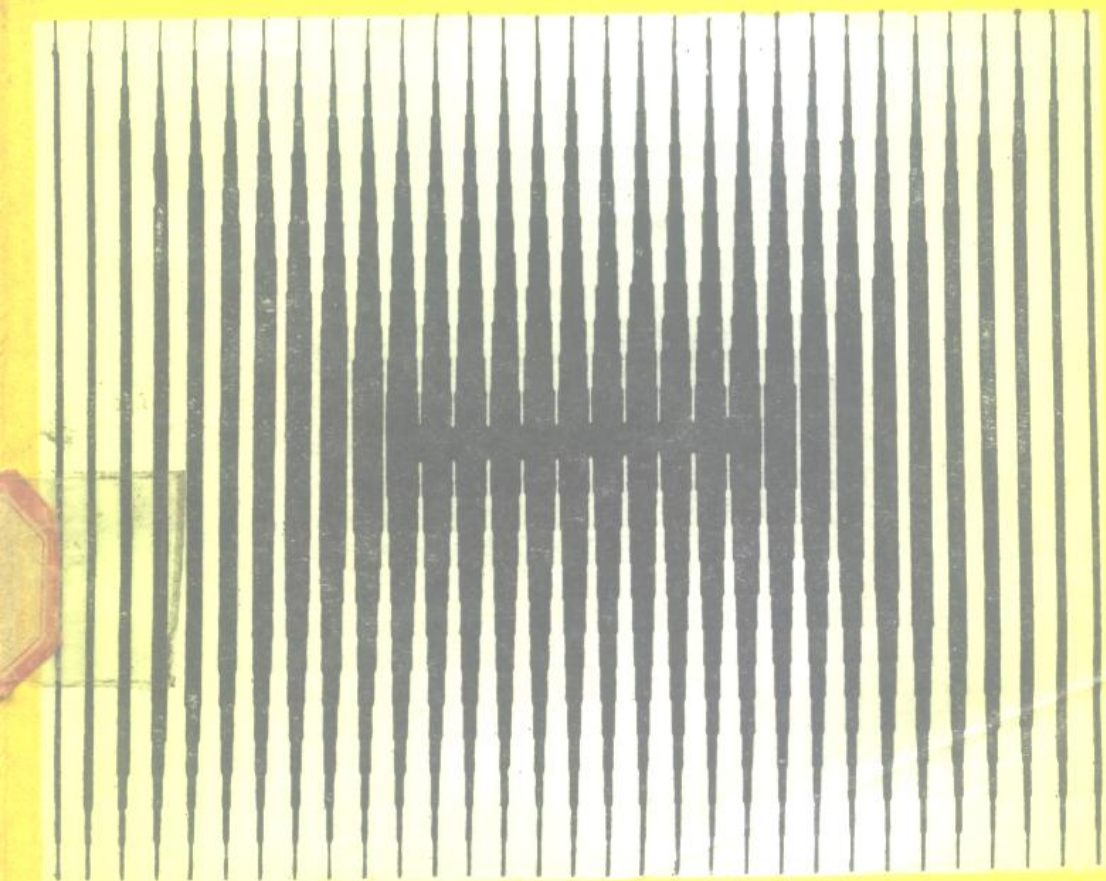


集成微电路无线电电子设备设计丛书

无线电接收设备

[苏] В. И. 班科夫 Л. Г. 巴鲁林等著 陈子敏译

高等教育出版社



本书根据苏联1984年МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ»出版的一套«ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ»丛书中«РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА»一书译出。书中阐述了用近代元器件(半导体和混合集成电路)构成的微电子无线电接收设备的总体设计、结构框图和各部件的设计,讨论了各种频率滤波的方法,分析了接收设备中几种数字信号处理的方法,列举了以大批生产的微电路为基础的许多设计实例。

本书可供高等工业学校电子及通信类专业的师生参考,也可供从事无线电接收设备设计及其电路的设计与研制的工程技术人员参考。

责任编辑 李永和

В.Н.Банков, Л.Г.Баранин, ...
РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА
МОСКВА. «РАДИО И СВЯЗЬ» 1984.

