第 2 章 空间信息网络链路切换与保护研究	14
2.1 卫星链路切换简介	14
2.1.1 单层卫星网络中的切换	14
2.1.2 多层卫星网络中的切换	14
2.1.3 卫星切换中技术与理论基础	16
2.1.4 单层卫星网络中几种切换实现	17
2.1.5 多层卫星网络路由	20
2.1.6 卫星网络切换研究现状分析	21
2.2 卫星网络中网络拓扑结构变化研究	21
2.2.1 拓扑变化理论分析	22
2.2.2 单层网络理论分析和仿真验证	28
2.2.3 多层网络理论分析和仿真验证	30
2.3 基于时隙划分的优化方法	31
2.4 LEO 卫星星座中一种重路由抑制的 ISL 切换协议	36
2.4.1 引言	36
2.4.2 重路由控制 ISL 切换协议	36
2.4.3 仿真结果	41
2.4.4 结论	44
2.5 基于本地恢复的快速切换保护恢复策略	45
2.5.1 网络模型	45
2.5.2 设计思想	46

2.5.3 算法性能分析与验证	48
2.5.4 结论	51
参考文献	52
第3章 空间信息网络可靠单播路由协议研究	53
3.1 快速自组织重构的空间信息网络可信路由协议设计	53
3.1.1 QoS路由可行性分析	53
3.1.2 安全路由协议研究需求	54
3.1.3 基本动态多径自组织重构路由协议研究	56
3.2 基本 ZDRP 的应用	60
3.2.1 基本 ZDRP 在单层星座下的应用	60
3.2.2 基本 ZDRP 在双层星座下的应用	63
3.3 QoS路由优化设计	65
3.3.1 QoS路由策略	65
3.3.2 多 QoS 约束的路由协议	65
3.3.3 QoS路由数学模型	66
3.3.4 多 QoS 约束的 ZDRP 优化	67
3.4 安全路由机制设计	68
3.4.1 基于身份的密码体制	69
3.4.2 路由协议中的安全机制	69
3.4.3 基于主动防御的安全性分析	73
3.4.4 ZDRP 的被动防御功能分析	73
3.5 ZDRP 仿真实现	74
3.5.1 系统设计方案	74
3.5.2 ZDRP 仿真设计	76
3.5.3 仿真系统的配置与管理	80
3.6 仿真结果分析	84
3.6.1 仿真配置	84
3.6.2 网络建立时间	86
3.6.3 网络自愈时间	87
3.6.4 路径搜索时间	88
3.6.5 应用层性能指标	88
3.7 可信路由交换协议总结	91
参考文献	92
第4章 空间信息网络可靠组播路由协议研究	93
4.1 卫星可靠组播协议研究意义及国内外研究进展	93
4.2 基于网络编码的高可靠组播协议设计	94

4.2.1	集成网络编码的分布式组播协议描述	94
4.2.2	集成网络编码的卫星组播路由协议可靠性分析	103
4.2.3	协议在单层星座下的应用	104
4.2.4	协议在多层卫星网络中的应用	105
4.3	仿真分析	108
4.3.1	NC-DMRA 协议在 LEO 星座系统中的性能评估	108
4.3.2	NC-DMRA 协议在多层星座系统中的性能评估	112
4.4	小结	115
	参考文献	116
第 5 章	空间信息网络可靠传输协议研究	117
5.1	概述	117
5.2	传输控制协议的研究现状	117
5.3	空间环境对传输控制协议的影响	120
5.3.1	长时延和大带宽时延乘积的影响	120
5.3.2	高误码率的影响	122
5.3.3	轨间链路中断和切换的影响	122
5.3.4	轨间链路时延变化的影响	123
5.3.5	链路不对称性的影响	123
5.4	STP 设计	124
5.4.1	启动阶段	124
5.4.2	拥塞避免阶段	127
5.4.3	快速重传阶段	132
5.4.4	快速恢复阶段	135
5.4.5	RTT 和 RTO 的计算	141
5.4.6	STP 小结	142
5.5	STP 对空间信息网络通信环境的适应性分析	144
5.5.1	大带宽时延乘积的影响分析及对策	144
5.5.2	高误码率的影响分析及对策	144
5.5.3	轨间链路时延变化的影响分析及对策	145
5.5.4	目标监视网路由切换的影响分析及对策	146
5.6	OPNET 平台下的 STP 仿真验证	147
5.6.1	OPNET 平台 STP 实现	147
5.6.2	协议评价的性能指标	157
5.6.3	业务模型	160
5.6.4	错误模型	161
5.6.5	仿真参数配置	163

