

卫星通信地球站设备丛书

地球站微波收发信机

高桂友 朱学祺 蓝登武 编著

DIQIUZHAN WEIBOSHOUFA XINJI

92

人民邮电出版社

出版说明

为适应卫星地球站维护工作需要，我们将按卫星地球站设备组成组织出版“卫星通信地球站设备丛书”一套，包括《卫星通信天线、馈源、跟踪系统》、《地球站微波收发信机》、《地球站终端设备》、《地球站电源设备》四个分册。由于地球站种类较多，为兼顾各大、中、小型站，故侧重介绍各类站共性的内容。编写时，注意到既对属于早期但目前应用仍较多的设备加以叙述，也要对正在发展中的新技术以及新设备作介绍。希望这套丛书有助于提高设备运行的质量，并能起到开阔地球站工作人员的视野的作用。

前 言

卫星通信地球站的微波收发信机通常是指地球站的天线、馈源与终端之间的信道设备，主要包括低噪声放大、高功放、变频三个分系统。本书的结构安排亦与之相应，第一章为总体介绍，第二至第四章为低噪声放大器，第五至第八章为上下变频器及微波频率源（锁相源与微波频率合成器），第九、十两章为高功率放大器。全书详尽地介绍了各部分的设备组成、特点、电路工作原理、基本设计考虑、调试及主要技术指标的测量。由于地球站的类型很多，我们取其中共性方面进行叙述，对一些正在发展的新技术也作了较多介绍。例如低噪声微波场效应管放大器、微波介质谐振器滤波器、固态微波功放、数字式微波频率合成技术、集成中放等。对某些正逐渐趋于淘汰而目前仍在很多站中应用着的设备也予以适当介绍。例如参量放大器、参量上变频器、分立元件中放等。本书在阐述中，着重于物理概念阐述，力求深入浅出，但对一些基本电路工作原理的分析，则适当引入一些数学推导，以便得出精确的结论或数据，以利读者加深理解。每一部分的最后都安排了主要技术指标测量。某些指标可能是几个部分都应测量的，但因各有其针对性，且具体测试方法及测量系统的配置有所不同，故仍分别进行叙述，不过尽量避免重复。

本书一至四章由朱学祺编写，五至八章及第九章中 400 瓦 TWT 高功放及固态功放两节由高桂友编写，第九章的其它各节和第十章由蓝登武编写。全书由高桂友统编。童卫平同志修改了第八、九章的部分章节。何返平同志绘制了部分图稿。由于我们水平有限，错误和不当之处恳请读者指正。

作者 1988. 12

目 录

第一章 概述

第一节 微波收发信机在地球站的作用	1
第二节 地球站收发信机主要特点	2
第三节 地球站收发信机的组成及设计考虑	6
一. 微波接收系统的组成	6
二. 微波发信系统的组成	7
三. 微波收发信系统的设计考虑	9

第二章 参量放大器

第一节 概述	20
第二节 变容二极管	21
一. 变容二极管的结构与等效电路	21
二. 变容二极管的主要参数	22
三. 泵浦激励下非线性电容的变频效应和负阻效应	25
第三节 单回路参量放大器	28
一. 基本原理	28
二. 基本电路结构	31
第四节 参量放大器设计的基本考虑	35
一. 参量放大器的增益 G_0	35
二. 单调谐参量放大器的带宽	37
三. 双调谐参量放大器	39
四. 参量放大器的噪声系数	42
五. 参量放大器系统噪声温度	45
第五节 W205 型参量放大器	47
一. 概述	47

