

空间X射线通信概论

赵宝升 苏 桐 盛立志 刘 舵 编 著



科学出版社

内容简介

空间 X 射线通信概论

赵宝升 苏 桐 盛立志 刘 舵 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

X 射线通信,顾名思义,就是将 X 射线作为载波,将信息通过调制加载至 X 射线脉冲上并向外发送。实际上仍然是一种利用电磁波的通信手段,与微波通信、激光通信等传统通信方式本质上并无不同。但 X 射线频率更高,单光子能量更大,当将其应用于空间通信时,对理论建模、核心元器件都提出了新的要求。同时,X 射线通信带来了传统微波与激光通信所不具备的优点:X 射线通信可以在电磁屏蔽环境下正常工作,不仅可望用于超高速飞机通信和飞行器返回地球时进入黑障区的通信,还将为未来复杂条件下的空天一体化战争提供通信安全保障。可以预见,空间 X 射线通信不仅是对微波与激光通信的补充,在复杂的空间环境与特殊应用场合中,更是对传统通信方式颠覆性的替代。

本书共分 7 章,主要介绍了 X 射线通信的意义、未来的潜在应用以及国内外研究进展,X 射线的调制发射,X 射线探测器,X 射线聚焦光学等基本概念和实验结果。

本书可供空间通信、X 射线探测以及 X 射线脉冲星导航的科技工作者、大专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

空间 X 射线通信概论/赵宝升等编著. —北京:科学出版社,2016.3
ISBN 978-7-03-047718-7

I. ①空… II. ①赵… ①X 射线—空间通信系统—研究
IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 052925 号

责任编辑:任 静 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:325 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

X 射线是波长范围为 $0.01\sim 10\text{nm}$ 的电磁波, X 射线通信则是一种利用 X 射线传输信息的通信方式, 是将信息加载至 X 射线的特征参数上进行传递的方法。X 射线通信系统主要由调制发射装置、X 射线光学系统、接收解调装置及配套电子学构成: 发送端通过对 X 射线进行调制, 将编码后的信息发送出去, 经由信道传输后, 作为载波的 X 射线被探测器接收并解调出原始信息, 完成通信过程。相比于传统的通信方式, 例如微波与激光通信, 将 X 射线作为载波应用于空间通信有以下优势: 极大的信道容量与通信带宽, 高度的保密性与强抗干扰能力, 体积小、重量轻、功耗低。因此, X 射线通信被誉为是“下一代革命性的概念”。

本质上来说, X 射线只是一种频率更高的电磁波, X 射线通信也仍然属于空间光通信的范畴, 但得益于其光子能量大、穿透性强的特点, X 射线通信在复杂的空间环境及特殊应用场合里有着相较于微波与激光通信更加优异的表现。其潜在应用包括穿透等离子体及“黑障区”内的通信、编队卫星的广播式高保密通信等领域。

美国国家航空航天局(NASA)于 2007 年首次提出了 X 射线通信的概念, 此后, NASA 与斯坦福大学等学术机构都提出了基于不同调制原理的通信方案并开展了相关研究。其中, NASA 预计将于 2017 年进行太空实验, 以试验 X 射线通信的工程应用、获取其核心参数指标。自 2011 年起, 作者所在团队即在国内首家提出并开展了 X 射线通信的相关研究, 并以与美国完全不同的技术方案搭建了 X 射线通信地面实验系统, 在核心元器件的研制及基础理论的探索方面获得了一定的成果与积累。2014 年, “基于 X 射线深空通信的基础理论与实验研究”得到国家自然科学基金委员会的资助, 在这里表示深深的感谢。

X 射线通信作为一个新概念, 由于其在空间通信方面具有的潜在优势, 因此在国际上获得了极大的重视。本书以作者所在团队在 X 射线脉冲发射源、探测接收装置、X 射线聚焦光学及 X 射线通信传输理论方面的研究为主体, 结合散见于国内外各种学术期刊上的学术观点加以综合, 力求就空间 X 射线通信为广大读者提供一个较为完整的系统介绍。希望本书起到抛砖引玉的作用, 激发更多读者的研究兴趣。此外, 书中不足之处在所难免, 望读者批评指正。

