

# 微波振荡源

陈为怀 李玉梅 编著



微波接力通信技术丛书

人民邮电出版社

微波接力通信技术丛书

# 微波振荡源

陈为怀 李玉梅 编著

樊景渤 等校

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍微波接力通信中使用的各种微波固体振荡源。讲述“微波晶体管振荡器”、“甚高频晶体振荡器”、“微波晶体管功率放大器”、“微波倍频器”等振荡源基本电路的原理和设计以及晶振一倍频链振荡源、环路锁相振荡源、注入锁相振荡源三种常用微波振荡源的原理和设计；各章中都给出具体实例，并结合具体实例介绍电路调测和维护。

7

微波接力通信技术丛书

微波振荡源

陈为怀 李玉梅 编著

樊景渤 等校

责任编辑：俞天林

•

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本：787×1092 1/32      1984年12月第 一 版  
印张：14    页数：224      1984年12月河北第一次印刷  
字数：320千字 插页：3      印数：1—4,000 册

统一书号：15045·总2909—无6291

定价：1.90元

## 出版者的话

几年前，我社曾给微波站的维护人员出版了一套微波设备维护手册，帮助他们了解微波设备的简单原理，学会值机操作和处理简单的障碍，起到了较好的作用。但时隔数年，全国微波电路有了新的发展，微波站维护人员的水平也在不断提高。需要为他们编写切合实际而又较为深入的读物，以便帮助他们进一步提高技术水平，做好维护检修工作。《微波接力通信技术丛书》就是在这个思想指导下组织编写的。

这套丛书准备结合当前使用的微波通信设备，分部件讲述各部分原理、各元器件作用、工作性能、指标以及调整、测试等问题。力求结合实际进一步阐明原理，并能适合当前大部分维护人员的实际水平。

丛书的读者对象主要是微波站的维护人员，也可以供微波设备的研制、生产人员和有关专业的大专院校师生参考。

我们希望广大读者对这套丛书的编辑出版提出要求和建议，帮助我们做好这一工作。

## 前 言

微波固体振荡源（也称为微波固态源）随着半导体技术的发展，在许多领域，如微波接力通信、卫星通信、雷达、遥测、遥控和微波测试仪表等方面已经得到广泛应用。

微波振荡源在微波通信系统中是关键部件，被称为微波收发信机的“心脏”。它的性能和可靠性对通信系统影响很大。因此研制性能良好的微波振荡源是改进微波通信线路质量、提高通信可靠性的一个重要方面。

随着微波接力通信、卫星通信的迅速发展，相应地对微波振荡源的性能和可靠性提出了越来越高的要求，国内外不断出现各种新型微波振荡源，有关刊物作了大量报导，但是只是一些零碎的资料。本书较系统地介绍了微波固体振荡源原理、设计和维护，可能更适合从事这方面工作的工程技术人员、维护人员和院校师生的需要。

本书重点介绍微波固体振荡源的四种基本电路：微波晶体管振荡器，甚高频晶体振荡器，微波晶体管功率放大器，倍频器。对常用的晶振一倍频链振荡源、环路锁相振荡源和注入锁相振荡源，也作为重点进行叙述。对AFC振荡源、空腔稳频振荡源等方案在第九章只作简单介绍。对新型的微波晶体管腔控振荡器、微波场效应晶体管振荡器、介质谐振腔稳频的微波振荡器在第二章中亦作了简单介绍。

本书在编写过程中，得到领导和同志们的大力支持和热情

• 1 •

帮助。孙寰权、王永生同志提出了不少宝贵意见，樊景渤、李明俊、毛作金、赵佩玲、李继善、兰光蔚等同志详细审校了原稿，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