集成微电路无线电电子设备设计丛书
无线电接收设备
(苏) В.Н.班科夫、Л.Г.巴鲁林等著
陈子敬译

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北香河印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张 13 字数 310 000
1988年12月第一版 1989年9月第一次印刷
印数 0001—1850

ISBN 7-04-000847-5/TN·49

定价: 5.10 元

前 言

本书是《集成微电路无线电电子设备设计》丛书之一，专门介绍无线电接收设备的设计。无线电接收设备理论的建立，一方面是由于无线电电子学各门学科的影响；另一方面还由于许多实用部门的促进，因为这些实用部门决定着接收设备元器件的生产，并且与无线电电子设备的生产工艺和设计、生产自动化的现代化设施息息相关。影响无线电接收设备理论的因素如下：

1. 用接收设备来解决的课题五花八门，对于利用接收设备的无线电系统，可以应用于以下方面^[1]：无线电通信、广播、电视、地面无线电中继线、卫星无线电中继线、宇宙通信、无线电定位、无线电导航、无线电遥控、无线电遥测和无线电气象学等。

2. 现代接收设备在功能上的复杂度增大，一系列相邻装置的功能集为一体。在无线电接收设备中，除了按信号频率完成传统的放大、选择和变换三大任务以外，还须完成下列功能：信号的搜索或探测、解调、载频的同步、副载频的同步、时钟频率的同步、延迟跟踪、信号从噪声或其他各种干扰信号的混合物中的最优提取、对不确定信号的自适应和有源天线阵的控制等。现代无线电接收设备，包括广播收音机在内，它们的组成部分中还引入了频率合成器、信息的数字控制与显示装置、微处理机。

3. 无线电接收设备中广泛使用各种大规模集成电路(БИС)，这是一种参数预先各有规定的产品，结构复杂(含有大量部件)，功能优异。

4. 元器件的品种繁多。

5. 生产部分接收设备部件时采用微电子技术的工艺。

6. 元器件不断更新, 微电子技术产品的集成度平均逐年提高倍, 集成电路“更新换代”的平均期限不超过10年^[14]。

7. 数字信号处理的推广使用。

8. 无线电技术各方面的理论知识实际上在极大地深化和系统化。

9. 设计任务的多方案性(通常, 在实现技术任务书制定的条件时, 使外部特性等同的方法不止一种)。

10. 计算机方法在设计器件时的作用增强, 设计与生产过程均机械化与自动化。

上述十个因素使接收设备理论的内容发生了变化, 同时也使接收设备理论细分成范围极其狭窄的学科分支, 例如, 接收设备系统工程技术、集成微电路版图技术、超高频装置的微电路技术、 RC 和 LC 有源滤波器、数字信号处理等。

无线电接收设备理论的细分及其与相关应用学科的紧密联系, 使接收设备理论难以简洁地加以论述。尽管如此, 还是可以从划分出四个基本部分, 本书在不同程度上对这四个部分的内容作了全面的阐述。

第一部分是无线电接收设备的系统工程技术, 阐述了无线电接收设备结构框图和包含在其中的以理想功能部件为基础的各种功能部件结构框图的综合原理, 讨论了根据实际功能部件的特性对结构框图的最优化、设计特点和技术任务书的要求, 介绍了无线电接收设备的典型结构框图和任务。这一部分内容随着新颖理论研究工作的开展在深化和扩大, 但没有本质上的变化。

第二部分是无线电接收设备功能部件的微电路技术, 反映各种应用学科和工艺的发展在目前已达到的水平, 并随同发展的水平而变化。这一部分内容介绍各种典型的集成电路和功能组件及其一般特性与在无线电接收设备各部件中的应用方法; 阐述了微

型组件的电路技术，其中包括超高频组件的电路技术。

第三部分是无线电接收设备的结构工艺设计基础，与第二部分有着密切的联系，因为无线电接收设备各部件的电参数，特别是在超高频段的电参数，主要取决于结构实现方式和所采用的工艺。

