

内 容 简 介

本书主要讨论空间跟踪和通信系统中地面发射机的特点和作用,以及该系统对发射机的指标要求,体制选择,关键技术及解决的途径,和工程设计方法等。全书可分三大部分共十二章。概论中先介绍了空间跟踪和通信系统的原理和发展概况以及发射机的作用和主要特点,接着第一部分作为理论基础,分别介绍了振荡统计理论和频率短期稳定度测量技术、调制理论、锁相技术等要点,这是解决实际问题的有力工具;第二、三部分分别讨论连续波体制和脉冲体制的地面发射机(重点又放在连续波体制部分),着重于系统分析和关键技术,通过典型实例阐明工程设计和调试方法,并介绍了近年来国内外有关发射机的一些新技术。

本书可供从事航天、雷达、射电天文、遥控、通信、广播以及发射机专业的工程技术人员及有关大专院校的师生阅读参考。

空间跟踪和通用地面发射机系统设计

郭衍莹 陆文福 编著

责任编辑 林秀权

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 14 356 千字

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷 印数: 0,001—2,150册

统一书号: 15034·2681 定价: 2.05元

序

发射机是无线电整机的一个重要组成部分，传输的信息在这里进行调制，辐射的高频信号由发射机产生和进行功率放大。

最初，无线电设备主要用作通信和广播，多数工作于中、短波频率，对发射机要求不高。四十年代出现了微波雷达，才使发射机技术有一个较大发展。五、六十年代，随着弹道式导弹的出现、人造卫星上天、航天技术的发展，要求电子设备能对空间飞行器进行轨道测量、识别及实时信息传输与控制，从而大大促进发射机技术的发展。由于作用距离要求远，研制了各种类型的超短波和微波发射电真空功率器件；由于精密测速定位的要求，发展了连续波测量系统，用作单站测轨的脉冲雷达也得到显著的性能提高；由于传输信息质量对发射机提出了严格的频谱、相位、噪声、带宽、稳定性等要求，促进了发射机在理论、设计与试验技术上的前进；由于反弹道式导弹的需要，发展了大功率相控阵雷达发射机等等。

七十年代以来，由于空间技术的突飞猛进，进一步推动了发射机理论与技术的发展。如采用相干体制，研制高稳定振荡源和中、小功率固体组件，扩展新频段，研制新型毫米波大功率器件，应用自适应控制技术于发射机，提高信息传输质量，提高发射机系统可靠性，以及发展发射机的故障自动检测技术等。

过去，发射机设备较简单，造价不高，自身的系统设计不复杂，系统对它的指标要求不严，发射机设计人员可以不需要广泛的系统设计知识，也不必深入了解整个系统的设计要求。现在这样看法完全不对了。现代空间技术用地面发射机，不仅设备复杂、工程庞大、造价昂贵，更重要的是它的主要指标参数的选择会影响整个系统的工作性能。因此，发射机设计人员必须掌握系统设

计所必需的知识和理论，才能搞好优化设计。

《空间跟踪和通信用地面发射机系统设计》这本书，正是阐述了系统设计的知识，介绍了空间技术对地面发射机的设计要求，详尽分析了在空间跟踪测量、指令控制、通信中地面发射机的地位和作用。书中还对振荡统计理论、调制与锁相技术、频率稳定度测量技术等必要的理论基础作了扼要和系统的介绍。书中内容较丰富和全面，不少内容是作者的经验和实践。当然本书不可能对空间跟踪和通信用地面发射机一切问题都进行深入详尽的讨论。尽管如此，相信本书一定会对从事空间技术专业的科技工作人员有重要的参考学习价值。本书的出版，将为推动我国空间科学技术以及发射机技术的发展，增添一份力量。

张 履 谦

一九八二年一月

前 言

空间跟踪和通信是航天技术的一个重要分支，也是现代科学技术发展重大成就之一。它的含义是指地面站对空间飞行器（导弹、卫星、飞船等）的跟踪以及二者之间的信息传递。这些信息包括跟踪测量、指令控制、遥测、遥感、报话通信和电视图象等内容。这些任务一般说来需要几个系统来完成，但也可以设计一个系统来完成全部任务。美国“阿波罗”飞船的统一 S 波段系统就是个典型例子。