在撰写本书过程中参考了国内外科技工作者的大量文献, 就我们所知在文中对这些文献都加以标注, 在此给予真诚的致谢, 如有疏漏敬请谅解。

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所光电子学研究室各位同事的支持和帮助。

赵宝升

2016 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 关于 X 射线	1
1.1.1 X 射线的发现	1
1.1.2 X 射线的应用	3
1.2 无线通信发展历史	7
1.2.1 电磁波的发现	7
1.2.2 无线电报发明	7
1.2.3 无线电通信发明	7
1.2.4 激光通信的出现	8
1.2.5 量子通信的实现	10
1.2.6 X 射线通信的提出	12
1.3 X 射线通信意义	12
1.3.1 X 射线通信的潜在应用	14
1.3.2 X 射线通信的发展	16
1.4 X 射线通信关键技术	18
1.5 本章小结	19
第 2 章 无线数字通信系统	20
2.1 模拟信号与数字信号	20
2.1.1 概述	20
2.1.2 模拟通信与数字通信系统	22
2.2 数字通信系统	24
2.2.1 数字通信发展的回顾	24
2.2.2 无线数字通信系统的组成	26
2.2.3 主要性能指标	28
2.3 空间 X 射线通信系统	29
2.3.1 X 射线通信系统	30
2.3.2 X 射线发射源	32
2.3.3 X 射线聚焦光学	35
2.3.4 X 射线探测器	37

2.3.5	深空信道特征	38
2.3.6	编码调制	41
2.4	本章小结	44
第 3 章	编码调制	45
3.1	信源编码	45
3.1.1	信源的数学模型	45
3.1.2	离散随机信息的对数量度	47
3.1.3	平均互信息和熵	48
3.1.4	连续随机变量信息的度量	48
3.1.5	离散无记忆信源编码	49
3.2	差错控制编码	52
3.2.1	差错控制编码分类	52
3.2.2	线性分组码	54
3.2.3	卷积码	59
3.2.4	Turbo 码	64
3.3	数字调制	69
3.3.1	OOK 调制	69
3.3.2	PPM 调制	70
3.3.3	L-PPM 性能分析	72
3.3.4	PPM 解调	79
3.4	同步策略	82
3.4.1	PPM 位同步	83
3.4.2	PPM 帧同步	83
3.5	本章小结	84
第 4 章	X 射线通信发射系统	85
4.1	X 射线产生	85
4.1.1	X 射线管	85
4.1.2	激光等离子体光源	88
4.1.3	同步辐射光源	88
4.1.4	X 射线自由电子激光	90
4.2	X 射线与物质相互作用	90
4.2.1	X 射线的散射和衍射	91
4.2.2	光电效应	93
4.2.3	X 射线的吸收	94
4.3	X 射线调制方法	96

4.3.1	电光调制	96
4.3.2	斩波器机械调制	97
4.3.3	光阴极调制 X 射线管	99
4.3.4	飞秒激光调制 X 射线源	100
4.3.5	普通热阴极调制 X 射线管	100
4.4	栅控 X 射线调制源	101
4.4.1	栅控 X 射线管基本原理	101
4.4.2	栅控 X 射线管设计	102
4.4.3	栅控 X 射线管研制	111
4.4.4	栅控 X 射线管测试	115
4.5	碳纳米管冷阴极	122
4.5.1	碳纳米管冷阴极与栅控 X 射线源	122
4.5.2	碳纳米管冷阴极的研制	122
4.6	X 射线脉冲星模拟光源	126
4.6.1	研究意义	126
4.6.2	技术方案	127
4.6.3	总体性能指标	132
4.7	本章小结	132
第 5 章	X 射线聚焦光学	133
5.1	X 射线聚焦原理	133
5.1.1	基于反射式的 X 射线聚焦光学	133
5.1.2	基于衍射式的 X 射线聚焦光学	137
5.1.3	基于折射式的 X 射线聚焦元件	138
5.2	X 射线聚焦光学的空间应用	139
5.2.1	Chandra 望远镜	139
5.2.2	XMM-Newton 望远镜	140
5.2.3	Suzaku (朱雀) 计划	141
5.2.4	Astro-H	141
5.2.5	NICER 计划	142
5.3	多层嵌套式 X 射线聚焦光学的设计	143
5.3.1	X 射线聚焦光学设计的理论基础	143
5.3.2	多层嵌套式 X 射线聚焦光学设计原则	146
5.4	X 射线聚焦光学的研制	149
5.4.1	反射镜基底选材及加工	149
5.4.2	反射镜片的加工	150

