

微波统一测控系统设计导论

韩魁选 忻鼎勇
柴肇坤 蔡开基 梁振兴 编著

前 言

微波统一测控系统是现代空间技术的重要组成部分，是无线电电子技术的重大成就。它是在连续波定位、遥测、遥控和通信等技术基础上发展起来的综合性多功能测控系统，它的技术涉及到无线电电子技术的各个领域。现在从事有关这方面工作的工程技术人员、高等学校教师和学生感到系统介绍无线电测控技术的工作原理和设计方法的书不多。为此我们编写此书，以供参考。

本书作为微波统一测控系统设计的参考书，由于其中不少章节具有相对独立性，因而对于遥测、遥控、测速、测距等单功能测控系统的设计也是适用的。

全书着重介绍系统的工程设计。但是考虑到我国至今出版这类技术书籍不多，为使初学者也能阅读，而又不必去翻阅大量的参考资料，故本书对遥测、遥控、测距、测速、应答机及目标的引导捕获等技术的基本原理也作了比较系统地交待。

书中某些公式、数据、图表以及设计举例，对于工程设计会有较好的参考价值。

全书共分十章：第一章是系统概述；第二、六章属于系统的综合设计；其它各章分别介绍测距、测速、应答机、遥测、遥控、引导捕获以及监控等分系统。韩魁选同志组织了本书的编写，拟定了全书的编排方案，并编写了第一、八、十章和第二章§2.1，还参与了第五章§5.5的编写；忻鼎勇同志编写了第七、九章和第二章§2.2，并担负了全书的技术审定工作；柴肇坤同志编写了第五、六章和第二章§2.3；蔡开基同志编写了第四章；梁振兴同志编写了第三章和第一章§1.1。

本书在编写过程中一直得到童志鹏教授的热情指导，并在百忙中亲自审阅了稿件，提出了宝贵的意见。陈芳允教授始终热心指导了本书的编写，并在百忙中亲自审阅了稿件，提出了宝贵的意见。本书在编写中还得到钱母荒总工程师和刘铁昌、姜昌高级工程师的指导和帮助。此外参加本书审校的同志还有 吴杰 副研究员和高秉杰、叶平光、王玉璞工程师及何明溪同志等。在此我们对他们表示感谢！

