

数字通信

—— 卫星和地球站工程

美 凯米洛·费赫 著

雷震洲 鄧广增 译



人民邮电出版社

1



数字通信

卫星和地球站工程

【美】 凯米洛·费赫 著
雷震洲 鄧广增 译

人民邮电出版社

2060/11

DIGITAL COMMUNICATIONS:
SATELLITE/EARTH STATION ENGINEERING
KAMILO FEHER
PRENTICE-HALL, INC., Englewood cliffs, N.J1983

内 容 提 要

本书以清晰易懂的笔法全面阐述了数字卫星通信系统的原理、设计和应用，并从工程的角度给出了分析和设计数字通信系统所必须的工具。全书共分十章，包括卫星通信系统构成、线路计算、与地面设备的接口、数字调制技术、纠错编码、载波和定时恢复、时分多址系统、再生式卫星系统以及每载波单路数字地球站。其中对数字调制技术和时分多址系统的论述特别详尽，是本书的独到之处。

每章都附有工程性很强的实例和习题。文中引用的大量参考文献都集中附于书末，这些文献对读者将十分有益。

本书宜用作高等院校高年级学生或研究生教材，也是电信工程技术人员的一本有价值的参考书。

数 字 通 信 卫 星 和 地 球 站 工 程 [美]凯米洛·费赫 著 雷震洲 鄧广增 译 责任编辑：李小曼

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1987年4月第 一 版
印张：17 4/32 页数：274 1987年4月河北第1次印刷
字数：450 千字 印数：1—3,400 册

统一书号：15045·总3229-无6377

定价：4.60 元

0210188

代 序

曾经举世瞩目的卫星通信如今不再是新奇事物了。但是，在六十年代和七十年代期间，由于卫星技术和卫星通信业务迅猛发展和增长使卫星通信在我们跨入八十年代时，成为我们日常生活中不可缺少的一部分。

另外，一个即将成为我们日常通信世界中不可缺少的部分，则是正在迅速发展的数字卫星通信技术。

在六十年代，人们基本上把数字卫星通信看作是理论上和实验中的东西；在七十年代，开始初见成效；而现在，八十年代显然是数字卫星通信的十年。在六十年代和七十年代期间，曾经是主要通信手段的模拟卫星通信技术，再不能很好地满足飞快发展的未来通信需求了。因此，各种数字通信系统包括为数越来越多的通信卫星系统，现在正在实施之中。在仅仅十年多一点的时间内，不少先进的通信系统把数字技术从初级阶段引向成熟阶段，现在已经有千千万万的人正在从这些先进系统中获益。可以说，数字通信的时代已经到来。

因此，现在正是出版一本有关数字卫星通信的有充分论据和实用价值的书的最好时机，而凯·费赫博士恰恰为我们编写了这样一本书。

《数字通信——卫星和地球站工程》一书的最主要贡献之一，在于它所涉及的范围极广。它涉及了数字无线电通信的所有方面，包括空间的和地面的。

整部著作反映了作者在工业和科研方面的多年经验。毫无疑问，那些企图掌握有关整个现代卫星系统（包括地面部分）的广泛知识的工程师们将会对此书发生特别兴趣。由于认识到卫星地球站

设计的重要性，此书包含了许多有关地球站工作原理、设计和操作的有价值材料。

数字卫星通信技术上的优点将在费赫教授的这本书中作详尽阐述，它们有希望使效率达到2比特每秒每赫射频频谱以上。在把卫星群集、空间平台以及静止轨道上较窄的卫星间隔结合起来之后，上述这样的效率有可能使通信卫星系统提供100吉比每秒以上的总容量，在十年之前，象这样大的容量简直是不可想象的。然而，这些重大突破不会是一蹴而就的，它们将需要无数的科学家和工程师用他们的专门知识去把各种新的数字卫星通信技术变为现实。费赫博士为此而著的这本书（其中包括其他几位国际著名专家撰写的三章）将作为一个“训练工具”，使八十年代和九十年代的工程师们能够达到这些目标。

当然，令人关注和令人高兴的是看到了我所代表的组织——国际通信卫星组织也认识到了这一点。INTELSAT现在已经深深卷入并放手发展数字卫星通信——最令人瞩目的时分多址(TDMA)系统。我们把它视作为满足未来巨大数字通信需求的重要手段之一。