5.4.3	反射镜片的镀膜	153
5.4.4	整体支架结构的精密加工与装配	159
5.5	X 射线聚焦光学性能测试	160
5.5.1	真空中测量 X 射线准直性能	160
5.5.2	焦距与焦斑的测量	161
5.5.3	聚焦效率测量	162
5.5.4	聚焦光学在 X 射线通信上的应用	163
5.6	本章小结	166
第 6 章	X 射线探测器	167
6.1	X 射线探测器性能	167
6.1.1	X 射线探测器基本特性参数	167
6.1.2	X 射线探测器分类	169
6.1.3	准直型探测器和聚焦型探测器	170
6.2	常用 X 射线探测器介绍	170
6.2.1	气体正比计数器	170
6.2.2	闪烁体探测器	171
6.2.3	量热计探测器	173
6.2.4	微通道板探测器	173
6.2.5	半导体探测器	173
6.2.6	CCD 探测器	175
6.2.7	SCD 探测器	175
6.3	基于微通道板的探测系统	176
6.3.1	MCP 探测系统构成	176
6.3.2	输入窗	179
6.3.3	光电阴极	179
6.3.4	微通道板	185
6.3.5	收集阳极	186
6.3.6	电子读出系统	190
6.4	基于硅漂移探测器的探测系统	197
6.4.1	工作原理及几何结构	199
6.4.2	SDD 噪声来源分析	199
6.4.3	SDD 探测电子学总体方案	200
6.4.4	制冷设计	201
6.4.5	高压控制	204
6.4.6	信号预处理	205

6.4.7 模数转换模块设计	209
6.4.8 基于 FPGA 的采集电路	210
6.5 本章小结	220
第 7 章 空间 X 射线通信研究进展	221
7.1 功率传播	221
7.1.1 噪声功率分析	221
7.1.2 信号功率的传播: 自由空间损耗	223
7.1.3 聚焦/准直光学效率	225
7.2 参数指标	228
7.2.1 通信距离与通信速率	228
7.2.2 OOK 下误码概率分析	229
7.3 实验分析	232
7.3.1 X 射线发射源的测试	233
7.3.2 聚焦光学增益的测定	234
7.3.3 MCP 探测器的测试	235
7.3.4 语音通信实验	236
7.3.5 随机码信源实验	236
7.3.6 电子学补偿	240
7.4 X 射线穿透电磁屏蔽通信	246
7.4.1 研究目的	246
7.4.2 研究目标	246
7.4.3 技术指标	246
7.4.4 方案论证	247
7.5 本章小结	252
参考文献	253

第 1 章 概 述

人类科学发展历史源远流长,从牛顿发现万有引力到电磁学与光学系统理论的建立,再到爱因斯坦光电效应与相对论的提出,在此基础上通信理论不断发展,推动着人类文明的高速发展。从微波通信到激光通信,再到后来的量子通信,人类探索太空的脚步从未停止过。从月球到太阳系,从太阳系中的金星、土星,再到银河系,随着人类探索宇宙的距离越来越远,对通信技术也提出了新的要求。但在复杂多变的空间环境中,传统的微波、激光等通信手段由于自身特性,在受到屏蔽干扰及空间天气变化的情况下,可靠性大大降低甚至无法通信。X 射线因其光子能量大、频率高、穿透能力强等特点有可能为未来无线通信带来革命性的影响,并将发挥其独特的作用。

X 射线波长更短,因此理论上通信系统带宽更高,且因为其光子能量大、频率高,不易受高能粒子与空间电磁场的影响,利用 X 射线进行通信具有高度的定向性和保密性。2007 年,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center)的天文物理学家 Keith Gendreau 博士提出了 X 射线通信这一概念,被称为未来通信技术中“革命性”的概念。

1.1 关于 X 射线

1.1.1 X 射线的发现

X 射线^[1]是波长介于紫外线与 γ 射线间的电磁辐射,是一种波长很短的电磁波,其波长介于 $0.001\sim 10\text{nm}$ 。X 射线具有很高的穿透本领,能透过许多对可见光不透明的物质,如墨纸、木料等。这种肉眼看不见的射线可以产生诸多效应,譬如使很多固体材料发出可见的荧光,使照相底片感光以及空气电离。波长越短的 X 射线能量越大,波长越长的 X 射线能量越低。当波长小于 0.01nm 时称为超硬 X 射线,波长在 $0.01\sim 0.1\text{nm}$ 的称为硬 X 射线, $0.1\sim 10\text{nm}$ 的称为软 X 射线。

