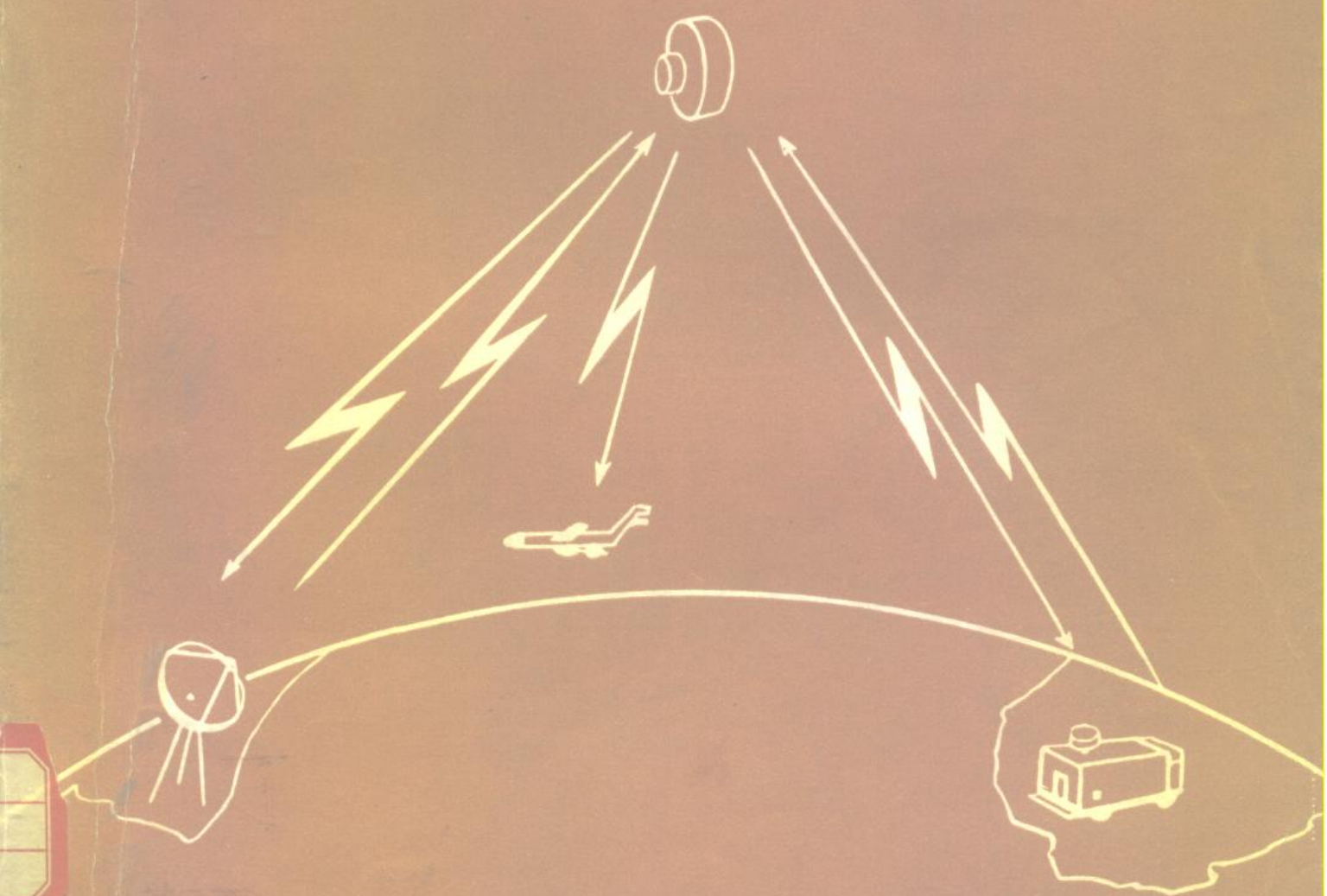


[美] W. C. 林赛 M. K. 西蒙 著

电讯系统工程



科学出版社

电 讯 系 统 工 程

[美] W. C. 林赛 M. K. 西蒙 著

邓金木 译

科 学 出 版 社

1984

内 容 简 介

本书从电讯系统设计出发,系统地论述了电讯网概念、功能和基本理论。着重论述了锁相跟踪环的理论和设计;单、双向相位相干跟踪和通信系统的最佳设计;载波(副载波)的各种同步方法;带通限幅器的性能及有带通限幅的相位相干跟踪和通信系统的性能;相位相干检测问题;差分编码信号的解模糊和检测问题;卷积码通信系统的性能;码元(位)各种同步方法;高斯信道的非相干通信和数据检测方法;数据辅助载波跟踪环及混合载波跟踪环的理论和设计等。每章末均附有思考题。

本书论述严谨,概念清楚,可供从事通信、雷达、遥测、计算机应用等专业以及海洋、天文、工业自动化等方面的电讯专业的研究、设计和使用的科技人员、大专院校的师生参考。

William C. Lindsey Marvin K. Simon
TELECOMMUNICATION SYSTEMS

ENGINEERING
Prentice-Hall, Inc. 1973

电 讯 系 统 工 程

〔美〕W. C. 林赛 M. K. 西蒙 著

邓金木 译

责任编辑 张建荣 唐正必

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年5月第一版 开本:787×1092 1/16

1984年5月第一次印刷 印张:26 1/4

印数:0001—6,400 字数:606,000

统一书号:15031·569

本社书号:3551·15—7

定价:4.00元

译者序

众所周知,电讯系统工程所研究的对象,是各种具有不同功能的电讯网。其中,最典型的、具有普遍意义的是航空和航天飞行器的电讯网。它通常是由跟踪系统、遥测系统、指令系统、监控系统、仿真系统、操作控制系统以及 C/I 联网系统(通信、指挥、控制和情报网)等组成。通过这些系统的协同工作,完成信号捕获和跟踪、数据获取、指令遥控、遥测和同步、侦察对抗等功能。所谓“电讯系统工程”,就是把上述各系统作为相互作用、相互依赖的一个有机的整体,用系统科学和系统工程技术来综合解决无线电信号的发送、传输、接收和处理的问题,使整个系统具备所需要的功能。

