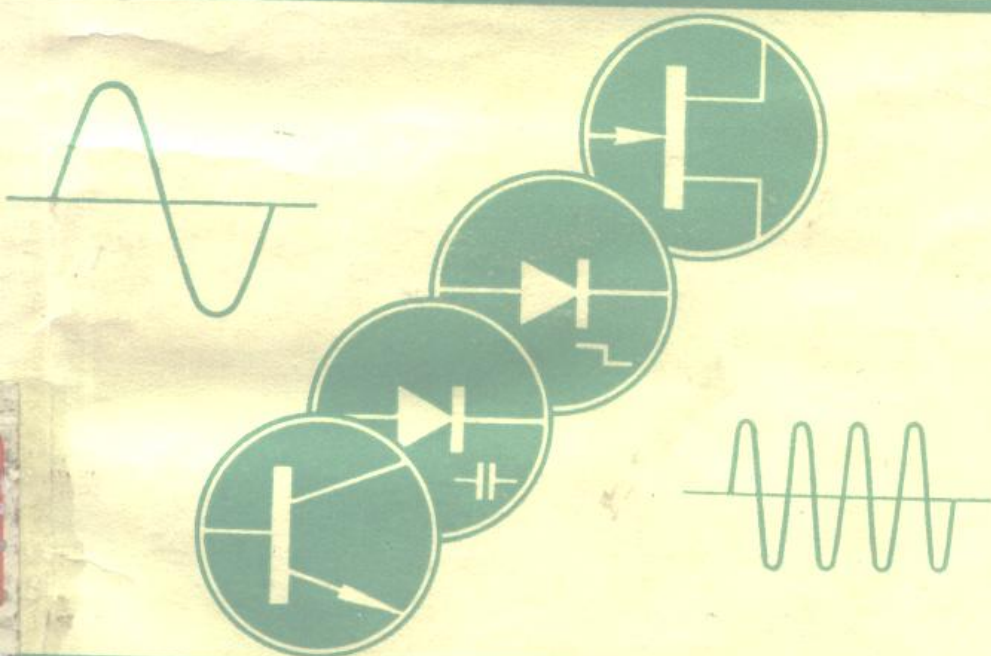


数字与模拟电子线路教学小丛书

固态倍频

费元春 编著



高等教育出版社

73.760
668

数字与模拟电子线路教学小丛书

固 态 倍 频

费 元 春 编著



高等教育出版社

8610512

DE42/17

内 容 简 介

本书比较全面、系统地论述了非线性电阻倍频和非线性电抗倍频的基本理论、工程设计及参数调测。全书共分八章。包括：非线性电阻倍频器的基本理论；变容管倍频器的理论分析；阶跃管倍频器的频域和时域分析；倍频器的偏置、激励和匹配、滤波；倍频器的信噪比和相位稳定度；晶体三极管倍频器的设计；阶跃管倍频器的设计；毫米波和亚毫米波倍频器。

本书可作为高等院校《电子线路》和《微波电子线路》的教学参考书，亦可供通信、雷达、电子对抗、遥测、测量仪器等专业工程技术人员和科研人员参考。

本书经高等学校工科电工教材编审委员会电子线路教材编审小组委托沈楚玉副教授审稿，同意作为高等学校教学参考书出版。

数字与模拟电子线路教学小丛书

固 态 倍 频

费元春 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

通县觅子店印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 10.125 字数 210,000

1985年9月第1版 1985年9月第1次印刷

印数 00,001—3,160

书号 15010·C604 定价 1.95元

8160162

前 言

固态倍频器是电子技术领域中常用的一类非线性电路，它遍及空间探测、卫星、外弹道的测量、雷达、导航、通信、频率合成、仪器等许多方面。随着倍频器件和电路的应用与发展，对倍频理论研究日益深入，目前倍频技术已达到了一个新的水平。

《固态倍频》是一本关于电子线路方面的专题参考书，主要内容包括固态倍频的基本理论和工程设计、调测两部分。其基本理论部分是根据作者多年来从事科研和教学工作中汇集的一些资料经过消化整理成文的；其工程设计、调测部分是结合作者过去从事高频、超高频、S、C、X波段倍频器研制中的一些实际工作经验和学习心得而写成的，并在一定程度上反映了近年来国内外固态倍频技术的最新成就。该书可作为高等院校“电子线路”、“微波电子线路”课程的教学参考书，亦可供从事该方面科研、生产的工程技术人员参考。

全书内容共分八章。第一章非线性电阻倍频器的基本理论。本章阐述了晶体二极管、三极管阻性倍频的基本原理和数学模型。并着重讨论了单栅场效应晶体管的非线性模型和双结型晶体管C类倍频器的折线分析方法。第二、三章是关于非线性电抗倍频的基本理论。其中，第二章内容为变容二极管倍频的理论分析。由非线性电容-电压特性、电压-电荷特性进行分析，计算机解出结果，得到常用的变容管倍频器设计表格。另外还介绍了一种简化为立方方程求解的新方法及