一九八二年六月十五日

# 目 录

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| <b>第一章 微波通信用固体振荡源概况</b> ..... | ( 1 )   |
| 第一节 微波固体振荡源的技术指标.....         | ( 1 )   |
| 第二节 国内外固体振荡源发展概况.....         | ( 4 )   |
| 第三节 微波固体振荡源分类.....            | ( 7 )   |
| 第四节 几种常用固体振荡源性能比较.....        | ( 8 )   |
| <b>第二章 微波晶体管振荡器</b> .....     | ( 11 )  |
| 第一节 微波功率晶体管.....              | ( 12 )  |
| 第二节 微波晶体管振荡器电路.....           | ( 27 )  |
| 第三节 结构设计.....                 | ( 35 )  |
| 第四节 偏置电路.....                 | ( 53 )  |
| 第五节 微波晶体管振荡器的噪声.....          | ( 56 )  |
| 第六节 设计步骤和实例.....              | ( 60 )  |
| 第七节 高稳定度微波晶体管振荡器.....         | ( 65 )  |
| 第八节 电压控制振荡器 ( VCO ) .....     | ( 76 )  |
| 第九节 晶体管负阻振荡器.....             | ( 96 )  |
| 第十节 微波场效应晶体管振荡器.....          | ( 101 ) |
| <b>第三章 甚高频石英晶体振荡器</b> .....   | ( 110 ) |
| 第一节 甚高频石英晶体谐振器.....           | ( 110 ) |
| 第二节 晶体振荡器电路分析.....            | ( 118 ) |
| 第三节 晶体振荡器的噪声.....             | ( 123 ) |
| 第四节 调测和故障检查.....              | ( 126 ) |
| 第五节 恒温晶体振荡器.....              | ( 129 ) |
| 第六节 实用电路汇集.....               | ( 132 ) |
| 第七节 电路设计考虑.....               | ( 135 ) |

|                             |         |
|-----------------------------|---------|
| <b>第四章 微波晶体管功率放大器</b> ..... | ( 139 ) |
| 第一节 一般设计原则.....             | ( 139 ) |
| 第二节 匹配电路设计.....             | ( 145 ) |
| 第三节 实例介绍.....               | ( 165 ) |
| <b>第五章 倍频器</b> .....        | ( 170 ) |
| 第一节 变容二极管倍频器.....           | ( 170 ) |
| 第二节 阶跃恢复二极管倍频器.....         | ( 177 ) |
| 第三节 晶体管参量倍频器.....           | ( 198 ) |
| <b>第六章 晶振一倍频链振荡源</b> .....  | ( 210 ) |
| 第一节 方案构成和指标要求.....          | ( 210 ) |
| 第二节 噪声特性和噪声抑制滤波器.....       | ( 212 ) |
| 第三节 调测和维护.....              | ( 215 ) |
| 第四节 4GHz960路晶振一倍频链振荡源.....  | ( 218 ) |
| 第五节 移频振荡源.....              | ( 221 ) |
| <b>第七章 环路锁相振荡源</b> .....    | ( 227 ) |
| 第一节 锁相环路的一般概念.....          | ( 227 ) |
| 第二节 环路锁相振荡源方案构成.....        | ( 245 ) |
| 第三节 取样锁相环路.....             | ( 250 ) |
| 第四节 锁相振荡源的噪声.....           | ( 260 ) |
| 第五节 锁相环路的稳定性.....           | ( 268 ) |
| 第六节 鉴相器.....                | ( 272 ) |
| 第七节 环路放大器、扩捕和告警电路.....      | ( 292 ) |
| 第八节 1GHz取样锁相振荡源.....        | ( 310 ) |
| 第九节 取样锁相振荡源的调整和测试.....      | ( 323 ) |
| 第十节 电调谐锁相振荡源.....           | ( 336 ) |
| 第十一节 锁相移频振荡源.....           | ( 344 ) |
| 第十二节 锁相微波调制器.....           | ( 350 ) |

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| <b>第八章 注入锁相振荡源</b> .....          | ( 376 ) |
| 第一节 晶体管振荡器的注入锁相原理.....            | ( 376 ) |
| 第二节 注入锁相振荡源方案构成.....              | ( 384 ) |
| 第三节 注入锁相振荡源的噪声.....               | ( 386 ) |
| 第四节 注入锁相的稳定性.....                 | ( 389 ) |
| 第五节 锁定指示和告警电路.....                | ( 391 ) |
| 第六节 设计低噪声注入锁相振荡源应考虑的几个<br>问题..... | ( 395 ) |
| 第七节 4GHz用的1GHz注入锁相振荡源 .....       | ( 398 ) |
| 第八节 4GHz用的400MHz注入锁相振荡源 .....     | ( 410 ) |
| 第九节 注入锁相技术在微波振荡源中的其他应<br>用.....   | ( 414 ) |
| <b>第九章 其他类型振荡源</b> .....          | ( 423 ) |
| 第一节 AFC微波振荡源.....                 | ( 423 ) |
| 第二节 空腔稳频体效应振荡器.....               | ( 428 ) |
| 附录: 微波振荡器噪声测试和话路噪声计算.....         | ( 432 ) |
| 主要参考文献.....                       | ( 435 ) |