感谢费赫教授在此书中所作的全面阐述，不仅包括了INTELSAT系统，而且还包括了所有的国内卫星系统，并附有大量设计例子。

衷心祝贺费赫博士对数字卫星通信领域及其未来发展所作的这一重要贡献。

S. 阿斯特伦
INTELSAT 总裁

前 言

学了本书之后，你将掌握分析和设计现代卫星通信系统各单元所需的各种工具和技巧。在你顺读各章和研究大量实例的同时，你将会学到各种原理和较好地了解正在使用和已经计划的国内、国际和洲际数字通信卫星系统。本书的读者对象是专业工程师和管理人员、企图牢固掌握这一领域知识的高年级学生以及需要获得一本有关数字通信系统的较新的综合性参考书的研究人员。

由于多址、全球覆盖数字卫星系统所提供的灵活性，卫星通信容量和能力的增长已经达到令人吃惊的地步。

通信卫星覆盖全球的这一独特能力为地区通信和全球通信开创了一个新纪元。使用单颗卫星的系统所提供的灵活性使我们能把相隔距离远达17000公里(约地球周长的三分之一)的用户互相连通。使用三颗卫星的系统则能利用多址灵活性覆盖全球。这种独特的多址灵活性包括卫星与以下各目的地之间的通信线路：地球上的固定地点；大海中的船只；飞机；火车；汽车；其它飞行中的空中飞船；由一个人运载并能在五分钟或更短时间内安装起来的便携式终端。

没有任何其它通信系统能够具有这样的灵活性。卫星通信的成本基本上与终端之间的距离无关，而地面（非卫星）通信的成本却与距离有关。

卫星线路所能提供的各种数据格式和业务，包括电话信号、电视（图象和声音）信号、计算机产生的信号（计算机通信）、计算机通信用的广播式数据、电传打印机、大屏幕电视会议、交互型教育、医疗数据、应急业务、电子邮件、新闻广播、电力系统和公用事业用的控制数据、交通信息、气象与陆上监视、船舶与飞机的航行数据以及军事战略数据。



渥太华大学的14/12GHz收发天线。在凯·费赫博士的研究指导下，对各种新的调制解调器、编译码器、SCPC和TDMA系统的性能进行评价。在这些实验中均使用加拿大ANIK卫星。站在前面的是费赫教授。

以上所列还远远不够完整，由于每年都有许多新的需求产生，使以上所列的数据格式和业务，显得更加不完整。灵活的长距离和短距离多址卫星系统提供了越来越可靠、越来越经济有效的解决办法。

现在美国、加拿大、日本、欧洲和其它一些国家的许多国内通信卫星系统以及INTELSAT卫星系统有的正在使用，有的正在建设之中。目前半数以上的商用越洋长途电话和几乎全部商人用越洋广播电视，都是通过“同步”卫星中继的，“同步”卫星浮现在地球表面某点上空的同步高度(36000公里)上，偶而由于“位置保持”不完善会略有一些漂移。有不少国家的数据传输和军事通信也依靠卫星。

在七十年代后期和八十年代初期，所使用的大多数卫星系统和地面视距微波系统都采用模拟调频技术。但是，新的发展趋势是，新的卫星系统将绝大多数采用数字方法。这一趋势由于最近美国、加拿大和法国（还有许多其他国家）就国内系统的有关决策而得到了加强，在他们的决策中，采用数字方法的新传输设备将占压倒优势。INTELSAT董事会在1980年作出了一项决定，决定在INTELSAT-V和今后几代的卫星上采用时分多址数字调制技术。这一决定对数字卫星通信的发展具有明显的影响，因为有100多个国家使用着INTELSAT的卫星通信网。假如目前这一趋势继续发展下去，估计到1993年，几乎所有新增加的系统都将是数字的，因此，工科学生、电信专业人员和研究人员都必须熟悉数字卫星通信网与系统的原理、设计、应用与规划。

在多数系统应用中，一颗卫星用于多个地球站。卫星地球站的数量、类型和大小正在显著地增加。在卫星通信网中，卫星地球站部分的增长和投资甚至超过卫星转发器。由于这一原因，本书重点主要放在地球站分析和设计准则上。

由于精心安排了本书的涉及范围，因此，卫星通信网路与系统经营者雇用的工程师和管理人员，电信设备制造厂雇用的制造工程师和管理人员、市场经理、产品计划者、咨询工程师，电信研究部

门雇用的工程师以及在跟电信规则有关的政府部门工作的行政管理
人员和技术人员，都将发现本书在提高解决问题本领方面是一个非常
宝贵的资料。本书也适宜用作一年级研究生或高年级本科大学生的
教科书，适宜于在大学和其它技术部门作为参考书使用。我们希望
读者已经具备通信系统的基础知识，如果先了解一下概率论，则对
阅读本书将更有益处。