本书涉及的技术领域较广，专业性较强，但限于编著者的水平，书中难免存在错误或不妥之处，望读者批评指正。

目 录

第一章 系统概述 1

§ 1.1 微波统一测控系统的发展简史 1

一、独立载波的测控系统 1

二、统一的测控系统 3

§ 1.2 组成与一般工作原理 4

一、组成 4

二、地面测控站的工作原理 6

三、飞行器上设备的工作原理 9

§ 1.3 工作程序 10

一、截获、搜索与引导 10

二、捕获 10

三、跟踪和数据录取 11

四、记忆状态 11

五、丢失状态 11

§ 1.4 系统的主要技术参数 12

参考文献 14

第二章 信道设计 15

§ 2.1 信号设计 15

一、基带信号的设计 15

二、副载波组合方式的选择 16

三、射频信号的设计 17

§ 2.2 频率流程 18

一、载波频率的选择 19

二、各分机和频率流程的关系 19

三、频率流程图的拟定 23

§ 2.3 功率分配 24

一、多信号调相波形的一般分析 24

二、最佳功率分配 28

三、残留载波功率的限制条件 33

四、功率余量对最佳功率设计的修正 35

五、最恶劣条件下的最佳设计 38

§ 2.4 副载波频率的干扰计算 39

参考文献 42

第三章 距离变化率的测量 43

§ 3.1 多普勒效应 43

§ 3.2 多普勒频率的获得和提取方法 45

一、双程相干载波测速方法 46

二、中频调制转发测速方法 48

三、单程非相干测速方法 50

四、锁相接收机的方案选择 53

五、偏置频率的作用和选择 54

§ 3.3 多普勒频率的测量 56

一、固定时间调整周 56

二、固定周数测时间间隔 62

三、基本固定时间调整周 64

§ 3.4 数据处理 65

一、滑动弧微分平滑法 65

二、整体数据拟合法 68

§ 3.5 振荡器频率的短稳引起的距离变化

率误差 69

一、振荡器的数学模型 69

二、频率稳定度在频域内的定义 70

三、频率稳定度在时域内的定义 71

四、振荡器短稳对双程相干载波测速的影响 73

§ 3.6 距离变化率测量系统的设计步骤 76

参考文献 79

第四章 测距分系统 80

§ 4.1 测距的基本原理 80

一、基本原理 80

二、距离的全跟踪测量法 80

三、距离增量积累法 80

四、模糊分辨问题 81

五、对测距分系统的一般要求 81

六、测距分系统的组成 82

§ 4.2 纯侧音测距系统 83

一、纯侧音的信号设计 83

二、纯侧音信号的提取技术 88

§ 4.3 伪码信号测距系统 98

一、伪码的基本特性 99

二、测距码的捕获与跟踪方式 105

三、最大似然判决和门限判决 110

四、测距码信号的设计 121

§ 4.4 混合测距系统 125

一、纯侧音信号与纯码信号的比较 125

二、混合测距信号的形式 126

三、混合信号的功率谱 129

四、捕获与跟踪方式	131	二、随机误差	209
§ 4.5 距离值的测量方法	134	三、系统误差	218
一、启动脉冲和停止脉冲信号的产生	134	四、总误差	223
二、时间间隔测量法	137	§ 6.2 误差分析在系统设计中的考虑	224
三、相位测量法	140	一、应答机在系统设计中的考虑	224
四、距离增量积累法	143	二、测距音频率 f_R 的选择 (最高测距音的选择)	226
§ 4.6 测距分系统的校准	147	三、系统设计的几点意见	226
一、对系统校准的基本要求	147	参考文献	237
二、工作原理	148		
三、距离校准的实施要点	148	第七章 遥测	228
四、内校准法	150		
附录〔4-1〕 复合码测距的距离计 算法	150	§ 7.1 概述	228
参考文献	151	§ 7.2 分类及基本原理	229
第五章 应答机	153	一、分类	229
		二、调频-调频 (FM-FM) 系统	230
§ 5.1 应答机简史	153	三、脉冲调幅-调频 (PAM-FM) 系统	233
§ 5.2 应答机的组成、作用原理及其 分类	153	四、脉宽调制-调频 (PDM-FM) 及脉位调 制-调幅 (PPM-AM) 系统	236
一、组成与作用原理	153	五、脉冲编码调制 (PCM)	238
二、分类	154		
三、应答机设计原则	155	§ 7.3 遥测副调制的功率效率比较	239
§ 5.3 相参应答机	156	一、起伏噪声	239
一、相参应答机的基本组成、工作原理及 主要技术指标	156	二、信噪比增益和门限值	240
二、工程设计的主要考虑	157	三、误码率	251
三、信道设计	167	§ 7.4 PCM-PSK 遥测技术	255
四、设计举例	170	一、数据发送	255
§ 5.4 非相参应答机	175	二、数据接收	263
一、作用原理及方框图	175	三、副载频传输信道	278
二、设计中的主要问题	177	四、性能分析与精度估算	289
三、设计举例	178	五、剩余码技术	293
§ 5.5 应答机性能测试	188	附录〔7-1〕 冲激脉冲的最大斜率	297
附录〔5-1〕 鉴相器的非线性失真 计算	197	附录〔7-2〕 平方环路的输出信噪比	298
附录〔5-2〕 应答机返回信道的分析 ——返回功率抑制比, 增量噪声谱密度	199	参考文献	299
附录〔5-3〕 调制制度对照表	202		
参考文献	205	第八章 遥控——指令分系统	301
第六章 测速、测距信道误差分析	206		
		§ 8.1 基本原理与工作特点	301
§ 6.1 误差分析	206	一、基本工作原理与工作特点	301
一、系统的模型及工作原理	206	二、数字指令特点	306
		三、导弹与星船遥控的区别	306
		§ 8.2 数字指令的误差控制	308
		一、数字指令误差控制方式的分类与特点	308
		二、抗干扰码及其分类	314
		三、抗干扰编码的一些基本概念	315
		四、常用的抗干扰码	318
		§ 8.3 数字指令的概率计算	321
		一、单向判决系统的概率计算	324
		二、验证反馈系统的概率计算	330
		三、判别反馈系统的概率计算	335

§ 8.4 数字指令副载波的门限信噪比	336
§ 8.5 数字指令结构的设计	338

一、指令格式选择	338
二、指令基带信号的选择	341
三、最佳指令地址码选择	346
四、同步码与位同步	350
五、控制码的选择	352
六、指令编、译码器	355

§ 8.6 指令精度与最小指令间隔	358
-------------------	-----

一、指令精度	358
二、最小指令间隔	359

§ 8.7 保密性与可靠性	360
---------------	-----

一、保密性	360
二、可靠性	362

参考文献	363
------	-----

第九章 引导、捕获和角跟踪分系统 364

§ 9.1 概述	364
----------	-----

一、定义	364
二、程序	365
三、天线系统	367

§ 9.2 引导	370
----------	-----

一、模拟引导	370
二、数字引导	371
三、引导概率的计算	372

§ 9.3 目标的捕获与自动跟踪	377
------------------	-----

一、天线波束的展宽	377
-----------	-----

二、频率捕获	379
三、角度捕获和自跟踪	382
参考文献	388

第十章 监控与微波防护 389

§ 10.1 监控设备职能	389
---------------	-----

一、设计监控分系统的基本条件	389
二、监控设备的职能	389

§ 10.2 微波统一测控地面站监控分	
---------------------	--

系统的设计	391
-------	-----

一、设计原则	391
二、设计程序	391
三、总监控台的设计	394
四、十米固定站监控台的主要监控内容	395

§ 10.3 故障检测与故障修复的基本方法	396
-----------------------	-----

一、设备分类及其特点	396
二、故障检测方法	398
三、故障修复	402
四、故障检测实例	403

§ 10.4 微波统一测控地面站监控的	
---------------------	--

自动化	406
-----	-----

一、微波统一测控地面站的自动监控原理	406
二、设计程序及注意事项	408

§ 10.5 微波防护	410
-------------	-----

一、微波对人体的危害及其安全标准	411
二、微波统一测控系统中对微波辐射的防护方法	412

参考文献	414
------	-----

第一章 系统概述

微波统一测控系统是指一个载波调制若干个测控信号,以完成多种功能的综合无线电测控设备。这种设备通常用以对各种飞行器(如导弹、人造卫星、宇宙飞船和其它探测器等)进行无线电定位、遥测、遥控和通信等。六十年代,在美国的“阿波罗”登月飞行时就使用了这种系统。

微波统一测控系统与独立载波的无线电测控设备(如连续波雷达、遥测设备、遥控设备、数传设备等)相比,它具有一个载波能同时完成多种测控使命的特点,因而可以缓和靶场射频的拥挤,这对试验任务日益频繁的今天是很有意义的,而且还可以简化飞行器上的射频设备,从而减少了飞行器的体积、重量和功耗。因此,这种系统的测控设备在近几十年中有了较快的发展,已成为对各种空间飞行器进行无线电测控的主要手段。

§ 1.1 微波统一测控系统的发展简史

微波统一测控系统是由独立载波(即一个载波调制一个测控信号)测控设备发展而来的,因此这里先对独立载波系统的发展简史作一梗要的回顾。

一、独立载波的测控系统

1. 外测(定位)系统

外测设备用来测定飞行器的飞行轨迹。现有的外测设备主要测定飞行器相对于测控站的距离、距离变化率、角度及相对于两站连线的方向余弦。起初,外测设备仅用于对导弹作安全控制,即当导弹出现故障、偏离正常轨道时,及时加以测定并发出指令,予以自毁。这种用途的外测设备所要求的定位精度不高,通常利用传统的单台雷达测角和测距方法已能满足。但后来要测定导弹制导系统的精度和分离制导元件误差时,这种方法的测量精度就不能满足要求了。例如,如果要求制导系统的三个坐标分速度的测量准确度达到 0.05m/s ,则当飞行目标与雷达相距六、七百公里时,它的测角精度约需千分之一毫弧度,但是最精确的雷达测角精度只能达到百分之几毫弧度,这与要求相差几十倍。要解决这个问题有两种办法:一是改用新体制,如采用连续波干涉仪,即由二个站同时对飞行器发来的电磁波进行测量,以测定电磁波到达这二个站的距离差;二是增加站数,形成测量数据的多余度,通过数据处理以消除固定误差。在五十年代出现的中等基线(30km左右)干涉仪以及六十年代将这类干涉仪和距离变化率测量设备的联用,并结合采用最佳弹道估算方法,从而提高了弹道的测量精度。

1957年第一颗人造卫星问世后,最先用来跟踪人造卫星的外测设备是干涉仪体制,其测角精度为 $0.1\sim 0.2\text{m rad}$,它对500km高空上的卫星,定位误差大约为100m,这样的精度对测量一般卫星来说已是足够的;与此同时,还采用双频多普勒测速和距离变化率系统来跟踪卫星,其测速误差约为 0.1m/s ,相当于卫星的位置误差几十米至百米左右。随