运用电讯系统工程方法的大体思路是:确定系统功能指标,系统方案综合,系统分析并建立数学模型,系统优化选择,系统实施等。在方案选择中,关键在于系统的信号设计。此外,信道中载波和副载波间的功率最佳分配、信号的检测估值、系统同步等,对电讯系统的总体性能也有重要影响。这些问题在方案选择中也需认真考虑。

最佳信号设计,是关系到电讯系统总体性能的主体设计。最佳信号主要取决于给定的环境、用途、技术条件和最佳准则,同时,也与调制形式、天线类型、极化方式和信号处理的难易程度等有关。实际上,不存在适应各种条件的“最佳”信号,即使是智能化的随干扰环境而自适应的信号,也有一定局限性。信号的选择,需同系统功能的要求相适应。如对一般雷达信号,要求具有一定的能量、一定的分辨力和测量精度、很强的抗干扰性等。对跟踪测量雷达信号,除上述因素外,还要求能够快速自动地捕获目标信号,而且信道间的互调影响最小。对跟踪和通信系统而言,调相信号更优于调频和调幅信号。

在信号设计中,特别值得重视的是一种频谱类似白噪声的伪随机码信号。最初,这种信号是为阿波罗飞船的统一 S 波段通信跟踪系统设计的。由于它具有抗干扰能力强、距离和速度联合分辨力高、无模糊距离可任意远等优点,因而,得到了广泛的应用。伪随机码信号是一种具有特大的时宽带宽积而且形式为多变的脉冲压缩信号,其模糊函数呈图钉形,副峰低而平坦,信号有效带宽 β_s 大。伪随机码信号也是一种扩谱信号,由于采取了扩展频带的方法,有效地抑制了加性和乘性干扰,从而具有很强的抗杂波干扰能力。信息论指出,一个通信系统的潜在性能直接与其发射信号的时宽、带宽、能量之积有关,通过增加信号有效带宽,就可提高抗干扰能力和测量精度,因为测距误差方差 σ^2 与信号有效带宽 β_s 成反比(当信号噪声谱密度比 $R_d = E/N_s \gg 1$ 时),即 $\sigma^2 = 1/2\beta_s^2 R_d$ (当 $R_d \gg 1$ 时),因此,伪随机码的测距系统可以达到相当高的测距精度。对于一般的脉冲雷达,由于其无模糊距离受脉冲重复频率的限制,无法满足远距离探测的需要。因此,在远距离探测的电讯系统中采用伪随机码信号,就具有无可比拟的优越性。

信号设计的重要性还在于:它是决定系统模型和结构的主要因素。例如,当采用宽带调频信号时,为了抑制杂波干扰,就要采用大调制指数,以便将基带信息和杂波干扰的能量都展宽;在接收端,则需采用相关接收,用调频负反馈技术将宽带调频信号变成窄带调频信号(近似于调幅),使信号能量恢复集中在载波分量和第一对边带上,以降低因宽带

调制而提高的接收机噪声门限。对伪随机码调相信号的接收,也是通过将回波信号与存储的发射信号进行相关解调来实现的。伪随机码在发射机中对被基带信号调制的载波进行调相时,就展宽了调制前的杂波干扰和基带信号的频谱,在接收机中回波与本振复制的发射信号进行相关解调。由于杂波干扰不相关,又再次被伪随机码扩谱信号展宽而抑制,从而使信杂比得到提高。同样,它也应采用调相负反馈环路,将信号能量又恢复集中在载波分量和第一对边带上,由载波锁相环提取载波分量,用信号解调器提取基带信息。显然,扩谱信号接收机通过相关解调对杂波的抑制可获得所谓处理增益(为扩谱信号带宽与基带信息带宽之比值)的好处。上述采用调频负反馈环路和调相负反馈环路的接收机模型与由最佳接收机理论导出的锁相接收机模型相同。

功率最佳分配问题也是电讯系统工程设计中的一个重要问题。在相位相干通信和跟踪系统中,要求载波和各副载波间进行功率最佳分配,使具有额定功率的系统能获得最大的传输距离。否则,系统性能就会因功率分配不合理而急剧恶化以致使系统工作中断。例如在火星探测系统中,曾由于副载波间功率平衡出现1分贝的变化而导致功率较低信道的消失比预期提前几个星期。载波和各副载波间功率分配的最佳准则应是:1)各副载波间要同时达到门限,以使系统工作最合理;2)载波的门限要等于或低于各副载波的门限,以保证载波的功率不小于一定值;3)系统的效率应尽可能高,以保证系统能较经济而又合理地工作,这就是准则1的边界条件,即在满足准则1时造成的无用功率或交调功率不能太大。

“电讯系统工程”是运用系统工程的科学方法,解决电讯系统的规划和工程设计问题的一门学科。有关介绍这方面内容的书,目前在国内尚未问世,在国外也属少见。

本书对电讯系统工程的论述,理论分析严谨,物理概念清楚,数学分析着重于工程应用的实际条件和结论。书中提供的各种系统性能参数的计算公式和曲线,可供设计时参考。因此,本书在某种程度上可作为电讯工程设计的指南和设计手册,这对于从事通信、雷达、声纳、遥测、遥控、遥感、计算机应用等专业及地震、工业自动化等方面电讯专业的研究、设计、使用部门的科技人员和大专院校师生,是一本难得的好书。

随着现代科学技术的发展,各种电讯工程的规模越来越大,系统越来越复杂,综合性越来越强,只有运用系统工程的方法来解决它的规划和设计问题,才能适应电讯技术日益发展的需要。为了满足有关专业人员学习和运用电讯系统工程设计方法的需要,我们翻译了这本由美国南卡里福尼亚大学 W. C. 林赛博士和麻省理工学院喷气推进实验室 M. K. 西蒙博士合著的《电讯系统工程》推荐给广大读者。

在本书的校对过程中承蒙下列同志的帮助和支持:1—2章、3—4章、5章、6—11章分别由郑继禹、张厥盛、赵洪、李帮复等同志进行初校。1—4章、5章又由蔡希尧、梁传甲同志进行了校阅。贺泳同志对全书又进行了校阅。最后方再根同志较仔细的校阅了全书。在此对他们表示衷心的感谢。译校中已对原书的几处错误作了更正。由于译者水平所限,译文难免会有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