5.6.6 仿真测试	165
5.6.7 仿真小结	186
5.7 一种基于网络编码的自适应传输协议	187
5.7.1 网络编码介绍	187
5.7.2 ATCS 协议设计	188
5.7.3 ATCS 协议实现	192
5.7.4 ATCS 协议性能评估	194
5.7.5 ATCS 协议小结	198
参考文献	198
第 6 章 LEO 卫星仿真平台设计	200
6.1 引言	200
6.2 仿真平台总体框架	201
6.2.1 高配置性仿真平台设计	201
6.2.2 仿真平台组成及其架构	201
6.3 LEO 卫星星座网络域建模	201
6.3.1 卫星星座建模实现	203
6.3.2 卫星动态轨迹更新	203
6.3.3 卫星链路通信模拟实现	206
6.4 LEO 卫星仿真平台节点模型	209
6.4.1 卫星节点模型	209
6.4.2 地面终端节点模型	211
6.5 LEO 卫星仿真平台进程模型	212
6.5.1 卫星 MAC 协议状态机设计	212
6.5.2 路由模块和卫星轨迹进程的交互	215
6.6 仿真平台效率优化	216
6.7 小结	220
参考文献	220
第 7 章 基于 Google Earth 的空间信息网络可视化仿真系统设计与实现 ...	223
7.1 引言	223
7.1.1 GEES 的研究背景和意义	223
7.1.2 国内外研究现状	224
7.1.3 GEES 的优势	225
7.2 系统需求	226
7.3 系统设计	226
7.3.1 可行性分析	226
7.3.2 系统需求分析	228

7.3.3 系统设计思想和实现框架	230
7.4 系统实现	232
7.4.1 系统开发工具简介.....	232
7.4.2 GEES 中关键技术的实现	233
7.5 系统性能评述	246
7.6 小结	248
参考文献	249

第 1 章 空间环境对卫星通信网络 通信链路的影响研究

1.1 引言

卫星通信网络是由多个地球站互相通过一个或多个卫星而组成的通信网络。服务于互联网、通信等领域的无线电链路要求传递到目的地的信息必须具有允许的保真度。但如果以很高的质量传递大量信息,可能会出现无法接受的高价格。因此,卫星链路设计中不仅需要考虑包括工作频率、传播效应、可以接受的卫星-地面终端的复杂性(影响到价格)、噪声影响和规章要求等,还要在传递信息的质量、数量和实际限制,如经济和技术状态之间,要经过多次综合平衡以使得卫星通信网络具有最好的性能价格比。

不同于传统的无线电链路,空间环境的复杂性和多变性使得在进行卫星通信网络设计时,必须考虑到空间环境对于卫星通信网络通信链路的影响,并设法将其减到最小^[1,2]。本章通过系统的理论分析和仿真实验,量化了空间环境及卫星运行姿态等因素对卫星链路的影响,为设计适用于卫星的空间通信网络,提高卫星通信网络通信质量提供了一定的前提条件。

1.2 影响通信链路的主要因素

卫星通信网络中,空间环境、卫星和地面站复杂性等诸多因素都对通信链路具有直接和间接的影响^[3]。其中主要的影响因素包括自由空间损耗、电离层散射、对流层损耗、热环境、宇宙辐射线、地球磁场影响、宇宙尘埃、邻近卫星系统干扰等。