1901 年,首届诺贝尔物理学奖授予德国物理学家伦琴(Wilhelm Röntgen, 1845~1923),作为对其在 1895 年发现了 X 射线的表彰。1895 年,物理学已经有了相当的发展,它的几个主要部分——牛顿力学、热力学和分子运动论、电磁学和光学,都已经建立了完整的理论,在应用上也取得了巨大成果。这时物理学家普遍认为,物理学已经发展到了极致,以后的任务无非是在细节上作些补充和修正而已,已经不会再有重大的变革发生。19 世纪末,阴极射线研究是物理学的热门课题。许多物理实验室都致力于这

方面的研究，伦琴同样也产生了兴趣。1895 年 11 月 8 日，正当伦琴继续在实验室里从事阴极射线的实验工作时，一个偶然事件引起了他的注意。漆黑的房间里，在不超过一米远的小桌上有一块亚铂氰化钡做成的荧光屏发出了闪光。当荧光屏被移动时，荧光屏的闪光，仍随放电过程的节拍断续出现。六个星期之后，伦琴确认这是一种新的射线。1895 年 12 月 22 日，他邀请夫人来到实验室，用他夫人的手拍下了第一张人手 X 射线照片（图 1.1）。



(a) 威廉·伦琴



(b) 第一张 X 射线透视相片

图 1.1 X 射线的发现者威廉·伦琴和第一张 X 射线透视相片

1895 年年底，他以快报方式将这一发现公之于众。他把这一新射线称为 X 射线，因为他当时确实无法确定这一新射线的本质。发现 X 射线的消息很快传遍全球。由于这一射线有强大的穿透力，能够透过人体显示骨骼和薄金属中的缺陷，在医疗和金属检测上有重大的应用价值，引起了人们的极大兴趣，迅速被医学界广泛利用，成为透视人体、检查伤病的有力工具，后来又发展到用于金属探伤，对工业技术也有一定的促进作用。X 射线的发现对自然科学的发展有极为重要的意义，它像一根导火线，引起了一连串的反应。许多科学家投身于 X 射线和阴极射线的研究，进而促进了放射性、电子以及 α 、 β 射线的发现，为原子科学的发展奠定了基础。同时，由于科学家探索 X 射线的本质，发现了 X 射线的衍射现象，并由此打开了研究晶体结构的大门；根据晶体衍射的数据，可以精确地求出阿伏伽德罗常量。在研究 X 射线的性质时，还发现 X 射线具有标识谱线，其波长有特定值，和 X 射线管阳极元素的原子内层电子的状态有关，由此可以确定原子序数，并了解原子内层电子的分布情况。此外，X 射线的性质也为波粒二象性提供了重要证据。X 射线是 19 世纪末 20 世纪初物理学的三大发现（X 射线、放射线、电子）之一，这一发现标志着现代物理学的开始。一个多世纪以来，X 射线已经广泛而又深刻地影响着我们的生活。

1.1.2 X射线的应用

伦琴发现X射线至今已有120年历史了，X射线得到了广泛的应用^[2]，为人类做出了重大贡献，特别是在医疗透视方面的应用：利用X射线透视，医生可以准确地诊断出病症。同时在物质的结构分析等工业和科技领域也有着重要应用。以下仅列举几个重要应用。

1. 应用医学诊断

因为X射线的波长很短，穿透本领很强。利用X射线的穿透作用、差别吸收、感光作用与荧光作用等效应，X射线穿过人体时，将受到不同程度的吸收。例如，骨骼吸收的X射线量较肌肉吸收的量更多，故而通过人体后的X射线的强弱便携带了人体各部分密度分布的信息，其在荧光屏或胶片上所成的像就有较大差别。根据图像阴影浓淡的对比，便可判断出人体某一部分是否正常。X射线诊断技术是世界上最早应用的非创伤性的内脏检查技术。不仅如此，可以将不同角度的X射线影像合成三维图像以获得更为准确的检查信息，在医学上常用的电脑断层扫描(CT)便是基于这一原理。它使医生能看到人体内各种内脏器官的横断面图像，因而能准确诊断许多病症，大大丰富了医用X射线诊断的内容。另外，X射线还可应用于医学治疗当中，主要依据其生物效应，应用不同能量的X射线对人体病灶部分的细胞组织进行照射时，即可使被照射的细胞组织受到破坏或抑制，从而达到对某些疾病，特别是肿瘤的治疗目的。