译者

一九八三年一月于北京

前 言

近几年来,在各种专业杂志和其他出版物上积累了大量的资料。它们主要是空间应用方面的电讯系统的设计和规划中出现的各种问题。“电讯”或“电讯系统”这个词对于不同的人,意味着不同的事物。在电话学方面,它是指通过电缆或微波系统同时传输几千路话音信号、电传打字信号、传真和电视信号。在电影学方面,它用来确定和评价发行的新闻和电视宣传对社会、政治和文化的影响,而在计算机通信网络中,它又有另一种含义。

本书所用的“电讯系统工程”这个词是指用无线电系统完成数字传输、跟踪、遥测和指令系统的设计和规划。现有的技术、设备限制、传播因素和带宽促使设计工程师们更喜欢采用微波频段,即 L、S、C、X 和 K 频段。目前,在 C、X 和 K 波段方面的技术发展较慢。

本书所阐述的电讯系统工程早在四十年代末,当工程师们正面临提供近程弹道式导弹的遥测和制导时,就在喷气推进实验室开始研究了。后来又出现在严重干扰条件下进行可靠的通信问题。这些问题的解决导致 C. 山农和 N. 维纳与麻省理工学院辐射实验室及林肯实验室的工作人员更积极广泛的研究并取得他们早期工作的进展。接着迅速发展了在有噪声情况下能工作的伺服系统的理论和实际运行。在五十年代初,雷克廷 (E. Rechten) 和贾菲 (R. Jaffe) 应用这一理论研制了锁相接收机、自动增益控制 (AGC) 系统、相干双向测速和测距系统等。这些技术在陆军的赞助下实现了微波锁定系统。1957 年发射的(苏联)人造地球卫星 1 号 (Sputnik) 使美国进入了空间时代并随后成立了全国航空和宇宙航行局 (NASA) 组织。上面提到的电讯技术和许多硬设备可以立即用来解决遥测、跟踪和指令系统中的新问题。事实上,为微波锁定系统而发展的遥测技术已首次用于美国第一颗卫星、探测器系列中。

宇宙探测和商用及军用卫星的使用提出了许多新问题,这些新问题是在利用接近门限时的无线电信号和利用实时遥测和指令、小型和大型精密天线结构的设计和运行中出现的。在过去十年期间,地面天线已经从用于微波传输系统初期相当小的螺旋天线发展到深空网采用的巨大的 64 米抛物面天线。地面接收机的噪声温度从 1000K 降到 25K。数据处理机已经从基于纸带记录的人工处理发展到大型互联的计算机系统处理。数据速率从深空应用的每秒几百比特增加到目前的通信距离达到外层行星的每秒数千比特。近来的卫星技术已具有每秒一到二个千兆比特数量级的比特速率。还有大量的组织机构也对这种基础技术与理论作出了贡献。

本书致力于介绍和研究电讯系统的设计和规划中可以采用的理论,这种电讯系统一定能以小的或大的性能裕量工作。一方面过量的裕量意味过量的功率、重量和成本,另一方面负的裕量意味着性能太差。为了设计一个有效的系统,即一个能以小的性能裕量可靠地工作的系统,就必须有一个准确的理论来考虑对这种裕量的有害影响。就这些系统设计而言,裕量既够用又不太多,因此可以用基础工程设计法 (Seat-of-pants engineering) 进行这种设计。

本书的许多特点使之十分适合于实际工作的工程师和通信系统专业的研究生阅读。

1. 本书首次论述了单向和双向相位相干跟踪和通信系统设计的理论。
2. 论述、分析和比较了载波(副载波)和抑制载波(副载波)同步技术的各种方法,例如一般的同相-正交环、 N 次幂环、判决定向环、延迟锁定环、混合和数据锁定环等。
3. 给出了带通限幅器理论方面改进的分析并用来计算接收系统前几级采用带通限幅器的相位相干跟踪和通信系统的性能。
4. 论述了理想的和有噪同步参考信号的相位相干检测问题。获得了正交、双正交、超越正交、多相和 L -正交发射信号集的结果并绘图加以说明。此外,还给出了这些信号集的错误概率与信噪比关系的表格。
5. 论述了采用数据的差分编码引起的模糊分辨问题(与抑制载波传输和接收系统有关)。广泛地讨论了差分编码信号相干和差分相干检测两个方面的问题。比较了采用这些不同信号(例如双相、四相、八相信号)传输和检测方法的各种系统的性能。
6. 介绍和概述了采用卷积码的通信系统的设计和性能分析的许多结果。
7. 讨论、分析和比较了由携带数据的信号及用单设信道法获得码元(比特、钟)同步的各种方法。
8. 论述了 M 元信号的非相干检测问题并讨论了用快速傅里叶变换(FFT)和有限时间自相关进行数据检测的专门方法。讨论了存在接收机频率和时间不确定性时性能的计算(评价)及获得时间和频率同步的方法。
9. 每章的后面给出了所研究的理论应用的大量问题。其中许多问题的解答可根据要求从作者那里得到。

作者感谢在本书手稿准备期间许多同事的帮助,特别是承蒙喷气推进实验室詹姆斯 C. 斯普林格特 (James C. Springett) 先生和商业部电讯学院马丁·内森伯格 (Martin Nesenbergs) 博士对本书的注释和指正。此外,作者还十分感激和感谢加利福尼亚大学的罗伯特·盖格利亚迪 (Robert Gagliardi)、罗伯特 L. 斯科尔茨 (Robert L. Scholtz)、洛因德·韦尔德 (Lloyd Weld) 和查利斯 L. 韦伯 (Charles L. Weber) 教授和斯坦福 (Stanford) 大学的托马斯 L. 卡拉思 (Thomas L. Kailath) 教授在技术方面的支持。作者十分赞赏科琳 J. 莱斯利女士对本书文稿打字所作的极大努力。

本书得以完成的重要因素是由于布鲁斯 J. 麦克唐纳 (Bruce J. McDonald) 博士董事长领导下的海军统计和概率规划研究部长期提供的经济上的支持。最后,我们还感谢运输部运输系统中心的莱斯利·克莱茵 (Leslie Klein) 先生和休曼·卡普 (Sherman Karp) 博士作本书的金融保证人。