二. 主要技术指标	48
三. 设计特点	49
四. 参放的调整	52
五. 参放的使用和维护	55

第三章 微波低噪声晶体管放大器

第一节 概述	56
第二节 微波低噪声场效应晶体管	57
一. 工作原理	57
二. 微波 FET 小信号等效电路	58
三. GaAs—MESFET 的噪声等效电路和噪声系数	60
第三节 微波晶体管网络的 S 参量	62
一. S 参量、归一化波及其物理意义	62
二. FET 的输入输出阻抗、转换功率增益 G_T	65
三. 微波晶体管稳定性判别	67
第四节 单级低噪声 FET 放大器的设计考虑	69
一. FET 的选择	69
二. 匹配电路设计考虑	70
三. 平衡放大器	71
第五节 级联放大器	77
一. 两级放大器	77
二. 级联放大器	79
三. 量度放大器的概念	81
第六节 微波 FET 放大器的偏置电路	82
第七节 卫星地球站用低噪声 FET 放大器实例	85
一. 4GHz 低噪声 GaAs—FET 放大器	85
二. 6GHz 低噪声 GaAs—FET 放大器	87
三. 12GHz 低噪声 GaAs—FET 放大器	90

第四章 微波低噪声放大器主要指标测量

一. 输入、输出回波损耗测量	92
----------------------	----

二. 幅度/频率特性测量	93
三. 噪声温度测量	94
四. 动态范围测量	95
五. 三阶互调分量测量	96

第五章 下变频器

第一节 概述	98
一. 下变频器的作用和组成	98
二. 对下变频器的基本要求	99
第二节 变频方案及 SCPC 卫星地球站下变频器	101
一. 变频方案	101
二. 典型 SCPC 地球站下变频器简介	102
第三节 微波混频器	106
一. 概况	106
二. 微波二极管混频器的基本分析	108
第四节 平衡混频器	121
一. 工作原理	121
二. 微带分支线定向耦合器平衡混频器	126
三. 双平衡混频器	134
第五节 中频放大器	138
一. 前置中频放大器	138
二. 主中放和后置中放	143
第六节 滤波器	152
一. 交指型带通滤波器	153
二. 微波介质谐振器滤波器	165

第六章 上变频器

第一节 概述	170
一. 上变频器的作用及对其基本要求	170
二. 上变频器的组成	171
第二节 典型地球站上变频器简介	172

一. 数字 SCPC 站上变频器	172
二. 15/13 米站上变频器	176
第三节 上变频混频器	178
一. 肖特基管上变频混频器	178
二. 微波场效应晶体管混频器	181
第四节 参量上变频器	186
一. 参量上变频器工作原理	186
二. 参量上变频器的微波结构	188
三. 上变频器的交调问题	191
第五节 中频群时延均衡器	192
一. 概述	192
二. 群时延均衡器的工作原理	193

第七章 微波锁相振荡器和微波频率合成器

第一节 概述	198
第二节 微波锁相振荡器	200
一. 锁相振荡器的基本类型	200
二. 1GHz 取样锁相源	203
第三节 微波频率合成器	223
一. 主要性能指标	223
二. 数字式微波频率合成器简介	225
三. 程序分频器	232
四. 数字电压型鉴相器	246
五. 微波倍频器	254

第八章 变频分系统测量

一. 电压驻波比及回波损耗测量	260
二. 功率测量	262
三. 振幅/频率特性测量	262
四. 群时延特性测量	264
五. 多载波互调比测量	265

六. 下变频器选择性测量	265
七. 下变频器噪声系数测量	266
八. 镜像干扰抑制比测量	267
九. 饱和电平测量	268
十. 杂散输出测量	269
十一. 残余调制噪声测量	270
十二. 本振频率及频谱测量	272

第九章 高功率放大器

第一节 概述	274
一. 高功率放大器的组成	275
二. 对高功率放大器的基本要求	275
三. 高功放系统输入、输出信号流程	277
第二节 速调管放大器	278
一. 速调管放大器工作原理	278
二. 速调管放大器特性	284
三. 速调管放大器电源	290
四. 速调管高功率放大器操作过程	292
第三节 控制电路和保护电路	293
一. 注电压和注电流的保护	294
二. 壳体电流的保护	294
三. 风压告警控制设备	295
四. 功率自动稳定电路	295
五. 大驻波保护电路	297
六. 快速自动倒换分机	299
七. 增益调节装置	301
第四节 行波管放大器	302
一. 行波管的结构	302
二. 行波管工作原理	304
三. 行波管主要特性	305
四. 行波管各极电压	307
五. 行波管放大器与速调管放大器主要特性比较	309