第四部分专门讨论无线电接收设备设计和生产方法的最优化。其中还包括在生产过程中产品设计、组装和检验过程自动化、机械化问题。由于这一部分内容的特殊性，本书不予讨论。

本书作者首次力求较充分地描述第三代和第四代接收设备（集成电路和大规模集成电路制造的接收设备）的一般制造原则及其发展趋势，同时以这两代接收设备各个典型部件的设计为例做了具体说明。为了在极专门的设计问题方面和相关学科方面获得更丰富的知识，建议凡是有条件的读者去查阅专门书刊。

本书由五位作者编写而成：Л.Г.巴鲁林编写第一、二、五、六章以及第四章的4.1节、4.2节（不包括4.2.2小节）与4.7节（其中，2.6节和2.8节系与М.И.若德济什斯基合编，5.3.5小节系与В.В.彼德鲁辛斯基合编），И.В.马雷舍夫编写第四章的其余部分，М.И.若德济什斯基编写第三章，В.Н.班科夫编写第七章，Е.В.彼德鲁辛斯基编写第八章。

目 录

前言

第一章 接收设备总体设计和合并结构框图设计	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 无线电接收设备的层次结构	5
§ 1.3 无线电接收设备的设计顺序	8
§ 1.4 原始数据的论证	9
§ 1.5 结构框图的综合	12
§ 1.6 信号处理方法的选择	15
第二章 主要功能组件的设计	25
§ 2.1 设计顺序	25
§ 2.2 放大通道	25
§ 2.3 数字无线电接收设备的放大通道	47
§ 2.4 信息通道	50
§ 2.5 几个典型接收问题中信息通道的最优结构框图	59
§ 2.6 频率合成器通道	79
§ 2.7 控制与显示装置	84
§ 2.8 相位-频率自动微调系统	86
第三章 数字信号处理式无线电接收设备的功能组件和部件的设计	91
§ 3.1 从模拟信号转换为数字信号的方法	91
§ 3.2 数字式频率合成器	94
§ 3.3 数字式沟通通信系统	110
§ 3.4 数字式自动增益调整装置	124

§ 3.5	数字式准谐波跟踪解调器	127
§ 3.6	数字式二进制信息符号跟踪解调器	134
第四章	无线电接收设备中使用的集成微电路	138
§ 4.1	元器件的选择	138
§ 4.2	多功能放大器的集成微电路	140
§ 4.3	模拟乘法器	145
§ 4.4	宽带放大器	147
§ 4.5	增益电调型宽带放大器	152
§ 4.6	专用集成微电路	153
§ 4.7	电荷转移器件	169
第五章	接收设备的典型功能部件和微型组件的设计	186
§ 5.1	概述	186
§ 5.2	微型组件的结构特点	187
§ 5.3	放大器的设计	192
§ 5.4	限幅器	215
§ 5.5	变频器	217
§ 5.6	倍频器	227
§ 5.7	分频器	236
§ 5.8	检波器	237
第六章	频率滤波器	255
§ 6.1	功能和实现方法	255
§ 6.2	综合的原始数据	256
§ 6.3	工艺或结构上可与微电子产品配合的LC滤波器	260
§ 6.4	LC有源滤波器	268
§ 6.5	RC有源滤波器	268
§ 6.6	参量滤波器	288
第七章	压电学器件滤波器和振荡器	290
§ 7.1	压电器件的物理基础	290
§ 7.2	压电谐振器和压电滤波器	292

§ 7.3	集成晶体振荡器	302
§ 7.4	声表面波压电器件的工作原理与结构	309
§ 7.5	声表面波延迟线、滤波器和其他部件	314
第八章	放大通道的超高频输入装置	321
§ 8.1	输入装置的基本特性	321
§ 8.2	超高频输入装置的电路技术和特点	322
§ 8.3	超高频放大器	326
§ 8.4	超高频滤波器	346
§ 8.5	超高频混频器	355
参考文献		375
附录	本书俄文缩写词和下标符号俄汉对照表	392