# 第一章 微波通信用固体 振荡源概况

## 第一节 微波固体振荡源的技术指标

在微波接力通信系统和卫星通信系统中，收发信设备的微波本振源是设备的一个关键部件，它的可靠性在很大程度上影响着整个系统的可靠性。随着固体电路技术的发展，微波设备中的其他部件(中频放大器、调制解调器等)都逐步在固体化，微波本振源的固体化就成为改进设备质量的主要方面。

微波固体振荡源的技术指标是由微波收发信机的指标规定的，这些技术指标反映了微波收发信机对本振源功率、频率以及信噪比等方面的基本要求。主要技术指标有：

### 一、输出功率和功率稳定度

根据用途不同，发信振荡源一般要求输出功率为几十毫瓦( $mW$ )，收信振荡源一般只需要几 $mW$ 。收发信振荡源采用移频方法的主振荡源输出功率较大，为 $100mW$ 左右。用于高电平混频的发信振荡源要求几百 $mW$ 到几 $W$ 。无论收信振荡源还是发信振荡源，都要求输出功率稳定，变化小。如果功率降低，会使发信功率降低、或使收信混频效率降低，都会引起线路热噪声上升，影响传输质量。

## 二、输出频率和频率稳定度

振荡源的输出频率是根据通信波道频率确定的。对于不同频段，国际无线电咨询委员会（CCIR）制定了最佳频率配置方案。频率稳定度是根据对全线路频率偏离要求分配的。通常要求线路频率偏差应小于最低基带频率（对一个调制段），因此基带频率愈低，对频率稳定度要求愈高。

实际上，用途不同对频率稳定度的要求是不同的。例如4GHz600路微波接力通信系统要求收发信本振源频率稳定度小于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ ；4GHz960路系统要求小于 $\pm 2 \times 10^{-5}$ ；6GHz1800路系统要求小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。而用于支线的小容量微波通信设备，本振频率稳定度小于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 就可以满足要求。

对微波本振源的总的频率偏差要求通常包含以下三项指标：（1）频率准确度，指实际工作频率偏离标称频率的程度。（2）温度稳定度，指在环境温度变化范围内的频率变化。（3）长期稳定度，指按月或年计的频率变化。

## 三、基带噪声功率

振荡源的输出噪声功率包括调幅分量和调频分量。调幅分量在机架中被限幅器去掉，调频分量经解调后，落入基带话路，影响话路信噪比。因此振荡源的噪声指的是调频噪声，在以后的叙述中如不加特别说明，基带噪声都是指调频噪声。

振荡源的噪声指标是根据通信系统噪声指标而分配的。对于调频制微波接力通信，衡量系统传输质量好坏的重要指标之一是信噪比。CCIR制定了严格的标准，要求实际线路的噪声功率低于3微微瓦/公里。线路信噪比变坏原因部分是由传输途径损耗产生，部分是由微波设备引入噪声。引入的噪声功率大

小与基带频率有关，基带频率低，引入的噪声功率小，基带频率高，引入的噪声功率大，呈三角形分布。因此，为了保证系统的传输质量，对固体振荡源引入的噪声提出了严格要求。通信容量愈大，指标要求愈高（尤其在基带高端频率上）。因此固体振荡源的噪声功率大小就成为衡量其质量好坏的重要标志之一。

#### **四、杂波抑制度和副波电平**

通信系统除了要求振荡源在整个基带范围内没有杂波振荡外，还要求基带范围以外的杂波电平要小，对基带最高话路的噪声增加量不能大于1微微瓦。晶体振荡器频率的 $(n \pm 1)$ 次谐波称为副波，它也是一个干扰源。它与邻近波道的频率的组合频率如果落入基带范围，就会形成对话路的干扰。因此要求振荡源的输出频谱干净，杂波抑制度好、副波电平低。

#### **五、工作温度范围**

机器设备是在一定的环境温度和湿度条件下工作的，要求振荡源在规定的工作环境中保证性能指标。

#### **六、可靠性和经济性**

可靠性对振荡源来讲可以说是一个最重要的指标。因为振荡源故障往往会使通信线路中断。

可靠性指标是元器件可靠性、技术水平、工艺等的总评价。可靠性数据是在使用长时间后，经过观察，故障统计，进行概率计算得到的。在设计时可按元器件的“平均无故障时间”进行估算，并规定严格的试验条件（超过通常例行条件的试验），以期得到高可靠性。