着卫星轨道高度的提高(如大椭圆轨道、同步轨道以及登月飞行和深空星际探测),上述两种跟踪方法的准确度已不能满足要求了。因此,人们又研制了距离和距离变化率系统,这种体制可用于跟踪高、中、低各种轨道的飞行器,尤其更适用于跟踪高轨卫星。另外,由于测量距离需要在飞行器上配备应答机,因而,飞行器的有效载荷和功耗也相应增加。

除了卫星的轨道高度增加外,定轨准确度的要求也在不断提高。从二十多年来卫星发展的历史可以看出,对卫星定轨准确度的要求大约是每隔十年提高一个数量级,如测距精度在六十年为 $800\sim 100\text{m}$;七十年代为 $100\sim 10\text{m}$;八十年代将要求达到 $10\sim 1\text{m}$;预计到2000年时将要求达到 0.2m ,有可能将达到 0.1m 。

2. 遥测系统简况

无线电遥测是指对飞行器的内部功能及物理参数等的测量,并将测量数据传送到地面站进行记录、处理和显示。早在二十年代,无线电遥测就首先被用来接收气球上发回的气象数据;四十年代末,遥测系统开始为导弹研制服务,这时主要是模拟体制,如18路频分制的FM-FM系统;五十年代末至六十年代中期,遥测体制已由模拟体制向数字体制发展,如脉码调制,并朝着增加距离、加大容量和提高精度的方向发展;七十年由于数字通信和新的编码技术逐步用到空间遥测中来,使遥测系统的功率效率有了很大的提高,同时又由于半导体集成电路的发展和计算机的大量使用,使遥测系统进一步朝着小型化、数据处理自动化以及自适应(可编程序、数据压缩)等方向发展。

3. 遥控系统简况

遥控是指地面站通过无线电传输线路发出指令,以实现飞行器的各种动作的控制。无线电遥控技术大致发展于二十世纪初期,如早期的遥控指令使用单音(一个正弦波)指令系统,曾实现了对无人驾驶的飞行器的远距离控制;四十年代初,为了进行导弹的飞行试验而采用了遥控技术,只是所用的指令条数相当有限,一般只用来操作开机、关机、自毁等一些动作,但对指令要求实时性及较高的可靠性。

进入五十年代后,人类开始利用人造卫星进行空间研究活动,无线电遥控也进入了一个新的发展时期。

(1) 地址-执行侧音指令系统。这是五十年代中首先用于卫星的指令系统,它的指令条数少,只有几个“开/关”型指令。如一条指令由四个侧音组成:第一个侧音是地址侧音,不同的卫星使用不同的地址侧音频率;其余三个侧音称为执行侧音。侧音的频率范围为 $1\sim 7\text{kHz}$ 。测地卫星、信使卫星、无线电天文研究卫星上都采用过这种指令系统。由于单音指令简单可靠、解调方便,因此至今仍是导弹试验中最常用的一类。

(2) 侧音数字式指令系统。六十年代初,卫星的指令条数要求增多,简单的实时性开/关型单音指令已不能满足要求,因为采用单音指令需要的侧音频率太多,解调不方便,所以又发展了侧音数字式指令系统。这种典型式的每条指令由四个信号组成:“同步”、“1”、“0”和“空白”。数字编码信号对音频副载波进行脉宽调制,如“空白”位周期是副载波的72个整周;“同步”位是54个整周;“1”位是36个整周;而“0”位是18个整周。副载波对发射机载波调幅,产生脉宽调制-调幅工作方式。每个卫星指定一个副载波侧音频率,范围在 $7\sim 11\text{kHz}$ 。采用这种指令系统的卫星有“轨道太阳观测台”、“飞马座”、“生物卫星”等。

(3) 数字式指令系统。六十年代中期, 随着空间技术的发展, 要求继续增加指令条数, 为此出现了数字指令系统。这种指令系统的特点是容量大, 能进行误差校验以提高可靠性, 能便于与计算机接口以实现自动控制等。

这种指令信号的调制方式一般为脉码调制-频移键控——调幅-调幅型。原始数字指令是脉码调制, 再对两个相干转换的副载波振荡器调频。

指令数据发向卫星, 在执行之前应进行误差校验。在地面站, 已发射的每个指令在监视接收机上被检测出来, 送回指令编码器与指令寄存器的输出进行比较, 如果发现错误, 指令编码器就进入误差工作方式, 准备停发或重发指令。在卫星上, 也应校验接收到的指令是否正确, 并将校验结果通过遥测发回地面。指令系统与遥测系统的关系是非常密切的, 在空间技术中往往把它们合并成为一个系统。

和遥测系统一样, 七十年代由于固体器件和高速计算机的出现, 使遥控技术实现了计算机编码等。

二、统一的测控系统

随着空间科学技术的发展, 卫星、飞船或登月探测器往往需要同时有遥测系统、轨道测量系统、话音系统、电视系统及图象收集系统等。美国“阿波罗”登月飞行就是一个典型的例子。这个系统所具有的作用是:

(1) 从宇宙飞船起飞到入轨, 需要连续不断地进行跟踪, 以便及时判断飞船是否进入轨道; 入轨之后可以间断跟踪, 但在变轨和机动飞行时仍需连续跟踪, 以便确定其位置或加以修正; 在“再入段”也要求连续跟踪, 以便精确计算落点和予以回收;

(2) 需要一条用来测量飞船的各种参数及宇航员生理状态的遥测线路;

(3) 在测控站与宇航员之间需要建立一条话音通信线路及电视传输系统, 以便及时了解宇航员的活动状况及其它有关信息;

(4) 向飞船发送遥控指令;

(5) 深空研究中用于各种数据传输的线路。

在“阿波罗”计划开始时, 曾决定采用已有的“水星”、“双子座”地面跟踪网和飞船上的各种设备(如选用甚高频、超高频和C波段设备, 以完成跟踪和通信任务), 因此, 飞船上还需配备多部发射机和接收机。但为了减轻飞船上的负载, 减少射频数目, 最后, 飞船上采用了统一载波系统。

自统一测控系统问世以来, 就在空间技术领域广中应用, 即:

(1) 作为导弹试验的安全控制。微波统一测控系统具有中等精度的外测能力, 可以测量导弹的飞行轨迹。一旦导弹控制失灵而偏离轨道时, 便发出遥控指令予以摧毁。它也可以和中等基线干涉仪联用, 以提高整个外测的精度。