地面发射机是空间跟踪和通信系统的重要组成部分，它的任务就是向飞行器发送上述信息。与一般发射机相比，这种发射机的主要特点是它的一些主要参数指标，尤其是信号稳定性和信号形式与系统的工作性能密切相关。因此，系统首先对这二方面参数指标提出很高甚至相当苛刻的要求。在这种情况下，过去发射机的一些概念、理论、设计方法等已不太适应新的要求。这就要求从事本专业的的设计人员首先要有丰富的系统知识，能从系统的角度去分析问题，提出要求，并研究解决途径；同时要求他们在具体工程设计中广泛采用各种新技术，以满足系统所提出的指标要求。

本书是从空间跟踪和通信的角度出发，论证对发射机子系统和其组成部分的指标要求、关键技术问题和解决途径。概论部分扼要介绍了空间跟踪和通信的原理、发展概况以及地面发射机的特点，目的是帮助读者建立一个初步的但却是全面的概念。概论中指出，振荡统计理论、调制理论、锁相技术、相干通信理论、模糊函数理论等等是研究本专业的的主要理论工具。考虑到不少读者对这些理论（特别是如何把这些理论应用于地面发射机）还比较陌生，所以本书第一部分的第一、二、三章扼要介绍这些理论

的要点,要求读者基本上能掌握这些理论工具,以便进一步解决实际工程问题。但相干通信理论和模糊函数理论由于已有不少参考书作了介绍,故本书从略。第二、三部分分别对连续波系统和脉冲系统进行详细讨论。每一部分开始先是系统分析,然后讨论各组成部分的关键技术问题。书中还给出一些主要电路的工程设计和调试方法,特别着重于介绍近年来国内外电路新技术。需要指出,空间跟踪和通信中,本书的重点在于跟踪测量和指令控制,至于报话、电视等由于和一般通信、电视无本质区别,故本书只作简要介绍。

本书部分内容取材于编著者近年来在国内一些学术刊物或会议上发表的论文或报告,部分内容取材于国内外近年来公开发表的一些主要成果,部分内容取材于本书著者之一为研究生讲课的教材。在编写上我们力图理论联系实际,以帮助读者掌握理论工具,解决实际问题。本书主要供从事航天、雷达、射电天文、遥控、通信以及发射机专业的科技人员和大专院校有关专业师生阅读参考。在编写上力求深入浅出,使中专以上程度的技术人员也能看懂本书基本内容,个别难度较大章节也可供研究生选读。

本书编写过程中得到有关领导和同志们支持和帮助。全书经张履谦和莫恬生二位专家审阅。张履谦还为本书写了序言;童铠高级工程师对本书第二章的编写作了具体指导;某些重要章节还承毛瑞达高级工程师和刘兴术工程师审阅,提出不少宝贵意见,谨此向他们致谢。由于我们水平有限,书中一定还有不少缺点和错误,希望读者批评指正。

编著者

目 录

概论	1
§ 0-1 空间跟踪和通信原理	2
§ 0-2 空间跟踪和通信系统发展概况	14
§ 0-3 空间跟踪和通信用地面发射机的作用和主要特点	22

第一部分 理论基础

第一章 振荡统计理论和频率短期稳定度测量技术	27
§ 1-1 基本概念	28
§ 1-2 振荡统计理论发展概况	36
§ 1-3 频率起伏产生的机理	39
§ 1-4 频率起伏的频域特性	43
§ 1-5 频率起伏的时域特性	49
§ 1-6 振荡统计理论的数学方法	50
§ 1-7 时域与频域之间关系	55
§ 1-8 阿仑方差的性质	57
§ 1-9 频率起伏特性测量方法	60
§ 1-10 频率起伏的测量、计算举例	68
第二章 调制理论	72
§ 2-1 概述	72
§ 2-2 潜在抗干扰定理	75
§ 2-3 连续波调制	89
§ 2-4 脉冲调制	120
§ 2-5 数字调制	144
第三章 锁相技术	153
§ 3-1 基本原理	154
§ 3-2 等效电路	159
§ 3-3 同步与捕获	163