1. 自由空间

各种天线的无线电波都是在自由空间传播的,其传播得越远,在自由空间的损耗就越大。卫星通信中电波的长距离传输特性使得其自由空间损耗更为严重,并且传输信号在传输过程中还会遭到极地的传播损耗,且信号的传播功率越小,越容易遭受空间噪声的破坏。自由空间损耗公式为

$$L_t = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1)$$

2. 电离层

电离层会引起信号极化面的旋转、信号的时延和由于折射造成的信号和角度的变化等。并且其不规则性,使得电离层就像一个收敛和发散的透镜对无线电波进行聚集和散焦,从而造成信号的振幅、相位和到达角等发生短周期的不规则变化,产生所谓的电离层散射,从而影响无线电链路通信质量。

在卫星通信中电离层对于电波传播的影响表现在电离层中的电子会对电波产生吸收损耗,并且电离层对通信的影响随着波段的不同而不同,对于卫星波段,主要是电离层闪烁衰落,电离层闪烁在一次短期事件中是服从 Nakagami- m 分布的,其特征参数与闪烁指数 S_4 相联系:

$$P(i) = \sum_i f_i P_i(i) \quad (1.2)$$

其中, i 为相对于平均值的信号强度或衰落深度; $P(i)$ 为衰落深度的长期统计分布; $P_i(i)$ 为特征参数为 m_i 的 Nakagami- m 分布:

$$P_i(i) = \Gamma(m_i, m_i i) / \Gamma(m_i) \quad (1.3)$$

$$m_i = 1/S_{4i}^2 \quad (1.4)$$

$$S_{4i} = (\xi_i/27.4)^{1/1.26} \quad (1.5)$$

$$f_i = F(\xi_i \leq \xi < \xi_i + 1) \quad (1.6)$$

其中, ξ 为峰值起伏; ξ_i 为其第 i 个值; $F(\xi)$ 为峰值起伏统计分布。

3. 对流层

已有的对流层散射传播机理有多种,综合为湍流散射、中小尺度层结的非相干反射和大尺度渐变层结的相干反射三种。实际上三种机理都可能单独或同时存在。广义散射截面模型综合反映了各种可能情况,其形式为

$$\sigma = A\lambda^{n\theta} - me^{-\gamma h} \quad (1.7)$$

其中, λ 为波长, θ 为散射角, h 为高度; A 为气候气象参数; n, m 为大气结构参数; γ 为高度分布指数。当 $n=m^{-4}$ 时, σ 退化为湍流散射形式。当 $m=4, n=1$ 或 $n=0$ 时, σ 退化为中小层结非相干反射形式。当 $m=6, n=2$ 时, σ 退化为大尺度层结反射形式。参数 A, n, m 和 γ 在推导出传输损耗理论形式后由实验数据统一确定。

另外当无线电波通过对流层时,会受到对流层中氧分子、水蒸气分子和云、雾、雨、雪等的吸收和散射,从而对信号产生了损耗。这种损耗与电波的频率、波束的仰角、气候的好坏都有关系。

4. 热环境和辐射线

空间环境中的各种辐射和温度噪声对无线电链路也具有较大的影响,对卫星通信来讲主要包括太阳直接辐射、地面辐射、地面反射太阳的辐射、地球的红外线辐射、Van Allen 辐射带、太阳辐射线和宇宙辐射线等,其中,热环境的热能密度分别为 $1400\text{W}/\text{m}^2$ 、 $0.012\text{W}/\text{m}^2$ 、 $0.005\text{W}/\text{m}^2$ 。