在第一章中，将向你介绍八十年代和九十年代卫星通信的有关
情况，图示说明地球站和卫星通信子系统，并介绍了线路预算问题。

第二章阐述在地面接口子系统中使用的信号处理和多路复用技
术。在对常规PCM技术作了简明论述之后，将向你介绍用于音频和
电视信号的比较先进的模/数变换技术（自适应差分PCM调制，DPCM）、
复用变换器、回波抑制和抵消、数字话音插空与能量扩散系统。

在第三章中，我们叙述基带传输系统原理和设计技术。此外还
将讲述基带频谱、奈奎斯特定理以及滤波与均衡技术，这些对频谱
有效的数字卫星系统的设计来说，都是非常重要的。

在本章以及在其它各章中所阐述的技术也可以应用于数字电
缆、光纤、视距微波以及在电话线路上的数据传输系统。在一本书
中向读者介绍许多基本的数据传输、信号处理与调制技术还是第一
次。通过对这些新技术的仔细研究将开阔你的思路，加深你对竞争
激烈的系统新发展的理解。

在第四章中，你将学到在线性和非线性卫星地球站和卫星系统
中使用的功率有效数字调制技术的原理、性能分析和设计方法。至
今没有别的书以综合实用并具有一定深度的方式来阐述这一重要的
命题。此外，还包括常规QPSK系统的重要设计、新的调制技术以及
在邻波道和同波道干扰环境中的性能分析。还叙述了在积木式组件
中经常使用的集成电路。根据我们在INTELSAT和国内数字卫星系
统以及硬件设计方面的经验而引用的一些设计举例，将会加深你对

实际系统能力的了解和对实际系统限制的认识。

在第五章中，将向你介绍频谱效率高于2比特/(秒·赫)的频谱有效数字调制技术。在无线电频谱的许多区域内的严重拥挤情况，产生了对提高频谱效率技术的要求。由于非线性放大调制技术的最近发现，可望一些新一代的卫星系统将具有足够高的信噪比，得以采用较高频谱效率的调制技术。这一章还简单扼要地叙述了我的前一本书《数字通信：微波应用》(Prentice-Hall, Inc, 1981)中的一些内容。

在第六章中，你将学到纠错和检错码的原理和应用。本章是由密苏里大学的W.H.特伦特教授撰写的，它透彻地阐述了编码理论和信息论的最重要的原理以及它们在数字卫星系统中的应用。这样将把你从最简单的概念逐渐引向牢固掌握各种编码系统的优点。

第七章叙述在相干数字传输系统中使用的同步子系统(尤其是载波恢复和符号定时恢复系统)。本章是由麻省大学的L.E.弗兰克斯教授撰写的。为了使读者不需通过复杂的方程而能了解同步系统，在本章的附录中还给出了关于信号复包络和最大似然接收机的理论分析。本章内容对于那些必须掌握有关同步系统的扎实理论基础的工程师来说，将会特别感兴趣。

COMSAT实验室的通信技术部主任S.J.坎潘纳勒博士和D.雪弗博士在第八章中叙述了时分多址(TDMA)卫星系统。这些系统正在成为INTELSAT和许多国内卫星系统的主干。在这一章中他们既给出了背景材料，也给出了比较近期的材料。

在第九章中，你将学到在再生式卫星系统中使用的非常有用的信号处理技术。这些技术的优点以及由再生式“空中交换台”带来的附加灵活性都将在本章中加以叙述。

第十章阐述每载波单路(SCPC)数字卫星系统。这些系统正在许多国家中使用，尤其对小容量用户来讲，比较经济有效。此外由著者发明的一种新的比较有效的调制技术也将在本章给出。最后叙述了卫星系统设计方面的综合评价和发展趋势。

在许多章节中都将给出一些现代数字卫星通信系统的规格和照片，这是为了让读者了解目前发展水平的一些系统的情况。本书除了给出一些说明性设计例子和解决方法以外，在每章末尾还给出了一些经过仔细选择的习题。对于在哪里应解哪道题，我们都在相应的地方作了特别的强调，我们认为这样做是比较恰当的。课堂指导教师可以从Prentice-Hall出版公司得到一本完整的题解手册。我相信，你将发现这些设计例子和习题很有教学意义，也是很有趣味的，其中有一部分专门用来增强你的直觉知识，这会有助于你设想出一些富有创造性的原始设计来。