第五节 400 瓦 TWT 高功放	310
一. 工作过程	310
二. 主要技术指标	312
三. 调试和维护	314
第六节 固态微波功率放大器	317
一. 概述	317
二. 微波功率场效应管	318
三. 微波固态功放电路	322
四. 功率合成简介	327
五. 适用于卫星地球站的几种固态微波功放产品	328
第十章 高功率放大器主要指标测量	331
一. 功率和功率增益测量	331
二. 幅度/频率特性测量	333
三. 多载波互调比测量	336
四. 调幅/调相转换系数测量	337
五. 群时延特性测量	338
六. 带外杂散抑制制度测量	339
七. 微波辐射与电离辐射测量	340
附录一. 微波波段划分及代号表	343
附录二. 同轴线参数表	344
附录三. 矩形与扁矩形波导参数表	347
附录四. 微波设备中常用高频插头、插座件	348
参考资料	350

第一章 概述

第一节 微波收发信机在地球站的作用

卫星通信是以微波为射频、利用人造地球卫星作中继站转发或反射无线电信号在两个或多个地球站之间进行的通信。以静止卫星通信而言,某一地球站所发射的微波信号,被在赤道上空的通信卫星转发器接收,经放大、变频或者解调后再重新调制变成下行微波频率的信号发回地面,为其它地球站所接收,从而完成通信过程。这里,定点漂浮在赤道上空距地面约 36,000 km 同步轨道上的通信卫星是构成卫星通信的两大要素之一。在地球赤道上空等间隔地配置三个卫星,可构成覆盖全世界的通信网。目前国际卫星通信技术日趋成熟,在三大洋上空的 Intelsat 卫星组成的全球通信网承担了 80% 的国际通信业务和全部国际电视转播业务。可见,卫星通信已成为国际通信的主要手段。到目前为止,Intelsat 卫星组织已制造了六代卫星。

卫星通信的另一大要素是地球站。根据国际通信卫星组织规定,可把卫星通信地球站分为标准站和非标准站两大类。其中,天线直径为 26 m 级, $[G/T]^* \geq 40.7 \text{ dB/K}$ 的站称为标准 A 站;天线直径为 10 m 级, $[G/T] \geq 31.7 \text{ dB/K}$ 的站称为标准 B 站;与上述规格不同的站称为非标准站,非标准站用于区域卫星通信和其它特殊情况。

* $[G/T]$ 值又称为地球站的优值。其中 G 是地球站接收天线增益; T 为接收系统的等效噪声温度。

我国从 70 年代开始发展卫星通信,至今已进入较为成熟阶段。除成功地发射实用通信卫星外,遍布全国各地的各种类型卫星地球站在国际通信和国内公用及专用通信网中发挥着重要作用。

从发展趋势看,今后重点将是发展国内卫星通信。国内卫星地球站一般有以下几种类型:

①大型站:用 15m 以上带跟踪装置的天线,发射功率在 500W 以上,接收机用常温参量放大器作前端放大。用于业务量大的通信中心站。

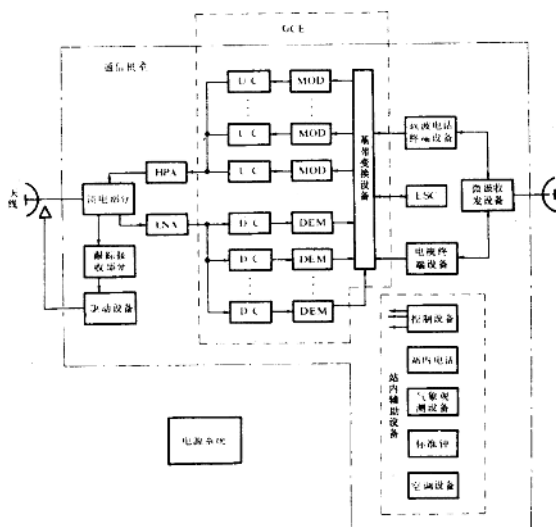
②中型站:用 5~10 m 不带跟踪装置的天线,发射功率小于 250W,接收机用低噪声场效应放大器。通常用作中心业务通信站。