第一章 接收设备总体设计和 合并结构框图设计

§1.1 概 述

现代接收设备是非常复杂的系统,要用大量相互联系参数才能表示其特性。因此,在现代接收设备设计的各个阶段中,宜采用系统处理法,它在于采用一定的设计顺序,利用综合和最优化方法^[3,4],以便在一定的(给定的)最优系统质量准则下求出最优的系统。

无线电接收设备的设计,是根据系统的层次结构,由繁到简、由一般表示到具体细节逐步进行的。按实用观点,凡是用来解决某种问题的无线电电子设备的复杂综合体都叫做无线电工程系统。根据层次结构,无线电工程系统(或任何其他系统)各组成部分是按结构复杂性降低的等级,以从上到下的设计次序来排列的,例如,系统(第五级层次结构),设备(第四级层次结构),功能组件(第三级层次结构),典型功能部件(第二级层次结构),运算环节(第一级层次结构)。

无线电接收设备的设计原始数据在系统的拟定过程中形成,因为接收设备是系统的组成部分。现在分析现代无线电系统和接收设备的几个有代表性的实例。

第一个实例是泰罗斯卫星(TIROS-N)^①中宇航轨道器的机上无线电系统^[138],专门用来测定位置以及采集来自固定气象

①这是一种电视和红外线观察卫星,或气象观察卫星。——译者注

信标或自由漂浮气象信标、空中探测器和地面站的数据。这个无线电系统的基础就是图1.1所示的无线电接收设备,它包含有:一个放大通道(УТ),四个信息分离组件(БВИ),一个沟通通信系统(CBC)和一个逻辑控制装置(ЛВУ).地面信标以401,650 MHz的频率发射重复周期约为50s的窄脉冲(小于0.5s)信号,由工作在直通状态的无线电接收设备接收。这个信号是用二进制数字代码进行相位键控,其调相指数为1.1rad,二进制代码符号的传输速度为400bit。由于多普勒效应,无线电接收设备输入端信号频率的变化量为 ± 8800 Hz,考虑到信标发射机主控振荡器的不稳定性,频率的不确定值为 ± 12 kHz。沟通通信系统组件的作用是探测输入信号,测出输入信号的载频和电平,并由逻辑控制装置传递信息。逻辑控制装置本身也检验所探测到的信号是不是新出现的信号,或者是不是已经由其中一个信息分离组件接收,并以消除相互干扰的观点检验是否已按频率充分分集了来自不同信标的信号。若判决是肯定的,空闲的信息分离组件就被接到放大通道输出端,而重新探测到的信号之一,其目标指示则由逻辑控制装置传送到包含在信息分离组件内的相位-频率自动微调(ФАП)系统。

沟通通信系统中信号的探测、逻辑控制装置的判决和相位-频率自动微调系统的同步等全部过程,均应在不大于160ms的时间内完成,而在这段时间开始时,信标所发射的信号是传递未经调制的载波。因此,在沟通通信系统中使用了加速探测信号的电路,并根据输入信号电平的大小,借助于逻辑控制装置,把相位-频率自动微调环的参数最优化。在载波俘获过程中,相位-频率自动微调系统的通带分三段逐步缩小。

鉴相器输出端所得到的解调信号加到同步与恢复装置(УСР),并利用这个装置分离出码脉冲信号的时钟频率和信号的信息部分在开始时所传送的同步字,而信号本身则进行了最优的