§ 3-4	有规干扰对锁相环影响	169
§ 3-5	噪声干扰对锁相环影响	174
§ 3-6	稳定性问题	177
§ 3-7	取样锁相环	180
§ 3-8	锁相调角	184
§ 3-9	环路部件设计要点	188

第二部分 连续波体制地面发射机

第四章	系统分析	194
§ 4-1	技术指标	194
§ 4-2	频率短期稳定度问题	212
§ 4-3	统一载波系统调制问题	228
第五章	精密频率标准	244
§ 5-1	精密频标源的种类	244
§ 5-2	精密频标源的比较	249
§ 5-3	石英晶体振荡器	253
第六章	频率综合技术	257
§ 6-1	概述	257
§ 6-2	频率综合器方案选择	258
§ 6-3	直接频率综合法电路设计要点	265
§ 6-4	间接频率综合法电路形式	272
§ 6-5	间接频率综合法电路设计要点	282
§ 6-6	数字频率综合法	286
§ 6-7	注入锁相技术在频率综合技术中的应用	292
第七章	调制技术	298
§ 7-1	概述	298
§ 7-2	调制器位置的选择	299
§ 7-3	调制信号的时延	301
§ 7-4	调制指数的测量	311
§ 7-5	几种调相器	315
第八章	功率放大技术	324
§ 8-1	概述	324

§ 8-2	功率放大的方法	324
§ 8-3	功率放大器的特性	328
§ 8-4	功率放大器特性的测量	335
§ 8-5	功率放大器特性的改善	343
§ 8-6	功率放大器的功率稳定	351
§ 8-7	功率放大器的控制和保护	354
第九章	发射机监测技术	357
§ 9-1	概述	357
§ 9-2	调制监测器	358
§ 9-3	模拟信号源	363
§ 9-4	模拟发射机	364

第三部分 脉冲体制地面发射机

第十章	系统分析	365
§ 10-1	概述	365
§ 10-2	作用距离和功率问题	366
§ 10-3	信号形式和波形设计问题	368
§ 10-4	信号的频率稳定度和脉冲波形稳定度	380
§ 10-5	雷达发射机的可靠性问题	397
§ 10-6	相控阵体制雷达发射机的系统设计	400
第十一章	部件设计概要	408
§ 11-1	放大链	408
§ 11-2	调制器	420
§ 11-3	电源	426
第十二章	整机调试和监测	429
§ 12-1	整机调试	429
§ 12-2	幅、相特性和噪声的测量	432
§ 12-3	发射机自动监测问题	435

概 论

空间跟踪和通信是航天技术的一个重要分支。所谓航天技术(又名空间技术)是指空间飞行器(导弹、卫星、飞船等)的设计、制造、发射以及地面跟踪、测量、控制和通信等技术。它既是一门尖端技术,又是一门综合性学科,几乎包罗了现代科学技术各个方面。本世纪五十年代以来,各国政府出于科研、军事和经济等方面的目的,不遗余力推动空间技术,使它获得突飞猛进的发展,它是现代科学技术重大成就之一,也是衡量一个国家科学技术水平主要标志之一。

空间跟踪和通信广义地讲是指地面站对飞行器的跟踪以及二者间的信息传递。这些信息包括跟踪测量、指令控制、遥测、遥感、报话通信、电视图象等一切内容。它在航天技术中的地位,有人比喻为人体中的神经系统。如空间飞行器在靶场试验时需要跟踪测量,在发射时需要制导入轨,在发射后需要指令控制,还有遥测、遥感、图象信息的传递,宇航人员和地面的通信联系等等,都要靠空间跟踪和通信系统来完成任务。因此可以说,空间技术的进展是和空间跟踪、通信的高度发展分不开的。

地面发射机是空间跟踪和通信系统的一个重要组成部分。与一般常规发射机相比较,不同处在于它不仅只是发射信号,更主要是它的指标参数是和整个系统的工作性能密切相关的。从技术上讲,它有二个特点:一是系统对发射信号主要参数(频率、相位、幅度、时间等)的稳定性要求很高;二是系统对发射信号的形式(调制制度、线性和准确度,波形设计等)要求很严,因此,这种发射机的技术难度较大。为了满足系统提出的要求,它采用了大量新技术。本书的主要目的就是从系统的观点来阐明这种发射机的特点,论述系统对发射机及各组成部分的指标要求,讨