W. C. 林赛

M. K. 西蒙

目 录

译者序

前言

第一章 电讯网概念	1
1-1 引言	1
1-2 跟踪和数据获取网中电讯系统的功能	4
1-3 空间应用的电讯系统设计	6
1-4 山农定理和通信系统效率	10
1-5 频谱占据与带宽	11
1-6 进一步的研究	16
问题.....	16
参考文献.....	17
第二章 使用锁相原理的载波跟踪环	19
2-1 引言	19
2-2 锁相环工作原理	19
2-3 前置带通限幅器的二阶锁相环	35
2-4 抑制载波的跟踪环	41
2-5 多相信号的载波跟踪环	51
附录 A $v_2(t, 2\phi)$ 的自相关函数的计算	59
问题.....	60
参考文献.....	61
第三章 在双向相位相干跟踪系统中的相位和多卜勒测量	63
3-1 引言	63
3-2 双向相位测量	64
3-3 双向多卜勒测量	73
3-4 上行系统的加性噪声对下行系统载波抑制的影响	78
3-5 改善相位和多卜勒测量的分集组合	80
3-6 将双向相位和多卜勒测量推广到 N 级网络	83
问题.....	91
参考文献.....	93
第四章 用相位相干法测距	94
4-1 引言	94
4-2 距离估值	96
4-3 测距方法	98
4-4 伪随机码测距跟踪接收机	120

问题.....	128
参考文献.....	131
第五章 用理想参考信号进行相位相干检测	132
5-1 引言	132
5-2 二元制和 N 元制的判决问题	134
5-3 信号集表示法和相关器输出的联合概率密度函数	137
5-4 二元制信号集的产生, $r = 2$	140
5-5 相位相干接收机的性能特征	144
5-6 差分编码的多相移相键控 (MPSK) 信号的相干和差分相干检测.....	173
5-7 正交和双正交信号的差分编码数据和相干检测的比特错误概率	181
5-8 卷积码	181
5-9 自同步码	194
附录 A 抽象矢量空间概念.....	197
附录 B 多相信号错字率的推导.....	198
附录 C 卷积码的距离结构和选择好码的其它准则.....	199
附录 D 任意卷积码按最大似然法译码时的错误概率限.....	202
问题.....	204
参考文献.....	210
第六章 有噪参考信号的相位相干检测	214
6-1 引言	214
6-2 系统模型	214
6-3 差分互相关器输出的统计特性 ($N = 2$)	216
6-4 数据检测器的性能, $N = 2$ (用锁相环进行载波跟踪)	220
6-5 数据检测器的性能, $N = 2$, (用平方环或科斯塔斯环进行抑制载波的跟踪)	227
6-6 分组码系统的数据检测性能	229
6-7 多相信号检测时的有噪参考问题	232
6-8 采用抑制载波跟踪的差分编码多相移相键控 (MPSK) 系统的相干检测	234
6-9 利用有噪参考信号的准最佳 L -正交接收机的错字率性能.....	236
附录 A 平均错误概率 P_E 的一组解.....	236
问题.....	237
参考文献.....	238
第七章 单向和双向相位相干通信系统的设计	239
7-1 引言	239
7-2 单信道系统的最佳设计	239
7-3 双信道系统的设计	255
7-4 多信道系统的设计	264
问题.....	275

参考文献	276
第八章 有前置带通限幅器的相位相干系统的设计和性能	277
8-1 引言	277
8-2 在有前置带通限幅器的相干系统中的有噪参考问题	277
8-3 采用带通限幅器的单信道系统的最佳设计	286
问题	293
参考文献	293
第九章 码元(位)同步及其对数据检测的影响	294
9-1 引言	294
9-2 从携带数据的信号中提取码元同步	295
9-3 单独占用一个信道的码元同步	326
9-4 错误概率性能	327
9-5 结论	334
问题	334
参考文献	337
第十章 高斯信道的非相干通信	339
10-1 引言	339
10-2 发射机的特性	339
10-3 最佳非相干检测	341
10-4 准最佳非相干检测	349
10-5 振荡器存在短期不稳定时的非相干检测	353
10-6 最佳接收机的时间同步	354
10-7 有定时误差时最佳接收机的错误概率性能	356
10-8 最佳接收机的频率同步	358
10-9 有频率误差时的最佳接收机的错误概率性能	359
10-10 定时误差和频率误差同时存在时的最佳接收机的错误概率性能	359
10-11 准最佳接收机的频率同步和错误概率性能	360
附录 A 最大似然估值器 $\hat{\lambda}_t$ 的推导	362
问题	364
参考文献	366
第十一章 改善了性能的跟踪环	368
11-1 引言	368
11-2 单信道系统的相位最大后验概率估值器	368
11-3 数据辅助载波跟踪环	372
11-4 混合载波跟踪环	385
11-5 在多信道系统中的应用	393
附录 A θ 的最大后验概率 (MAP) 估值的推导	397
参考文献	400
汉英名词对照索引	401

第一章 电讯网概念

1-1 引言

本章研究影响现代电讯网设计的各种因素,详细地说明这些因素的含义,并向读者介绍书中使用的某些基本术语。电讯这个词的词义即是“在一定距离内的通信”。简单地说,一个网络就是互相连接或互相关联的系统链,每个系统完成一定的功能。因此,电讯网是多个系统的组合或集合,这些系统通过各种通路联合起来,组成一个闭合的信息传递环路,也就是说,它可以提供询问(或指令)、应答以及与询问(或指令)有关的应答译码。

本书感兴趣的一种特定形式的电讯网是着重于地面站到飞行器通路的跟踪和数据获取网。目前运行中的大多数跟踪和数据获取网,都设计成能够同时承担许多飞行任务,而能同时承担多种任务是节约费用的关键。例如,美国宇航局有三个跟踪和数据获取网用于进行宇宙探测。空间*跟踪和数据获取网(STADAN)^[1]是为自动处理具有高或低倾角和各种轨道高度的不载人地球轨道卫星设计的,而轨道高度的范围是从最小高度直至保证进行载人的宇宙探测的高度。载人航天飞行网(MSFN)是专门为进行载人宇宙探测而设计的^[1]。而宇航局深空网(DSN)则是为提供月球、行星和深空飞行任务^[1,2]的跟踪和数据获取而设计的。