经济性是要求成本低，指的是元器件价格，加工工艺难易程度等。

此外，根据用途不同，还可以对振荡源提出不同的技术要求。

## 第二节 国内外固体振荡源发展概况

固体振荡源的发展是与微波固体器件的发展分不开的。约六十年代中期，双极晶体管的使用范围进入特高频频段后，才开始了微波本振源的固体化过程。由晶体管石英晶体振荡器、晶体管功率放大器和变容二极管倍频器组合成的微波本振源，开始代替原微波接力系统中由电子管和速调管作成的微波本振源，这就是最初的晶振一倍频链固体振荡源。60年代末期国外制成的半固体化设备（或称除行波管外的全固体化设备）中，基本上都采用这种方案。如美国的TD-3系统、TH-3系统，日本的SF-6B/FM系统等。

国外63年出现的体效应二极管（耿氏二极管）及65年出现的碰撞雪崩渡越时间二极管（简称雪崩二极管），作为反射速调管的代用品受到广泛注意。耿氏二极管的特点是电压低，功率小、噪声特性好，适于作本振信号源，并特别适用于6千兆赫以上。缺点是振荡频率稳定度差，受温度、湿度以及电源电压变化的影响大。但是采用稳频措施，如采用空腔或锁相技术等稳频，可以作成质量良好的微波本振源。

雪崩二极管的特点是功率大、效率高、噪声大。因此不适用于作微波本振源，但可用作微波功率放大器。

晶振一倍频链振荡源的缺点之一是噪声大，为了得到低噪声和低的副波电平，需要用高质量的滤波器—噪声抑制滤波

器，致使线路复杂、体积庞大。70年代初，为了克服晶振一倍频链振荡源的缺点，在设计新的微波系统时采用了一种称为锁相固体振荡源的本振系统。锁相固体振荡源具有晶振一倍频链振荡源同样的频率稳定度，用不很复杂的电路可得到所需的低噪声电平。它具有低噪声、高可靠性、高效率、结构紧凑、体积小等许多优点。由于晶体管水平的限制，当时这种方案的功率振荡级（压控振荡器或被锁振荡器）的振荡频率一般选在  $1 \sim 2\text{GHz}$ ，然后再用阶跃恢复二极管倍频器倍频到所需要的频段。锁相固体振荡源分为环路锁相振荡源和注入锁相振荡源两种。采用环路锁相如表1-1所示，有意大利西门子公司 的  $6\text{GHz}$  2700路系统，西德德律风根公司的  $\text{FM1800/6200}$  及  $\text{FM2700/6700}$  系统，英国的  $60\text{R18D}$  系统，比利时贝尔公司的  $\text{RRH1800}$  系统。此外美国在卫星通信地面站和数字微波接力系统中，法国汤姆逊公司的新型微波设备中也采用了环路锁相振荡源。在日本有采用注入锁相振荡源的设备。同时，也有采用自动频率微调的固体振荡源（AFC振荡源）的设备。

近年来出现了一种新型微波晶体管，叫做金属半导体场效应晶体管（简称为MESFET）。它有很高的最高振荡频率（约为  $100\text{GHz}$ ），在  $6\text{GHz}$  以上可成为良好的中小功率源。

我国研究各种型式的微波固体振荡源已有若干年了，曾先后研制成功了晶振一倍频链振荡源、注入锁相固体振荡源、取样锁相固体振荡源、AFC固体振荡源、6、 $8\text{GHz}$  空腔稳频体效应振荡器和  $2\text{GHz}$  腔控晶体管振荡器，频率稳定度可达  $\pm 5 \times 10^{-5}$ ，已用于各种容量的微波设备中。