在有些章节中，包含了一些原始的研究材料。虽然本书的原意是作为一本介绍数字卫星通信基础、设计和应用的入门书，但是我觉得介绍一下现代的研究设想和概念还是值得的。为了限制本书的篇幅和达到它作为一本实用的数字卫星通信书的原定目标，因此有些推导过程从略了。所谓比较实用的书也就是说读者不必具备象研究工程师那样高深的数学知识就能阅读理解此书。相反，本书特别强调的是对最终方程的物理解释、实际的硬件、系统限制以及数字卫星地球站应用。在本书末尾列出的许多参考书，对那些希望研究理论推导和希望对上述材料有更深了解的读者来说，将是很有用的。

考虑到本书的写法和构思，我认为有必要说明一下我对本书是如何设想的。通过我的经历——包括十年以上的工业研究、设计与应用方面的工程设计和管理工作以及大约九年的大学教学、研究和咨询，我了解到绝大多数从事实际工作的电信工程师很少使用高深的数学工具。为了在专业方面有所进展，只要求他们对系统和设备的工作原理具备牢固的知识，并希望他们把这些知识应用于成本有效的现代通信系统的设计之中。

我前两本书中的内容主要根据我在美国、加拿大、墨西哥、南美和欧洲许多国家内举办的短期课程和讲座中所包括的材料。我的前两本书是：

(1) 凯·费赫:《在干扰环境中的数字调制技术》*Donwhite*
*Consuitonts*公司, 弗吉尼亚洲, 日耳曼城, 1977。

(2) 凯·费赫:《数字通信:微波应用》, *Prentice-Hall*,
Englewood-Cliffs, 新泽西洲, 1981。

另外, 在本书中我还补充加入了我在大学里讲授的本科生和研究生课程的内容。我一直不断地从正在用我上列两本书进行学习或讲学的电信专业人员。学生和教授那里听取许多积极宝贵的意见, 它们鼓励我在这本书里继续采取实用而渐进的写法。

我将十分高兴地听取你的反映。如果你对本书内容有疑问、评注或建议的话, 请随时写信给我。

凯米洛·费赫博士
渥太华大学电工系教授
770 King Edward Avenue
Ottawa, Ontario
K1N 9B4
电话: (613)231-2288

目 录

第一章 卫星系统构成和线路计算	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 国际和国内卫星通信系统	(1)
1.2.1 地球站和卫星系统的图示说明	(20)
1.2.2 静止轨道	(20)
1.3 八十年代和九十年代的卫星系统	(22)
1.3.1 增加容量的要求	(24)
1.3.2 数字卫星通信较模拟卫星通信的优点	(27)
1.4 地球站和卫星通信子系统的图示说明	(28)
1.5 系统线路模型和参数	(35)
1.5.1 基本地球站——卫星线路模型	(35)
1.5.2 系统参数定义	(38)
1.5.3 几个常用参数	(47)
1.5.4 线路方程式	(48)
1.6 数字卫星系统的线路预算举例	(51)
1.6.1 地球站EIRP (以1瓦的分贝数来表示,即1dBW)	(51)
1.6.2 上行线路的G/T	(51)
习题.....	(53)
第二章 在地面接口子系统中的信号处理和多路复接	(55)
2.1 卫星地球站与地面网之间的数字接口子系统	(55)
2.2 音频和电视信号模/数变换用的PCM DPCM和DM 技术.....	(56)

2.2.1	脉码调制(PCM)	(56)
2.2.2	差分脉码调制(DPCM)	(60)
2.2.3	增量调制(DM)	(61)
2.3	FDM/TDM变换用的复用变换器—复用标准	(67)
2.3.1	多路复用标准	(67)
2.3.2	常规FDM/TDM与复用变换器两种变换方法 的成本比较	(70)
2.4	回波抑制和抵消技术	(71)
2.4.1	回波抑制器	(73)
2.4.2	回波抵消器	(73)
2.5	数字话音插空(DSI)系统	(77)
2.5.1	TASI-DSI系统	(84)
2.6	与数字地面设备的接口——非插空数字接口 (DNI)系统	(84)
2.6.1	准同步系统	(85)
2.6.2	多普勒漂移效应	(85)
2.7	数字通信中的能量扩散(扰码)	(86)
2.7.1	随机和伪随机(伪噪声)数据的功率谱	(87)
	习题	(91)
第三章	基带传输系统	(93)
3.1	引言	(93)
3.2	随机同步信号的频谱密度	(94)
3.2.1	二进信号基带频谱的推导	(96)
3.2.2	二进信号基带频谱公式小结和应用	(103)
3.2.3	不归零(NRZ)信号的频谱密度	(106)
3.3	限带基带系统	(110)
3.3.1	理想低通信道(滤波器)	(110)
3.3.2	眼图的基本原理	(113)