深空网和载人航天飞行网都采用了统一S波段技术。统一S波段系统最初用于水手号火星探测器(1964年发射的)和月球卫星中,以提供可靠的跟踪和通信。后来又用于阿波罗载人飞船计划中。从原理上来说,统一S波段系统在各个方向上使用单一射频载波,以传输航天飞行器(如导弹、卫星或飞船)和地面站之间的全部跟踪和通信数据。通常到航天飞行器的上行通路数据或到地面站的下行通路数据均调制在各副载波上,各副载波又调制在射频载波上。这种网络设计将在下面几章详细讨论。

最有吸引力的第二代的跟踪和数据获取网是跟踪数据中继卫星网(TDRSN),它由能覆盖发射装置和低轨地球卫星的同步轨道的跟踪和数据中继卫星以及用来保障高地球轨道和绕月球轨道飞行器^[3]的一些有选择的站所组成。图1-1说明了跟踪和数据中继卫星网的概念。其改进型的应用包括空中交通管制和导航^[4]、地球资源卫星^[5]收集的数据中继以及地球-空间-地面站^[6]的技术保障。卫星的唯一特征是具有观察整个地理区域的能力。这就使我们能采用一种完全新型的方法进行国内通信、商用通信和军用通信。例如,在目前条件下,如果只是用地面通信手段要在洛杉矶与纽约之间进行通话,通常需要通过十来个不同的中继站。然而用一个卫星进行中转,就能直接由发信局经卫星中转到被呼叫的终端局,因而减少了八个交换中心及其必要的维护费用。比较新型的宇宙飞行器,在其内部装有计算机系统,它能通过地面指令系统编制程序和存储载荷信息。

作为导航和交通管制而设计的一个跟踪和数据获取网的例子是 NAVSTAR,它是汤

* “Space”一词本书根据不同情况译为空间、航天、宇宙,下面不再一一说明。——译注

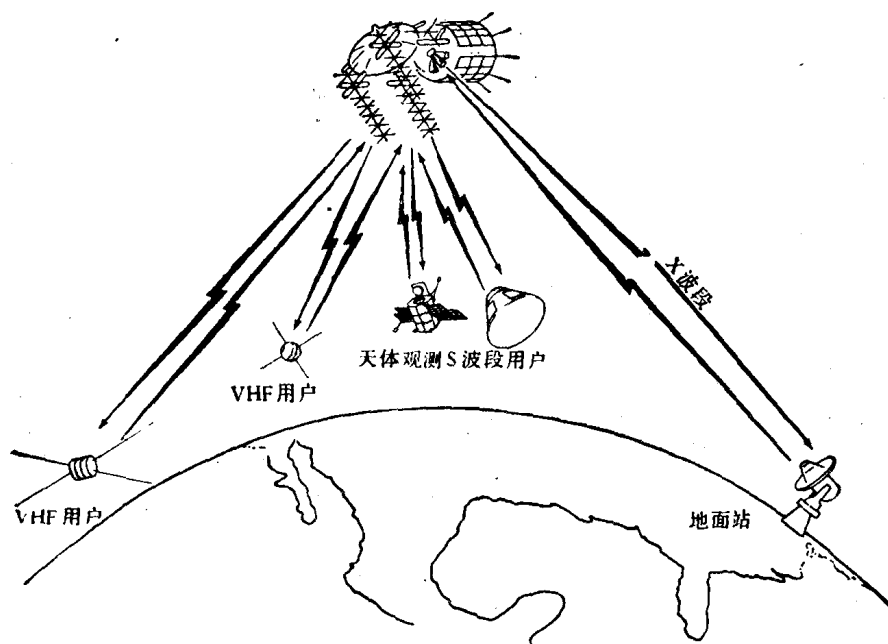


图 1-1 跟踪和数据中继卫星概念

姆森腊英伍里奇 (TRW) 公司为宇航局研制的 (图 1-2)^[4]。这个导航和交通管制网预计提供: (1) 具有可能扩展到全球网能力的大西洋覆盖区; (2) 适合无源用户的一种导航技术; (3) 为最广泛的可能用户范围服务, 例如, 象超音速运输机 (SST)、大型喷气客机 (DC-10) 和波音 747、通用航空和航海飞机等大型飞机。可以想像, 这样一个网也可用来监视全球的气象情况。

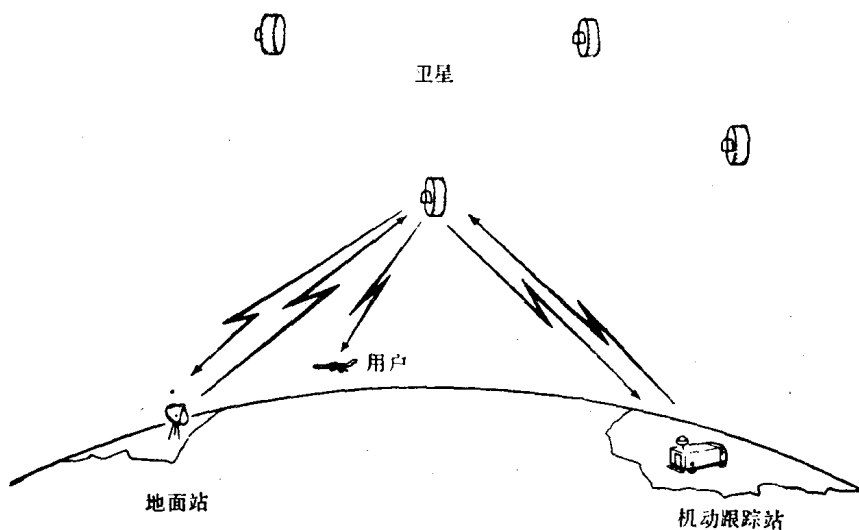


图 1-2 NAVSTAR 信息网(取自技术报告 TRW No. 08710-6012-R000, 1967 年 12 月)