X射线在医学诊断上的应用如燎原之火，如今，放射医学甚至已经成为了医学的一个专门领域，这可能也是X射线技术应用最广泛的地方。

2. 窥探物质结构

1912年，德国物理学家劳厄(Max Theodor Felix Von Laue, 1879~1960)大胆假设，如果X射线是一种波长很短的电磁波，晶体中的原子又都按一定规则排列，那么当X射线穿透晶体时，应当跟光线穿过衍射光栅后一样，也会出现衍射图样。他的这一设想不久就被实验所证实。规则分布在感光底片上的衍射黑点，被称为“劳厄图样”，它就是晶体的微观结构在宏观上的体现。此外，X射线实时成像直观，照相底片可以长时间保存，对薄壁工件无损探伤灵敏度高，对体积状缺陷敏感，缺陷影像的平面分布真实、尺寸测量精确，对工件表面光洁度没有严格要求，并且材料晶粒度对检测结果影响不大，适应性极强，可以适用于各种材料内部缺陷检测，故在工业无损探伤领域里占据着重要的位置。

3. 利用X射线制备热收缩材料

塑料在人们日常生活中应用广泛，其中聚乙烯材料就是一种乙烯单体聚合成线状分子的集合体，但是它们不具有热收缩性能，不论是塑料膜，还是管材，在商店里是

什么样,应用时就是什么样。所谓热收缩材料就是该材料经加热以后即收缩变形。遇冷时是一个粗管,当加热以后可以收缩成细管,并紧贴在其附着的物体表面,从而可保证物体的绝缘或保证金属表面的防腐。如果材料是薄膜,用此包装食品,一经加热,膜材料就收缩紧包住食品,使食品空气隔绝,起到保鲜作用。

普通的聚乙烯管并不具有热收缩性。聚乙烯由乙烯单体聚合而成,乙烯单体分子式是 $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$,在聚合条件下,每个乙烯单体分子的双键打开,若干个分子聚合成高分子的聚乙烯呈线状。我们平时所看到的聚乙烯塑料就是由乙烯单体聚合的线性分子堆积在一起构成的。

但是聚乙烯塑料在 X 射线作用下,线性分子间就会产生化学键,这就是辐射交联,辐射剂量越大,交联度就越大。辐射交联的结果是使聚乙烯塑料由线状结构变成网状结构即立体结构。新生成的材料有奇妙的“记忆效应”。例如,管材可扩粗,然后冷却定形成粗管,这种管子只要再受热即可恢复到扩管前塑料管的原管径大小,所以称它为“有记忆效应”的材料。热收缩聚乙烯材料制备的管子,可以方便地用来保护电缆、光缆的接头和金属管杆等。热收缩材料不仅可制备成径向收缩的热缩管,同时还可制备成经纬双向收缩的塑料膜,用在包装、保护物品等方面。神奇的热收缩材料,今后将会在人们生活和工农业生产中得到更广泛的应用。

4. X 射线脉冲星导航

1967 年,剑桥大学卡文迪许实验室的贝尔博士发现了第一颗脉冲星^[3,4]。据天文学家推断脉冲星是质量非常庞大的恒星经过非常漫长的演化而形成的中子星。在演化的末期,恒星因为长期燃烧而导致核原料匮乏,致使恒星内部的辐射压力小于自身的引力作用,这样在引力作用下恒星开始逐渐向内部坍缩,核外的电子被挤进原子核内部,与核内的质子中和形成中子星。在恒星的整个坍缩过程中,角动量是守恒的,这样坍缩后的中子星因为半径的减小,其自转的角速度就变得非常快。脉冲星周围环绕着非常强的电磁场和引力场,因此脉冲星的辐射只能沿着磁轴方向发射出来,形成一个圆锥形的辐射区。由于脉冲星的自转轴和磁极轴间存在夹角,导致脉冲星的磁极辐射在空间周期性扫描,这样通过探测器就可以接收到非常具有规律性的周期性脉冲信号,可谓天然的导航信标,如图 1.2 所示。