(2) 用来对卫星、飞船的测控。这是微波统一测控系统的主要应用方面, 各国已建立了不少这样的系统。例如美国的“哥达德”距离和距离变化率系统, 统一S波段系统; 国际通信卫星组织的跟踪、遥测、遥控系统; 应用技术卫星测控系统; 以及日本的卫星测控系统和苏联的卫星测控系统等。由于微波统一测控系统能同时完成距离、速度和角度的测量, 因此可以满足各种轨道卫星的高精度测量要求。它既可以满足卫星、飞船发射阶段的

测控,又能满足它们入轨后的测控。在卫星的运行中,该系统可以测定和预报轨道、制定星历表等。同时,遥测分系统还可以收集卫星工程的遥测参数和其它科学实验的遥测数据。在应用卫星方面,类似的统一载波系统还可以具有接收卫星云图、环境污染和各种资源图象等。

(3) 用作深空探测。在深空探测中主要可以用来测定飞行器的角度、运动的单双向多普勒距离,遥测飞行器的工程和科学实验数据以及发送遥控指令。

§ 1.2 组成与一般工作原理

一、组 成

微波统一测控系统(以下可简称为 MUS)按其功能划分,大致可由下列分系统组成:

- (1) 测距分系统;
- (2) 测速分系统;
- (3) 测角分系统;
- (4) 遥控分系统;
- (5) 遥测分系统;
- (6) 通信分系统;
- (7) 引导分系统;
- (8) 监控显示分系统。

上述各分系统的基本工作原理将分别在以下各章中予以介绍,这里将按其信息流程来说明统一测控系统的工作原理,并分为地面站和飞行器[●]的两个通道予以说明。

图 1-1 是统一测控系统的组成及其工作流程图。图中地面测控站的点划线方框部分相当于一部连续波雷达(其中包括主信道、测距和测速等),它用来完成测轨功能(即测距、测速、测角等)。遥控发送设备主要由指令编码器、遥控副载波调制器等组成,经遥控信号调制的遥控副载波送至系统主信道的发射机调制器对载波进行调制。遥测接收设备主要包括遥测副载波解调器、分路器、显示器、记录器等,其作用是完成对遥测副载波的解调、

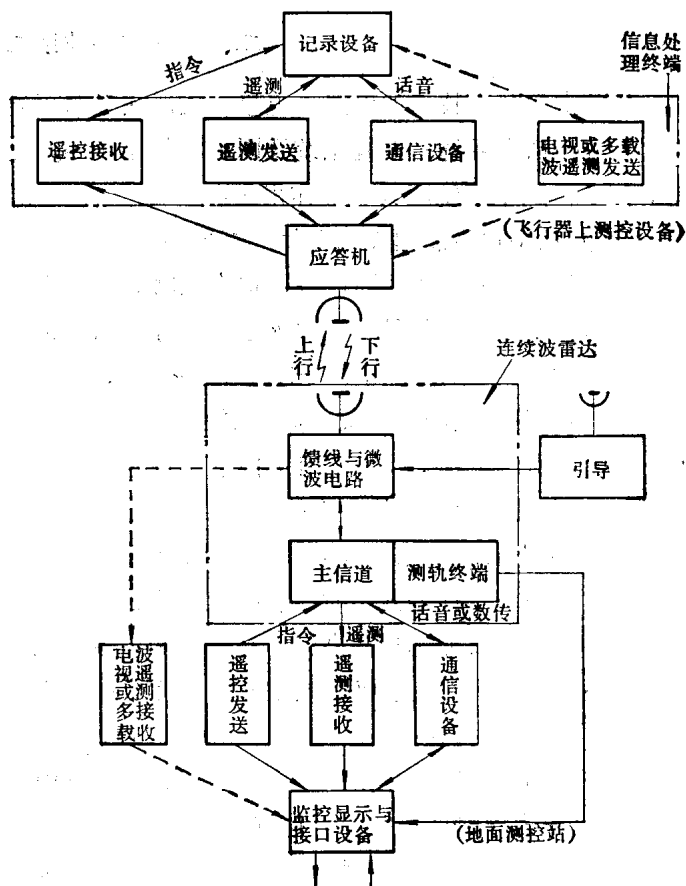


图 1-1 统一测控系统的组成及其工作流程图

号调制的遥控副载波送至系统主信道的发射机调制器对载波进行调制。遥测接收设备主要包括遥测副载波解调器、分路器、显示器、记录器等,其作用是完成对遥测副载波的解调、

● 这里的飞行器一般是指导弹、人造卫星、飞船、轨道空间站及其它探测器等。

分路及信号的显示与记录。通信设备主要包括话音或数传的副载波解调及有关的终端设备。监控、显示是地面测控站指挥、控制及设备功能检查、显示的中心。引导设备则与一般的连续波雷达相类似。至于测控站与计算机或其它外界设备的联接可由接口设备来完成。