③小型站:用 5 m 以下天线,发射功率小于 25W,接收机用低噪声场效应放大器。常用于以大、中站为主站具有很多小站的各种专用网中,亦可用于移动、应急和农村通信。有时,把天线在 2 m 以下的站称为微型地球站,或甚小口径终端站 (VSAT)。

地球站的规模和组成取决于通信方式和应用场合。但不论何种地球站,都要包括天馈系统、大功率发射机、控制设备、终端设备、低噪声放大器、上下变频器、调制解调器,电源设备等基本单元。图 1-1 为 C 波段标准地球站简化方框图。

通常把从低噪声放大器到下变频器输出之间系统称为微波收信系统。它将来自卫星的 4GHz 信号经低噪声放大器放大后,经下变频器(一次或二次变频)把微波信号变换到 70MHz 中频。

从上变频器到高功率放大部分称为地球站发信系统。它将已调 70MHz 中频信号经上变频器变换到 6GHz 发送频率,再经功率放大器放大到所需要的大功率,再由天线向卫星发射。



HPA：高功率放大器 LNA：低噪声放大器 ESC：工务线路
GCE：地面通信设备 U/C：上变频器 D/C：下变频器
MOD：调制器 DEM：解调器

图 1-1 地球站简化方框图

第二节 地球站收发信机主要特点

卫星通信最显著的特点是能实现多址接续和大容量通信。它要求地球站收、发信机具有极低噪声接收和高功率发射的功能。

一、低噪声接收

卫星通信和地面微波中继通信相比，接收系统输入端信号电平要低得多。地面微波通信中，一般接收机噪声系数 $NF=2\sim 4$ 就可满

意地工作，而且由于天线噪声温度较高，故没有必要采用噪声系数更低的接收机了。卫星通信因为是远距离宇宙通信，到达地面站输入端的信号非常微弱，例如，当卫星转发器的有效输出功率 $P_s = 10\text{dBW}$ 时，对于天线增益为 57dB 的大型地球站而言，在其接收机输入端，输入功率约为 -129.7dBW ，即 0.1pW 量级。对于这样微弱信号不仅需要采用低噪声接收技术，而且必须考虑天线、馈线等外部噪声对接收机的影响。

卫星通信地球站接收机的噪声特性通常用绝对温度为 T 的等效噪声温度来描述。整个接收系统总的等效噪声温度包括两部分，一是低噪声放大器及其以后各部分电路的噪声都折算到它的输入端的等效噪声温度；另一部分是天线和馈线的噪声折算到低噪声放大器输入端的噪声温度，如图 1-2 所示。将低噪声放大器及其以后各部分电路的噪声都折算到它的输入端，其等效噪声温度 T_{er} 为^[2]：

$$T_{er} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{L_1 T_{e3}}{G_1} + \frac{L_1 T_{e4}}{G_1 G_2} + \frac{L_1 L_2 T_{e5}}{G_1 G_2} + \dots \quad (1-2-1)$$