表 1-1

| 国别  | 设备型号                 | 锁相方式 | VCO 频率 | VCO 频率稳定度                                                   | VCO 输出功率       | 输出频率稳定度                                                     | 同步带宽                | 环路带宽  |
|-----|----------------------|------|--------|-------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|-------|
| 意大利 | 西门子公司<br>2700 路      | 环路锁相 | 1GHz   | $\pm 1 \times 10^{-8}$<br>( $-5 \sim +45^{\circ}\text{C}$ ) | $-5\text{dBm}$ | $\pm 5 \times 10^{-6}$<br>( $-5 \sim +45^{\circ}\text{C}$ ) | $\pm 2.5\text{MHz}$ | 20KHz |
| 比利时 | 贝尔公司<br>RRH1800      | 取样锁相 | 2GHz   | $\pm 5 \times 10^{-4}$                                      | +25dBm         | $\pm 5 \times 10^{-6}$                                      | $\pm 2\text{MHz}$   | 40KHz |
| 英国  | 60R18D<br>1800 路     | 取样锁相 | 1GHz   | ( $-10 \sim +70^{\circ}\text{C}$ )                          |                |                                                             |                     |       |
| 西德  | FM2700/6700          | 取样锁相 | 2GHz   |                                                             |                |                                                             | $\pm 2\text{MHz}$   | 30KHz |
| 美国  | FM1800/6200<br>卫星地面站 | 取样锁相 | 2GHz   |                                                             |                | $< 2 \times 10^{-6}$                                        |                     | 20KHz |
|     | 柯林斯公司                | 取样锁相 | 1GHz   | $\pm 5 \times 10^{-4}$                                      |                | $\pm 5 \times 10^{-6}$                                      |                     | 20KHz |
|     | 汤姆逊公司                | 分频锁相 | 2GHz   |                                                             |                |                                                             |                     |       |
| 法国  |                      | 分频锁相 | 4GHz   | $\pm 1 \times 10^{-8}$<br>( $0 \sim +50^{\circ}\text{C}$ )  | +23dBm         | $\pm 1 \times 10^{-6}$<br>( $0 \sim +50^{\circ}\text{C}$ )  | $\pm 10\text{MHz}$  | 10Hz  |
| 中国  |                      | 取样锁相 | 1GHz   | $\pm 5 \times 10^{-4}$                                      | +23dBm         | $\pm 5 \times 10^{-6}$                                      | $\pm 3\text{MHz}$   | 40KHz |
|     |                      | 取样锁相 | 2GHz   | ( $0 \sim +50^{\circ}\text{C}$ )<br>$\pm 1 \times 10^{-8}$  |                |                                                             |                     |       |

### 第三节 微波固体振荡源分类

用于微波通信的微波固体振荡源分类如下：

#### 一、按电路形式分

1. 晶振一倍频链振荡源
2. 锁相振荡源，又可分为
  - (1) 环路锁相振荡源；
    - ① 模拟环锁相振荡源
    - ② 取样锁相振荡源
    - ③ 分频锁相振荡源
  - (2) 注入锁相振荡源
3. 自动频率微调 (AFC) 振荡源
4. 腔体稳频微波振荡源
  - (1) 空腔稳频体效应振荡源
  - (2) 腔控晶体管振荡源
  - (3) 介质谐振器稳频振荡源

#### 二、按器件分类

1. 晶体管振荡源
2. 体效应二极管振荡源
3. 场效应管振荡源

#### 三、按结构分类

1. 分供式固体振荡源
2. 移频式固体振荡源

## 第四节 几种常用固体振 荡源性能比较

大中容量微波接力系统中常用的微波固体振荡源有以下几种：晶振一倍频链振荡源，注入锁相振荡源，取样锁相振荡源，腔体稳频振荡源。这几种方案的主要特点列表如表1-2。

**表 1-2            几种常用固体振荡源性能比较**

|       | 晶振一倍频链 | 环路锁相 | 注入锁相 | 腔稳体效应<br>振荡源 | 腔控晶体管<br>振荡源 |
|-------|--------|------|------|--------------|--------------|
| 基带噪声  | 差      | 好    | 较好   | 最好           | 好            |
| 功率稳定度 | 较差     | 好    | 好    | 较好           | 好            |
| 频率稳定度 | 好      | 好    | 好    | 较差           | 较差           |
| 副波电平  | 差      | 好    | 好    | 好            | 好            |
| 电源效率  | 低      | 较高   | 较高   | 较低           | 高            |
| 可靠性   | 低      | 高    | 较高   | 高            | 高            |
| 电路结构  | 复杂     | 较复杂  | 较简单  | 简单           | 简单           |
| 加工工艺  | 不严格    | 较严格  | 较严格  | 严格           | 严格           |
| 经济性   | 差      | 较好   | 较好   | 好            | 好            |
| 体 积   | 大      | 小    | 较小   | 较大           | 小            |

下面就其中几种主要性能加以说明：

一、固体振荡源的噪声与振荡级输出载噪比和倍频次数有关。与倍频次数 $N$ 的关系是按 $20\lg N$ 的规律增加的。在晶振一倍频链振荡源中，由于晶体振荡器的频率受石英晶体的限制，不可能作得很高（目前在100兆赫左右），因此倍频次数很大，加之晶体振荡器输出电平受晶体承受功率限制，不可能作得很大，所以晶振一倍频链振荡源需插入抑噪滤波器。锁相振荡