5. 地球磁场

地球在周围空间产生的磁场,会影响卫星的运动轨迹,从而对卫星通信链路产生一定的影响,其磁场强度可表示为

$$B=B_0 \sqrt{1+3 \sin^2 \phi} \left(\frac{a_e}{r} \right)^3 \quad (1.8)$$

其中, B_0 为赤道表面的磁感应强度($31 \times 10^{-6}\text{T}$); ϕ 为地球磁场纬度; a_e 为地球赤道半径; r 为观察点离地心的距离。

6. 宇宙尘埃

宇宙尘埃是指尺寸在 $100\mu\text{m}$ 以下的颗粒,且越靠近地球越多。

7. 系统自身因素

卫星自身因素包括馈线损耗、天线未对准损耗、进入或来自邻近卫星系统的干扰等。

(1) 馈线损耗。接收机天线和接收机本身之间就有损耗,它出现在连接波导、滤波器和耦合器中,用接收机馈线损耗来表示。实际上,发射天线和高功放输出之间也有这种损耗。值得注意的是,实际设计中如果给出有效全向辐射功率(EIRP)时已考虑了这种损耗,则以后就不要重复考虑。

(2) 天线未对准损耗。理想情况通信时,地球站天线和卫星天线是对准的,这时天线有最大增益。实际上,天线轴向偏离卫星的情况是会经常出现的。其中,地球站天线轴向偏离导致增益下降的情况,称为指向损耗,一般在零点几至一点几分贝之间,没有跟踪装置的大天线,指向损耗可能更大。极化方向未对准天线馈源,也可能产生损耗,但数值通常不大。

(3) 进入或来自邻近卫星系统的干扰。进入或来自邻近卫星系统的干扰,主要表现为当多个卫星系统使用同一频率时,其链路会被其他卫星系统所干扰。例如,在多载波系统对单载波系统的干扰中,多载波的每个载波是窄带的,其功率谱可近似看做相等的;而被干扰的单载波系统是宽带的,只要多载波功率落在它的频带内,就完全变成干扰功率。

8. 其他因素

其他因素包括日凌、卫星蚀等。在卫星绕地球运行的过程中,当太阳、地球和卫星运行到一条直线上时,卫星运行到太阳和卫星-地面接收站之间,卫星-地面接收站的抛物面接收天线对准卫星,也正好对着太阳,阳光直接射进天线波束内,太阳光的射电噪声温度最高将超过 25000K。接收的广播电视信号将受到严重干扰或中断,严重的将损坏设备,天文学界称这种干扰现象为日凌。

卫星蚀与日凌现象相似,是在卫星绕地球运行的过程中,当太阳、地球和卫星运行到一条直线上,而且卫星和太阳分别在地球的对侧时,卫星进入地球阴影区,天文学界称此现象为卫星蚀。

卫星蚀与日凌对于同步轨道卫星的影响比较明显,对于中、低轨道,由于卫星运行周期比较短,对于卫星蚀发生时,一般供电中断的时间比较短,如果卫星上有一定的电力储备能力,则可避免这种现象;日凌现象的影响主要针对卫星与地面站的通信,且其影响与地面站的位置、天线的直径大小等有关。

1.3 卫星通信系统基本参量

卫星和地面站是卫星通信网络中的通信主体,其上的发射机发射功率和接收机的 G/T 值等诸多因素是考量卫星通信系统的基本参量,同样也是影响通信链路链路质量的主要因素。

1. 有效全向辐射功率

EIRP 表示地球站或卫星的发射能力的强弱。EIRP 定义为高功耗的输出功率与天线增益的乘积,而且要考虑高功耗输出到天线馈源口的损耗。如果用 P_T 表示天线馈源口的输入功率, G_T 表示发射天线的增益,则有效全向辐射功率可表示为

$$\text{EIRP} = P_T G_T \quad (1.9)$$

2. G/T 值

G/T 值是天线增益对噪声温度的比,表示天线的低噪声放大器的性能,它与接收机的灵敏度密切相关。参量 G 是表示低噪声放大器输入端的接收天线增益。 G/T 值的计算公式为