在上式基础上再将天线和馈线的噪声都折算到低噪声放大器的输入端，则接收系统总的等效噪声温度为^[2]：

$$T_t = \frac{T_a}{L_p} + (1 - \frac{1}{L_p})T_o + T_{er} \quad (1-2-2)$$

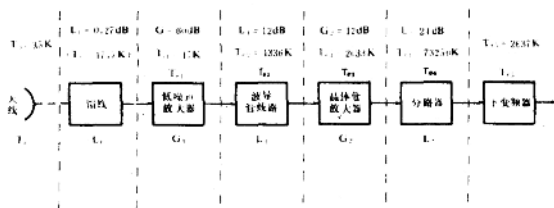


图 1-2 地球站接收系统噪声分配

将图 1-2 所标参数代入式 (1-2-1), 可求得接收机总的噪声温度

$$T_{er} = 17.77K$$

在常温 20°C (即 $T_0 = 293K$) 时, 馈线损耗 $L_F = 1.064$ (0.27dB), 将它折算到接收机输入端时的噪声温度为

$$T_F = (1 - \frac{1}{L_F})T_0 = (1 - \frac{1}{1.064}) \times 293 = 17.7K$$

由此可见, 即使馈线只有 0.27dB 的损耗, 但由于它处于接收系统的前级, 也会产生 17.7K 的噪声。显然, 其影响是相当大的。一般可作这样的近似估算, 即馈线损耗每增加 0.1dB, 可使系统等效噪声温度增加约 7K。

一般在天线仰角大于 5° 时, 其等效噪声温度 T_a 约为 35K。把它折算到低噪声放大器的输入端, 即为

$$\frac{T_a}{L_F} = \frac{35}{1.064} = 32.9K$$

将上述结果代入式 (1-2-2), 得到整个接收系统总的等效噪声温度为

$$T_i = 32.9 + 17.7 + 17.77 = 68.37K$$

可见, 这仍然是很低的。只有这样, 才能保证地球站接收系统输入端满足一定载噪比的要求。

以上是把全部噪声都等效到接收机输入端 (或者说等效到低噪声放大器输入端) 的情况。如果把全部噪声都折算到馈线的输入端, 则总的等效噪声温度应按下式^[2]计算:

$$T_i = T_a + (L_F - 1)T_0 + L_F \cdot T_{er} \quad (1-2-3)$$

这表明, 噪声折算的地点不同, 接收系统总的等效噪声温度表示的值也不相同。

二、高功率发射

卫星通信要求标准地球站能产生几百瓦以至十几千瓦的大功率

微波信号，向卫星发射。这是因为卫星中继站离地面遥远，大部分能量散耗在空间传输中。例如某地球站向 IS-V 卫星发送信号，在 6GHz 时，天线增益为 56dB、发射机功率为 3kW (34.78dBw)、馈线损耗取 3dB；卫星接收天线增益约为 16dB、上行线路损耗为 200.57dB，并考虑到电波的大气损耗，则卫星接收功率约为 -100dBw ($1 \times 10^{-10}\text{W}$)。由此可见，即使地球站发射千瓦级的微波功率，传输到卫星接收机输入端的信号功率仍然是十分微弱的。而且，因为卫星通信采用多个载波在各地球站之间进行多址连接，因此，卫星转发器和地球站的大功率放大器要同时放大多个载波。由于大功率速调管或行波管的放大特性和相移特性的非线性，当多载波同时输入时，在输出信号中就会因幅度的非线性和调幅/调相变换的非线性而产生交扰调制分量（互调分量）。互调分量的存在会影响通信质量，严重时，甚至无法进行通信。因此，在设计给定规模的地球站时，必须算出高功率所需要的饱和输出和相应的输入输出补偿量，使互调分量被控制在给定的指标范围内。