美国科学家德恩斯于 1974 年提出了利用脉冲星的射电波段来实现航天器的自主定位的方法^[5],该方法因为脉冲星射电辐射非常微弱,需要大口径的探测天线以及长达 24 小时的积分时间,因而在工程上无法实现。在德恩斯的基础上,切斯特和贝特曼于 1981 年提出了使用脉冲星的 X 射线辐射为星际航天器导航^[6],有效地减小了探测器口径并减少了弱信号积分时间,使利用脉冲星实现航天器的自主导航在工程上成为可能。美国海军研究实验室伍德于 1993 年提出了在先进技术研究及全球观测卫星上安装 X 射线探测器,进行 X 射线源的观察,搜索可用于导航的 X 射线脉冲星源。1999 年,美国 X 射线探测器获取了大量的关于 X 射线源的观测数据,并开展了 X 射线源自主

导航的研究^[7-9]。图 1.3 是全球观测卫星上所安装的两台气体正比计数探测器，能够探测能谱范围在 $1\sim 15\text{keV}$ 的 X 射线，探测器有效面积为 0.1m^2 。

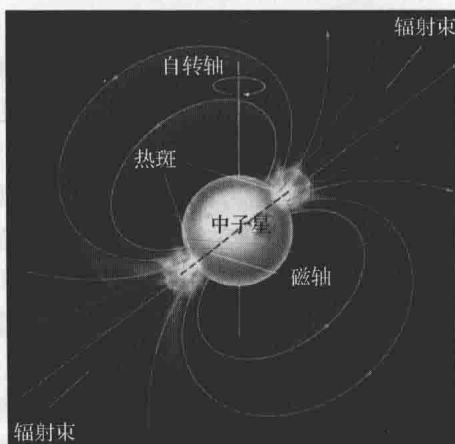


图 1.2 脉冲星导航示意图

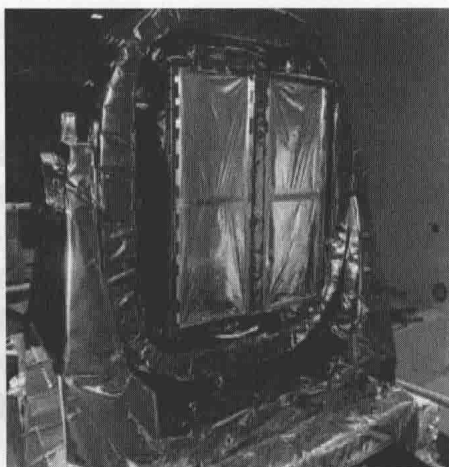


图 1.3 ARGOS 卫星实验平台和 X 射线气体正比计数探测器

美国国防部国防预先研究项目局（DARPA）于 2004 年初提出了基于 X 射线源的自主导航定位验证（XNAV）计划，由马里兰大学的皮恩斯教授全面负责，研究利用脉冲星来进行航天器自主导航的可行性^[9,10]。基于 X 射线源的自主导航定位验证计划分为三个阶段进行实施。

（1）可行性论证阶段，从 2005 年 3 月开始到 2007 年 1 月结束。其中指出了研制具有较高的灵敏度和时间分辨率的 X 射线探测器。

（2）原理样机研制阶段，从 2007 年 2 月开始到 2008 年 8 月结束。在这一阶段中要求研制宇航级的 3 套 X 射线探测器系统，包括 X 射线光子计数探测器和 X 射线成像仪等。

(3) 飞行演示验证阶段, 从 2008 年 9 月开始到 2009 年 8 月结束。要求完成全套的 X 射线探测器系统, 在空间站上进行实验。

此外, 美国 NASA 戈达德空间飞行中心预计于 2017 年发射一颗 NICER 卫星用于 X 射线脉冲星导航的太空实验, 卫星上将装载 X 射线调制发射源、X 射线聚焦装置、硅漂移 X 射线探测器 (SDD), 用以研究验证利用脉冲星来进行航天器自主导航的可行性。