军事上的应用常常要求设计具有通信、导航和识别综合功能的网——综合通信导航识别网^[7]。这个网要求: (1) 远距离通信; (2) 近距离或视距通信; (3) 全球导航; (4) 视距

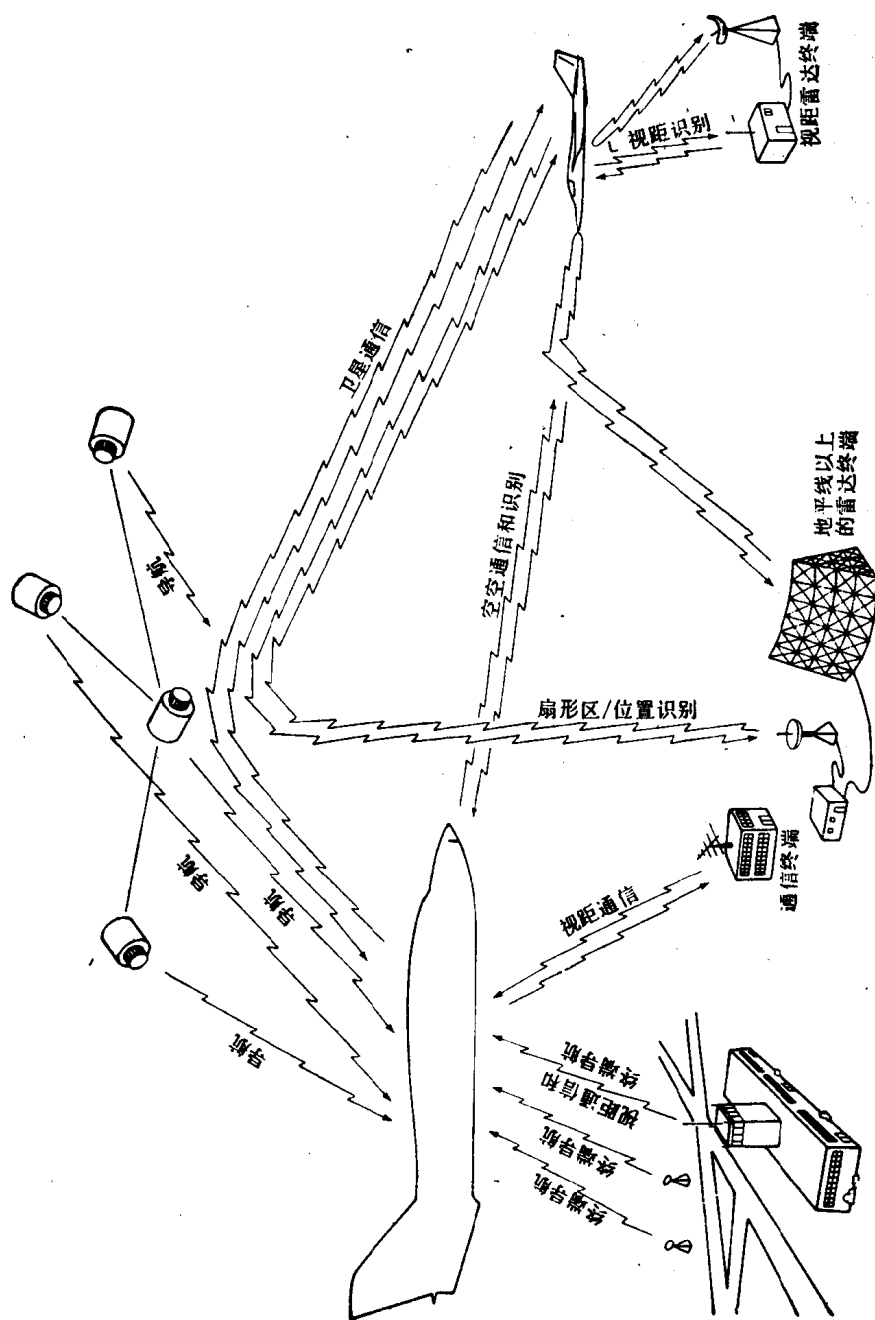


图 1-3 综合通信导航识别网 (ICNI) 概念

(LOS) 识别能力; (5) 远距离识别能力。图 1-3 说明了适当的网系模型及其功能关系与各个系统终端之间的联系。

一个典型的电讯网包含两个不同的工作系统: 数据处理系统和电讯系统。我们的兴趣只在于发展用于设计、计算和试验的电讯系统理论。

1-2 跟踪和数据获取网中电讯系统的功能

电讯系统必须完成信号捕获和跟踪、遥测或数据获取、指令和同步等功能。本节我们定义并定性地讨论这些功能, 严格的定量分析留在后面几章中进行。

信号捕获和跟踪功能

信号捕获功能必须用多维量度形式才能完成, 因为对于捕获宇宙飞行器的一般性问题来说, 捕获就包含着许多不同的方面。假若要捕获的信号是从一个地球卫星上的发射机发来的, 那么接收天线必须首先指向空中飞行器所在位置的方向。这个过程意味着捕获是在两个球面座标间进行的。除了角度捕获外, 接收机必须调谐到确切的频率以接收跟踪信息。这是通过对频谱的某一适当部分进行一维搜索实现的。最后, 对于相位相干接收和某些测距而言, 还要求相位捕获。因此, 信号捕获提出了四维或多维量度问题。

虽然“跟踪”这个词有时是指对空间飞行器的全部通信, 但是, 更正确的含义仅限于获取可以用来确定飞行器相对于太阳和行星的位置和速度的数据。对此, 有三种数据形式: (1) 角度数据, 相对于地球上某些参考点的辐射信号到达的入射角; (2) 多卜勒数据, 由空间飞行器相对于地面站的速度而产生的射频 RF 的变化; (3) 距离数据, 信号接收点和飞行器之间的距离。由于地面设备处理了往返于空间飞行器的全部跟踪数据, 因此, 经网系传送的数据序列是不断变化的并在不同点按时转发。

虽然角度数据的测量精度可以很容易地达到 $0.01-0.02$ 度, 但在空间飞行器发射几小时以后还用这种数据来确定轨道就不合适了。然而, 在此期间测角对确定空间飞行器相对于地面的位置是很重要的, 所测得的角度数据可用来计算飞行器发射后最初几个小时的轨道。此后的轨道是根据极其精确的多卜勒数据来确定的。