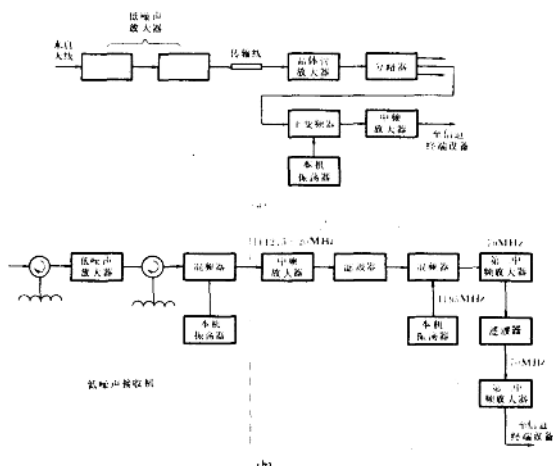
与地面微波中继相比，地球站收发信系统还具有信号频带宽、动态范围大等特点。

第三节 地球站收发信机的组成及设计考虑

一、微波接收系统的组成

卫星通信地球站的接收系统要完成的任务是，从天线上感应到的各种信号和干扰中提取所需要的信号，并经放大、变换送至信道（收端）终端设备，以解调出基带信号。如前所述，由于卫星通信收发距离遥远，信号经卫星转发到地球站时非常微弱，因而要求地球站接收机有很高的灵敏度，并要求天线有相当高的增益。因此，地球站接收系统应是以微波低噪声放大器作为前端放大的低噪声接收系统。

图 1-3 是低噪声接收系统组成方框图，它包括低噪声放大器（参量放大器或低噪声场效应放大器）、传输线、分路器、下变频器和本机振荡器以及低噪声前置中频放大器等。图 (a) 为采用一次变频接收方框图，一般取中频为 70MHz 或 140MHz。图 (b) 是二次变频接收机方框图，第一中频一般取得较高（例如 1112.5MHz），第二中频采用 70MHz。



(a) 采用一次变频的接收机组成方框图

(b) 采用二次变频的接收机组成方框图

图 1-3 低噪声接收系统组成方框图

接收机系统的频率稳定度取决于所用本机振荡器的频率稳定度。

二、微波发信系统的组成

目前，由于各种技术条件的限制，卫星通信中，一般都要求地球站发射机能向卫星发射大功率信号。所需地球站射频辐射功率大

小取决于卫星转发器的性能指数和输出级行波管所需的激励电平以及地球站应提供的信道数和天线增益。国际卫星通信组织根据卫星转发器的技术性能,对各种地球站的全向有效辐射功率 $[EIRP]_s$ 都作了具体规定。例如对IS—IV星的覆球波束,每载波容量为24路时,要求地球站 $[EIRP]_s$ 为74.7dBw;假设地球站天线口径为15m,在6GHz频率上天线的增益 G_T 为56dB。当考虑有关损耗(例如波导损耗 L_f 等)并计及放大器的补偿时,每个载波的有效辐射功率可按照 $[EIRP]_s = [G_T] + [P_T] - [L_f]$ 来确定。可以看出,发射机的实际功率输出 P_T 需要上百瓦。随着通信容量增加,所需发射功率还需加大,以致达千瓦量级。

根据地球站的使用条件和要求不同,发射系统的组成以及所需的发射功率是各不相同的。按发射机调制方式不同,可以分为两大类:①直接在微波频率上调制,然后微波放大;②在中频上调制,再利用上变频器将已调中频变换为微波信号,再经微波放大。目前广泛采用的是第二种方案。图1-4是大功率发射机组成方框图。70MHz已调信号经放大后加到被本振信号激励的上变频器,上变频器将中频信号变换为微波信号。因为变频是在低电平上运行的,必须放大到一定电平才能激励大功率放大器。大功率放大器包括大功率行波管(或速调管)、高压电源、冷却装置、自动功率控制电路、控制保护电路和监测系统。

在卫星通信中,对地球站发射机的功率稳定性和载频精确度都有较高要求。为了避免对方站的话路性能变坏,一般要求对着卫星方向的全向有效辐射功率应保持在额定值的 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内。这除了要考虑天线增益不稳定(由于天线抖动引起)、天线指向误差等因素外,大功率放大器增益的稳定性是一个重要因素。因此,地球站大功率发射机都装有自动功率控制电路。关于载频精度,在传输多路电话时,通常要求载波频率的误差在规定值的 $\pm 150\text{kHz}$ 以内;传输

• 式中加有方括号表示取分贝数