我国关于 X 射线脉冲星自主导航理论方面的研究起步较晚。中国科学院国家授时中心的杨廷高等于 2005 年, 在《脉冲星自主导航概述》一文中对 X 射线脉冲星自主导航的理论进行了系统的介绍^[5]。国防科学技术大学的郑伟和李黎在《脉冲星导航及其在深空探测中的应用》中, 提出了在深空探测中利用 X 射线脉冲星实现航天器自主导航的优势及可行性^[11]。装甲兵工程学院的费保俊等于 2006 年详细讨论了 X 射线脉冲星脉冲到达时间的时间转换方程中的广义相对论效应, 得到了高精度的光传播时间方程^[12,13]。熊凯等于 2007 年提出利用最小二乘法和卡尔曼滤波两种方法来处理脉冲星的观测量, 对 X 射线脉冲星导航的可行性进行了仿真验证^[14]。为了降低脉冲星计时残差中噪声的影响, 仲崇霞和杨廷高给出了一种基于小波域中的维纳滤波方法^[15]。郑伟、孙守明和汤国建于 2008 年, 给出了一种 X 射线脉冲星的脉冲到达时间 TOA 的预报算法, 理论研究了位置估计算法^[16]。2009 年 8 月, 中国空间技术研究院帅平、李明、陈绍龙和黄震撰写的《X 射线脉冲星导航系统原理与方法》一书系统地阐述了 X 射线脉冲星导航的基本概念和原理、基础理论和方法、数学模型和算法、数值试验和结果。2009 年中国科学院西安光学精密机械研究所 (简称西安光机所) 赵宝升团队开展了 X 射线脉冲星导航地面模拟系统的研究, 2010 年提出了利用多片 MCP 集成为大面积 X 射线探测器的方案并进行了关键技术的研究, 研制的第三代“X 射线脉冲星模拟光源”于 2015 年元月通过了成果鉴定 (具体见 4.5 节)。随后山东航天电子技术研究所与西安光机所也合作开展了基于 MCP 空间 X 射线探测器的研究和工程化, 并计划未来实现空间应用。

5. X 射线通信

2007 年, 美国 NASA 的戈达德空间飞行中心的天文物理学家 Keith Gendreau 博士提出了 X 射线通信这一概念, X 射线通信也被认为是下一代通信的革命性概念。美国斯坦福大学物理系的 Catherine Kealhofer 等于 2011 年提出一种可以用于空间通信的超快 X 射线发射源技术。X 射线通信这一概念首次进入了人们的视线。

NASA 预计 2017 年将在其发射的基于脉冲星导航验证实验的 NICER 卫星上装载一个 X 射线发射源, 一方面用来校准 X 射线探测器; 另一方面为未来 X 射线通信在太空中进行实验做准备, 不久的将来再发射一个载有 X 射线探测器的卫星即可进行 X 射线通信实验。

1.2 无线通信发展历史

1.2.1 电磁波的发现

1820年,丹麦物理学家奥斯特发现,当金属导线中有电流通过时,放在它附近的磁针便会发生偏转。英国物理学家法拉第指出,奥斯特的实验证明了“电能生磁”。随后他还发现了导线在磁场中运动时会有电流产生的现象,此即所谓的“电磁感应”现象。

麦克斯韦进一步用数学公式表达了法拉第等的研究成果,并把电磁感应理论推广到空间。他认为,在变化的磁场周围会产生变化的电场,在变化的电场周围又将产生变化的磁场,如此一层层地像水波一样推开去,便可把交替的电磁场传得很远。1864年,麦克斯韦发表了电磁场理论,成为人类历史上预言电磁波存在的第一人。直到1887年,赫兹通过实验得出了电磁能量可以越过空间进行传播的结论。这一发现不但证明了麦克斯韦理论的正确性,更重要的是促使了无线电的诞生,也是整个移动通信的发源点。

1.2.2 无线电报发明

赫兹通过闪烁的火花,第一次证实了电磁波的存在,但他却断然否定利用电磁波进行通信的可能性。他认为,若要利用电磁波进行通信,需要有一个面积与欧洲大陆相当的巨型反射镜,显然这是不可能的。

1894年,波波夫改进了无线电接收机并为之增加了天线,使其灵敏度大大提高。1896年,波波夫成功地用无线电进行莫尔斯电码的传送,距离为250米,电文内容为——“海因里斯·赫兹”。