滤波和恢复。在接收信息的同时，借助于多普勒频率计数器 (СЧД) 和固定信号接收时间，对载波频率进行测量，其测量准确度为 0.3 Hz。

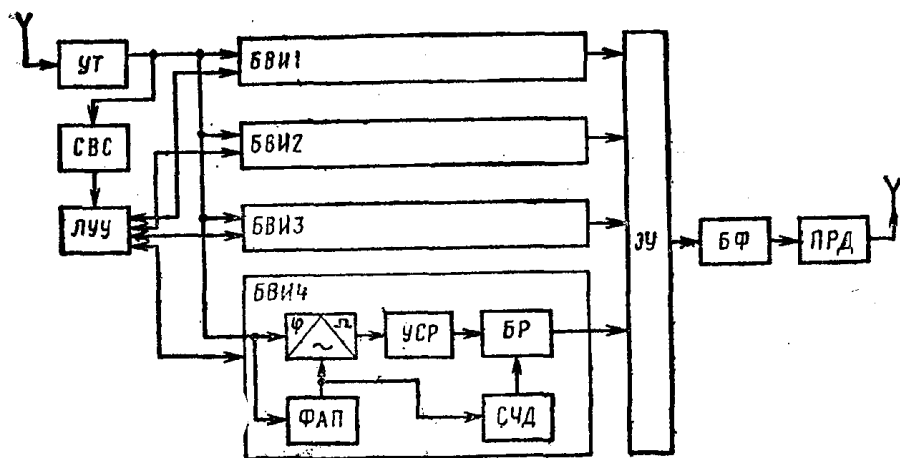


图1.1 航天设备机上无线电系统的结构框图

(图中: УТ——放大通道; СВС——沟通通信系统; ЛУУ——逻辑控制装置; БВИ——信息分离组件; ФАП——相位-频率自动微调系统; УСР——同步与恢复装置; БР——缓冲寄存器; СЧД——多普勒频率计数器; ЗУ——存储器; БФ——形成组件; ПРД——发射机。)

在逻辑控制装置中收到相位-频率自动微调俘获到的信号以及同步与恢复装置存在同步字的信号后，所有数字二进制代码形式的接收信息均经缓冲寄存器(БР)由无线电接收设备存储到存储器(ЗУ)中。卫星在信息收集站上空飞行期间，所有存储的信

号在形成组件(БФ)中构成画图,由发射机(ПРД)转发到地面,在地面对接收到的信息进行处理,并根据信号接收时间、已知的卫星轨道和卫星在信标上空飞行过程中多普勒频率变化曲线的速率,算出信标的坐标。

作为第二个实例,来分析现代数字通信线路的转发器简化框图,如图1.2所示^[54, 55]。接收到的相位键控信号经放大后,在混频器中变换成中频信号,利用能在无残留载波信号下工作的自动相位微调系统(例如,利用科斯塔斯电路或反馈判决电路^[49]),在鉴相器中解调中频信号,在恢复装置(УР)中滤出和恢复。所恢复出的信号在调制器中去调制另一个振荡器(Г)的信号,并经功率放大器放大后,朝下一个转发器发射出去。现代数字通信线路的特点是信息传输速度快(将来可望达到 $(100\sim 500)\text{M bit/s}$);采用新

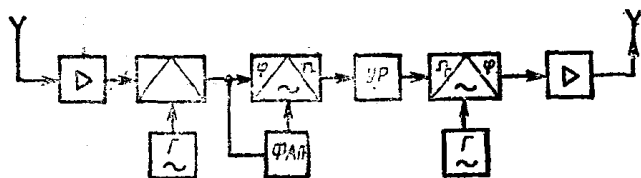


图1.2 数字无线电中继通信线路的转发器结构框图

(图中: Г——振荡器; УР——恢复装置; ΦАП——相位频率自动微调系统。)

型调制形式,其中包括使用16电平幅-相调制,以压缩发射信号的通频带(只是抗干扰性有所损失)。为了高速传输信息,必须使用高载频(达 14GHz)和高中频(1.254GHz 和 3.6GHz ,^[55])。有时,在转发器中还可采用直接放大式接收机。数字信号恢复法用大量转发器传送信息,而不致严重损失抗干扰性。

最后,举日本索尼公司的现代调幅调相信号便携式广播接收

机样机之一ICF-2001的实现实例^[58]。这种接收机已附加了外差频率数字合成器、晶体稳频、微处理机控制和数字式调谐指示。用有十个按钮的数字键盘控制接收机，可按必要的精度置定已知无线电台的频率。此外，在接收机中还能用两种速度进行自动频率调谐，并且在调到电台时，能够自动(或手动)停止调谐，储存所选电台的频率，自动播放或切断节目。接收机重量为1.8kg。