• 原文为“Brick-wall” Channel, 为照顾习惯, 译成理想低通信道——译者

3.4	奈奎斯特定理	(116)
3.4.1	奈奎斯特最小带宽定理	(116)
3.4.2	奈奎斯特残留对称定理	(118)
3.4.3	奈奎斯特的无符号间干扰和无抖动传输定理	(123)
3.4.4	奈奎斯特广义无符号间干扰传输定理	(125)
3.5	滤波和均衡技术	(131)
3.5.1	经典(无源和有源)滤波器	(133)
3.5.2	横向滤波器和均衡器	(134)
3.5.3	非线性开关滤波器	(141)
3.6	加性白高斯噪声环境下的性能: 误码率 P_e	(143)
	习题	(149)
第四章	用于线性和非线性卫星信道的功率有效调制技术	(152)
4.1	引言	(152)
4.2	低通和带通信道模型的等效	(155)
4.3	相干和差分相干二进PSK系统(BPSK)	(159)
4.3.1	BPSK, DEBPSK和DBPSK调制解调器的工作原理	(159)
4.3.2	BPSK系统的频谱和频谱效率	(165)
4.4	二进数字调制系统的最佳接收机	(167)
4.4.1	二进传输系统的模型和性能推导	(167)
4.5	奈奎斯特接收机和匹配滤波器(相关)接收机	(180)
4.6	二进相干PSK系统的 P_e 性能	(183)
4.6.1	E_b/N_0 和 C/N_0 之间的关系	(186)
4.7	相干和差分相干四相PSK系统(QPSK)	(190)
4.7.1	QPSK、DEQPSK、DQPSK和OKQPSK调制解调器	(190)
4.7.2	QPSK调制解调器的频谱和频谱效率	(201)

4.7.3	QPSK接收机的误码率性能	(204)
4.7.4	在不完善线性信道中P _e 性能的恶化	(218)
4.8	最小频移键控(MSK)和非线性滤波(NLF)OK-QPSK系统(费赫的QPSK)	(224)
4.8.1	MSK的背景	(224)
4.8.2	MSK调制解调器的工作原理	(224)
4.8.3	MSK频谱和频谱效率	(228)
4.8.4	非线性滤波的参差QPSK(NLF-OK-QPSK)(费赫的QPSK)调制解调器	(230)
4.9	滤波和限幅对QPSK、OK-QPSK、MSK和费赫QPSK的影响	(231)
4.9.1	QPSK、OK-QPSK和MSK信号的包络波动	(232)
4.9.2	频谱扩展	(237)
4.9.3	滤波和限幅对矢量间串话的影响	(241)
4.9.4	滤波和限幅对符号波形和眼图的影响	(242)
4.9.5	滤波和限幅对误码率性能的影响	(246)
4.10	邻波道和同波道干扰对M进PSK系统误码率性能的影响	(248)
4.10.1	背景	(248)
4.10.2	用于M进PSK	(256)
4.11	常用标准部件的集成电路实现	(261)
4.11.1	乘法器	(262)
4.11.2	振荡器和压控振荡器(VCO)	(265)
4.11.3	锁相环(PLL)	(268)
4.11.4	移相器	(270)
4.11.5	常规滤波器	(270)
4.11.6	非线性开关滤波器(费赫处理器)	(275)
4.11.7	门限比较器	(275)
习题		(277)

第五章 卫星系统的频谱有效调制技术	(281)
5.1 频谱有效(大于 $2b/s/Hz$)调制技术引言	(281)
5.2 线性和非线性放大(饱和的) M 进制PSK和QAM (APK)地球站及卫星调制解调器.....	(282)
5.2.1 八相PSK系统	(282)
5.2.2 正交幅度调制(QAM)系统的频谱效率	(285)
5.2.3 频谱有效 M 进制PSK和QAM信号的相干解调	(285)
5.2.4 通过非线性放大产生高功率 M 进QAM信号的方法.....	(288)
5.3 正交部分响应(QPR)相关编码调制技术	(291)
5.4 M 进制QAM和QPRS调制系统的 P_e 性能和频谱效率.....	(295)
习题.....	(298)
第六章 差错检测和纠错编码	(300)
6.1 引言	(300)
6.2 熵、交互信息和信道容量	(300)
6.2.1 信息和熵	(301)
6.2.2 交互信息和信道容量	(303)
6.3 信源编码	(308)
6.4 可靠通信编码	(311)
6.4.1 分组码	(315)
6.4.2 重复码	(318)
6.4.3 线性分组码	(322)
6.4.4 纠正单个差错的汉明码	(325)
6.4.5 循环码	(327)
6.4.6 BCH码	(329)
6.4.7 戈莱码	(331)
6.4.8 字差错率和比特差错率	(332)