飞行器上的应答机设备是空中收发的主信道，它用来转发测距、通信（数传）等信号。当没有上行信号（指由地面站至飞行器上应答机的信号）时，它相当一部无线遥测发射机，

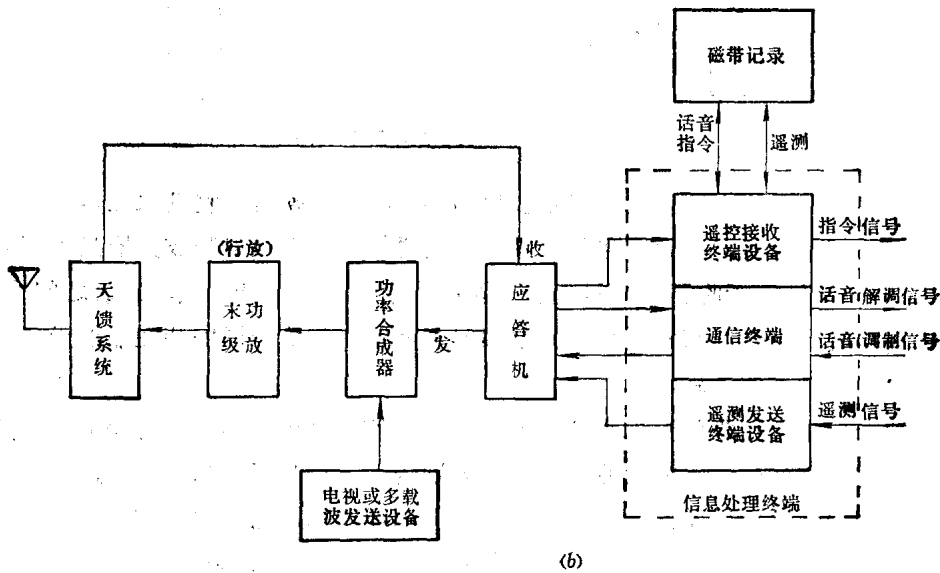
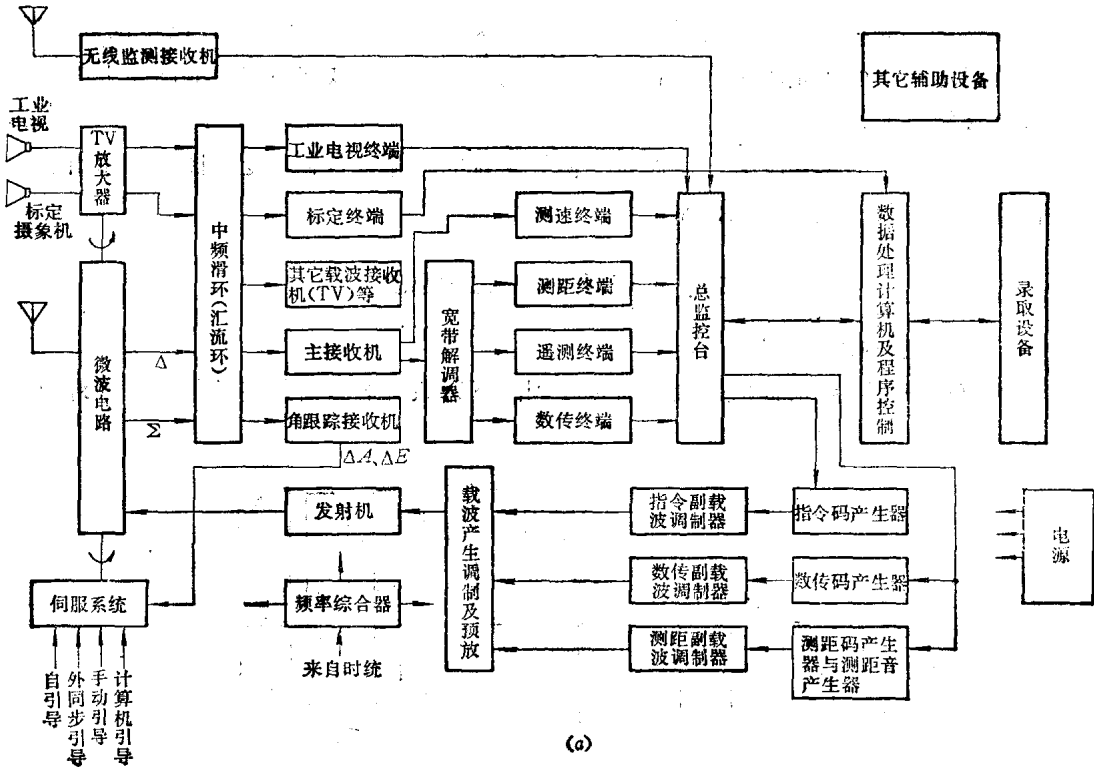


图1-2 微波统一测控系统工作原理图

(a) 地面测控站的工作原理；(b) 对应的飞行器上设备的工作原理。

向地面发射载波和遥测信号，供地面站频率和角度捕获，并可提供遥测信息。飞行器上的遥控接收设备用来解调遥控副载波和对遥控指令进行译码。遥测发送设备包括传感器、交换子、变换器以及遥测副载波调制器等，其输出的遥测副载波被送至应答机对下行载波进行调制。通信设备包括话音副载波解调与调制设备等。记录设备可用来实时记录指令、遥测、话音等信号，以便需要时重放。飞行器上的遥控接收设备，遥测发送设备以及通信设备等有时也统称为信息处理终端。

在微波统一测控系统中，有时还用同一收发天线、馈线系统和参放，以传送多个载波，如电视或遥测一类的容量较大的信息。这种传输方法称为多载波传送，如图 1-1 中以虚线连接的方框部分所示。

随着航天技术的迅速发展，微波统一测控系统的用途也日益广泛，图 1-2 示出了一个典型的微波统一测控系统的工作原理图。

二、地面测控站的工作原理

1. 下行信道的工作情况

当地面站正常跟踪信标后，天线将接收到的下行微弱射频信号传送至微波电路中，如图 1-3 所示。

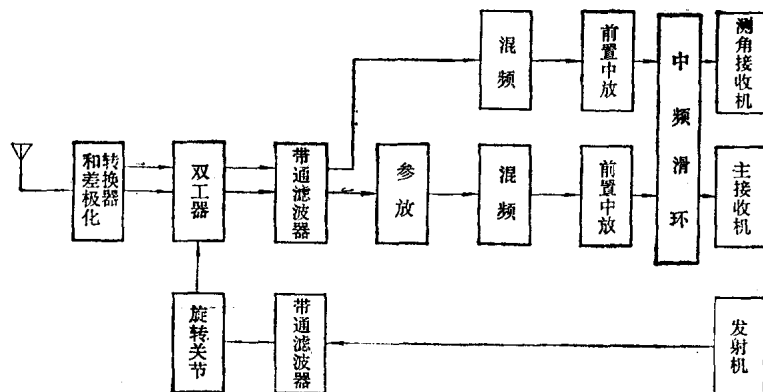


图1-3 MUS测控站的微波电路

微波电路是随天线而转动的，它主要包括和差极化转换器、收发双工器、带通滤波器以及低噪声射频放大器、混频器和前置中频放大器等。低噪声射频放大器又称高放（如参放），它对整个系统的接收灵敏度将起着重要的作用。为了减低天线与高放之间的传输噪声，以提高接收灵敏度，常常将高放、混频器和前置中放等一同安装在靠近天线的高频箱内，而高频箱又随天线而转动。