§ 1.2 无线电接收设备的层次结构

接收设备的典型结构框图可画成五种功能组件(或通道)的形式，如图1.3a所示。

放大通道或放大-变频通道(YT)接收(尽可能无损耗地接收)来自天线的信号，从干扰中滤出信号，把输入信号的频谱搬移到能进行基本信号处理的中频上，并把中频信号加以放大。这里和后文中，所谓信号处理是指在无线电接收设备中，为了从信号中分离出其中储存的信息，对信号进行的各种变换(放大、滤波、限幅、解调和恢复等)。

放大通道的组成部分中有许多辅助部件——自动增益调整系统、限幅器和对数放大器等。它们只影响放大通道的振幅特性，但不会引起接收信息的失真。

信息通道(ИТ)对信号进行基本处理，它含有一个最优滤波器(它在很大程度上确定了接收设备的抗干扰性)、一个信号解调器，以及处理检波后信号的一些电路(低通滤波器和码恢复器等)。信息通道的组成部分中同样也有一些辅助部件——相位自动微调或频率自动微调(相位-频率自动微调或自动频率微调)跟踪系统，用来改善信号解调器的工作性能，同时根据频率、相位和延迟实现信号的搜索和跟踪。

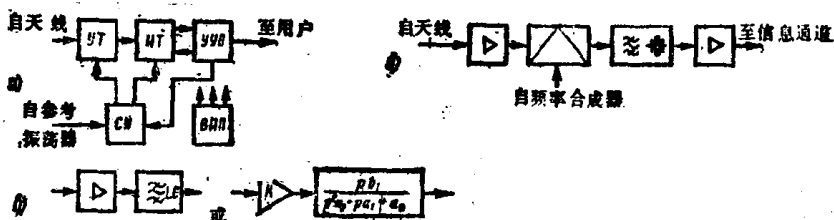


图1.3 无线电接收设备三种不同层次结构的结构框图实例

- a) 第三级层次结构;
- б) 第二级层次结构;
- в) 第一级层次结构

(图中: YT——放大通道; ПТ——信息通道; YUO——控制与显示装置;
CЧ——频率合成器; ВПП——二次电源。)

频率合成器(CЧ)或外差通道的作用是变换外接参考振荡器或固有参考振荡器的频率,并根据此频率产生放大通道中变频器工作所必需的频率间歇。频率合成器可把接收设备预调到其他的输入频率上。有些频率合成器可作为跟踪系统的组成部分。此外,频率合成器还可形成数字信号处理装置工作时所必需的频率间歇。

控制与显示装置(YUO)自动地实现接收设备操作的指定规定(接通与断开、信号的搜索与选择,对不断变化的工作条件自适应等),使操作人员能对接收设备进行手动控制,并用相应的指示器显示接收设备的工作状态与质量。

最后,二次电源(ВПП)是将一次电源(市电220V或机上电源27V)的能量转换为适合于接收设备直接使用的形式(即变换电压、整流、滤波和稳定等)。

如果转到一下级层次结构,譬如说,转到线性通道,那么,就可用一些典型功能部件(放大器、变频器和自动增益调整装置等)的组合形式来表示其结构框图,如图1.36所示。

最后,可用若干环节的连接来表示每个典型功能部件(基本功能部件示于图1.36)。运算环节是一种对电信号进行各种运算的装置,而这些运算则对应于一种或几种代数运算[乘以常数(即放大)、两个信号相乘、积分等]。单独一级宽带放大器、频率滤波器、倒相器、模拟信号乘法器等都是运算环节的实例。

在综合无线电接收设备各种功能部件的过程中,往往不是用实际的运算环节,而是用它的理想模拟环节(各个参数均与信号源和负载无关、而功能又可用代数表达式描述的装置),如图1.36所示。这样就可在不涉及具体集成电路参数的情况下,综合出许多典型功能部件或组件的结构,而在以后一旦要考虑这些具体参数时,就可把这种装置转变为实际的最优化结构。实际微电路与理想环节的性能越接近,部件或组件的参数就显得越准确。