论关键技术问题以及解决的措施等。考虑到部分读者对空间跟踪和通信技术比较陌生，在本概论部分将扼要介绍它的基本原理和发展概况，帮助读者了解系统的概貌，发射机在系统中的地位，以及它和其他部分的关系；概论第三节还将重点谈谈这种发射机的特点。

§ 0-1 空间跟踪和通信原理

一、空间跟踪和通信的任务及其组成

上面已谈到，在航天技术领域内，空间跟踪和通信的主要任务就是地面站对飞行器的跟踪，以及在二者间传递轨道测量、指令控制、遥测、遥感、报话通信和电视图象等信息或数据。它的内容很丰富，技术面很广泛，实际上往往需要几个系统才能完成上述全部任务。

对飞行器跟踪测量是空间跟踪和通信的一项重要任务。测量参数包括飞行器的距离、方位、俯仰、速度乃至它的目标特性等。通常采用连续波系统作为靶场测量和制导入轨（例如多普勒测速系统等），采用脉冲系统还可作为战略、战术武器（如空间监视雷达等）。

目前弹道式导弹，如洲际导弹，大都采用惯性制导方式。但在研制阶段的靶场试飞时需外弹道测量系统以精确测定其弹道参数，从而鉴定其惯性制导系统的精度。至于卫星和宇宙飞船的准确入轨，几乎百分之百要依靠空间跟踪和通信系统来保证。表 0-1 列出了一些航天飞行器最大允许的入轨误差。为了保证航天飞行器入轨无误，空间跟踪和通信系统的测量或制导精度必须比它高，例如高一个数量级。

空间跟踪和通信另一个重要任务，是通过遥测来了解飞行器内设备的工作状态和工作环境、飞行器壳体结构状态和环境条件、飞行器姿态参数，以及验证飞行器对指令执行情况等等。遥测也称作“内测”，以别于前面所说的外弹道测量系统。

表0-1 典型航天飞行器最大允许的入轨误差

航 天 飞 行 器 类 别	最大允许入轨误差	
	速 度(%)	方 向 角 (deg)
洲际导弹 要求射程误差0.5km	0.05m/s(关机点)	
地球卫星		
椭圆轨道	1	2~5
圆形轨道	0.1	0.5
登月飞船		
在月球上任一点着陆	0.2	0.8
在月球上50英里圆周范		
围内着陆	0.01	0.02
绕月飞行和返回	0.005	0.002
星际飞船		
在火星的表面上着陆	0.0005	0.0005

指令控制是通过遥控系统实现的。遥控的任务主要是保证在各种干扰情况下，把计算机（或人工）发出的指令信号准确无误地传送给飞行器的接收设备，再由后者形成相应的指令控制输出，使执行机构按预定规律产生动作。

通常在载人宇航飞船上还配置电视系统，以便地面人员通过电视图象看到宇航员的活动。当然也可通过电视来监视飞行器上仪表运转情况。

一个空间跟踪和通信系统有时需配置若干个地面站。各地面站可以有不同的功能，但它们与中心地面站间必须有统一的时间参照系统，以保证整个空间跟踪和通信系统能协同而又准确地工作进行工作。这个时间参照系统就是所谓时间统一勤务系统，简称时统，它也是空间跟踪和通信系统的组成部分。

图 0-1 是某空间跟踪和通信系统组成的示意图。图中空间站中的飞行器上配置测量控制应答机、通信转发器、电视始端、遥控终端和遥测始端等设备。一个空间跟踪和通信系统为了实现多功能，通常需要建立若干个信道。但随着电子技术的发展，国外已