在微波电路中，接收到的信号被分成和（主）信道（传送信息）与差信道（角信道）两路信号。这两路经过前置放大后的信号被分别送到主接收机与角接收机。

主接收机主要由混频器、中放及一个载波锁相环组成，它的主要作用是：

（1）将前置中放的输出信号进行混频和放大，并送至宽带解调器，解调器解调各副载波并传送至各个分系统的终端解调设备；

（2）在中频频率上锁定载波分量并进行自动跟踪；

(3) 提取一个相干载波，它是与接收到的载波频率和相位相同的正弦信号，以供相干解调和测速终端使用；

(4) 提供自动增益控制电压和载波捕获的指示信号。

主接收机的工作原理如图 1-4 所示。锁相环锁定在中频频率上。环路的闭合可以在第二混频器，也可以在第一混频器，二者优缺点的比较如表1-1中所列。

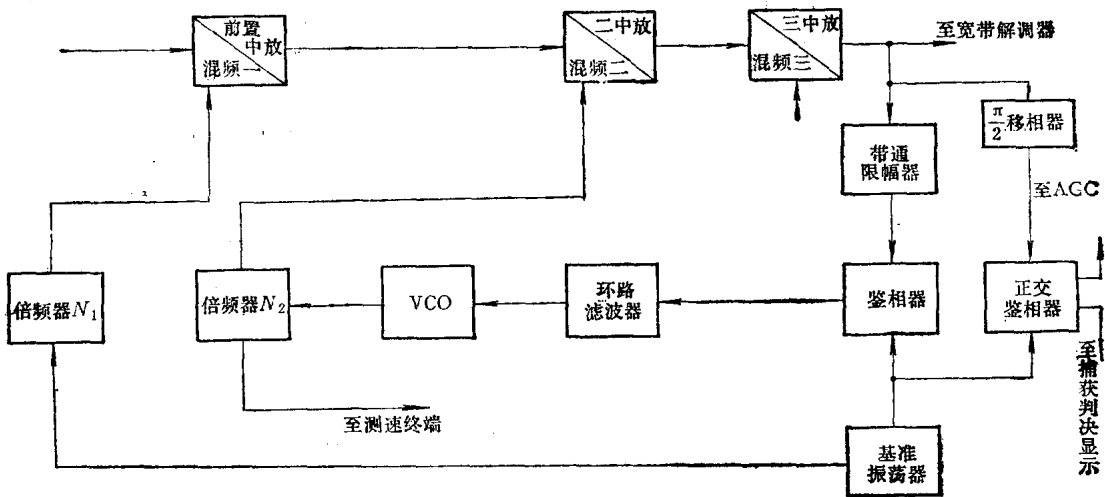


图1-4 主接收机工作原理图

表1-1 主接收机中两种不同环路的闭合方式比较

性 能	锁定在第一本振	锁定在第二本振
测速精度	好	差
VCO频率稳定度对测速影响	小	大
使用方便程度	不方便	方便

图1-2 (a) 中中频汇流环的作用是联通高频箱与地面接收机的电路，使前置中放输出的中频信号在天线旋转时保证能通过中频汇流环进入接收机的中放。

宽带解调器可以是宽带鉴相器或鉴频器（视载波调制形式而定）。它的主要作用是将各副载波从载波中恢复出来，供各分系统终端解调。从载波中解调出来的测距码、测距音及遥测、数传等副载波，再通过不同中心频率的滤波器（与各个副载波相对应），被分别送到各自的终端解调设备。各自终端设备再将有用信息（如遥测 PCM 码等）从它的副载波中解调出来，并处理成所需要的形式。如在测距终端中得到的测距信息与高侧距音及测距码的相位延时，可确定目标的距离R；又如在遥测终端将遥测信息从遥测副载波中解调出来等。各种解调终端输出的数据通常被直接送往监控台和计算机中作进一步处理及显示。

2. 上行信道的工作情况

上行的遥控、数传、测距信号在地面站中先对各自不同频率的副载波调制，然后这些副载波再同时对载波调制。调制信号经过n次倍频，达到所设计的射频频率，再进行射频功率放大，然后通过微波电路和天线将射频信号辐射到空间。一个典型的发射机方框图如

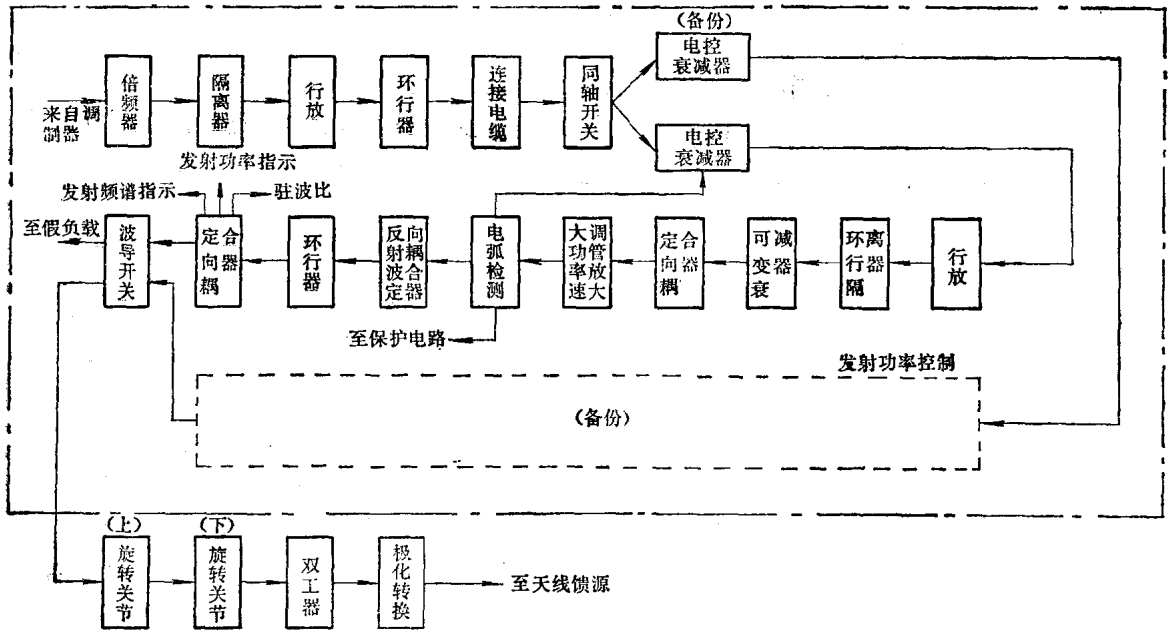


图1-5 MUS测控站发射机的一般工作原理

图 1-5 所示，它的工作原理与连续波雷达发射机的工作原理相似，故不再多叙。

图 1-2 (a) 中的频率综合器是向地面站各个部分提供稳定的各种基准频率信号，以作为基准信号源。为了达到较高的频率稳定度，通常采用石英晶体或原子钟作为频率标准。为了变换工作频率点，而又不导致飞行目标的频率丢失，需附加一个锁相环，使射频能连续地从一个频率变换到另一频率，其方框图如图 1-6 所示。