可以指出,为了构成模拟技术中所有运算环节,在一定的频率限制条件下,只要使用两个环节就够了。这两个环节是输出信号倒相放大器和信号乘法器。为了使这两个环节具有另一些环节的特性,可相应地接入线性二端网络:电阻网络或电抗网络;为了实现不连续函数(信号的限幅),还必须接入一个非线性二端网络:理想二极管。两个运算环节与线性或非线性二端网络结合在一起的上述组合,可构成功能完整、尺寸最小的模拟环节系统,并可根据这种模拟环节系统实现(在理想情况下实现)接收设备全部功能部件。功能上完整系统的其他组合也可以实现。通常,作为各种运算环节的实际模拟,可利用通用集成电路,其中包括两个原始的环节:运算放大器和模拟乘法器。

在数字技术中,可把进行最简单数学逻辑运算,即与、或和非

运算的逻辑电路，构成功能完整、尺寸最小的系统。

§ 1.3 无线电接收设备的设计顺序

各级层次结构的具体设备(例如接收设备)的设计，都是首先从外部设计阶段(即设备的原始参数(外部参数和输出参数)论证阶段)开始，然后再在内部设计阶段按照本层次结构提出的原始数据设计设备，确定内部数据(即该设备各组成部分的特性)，使其能保证给定的外部参数。

其次，把内部数据作为设计接收设备各组成部分的外部参数等。当然，设计不一定始终要按照系统——设备——组件等等这种逐次递降的思路一直进行下去。在估计所实现的参数后，可能要对系统的结构或该设备的外部原始数据做必要的修改。

根据以上所述，可提出整个无线电接收设备的设计顺序如下：

1. 论证无线电接收设备的设计原始数据。
2. 综合结构框图，确定对各组成部分的要求。
3. 选择信号处理方法。
4. 综合各种功能组件的结构框图。
5. 综合各种典型功能部件的结构框图，提出对运算环节和集成微电路的要求。
6. 选择元器件，设计典型功能部件，拟定原理图，估计集成电路参数的容差。
7. 把无线电接收设备划分为若干独立的结构部件(微型部件，结构单元，微型组合件)，拟定这些部件的结构，拟定整体结构。
8. 计算可靠性、成本、重量、体积和功耗。
9. 根据统一设计文件系统的要求，编写出无线电接收设备的

全套技术文件。

10. 拟定设备的生产、调整和测试的工艺。

实际的设计要从后列各项到前一项经过多次反复，是逐步逼近最优设计方案的过程。这种逼近的次数，取决于任务的复杂性（要求充分改进某些设备样机，或者原则上要求采用新颖设计方案）、所采用的设计机械化与自动化设施以及设计人员的学识。实际上，以上有许多项，如结构工艺的拟定、可靠性和成本的计算，都和电路图的设计同时完成。

§ 1.4 原始数据的论证

原始数据论证阶段是系统设计阶段的继续，因为无线电接收设备包括在该系统中。在系统的结构框图拟定之后，要进一步明确无线电接收设备与各相关设备之间的关系，确定设计接收设备的原始数据，也就是确定能非常完整地表征接收设备质量的外部参数。这些数据就是设计无线电接收设备的技术任务书的内容。在技术任务书中要对无线电接收设备规定总要求，也要规定电气、结构、机械、气候环境、工艺、成本和使用等方面的特性以及可靠性。对于广播接收机来说，这些参数均由苏联国家标准 ГОСТ 5651-76 规定，而其它各种无线电接收机的参数则由各有关主管部门和内部标准规定，或者在设计人员和订购人员之间洽商规定。

为了便于系统最优化起见，把原始数据分成如下四组：

第一组原始数据为条件集合 $Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ ，规定了系统的用途与各相关设备的关系和外部环境的影响，

第二组数据为限制集合 $O_c = \{O_{c_1}, \dots, O_{c_q}\}$ 是对系统结构和参数所加的限制，