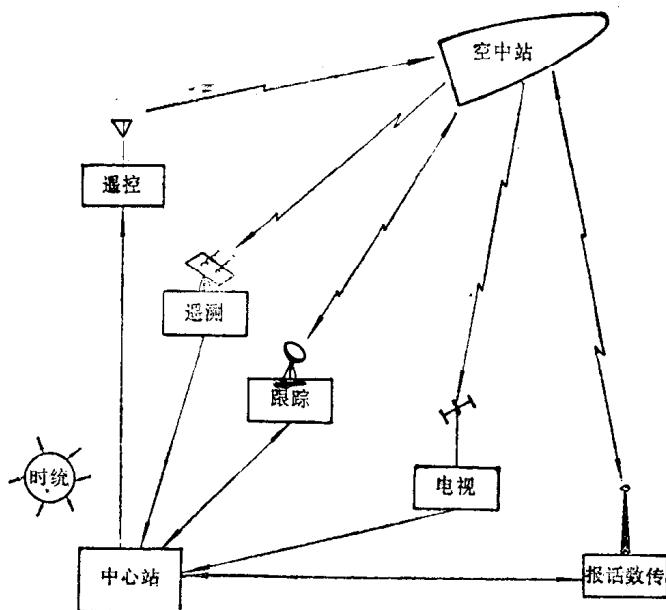


图0-1 空间跟踪和通信系统示意图

出现单信道完成多功能的系统。

二、空间跟踪和通信系统各种功能实现途径

完成上述空间跟踪和通信任务的设备，有连续波体制和脉冲体制两大类。其中连续波体制能完成全部任务，脉冲体制主要用作跟踪测量，也有兼作指令控制的。二种体制各有优缺点，大体上说，连续波体制精度较高，所以是国外靶场用作跟踪测量的主要设备；脉冲体制的显著优点是不一定要飞行器上有应答机与之协同工作，所以可作为战略或战术武器。

1. 飞行器轨道的测定

飞行器的轨道是由飞行器相对于参考系统的距离、角度来决定，换句话说，测轨就是测量飞行器在参考系统中的距离和角度，即把每一瞬间对应的距离、角度描绘在坐标纸上，这一条时间-位置曲线就是飞行器的轨迹。

不考虑参考系统, 就不能完整地讨论跟踪测量系统。直角坐标系是常用的典型参考坐标系。这是一个右手规则系统, 原点在测量的基准点 (通常就是发射台), $+Y$ 轴指向北方, $+X$ 轴指向东方, $X-Y$ 平面与地面相切, $+Z$ 轴向上垂直于切面 (图 0-2)。

坐标系之间可以互相转换, 这决定于最后需要的数据形式。例如, 球面坐标中的雷达参数 R (距离)、 E (仰角) 和 A (方位角) 可以转换成直角坐标系中的三个参数 X 、 Y 、 Z , 它们之间的关系为 $X = R \cos E \cos A$ 、 $Y = R \cos E \sin A$ 和 $Z = R \sin E$ 。同样, 也可转换成方向余弦及距离坐标系, 或者转换成大地坐标系等等。