$$G/T = G_R - T_s \quad (1.10)$$

其中, G_R 为卫星天线的接收增益; T_s 为卫星接收系统的噪声温度。

1.4 空间环境对卫星链路的影响

1.4.1 卫星链路质量评定方法

与其他通信系统一样,卫星通信系统的首要目标是为地球站之间传输质量满意的信号。在数字卫星通信系统中,地球站接收到的卫星信号的能量情况是用平均比特误码率来衡量的,它是卫星链路载噪比 C/N 、信息比特间隔 T_b (相应于信息比特率 $R=1/T_b$) 和卫星信道噪声带宽 B 的函数。为了能更好地研究空间环境对卫星通信链路的影响,本章使用更为详细的实时比特误码率作为卫星链路质量评定标准设计了以下实验,使用定量仿真和定性分析的方法从星-地链路、星间链路、传输速率等多个方面就空间环境对卫星链路质量的影响进行详细的探讨和研究。

1.4.2 仿真实验

1. 低轨卫星到地面站的星-地链路

1) 大气环境对星-地链路的影响

在星-地链路中,大气环境对星-地链路的影响主要包括降雨、对流层闪烁等。在表 1.1 和表 1.2 所示的参数下,通过仿真实验得到不同大气环境下星-地链路的误码率情况,如图 1.1 所示。

表 1.1 地面站仿真参数(一)

地面站名称	地面站经度 /(°)	地面站纬度 /(°)	地面站发射机天线大小/m	地面站接收机天线大小/m
北京	39.906 193	116.388 039	1.6	1.6

表 1.2 卫星仿真参数(一)

卫星倾角 /(°)	卫星轨道 高度/km	卫星升节点 位置/(°)	卫星初始 相位/(°)	星载发射机 天线大小/m	星载接收机 天线大小/m	发射机发射 频率/GHz	有效全向辐射 功率/dBW
90	1284	0	0	1	1	14.5	30

从上述实验中可以看出,在卫星和地面站本身参数不变的情况下,降雨对于链路通信质量的影响最大,在对流层闪烁对于通信链路同样具有一定的影响,但是影响程度比降雨要小。

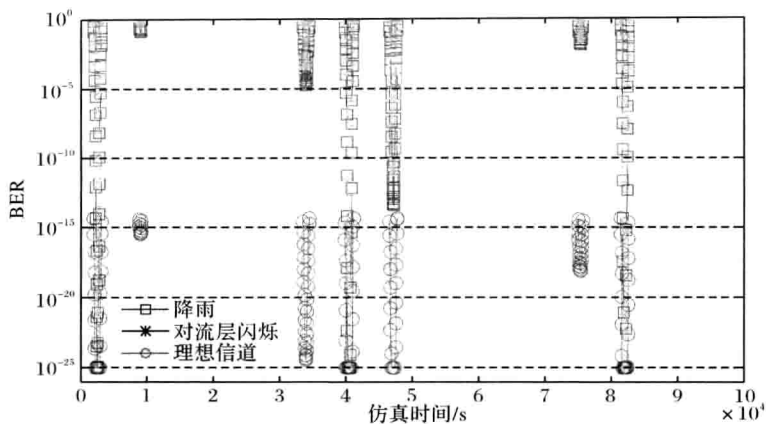


图 1.1 不同大气环境下星-地链路的误码率情况

2) 频率对星-地链路的影响

由于大气气体对于不同频率的信号吸收是不同的,所以误码率与信号的发射频率也有很大的关系。仿真参数的设置同表 1.1 和表 1.2,通过仿真实验得到不同发射频率下星-地链路的误码率情况,如图 1.2 所示。