由相位相干跟踪系统进行的多卜勒测量可获得非常精确的空间飞行器速度。这个系统采用一个空间飞行器的应答机。应答机向地面相干地发送一射频载波, 其频率与应答机从地面接收的载频成一固定的比值。例如, 在统一 S 波段系统中, 用一锁相环跟踪从地面向飞船发送的频率 (在 $2110-2120$ 兆赫波段), 将其乘以比值 $240/221$ 后再转发到地面。地面利用另一个锁相环跟踪所接收的载波分量并乘以比值 $240/221$ 的倒数, 即 $221/240$, 然后从地面到飞行器的发射频率的一个样品中减去该乘积。这种技术叫做双向跟踪。频率差等于两倍的单向多卜勒频率, 加之使用一个很稳定的原子频率标准作频率源, 因此, 多卜勒数据的精度基本上受发射机和激励器的相位不稳定性所限制。在一分钟的相关期间内可获得 $0.1-0.01$ 毫米/秒的速度精度。通过积分多卜勒频率可以进行精确的距离计算, 并可使飞船的运动与一运行轨道相吻合。用这种数据精度计算飞行器位置, 在月球距离上精度可达 10 公里, 在邻近行星处距离精度可达 200 公里。

用一个设计得当的测距信号来调制从地面发到空间飞行器的射频载波就可获得距离

数据。空间飞行器将此测距信号重新发回地面。必要时,可在重发以前复制这个测距信号。地面接收信号与发射信号进行相关以测量由往返传输期间产生的时延。由于地球上空的电离层和对流层传播时延是已知的(相对地说是很小的),载波在空间传播速度等于光速,因此,很容易计算出到空间飞行器的距离。在所测距离内,可以获得 15 米的测距精度和大约 1—2 米的距离分辨率。测距提供了确定空间飞行器位置的一种独特的和性质不同的方法,因为测距取决于载波群速[光(量)子]的测量,而多卜勒数据取决于相速的测量。当空间飞行器处于环绕一个行星的轨道运行时,距离数据用来快速确定飞行器的位置特别有用,而多卜勒数据在测量变速(如机动飞行期间)和建立曲线拟合的精确轨道是非常有价值的。

遥测或数据获取功能

从空间飞行器到地面的数据遥测(通常叫做数据获取)可以用几种方法来实现。例如可以用从空间飞行器敏感元件和传感器接收的数据去调制一个或多个副载波,然后用副载波对射频载波进行调相。地面接收机采用锁相环原理来跟踪射频载波分量。由环路检相器的输出提取受数据调制的副载波。然后将提取的这些已调数据副载波信号加到数据解调器上,可获得原来的调制信号。在本章的较后部分将详细说明该调制-解调过程。

在深空通信问题中,调制信号可分成工程信号与科学信号。前者叫做“室内”信号,诸如温度、气体压力和液体容量、电源、太阳电池及测量空间飞行器设备工作情况的仪表组件的电流与电压等。科学信号表示图象的传输和用科学仪器进行测量的信号,诸如电磁、宇宙辐射、核辐射、微陨星和磁场等现象。

遥测数据通过遥测信号连续地从空间飞行器经过下行通路传送到地面,被地面站接收并处理。在某些应用中,遥测数据发送给空间飞行器,再传送给另一个远区的地面站。

指令功能

空间飞行器的操作控制是通过上行系统线路发送指令来实现的。这些指令信号控制某些需要完成的功能,如火箭发动机的点火,向大功率发射机或各种科学传感器加电源,启动磁带记录器。其中有些操作,其进行操作的时间与前面的空间操作事件有关,或者动作很快,因而必须自动地完成。由于有些操作不可能用实时指令执行,所以需要自动启动。

例如深空探测的宇宙飞行器,采用自动控制器,它有永久地存储在其存储设备中的指令或者有可由地面编制程序的存储设备。存储的指令可能是主要指令或是其他实时指令。此外,还有接收从地面来的指令后可立即动作的装置。这些从地面来的指令,虽然从地面传输到宇宙飞行器时需要几分钟,但仍然叫做实时指令。如果指令的定时要求十分严格,那么指令发送的时刻应将传输时间考虑在内。

大多数指令(变更存储的程序或实时指令)都是用对宇宙飞行器的双向通信线路发送的,因而指令确实被宇宙飞行器接收后,它必然又会中转回到地面。发生故障时,指令会盲目地发送,这就无法证实上行指令是否进入锁定。为此,大多数深空飞行器都设有一部与一宽波束天线固定连接的接收机,以致不管宇宙飞行器的姿态如何,都可以发送和接收指令。因此,上行系统线路的指令数据流是不稳定的,由于指令的重要性,所以上行系统

线路的设计,通常不应使错误概率大于 10^{-5} 或 10^{-6} 。这与容许的下行遥测系统 10^{-3} 的错误概率大不相同,与数据的某些先验知识可利用情况下的 10^{-2} 的错误概率更不一样。

同步功能

同步功能基本上是估值接收信号的两个参数:频率和相对于一给定基准的时间。下面,我们必须区别三种同步类型或同步电平。第一,对于数字调制的相干接收而言,要求载波和副载波参考同步。第二,在估值调制变更状态的时刻,需要有码元同步。第三,确定一个码字结束和另一个码字开始的字同步。其他同步形式,例如帧同步可以归在字同步一类。在本书中,我们主要关心前两种同步形式。