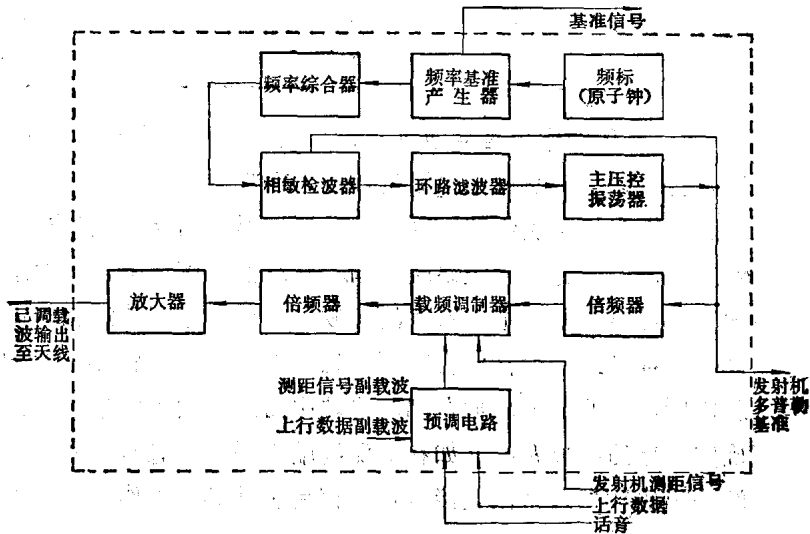


图1-6 发射机中的频率产生和预调电路

微波统一测控系统的角度自跟踪通常采用单脉冲工作方式。馈源有两种方式：多喇叭馈源及多模馈源。多模馈源常用的和模是 TE_{11} ，差模是 TM_{01} 及 TE_{21} 等。

角跟踪接收机的作用是将接收到的和路与差路（包含了天线方向与飞行目标之间误差信息）载波信号转换成对应的直流误差信号，去驱动天线伺服系统，使天线电轴自动地跟随飞行目标。角跟踪接收机可以采用单信道、双信道和三信道等型式。有关角跟踪的详细情况可参见第九章论述。

监控显示台是微波统一测控设备的程序控制和工作状态显示的中心。关于控制、显示的内容及自动化程度，往往视使用要求的不同而异，一般采用有线监测（常见的）和无线监测两种。图1-2中的小回路无线监测接收机是一个典型的例子，它是一部小型接收机，小天线位于主天线附近。小回路接收主要用来接收上行信号及检查上行信号和调制指数，这对于监视指令码、减少误指令概率是十分有效的。例如，将它解调出来的指令码与发射端的原始指令码比对，若发现有错误，则可立即予以校正。此外，还可以连续记录上行信号（这是系统故障分析的重要资料），监视整个系统的工作情况。小回路无线监测的最大优点是它对被测系统没有任何影响。

图1-2(a)中计算机的主要职能是：完成各种信息处理；控制整个系统的工作程序；完成系统故障预报及自动化监测；对系统进行轨道预报及数字引导等。今后随着微波统一测控系统的自动化程度、使用范围、灵活性以及性能要求的不断提高，计算机的作用必将显得更加重要，某些需要记录的数据或状态也可由录取设备进行记录。

三、飞行器上设备的工作原理

微波统一测控系统飞行器上的设备及其工作原理如图1-2(b)中所示，它主要由天馈系统（包括双工器）、末级功率放大器（如行波管放大器）、功率合成器、应答机、信息处理终端和记录设备等组成。

飞行器天线收到来自地面站的微弱信号，经过双工器送入应答接收机。接收机可以鉴相或鉴频工作，这可视上行载波调制方式而定。接收机对上行载波进行解调，并将解调得到的其中要求转发的信号（如测距、数传等信息调制的副载波信号）重新对下行载波进行调制。而解调得到的另一些信号，如指令和话音副载波被分别送到遥控接收终端及通信终端。遥控接收终端完成指令副载波解调、译码，并将指令执行脉冲送至执行机构，而通信终端完成话音的调制与解调后送至受话器。

下行信息除上述转发信号外，还有遥测信号。传感器输出的电信号，经交换子、变换器、多路调制器和副载波调制器，然后送到应答机。在应答机中遥测副载波和转发信号（测距、数传等）副载波同时对下行载波调制。已调载波信号从应答机输出端送至功率合成器，并与其它调制载波（如电视载波或多载波遥测）按一定功率比例相加，同时激励末级功率放大器（如行波管放大器）。功率放大器的输出信号经过双工器及天馈系统发送出去。

磁带记录器可对遥测、话音、指令进行实时记录或记录重放。

必须指出，微波统一测控系统的通道是由地面设备与飞行器应答机两部分设备组成的。在进行信道设计时（如工作方式、调制体制、频率选择、功率分配等等）都必须加以统一考虑和设计。

微波统一测控系统虽然一个载波能够调制若干个信息，但不能调制太多，因为它将受

到射频信息带宽的限制, 带宽过宽, 调制效率下降, 干扰也会增加。不过, 为了节省设备, 有时却可以借用微波统一测控系统的天线和馈源系统, 来实现多个载波调制。

§ 1.3 工 作 程 序

所谓工作程序是指地面站从搜索飞行目标至进入自跟踪和测控的这一过程。在单站锁相工作时, 工作程序大致可分列以下五个步骤。

一、截获、搜索与引导

在飞行器起飞之前或正在运行中, 飞行器上应答机已开机, 并向地面站发送遥测的调制射频信号, 这时, 地面测控站便可按预定的飞行轨道截获目标。但由于地面测控站天线波束狭窄 (只有零点几度的波束宽度), 而飞行目标轨道散布较大, 使飞行器很可能超出天线波束所照射的空间。为了可靠地截获目标, 往往要求地面站天线应在一定的空间范围进行搜索, 或者在外界信息的引导下使天线波束逐渐接近于目标 (飞行器)。

搜索方式一般可分为手控、半自动和自动三种方式, 而引导方式通常也有三种分类形式, 即: 按信号形式分有模拟和数字二种; 按信息来源分为实时数据引导和程序引导; 按引导仪器分有程序仪、经纬仪、炮镜和雷达等。

二、捕 获

微波统一测控系统的捕获包括双向载波捕获、数据捕获、距离捕获和角度捕获等。

1. 双向载波捕获

当飞行器进入天线波束的空间时, 地面测控站便能接收到下行载波, 并由载波锁相环锁定。同时也由地面站向飞行器发送上行载波, 且飞行器上的应答机也对上行载波加以接收和锁定, 这就是双向载波捕获。

2. 数据捕获

一旦双向载波捕获程序完成, 便进入数据捕获。由上述所知, 在微波统一测控系统中, 各种原始基带信号 (或称数据, 如遥测、遥控、语音、数传等) 先调制在各自的副载波, 以后合成后再共同调制载波。数据捕获是指载波解调后副载波和码信号的捕获, 如遥测通道中副载波锁相环的锁定及码同步和帧同步的检出等 (参见第六章)。