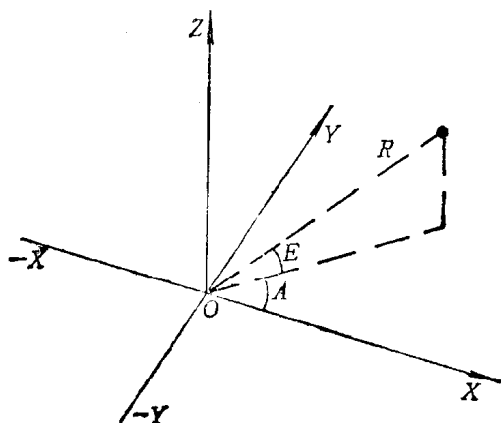


图 0-2 球面坐标系和直角坐标系

(1) 测距方法

测量设备和飞行器之间的距离, 可用脉冲测距或相位比较测距两种基本方法获得, 它们都基于计算信号往返时间来确定距离的原理。

1) 脉冲法

一个射频短脉冲经过距离 R 从飞行器返回, 时延 Δt 等于 $2R/c$, 其中 c 是电波传播的速度 (光速), 于是到目标的距离为

$$R = \frac{c}{2} \Delta t \quad (0-1)$$

2) 相位法

由一个稳定的振荡器产生的连续波被放大后,发射到飞行器,经飞行器反射回来或者由飞行器上的应答机转发回来,然后比较回波信号与发射信号的相位,就能测出距离。

光速 c 、振荡源频率 f 和它的波长 λ 三者的关系为

$$c = f\lambda \quad (0-2)$$

信号经过距离 R 所需的时间

$$\Delta t = \frac{R}{c} \quad (0-3)$$

发射信号经过时间 Δt 之后被接收,则接收到的信号较发射信号滞后了一个相位

$$\phi = 2\pi f \Delta t \quad (0-4)$$

综合式 (0-2)~(0-4) 可得

$$R = \frac{\phi \lambda}{2\pi} \quad (0-5)$$

从式 (0-5) 可见,只要测量出相位 ϕ 的大小,也就知道了从测量站到飞行器间的距离。

顺便说明一下,到达接收机的信号除了反射信号外,还有从发射机泄漏过来的信号,这两种信号可以利用多普勒原理区分之。在最简单的系统中,它们分别与发射机的部分功率相混频,反射信号表现为一差频,泄漏信号则是固定不变的。

上面讲了比相测距法原理,具体方案则是在载波上调制一个适当波长的侧音(也称单音),就可以有适当的探测范围。侧音频率与其最大测量距离的关系如表 0-2 所示。

表0-2 频率及其最大探测距离关系

频率(Hz)	1	10	100	1,000	10,000	100,000	1,000,000	10,000,000
最大探测距离(km)	300,000	30,000	3,000	300	30	3	0.3	0.03

众所周知,一个信号的相位为 65° 或 425° , 在相位计上的读数均为 65° 。并且 425° , 785° , $\dots$, $n \times 360^\circ + 65^\circ$ 等在相位计

上读数都是 65° ，可是 65° ， 425° ， 785° ， $\dots$ ，相对应的距离却是不一样的。例如侧音的频率为 100kHz ，则 65° ， 425° ， 785° ， $\dots$ ， $n \times 360^\circ + 65^\circ$ 分别对应的距离为 0.5416km ， 3.5416km ， 6.5416km ， $\dots$ ， $3n + 0.5416\text{km}$ 。这种测距方法会把远目标误认为近目标，而保证不了测距的单值性，即出现了距离模糊或多值性问题。为了距离的单值性，当然可以用一个频率极低的侧音来保证，如表 0-2 所列的 1Hz 的频率对应的最大探测距离为三十万公里，这对于一般的跟踪系统的距离要求已经可以了，但是带来的问题是精度不够。所以，在实际系统里采用多个侧音测距，它既可保证距离的单值性，又可保证测距的精度。这犹如钟表上的时针、分针和秒针的作用一样：只有时针，对时间的指示太粗了；只有秒针，虽然可以精确到秒，但你并不知道几时几分也是不行的。如果用表 0-2 所列的 8 个频率的侧音测距，则其最大探测距离到三十万公里无模糊，精度可达 0.1m ，而且其间的十、百、千等位数都可读出。

应用侧音的比相法测距，对于极远距离探测时，要求极低频率的侧音。这种极低频率的侧音用电子系统处理很困难，因此，在深空跟踪和通信中，应用一种叫做伪随机码测距法。它利用反馈的移位寄存器来产生长度为 $N = 2^n - 1$ 伪随机码（其中 n = 移位寄存器的级数）对载波进行调制，发射到飞行器，经飞行器反射回来（或应答机转发回来），在接收端用本机信号和收到的回波信号进行相关试探，以确定回波信号与发射信号之间的相移，即信号的往返时间，由此就得到了测量站到飞行器的距离。由于可以产生任意长周期的伪随机码，因而可以探测任意远的飞行器到测量站的距离而不产生模糊。伪随机码的无模糊测距能力随其周期成比例地增加，而测距精度由码元宽度决定，码元越窄分辨力越高。伪随机码测距系统设备方框图如图 0-3 所示。其信息流程概述如下：伪码产生器产生发射码，在副载波上相移键控后，作为测距基带信号对上行载波调相，发送至飞行器上的应答机，然后将它变换成下行频率，再转发回来；这个下行信号被锁相接