1-3 空间应用的电讯系统设计

任何电讯系统的设计都使用所谓通信方程,它包含了通信系统中所有固有的基本因素,并且能使接收的信噪谱密度比这项技术指标非常可靠地确定下来,该方程为

$$P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 L_6 L_r G_r \frac{1}{k T_0} = \frac{P_{rec}}{N_0}$$

$$\frac{S}{N_0} = (1 - L_m) \frac{P_{rec}}{N_0}$$

$$\frac{P_c}{N_0} = L_m \frac{P_{rec}}{N_0} \quad (1-1)$$

这里,我们将讨论这些“功率预算”方程中每个因素的含义,及它们对系统设计的影响。参数 P_t 表示总的发射功率:它可用一宽带功率计在发射机天线输入端进行测量。参数 L_m 表示发射机的调制损耗。实质上, L_m 确定了载波和由一特定调制过程产生的信息边带间的功率分配。如果基本的信息载波是一微波频段的连续波(CW)正弦电压的话,那就可对发射载波进行调角[调相(PM)或调频(FM)]、调幅(AM)或调角和调幅的组合。作为分析,可用下式表示已调射频载波的瞬时值

$$s(t) = \sqrt{2} A m(t) \cos [\omega_0 t + \theta(t)] \quad (1-2)$$

式中 $m(t)$ 表示发射机调幅, $\theta(t)$ 表示发射机调角, ω_0 为载波的角频率, $\sqrt{2} A$ 表示 $m(t)$ 为 1 时的峰值载波幅度。调制信号(即需要发射的信息),可以分成数字、模拟或数模混合等种类。

调相对跟踪和通信来说是最有吸引力的。这是因为:

1. 载波分量可用来提取多卜勒信息(在调频时不行);
2. 可把大部分的载波功率变换成边带功率;
3. 非线性放大不会使调制波形失真(在调幅时不行);
4. 峰值功率与平均功率之比值为 1,是个高效率系统(在调幅时不成立);
5. 调制机理简单、可靠(调幅就做不到)。

由各种调制产生的边带频谱在一般的通信工程教科书中已作了很好的论述。在图

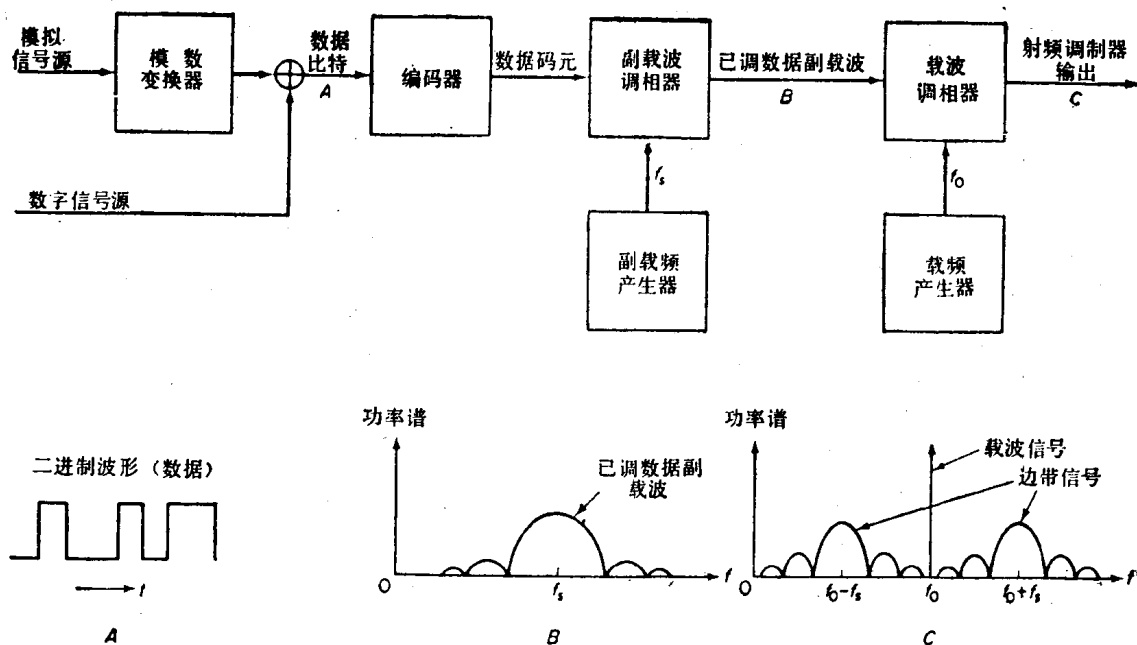


图 1-4 典型的调制频谱

1-4 中表示了一个用二元制* 数据调制的副载波及随后又调制到射频载波时所产生的典型频谱。在图 1-4 的 A 点处,通常允许用几种形式来表示二元制波形。在图 1-5 中,对各种脉冲编码调制 (PCM) 形式^[12]中的一些常用的典型波形及词义作了说明。

方程(1-1)中的参数 G_t 表示发射机的天线增益。它的定义为:

$$G_t = \frac{4\pi A_t}{\lambda^2} \quad (1-3)$$

式中, $\lambda = 2\pi c/\omega_0$ 为发射的波长,其中 $c = 3 \times 10^8$ 米/秒为传输媒质的传播速度; A_t 为天线的口径面积。假定 G_t 包括口径效率。

任一天线的增益是以在同一频率工作且各向同性的(在所有方向辐射能量都相等)天线作为参考的。一个各向同性天线(增益=1)的口径或有效口径的面积定义为 $\lambda^2/4\pi$ 。在这种定义下,一个各向同性天线的增益是以物理上可实现的天线为参考的,例如偶极子天线,其谐振尺寸,也就是口径面积是频率的函数。

天线的增益与其方向性有关。在某特定方向上灵敏度的增加,必然是其他方向灵敏度减小的结果。在某特定方向上发射的有效辐射功率(可通过一个各向同性天线得到)将随天线增益的增加而增加。提高增益的代价是明显地减小了波束宽度。作为一个典型的例子,由一个大的园形口径天线的方向图决定的半功率点波束宽(度)约为 $180/\sqrt{G_t}$ 。一个大口径天线的方向图其辐射功率的角分布通常为 $\sin x/x$ 型。

系数 $(\lambda/4\pi d)^2$ 表示所谓空间损耗。由各向同性的发射天线发射,而在接收天线的口径上得到的功率 P_r , 它等于接收天线口径的面积 A_r 对半径为两天线间的距离 d 的球面积的比值,再乘以发射天线的输出功率 P_{t0} 。于是:

* 二元制、N元制与流行的二进制、N进制的含义完全一样,但鉴于所传送的几种数字间并不一定存在数量上的关系,称“进制”容量误解,本书一般译作前一种。——译注