3. 距离捕获

微波统一测控系统的距离捕获可与数据捕获同时进行, 但也必须在双向载波稳定地被锁定之后进行。同时, 根据不同的测距方案, 距离捕获过程也略有不同 (详见第四章)。

一旦距离捕获结束, 即可给出飞行目标的径向距离 R , 并且测距分系统将自动地转入自动跟踪方式的工作状态。

在距离捕获之前或同时, 开始角度捕获, 即使天线波束中心准确地对准飞行目标。角度捕获完毕, 测控站便转入角跟踪状态。在这之前, 虽然飞行目标已位于天线波束之内, 但所测的角度信息不能被利用, 只有当天线进入角度自跟踪状态时, 才是精确可用的。当然, 角度的捕获及其转入自跟踪状态的切换可以是自动、半自动或人工地进行。本系统多采用单脉冲角跟踪原理。有关角度捕获及自跟踪过程可参见第九章所述。

三、跟踪和数据录取

地面测控站进入自跟踪状态（角跟踪和数据跟踪）之后便开始了正常工作，这时天线自动跟随飞行器运动，环路也已自动跟踪各自的信号，同时距离、速度、角度信息经采样（如每秒1, 5, 10, 20次）后便不断地送入计算机进行处理，并将其结果送至监控台显示。飞行器上的遥测数据及电视信号等通过下行信道被测控站接收、解调，并送往终端进行记录或实时显示。地面遥控指令又通过上行信道对飞行器进行控制，且这时的话音、数传也可同时传输。

四、记忆状态

与连续波雷达相类似，在自跟踪过程中，测控站应对角度、距离、载频具有一定的记忆能力，以便由于各种因素（如飞行姿态的改变及尾部喷出火焰的干扰等）致使目标丢失时，仍不必重新捕获，便能继续自动跟踪（惯性跟踪）。其记忆能力的大小主要取决于各种跟踪环路的结构、参数及目标运动速度等，例如载频的记忆能力与载波锁相环的带宽、增益及校正网络的参数等有关，角度记忆与伺服跟踪环路的参数有关。因此，当设计各种锁相环路和伺服跟踪环路时，应将记忆能力这个因素考虑进去。

五、丢失状态

若测控站的目标丢失时间超过记忆时间，则测控站便失去惯性跟踪能力，这时整个测控系统便将重新转入捕获状态。由不同的丢失状态（如载频丢失、数据丢失、距离丢失或角度丢失）到重新捕获状态的转变过程也就不同，这要视具体工作程序和情况而定。图1-7示出了一个典型MUS测控站的目标丢失与重捕过程。

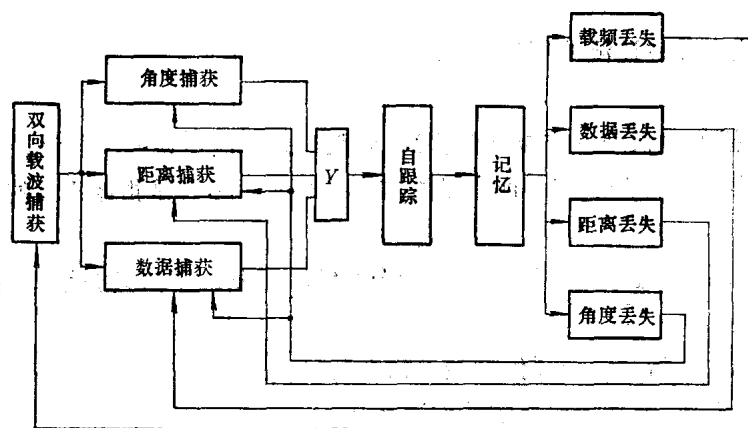


图1-7 MUS测控站的目标丢失与重捕过程

由图中可知，只有当载频丢失时，捕获过程才从头开始重新进行，而其它情况的丢失只需局部重捕。例如，角度丢失以后，只要对角度、距离和数据重新捕获就可以了，而不再对载波重捕，这样就可以节省时间。

§ 1.4 系统的主要技术参数

微波统一测控系统的技术指标因用途不同而异,下面仍以单站相参工作的微波统一测控系统为例,说明其主要技术参数。

1. 作用距离

(1) 系统的最大作用距离,对于测轨、遥测、遥控、通信等各种功能的最大作用距离是不同的;

(2) 无模糊距离,指测距分系统能够提供(无模糊)测量的最大距离(无模糊距离应大于系统的最大作用距离);

(3) 最小作用距离,指保证系统正常工作时所限制的最小作用距离。

2. 工作频率及点频数

(1) 上行载波频率,即 MUS 测控站发射的载波频率;

(2) 下行载波频率,即飞行器上应答机发射的载波频率;

(3) 载波频率点,通常载波频率可以因任务的改变而变换,如图1-8所示。上行、下行频率均可在5个点频中任意挑选,点频之间相距一定间隔。图中实线为正在使用的点频,虚线为备用点频;

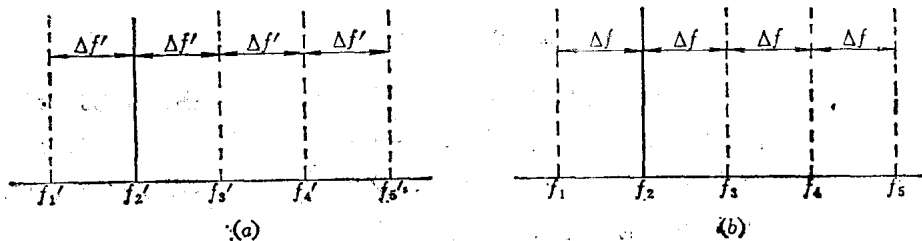


图1-8 上行与下行的载波频率点

(a) 上行载波; (b) 下行载波。

(4) 电视或多载波遥测的频率选择。

3. 定位误差

定位误差包括测角误差(方位与俯仰)、测距误差和测速误差。各种误差通常由随机误差 Σ 与系统误差 Δ 两部分组成,前者以均方根值表示,后者是指修正后的残差。

4. 遥控

在微波统一测控系统中大多采用数字指令系统,因此,下面只介绍有关数字指令的技术参数。

(1) 指令条数,指系统能提供的最大指令数目;

(2) 指令码速率,即指令码元的传输速率;

(3) 误指令概率,指传输信道中数字指令产生错误的概率,它又可分成漏指令概率与虚(串)指令概率(详见第八章);

(4) 单元误码率,即错误的码元个数与传输的总码元数之比;

(5) 指令延迟时间,指从地面发出遥控指令一直到飞行器上译码器译出并执行的延迟时间,有时也可称为指令精度;