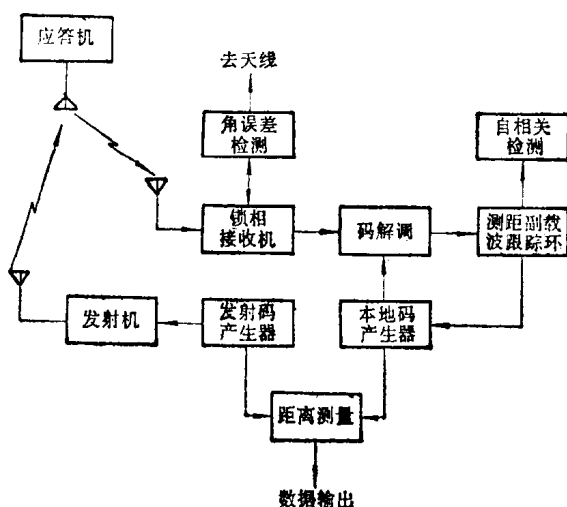


图0-3 伪随机码测距系统设备方框图

收，送到解调部分；本地码产生器产生的本地码对接收信号进行解调相关检波，这样，就再生出测距副载波；测距副载波跟踪环跟踪这一信号，经频率变换后作为本地码的钟，挪动本地码的相位，在自相关值检测部分使测距副载波的振幅成为最大，这时测量出发射码与本地码的相位差，再换算成电波的往返时间，也就完成了距离测量。

为了兼有侧音测距和伪随机码测距方案的优点，有些测距设备是音、码结合的方案。

（2）测角方法

测角设备与目标的连线方向，可以由跟踪天线的实际方向（方位角和俯仰角）得出；也可以在两个相隔一定距离的天线处测定接收载波的相位差，从而获得等效的角度数据。

1）天线定向测角

利用天线方向图的振幅特性来决定飞行器的位置。装在天线方位轴和俯仰轴上的编码盘，根据天线的实际指向，能直接送出数字形式的两轴角度读数。

2) 用相位比较测角 (干涉仪法)

地面跟踪站和飞行器之间的角度能用连续波来测定, 测角原理图如图 0-4 所示。从飞行器发出的信号同时被两个相隔 D 距离的天线所接收, 到达天线 A_1 的电磁波比到达天线 A_2 的电磁波多行进了 $P_1 A_1$ 路程, 这一路程可以换算成相位 $\phi \left(\phi = P_1 A_1 \frac{2\pi}{\lambda} \right)$ rad, 因为 $\sin \beta \approx P_1 A_1 / D$, 所以

$$\beta = \arcsin \frac{\phi \lambda}{2\pi D}$$

(0-6)

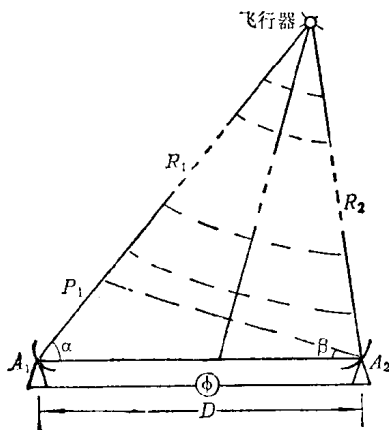


图0-4 比相测角原理图

相位计读数正比于 $\sin \beta$, 也就是得到了 $\cos \alpha$, $\cos \alpha$ 叫做方向余弦。

如果再布置一根天线 A_3 , 使 $A_3 A_1$ 和 $A_1 A_2$ 垂直, 就可以得到另一个方向余弦。有了两个方向余弦, 就可定出飞行器相对于测量站的方向; 如果再知道飞行器到测量站的距离, 就可得到飞行器的位置。

2. 飞行器速度的测量

通常有两种方法可以用来确定飞行器的速度。一种是间接测量法, 就是把距离数据进行微分; 另一种是直接测量法, 即测量飞行器的多普勒频率。

(1) 距离数据的微分确定速度

利用测距装置, 分别在 t_i 和 t_j 时刻测出飞行器的距离 R_i 和 R_j , 则速度为

$$V_{i,j} = \frac{R_j - R_i}{t_j - t_i} \quad (0-7)$$