1897年5月18日,马可尼改进了无线电传送和接收设备,在布里斯托海峡进行无线电通信取得成功,把信息传播了12公里。1901年,英国的无线电报能发送到大西洋彼岸,不过当时的天线是用风筝牵着的金属导线。1902年在英国与加拿大之间正式开通了越洋无线电报通信电路,使国际间电报通信跃入一个新的阶段。在中国,电报的最早应用是1920年7月中华邮政开办邮传电报业务。

1.2.3 无线电通信发明

1906年,美国物理学家费森登主持和组织了人类历史上第一次无线电广播。这套广播设备是由费森登花了4年的时间设计出来的,包括特殊的高频交流无线电发射机和能调制电波振幅的系统,从这时开始,电波终于可以载着声音开始传递。

与此同时,无线电通信逐渐被用于战争。在第一次和第二次世界大战中,它都发挥了很大的威力,以致有人把第二次世界大战称为“无线电战争”。

1920年,美国匹兹堡的KDKA电台进行了首次商业无线电广播。广播很快成为

一种重要的信息媒体而受到各国的重视。后来,无线电广播从“调幅”制发展到了“调频”制,到 20 世纪 60 年代,又出现了更富有现场感的调频立体声广播。

无线电频段有着十分丰富的资源。在第二次世界大战中,出现了一种把微波作为信息载体的微波通信。这种方式由于通信容量大,至今仍作为远距离通信的主力之一而受到重视。在通信卫星和广播卫星启用之前,它还担负着向远地传送电视节目的任务。微波通信是指利用波长在 $1\text{mm}\sim 1\text{m}$ 的电磁波进行的通信,其所对应的频率范围是 $0.3\sim 300\text{GHz}$ 。由于微波的频率较高,其在空中的传播特性与光波相近,即直线传播,遇到阻挡就被反射或被阻断,因此微波通信的主要方式是视距通信,超过视距以后需要中转继发。微波通信范围极广,涵盖地面微波接力通信、对流程散射通信、卫星通信、空间通信及工作于微波波段的移动通信。

1.2.4 激光通信的出现

激光技术的出现,使人们采用相干光源进行通信成为可能。激光的产生,一方面使电子学的概念、理论和技术推进到光频电磁波段,产生光频电子学;另一方面使传统光学的面貌产生革命性的变换,产生量子光学、信息光学和非线性光学等分支,统称为现代光学。

人们自然地想到激光应该能够像微波那样经过空气传送或经过空腔光学波导传输。贝尔实验室的科学家用激光器做了一个模拟器,建在纽泽西州的赫尔姆戴尔的主实验室和附近的克罗福德山实验室的屋顶之间,经过多次实验,没有取得预期效果。对于无线激光通信而言,雨、雪或浓雾都能使信号强度大大衰减,例如,经过 26km 的路程,信号便会衰减 60dB 以上。1958 年,美国物理学家肖洛和汤斯发表了著名的关于激光原理的论文,美国休斯飞机公司的科学家梅曼于 1960 年制成世界第一台固体激光器,它的激励系统是一支能突然爆发出强光的螺旋型闪光灯,激光物质是插在螺旋管中间的一支红宝石棒。红宝石经闪光灯发出的光照射后,发出激光,并通过光学谐振腔的加强和调节后出射。我国在同一时间也开展了在该领域的研究,1961 年夏,我国第一台红宝石激光器研制成功。此后几年内,我国激光技术迅速发展,各种类型的固体、气体、半导体和化学激光器相继研制成功。1964 年 9 月用激光演示传送电视图像,1964 年 11 月实现 $3\sim 30\text{km}$ 的通话,这标志着我国在无线激光领域的开端。1964 年,我国开始进行高能钽玻璃激光系统研究,1965 年开始研究高功率激光系统和核聚变,由于技术上的综合性和高难度,有力地牵引和带动了激光技术各方面在中国的发展。1965 年开始立项研究激光核聚变,建成了输出功率为 10^{10}W 的纳秒级激光装置。

激光通信(图 1.4)是涵盖多种领域的综合性技术,其关键技术问题主要有两个方面:一是远距离激光信号的发射与接收技术,其发送和接收信号的距离从上万米的空间激光通信到几十千米的地面激光通信;二是激光信号的捕获和自动跟瞄技术。当通信距离比较远时,在背景光比较强的情况下,信号的捕获和跟踪就是一个重要的问题,特别是在空间激光通信中,背景光产生很强的干扰,大大增加信号接收的难度。