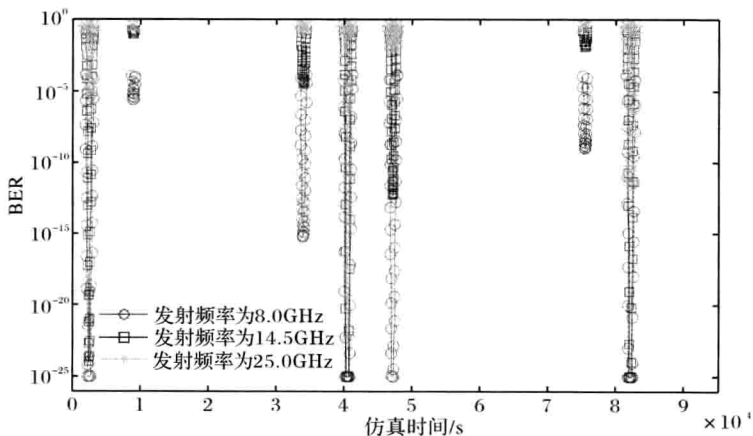


图 1.2 不同发射频率下星-地链路的误码率情况

从实验结论可以看出,在同样的 EIRP 情况下,星-地链路通信质量在一定范围内受到发射机发射频率的影响,频率越低大气层对信号影响越小,性能相对就越好。

2. 高轨卫星到地面站的星-地链路

为了研究高轨卫星到地面站的星-地链路中影响通信链路误码率的因素,在表 1.3 和表 1.4 所示的参数下,通过仿真实验得到不同空间环境下星-地链路的误码率情况,如图 1.3 所示。

表 1.3 地面站仿真参数(二)

地面站名称	地面站经度 /(°)	地面站纬度 /(°)	地面站发射机天线大小/m	地面站接收机天线大小/m
纽约	40.669 800	-73.943 848	1.6	1.6

表 1.4 卫星仿真参数(二)

卫星倾角 /(°)	卫星轨道 高度/km	卫星升节点 位置/(°)	卫星初始 相位/(°)	星载发射机 天线大小/m	星载接收机 天线大小/m	发射机发射 频率/GHz	有效全向辐射 功率/dBW
90	11 284	0	0	1.4	1.4	14.5	30

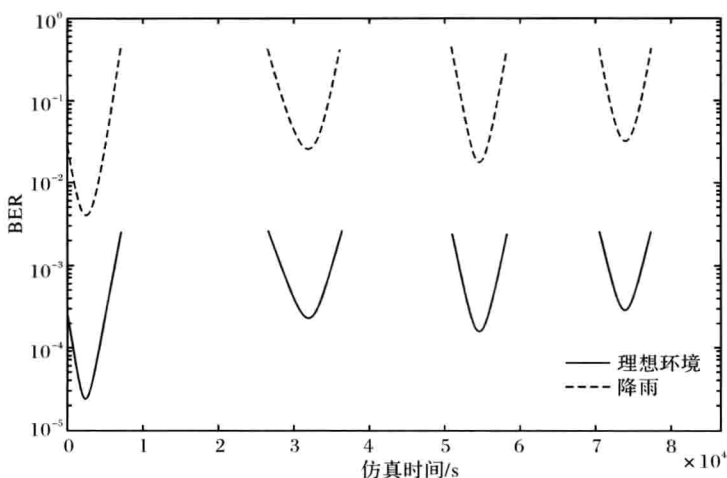


图 1.3 不同空间环境下高轨卫星星-地链路的误码率情况

从实验中可以看出,高轨卫星到地面站的星-地链路中,影响链路通信质量的关键因素依然是降雨等地表条件。当然, Van Allen 辐射、链路长度等同样也是高轨卫星到地面站的星-地链路中通信质量的重要影响因素,这也是高轨卫星的星-地链路和低轨卫星星-地链路通信质量不同的最关键原因。

对比图 1.2 的实验结果可知,在相同的情况下,高轨卫星到地面站的链路的误码率比低轨卫星到地面站的星-地链路更高。高轨与低轨链路相比,用户接收信