设计曲线。第三章阶跃管倍频器的理论：频域和时域分析。通过两种电路模型的分析，导出频域法和时域法的设计公式。第四章倍频器的偏置、激励和匹配、滤波，这是关系到如何实现高效率、高质量倍频的重要问题。在该章中论述了各种倍频器的激励、偏置电路的原理和要求，常用的分立元件和分布参数匹配网络及计算公式。从倍频的角度说明对滤波器的要求，列举了几种典型的分布参数滤波器。第五章倍频器的信噪比和相位稳定度。其内容涉及到怎样分析和实现高纯度频谱倍频源的若干问题。侧重讨论了影响倍频器相位噪声颇大的调幅-调相(AM-PM)变换特性及静态测试方法，并分析了突变结变容管的AM-PM变换和滞后效应及其影响因素。第六、七、八章内容是关于倍频理论在工程设计中的具体应用。第六章是晶体管倍频器的设计。列举了典型的小功率晶振倍频源及晶体管C类倍频器的设计和调试方法，其次介绍了晶体管参量倍频器、双栅场效应晶体管倍频器的设计原理和主要性能特点，并给出了几种晶体管放大倍频电路的实例，以供选用时参考。第七章阶跃管倍频器的设计。在讨论阶跃管内部结构特点和电参量的基础上比较详细地介绍了9 GHz三倍频器的设计步骤和调试方法，其次介绍了18 GHz七倍频器时域法设计结果。第八章毫米波和亚毫米波倍频器。在分析了毫米波砷化镓肖特基势垒二极管的设计和制造特点的基础上，讨论了宽带100~170 GHz毫米波倍频器的模拟设计法及性能，并且对300 GHz、600 GHz的亚毫米波倍频器的电路结构和设计特点、测试结果进行了阐明。

本书编写过程中力求理论分析上深入浅出，通俗易懂，电路上能密切结合工程实用。在编写的全过程中得到俞宝传教

授的热忱鼓励和耐心指导，对编写提纲和初稿提出了不少宝贵的意见。沈楚玉副教授认真细致地审阅了初稿的全部内容，为该书的定稿提出了许多有益的意见。对于他们所付出的辛勤劳动，在此谨表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中可能存在不少错误和缺点，诚恳地欢迎读者批评指正。

作 者

1983 年 5 月

常用符号、单位表

1. n 倍频次数或谐波次数

2. 电流

i	电流瞬时值
I_i	输入电流幅值
I_o	输出电流幅值
I_n	n 次谐波电流幅值
I_m	电流最大值

3. 电压

v	电压瞬时值
V_i	输入电压幅值
V_o	输出电压幅值
V_n	n 次谐波电压幅值
V_b, E_b	偏置电压
V_m	电压最大值
V_B	击穿电压
V_{CC}	集电极电源电压

4. 功率

P	功率通用符号
P_i	输入功率
P_o	输出功率
P_n	n 次谐波功率
P_{ia}	输入资用功率
P_{CM}	集电极最大耗散功率

5. 频率、波长

f	频率通用符号
ω	角频率通用符号
f_i	输入频率
ω_i	输入角频率
f_o	输出频率
ω_o	输出角频率
f_I	空闲频率
ω_I	空闲角频率
f_T	特征频率
f_c	截止频率
λ	波长通用符号
λ_o	对应输出频率的波长
λ_g	波导波长

6. 阻抗、导纳、电容、电感

R, r	电阻通用符号
R_o	回路谐振电阻
R_s	二极管串联损耗电阻
R_I	空闲回路电阻
R_g	激励源内阻
R_L	负载电阻
Z_L	负载阻抗

Z_0	传输线特性阻抗
$Z_i = R_i + jX_i$	输入阻抗
$Z_o = R_o + jX_o$	输出阻抗
$Y_i = G_i + jB_i$	输入导纳
C	电容通用符号
C_j	变容管结电容
C_{j0}	变容管零偏压结电容
L	电感通用符号
RFC	射频扼流圈
7. 其它	
BJT	双极(双结型)晶体管 c 集电极、 b 基极、 e 发射极
FET	场效应晶体管 d 漏极、 g 栅极、 s 源极
AM	调幅
PM	调相
FM	调频
dc	直流
max	最大值
min	最小值
opt	最佳值
i	输入

o	输出
θ	导通角
φ	相位
T	周期
t	时间
η	效率
8. 单位	
cm	厘米 (10^{-2}m)
mm	毫米 (10^{-3}m)
μm	微米 (10^{-6}m)
s	秒
μs	微秒 (10^{-6}s)
ns	纳秒 (10^{-9}s)
ps	皮秒 (10^{-12}s)
Hz	赫兹
kHz	千赫 (10^3Hz)
MHz	兆赫 (10^6Hz)
GHz	吉赫 (10^9Hz)
THz	太赫 (10^{12}Hz)
V	伏特
A	安培
mA	毫安 (10^{-3}A)
μA	微安 (10^{-6}A)
Ω	欧姆
S	西(门子)
F	法拉
μF	微法 (10^{-6}F)
pF	皮法 (10^{-12}F)

fF 飞法 (10^{-15}F)
H 亨利
 μH 微亨 (10^{-6}H)
nH 纳亨 (10^{-9}H)
W 瓦特

mW 毫瓦 (10^{-3}W)
dB 分贝
dBm 分贝毫瓦
 $^{\circ}\text{C}$ 摄氏温度
K 绝对温度

目 录

第一章 非线性电阻倍频器的基本理论

1.1 倍频器概述	1
1.1.1 倍频器的特点和应用	2
1.1.2 倍频器的分类	5
1.1.3 倍频器的主要性能指标	7
1.2 二极管非线性电阻倍频器	7
1.2.1 二极管阻性倍频的分析方法	7
1.2.2 二极管阻性倍频的损耗	10
1.3 晶体三极管 A 类倍频器	14
1.4 晶体三极管 C 类倍频器	17
1.5 C 类混合型倍频器	21
1.6 D 类倍频器	25
1.7 场效应晶体管倍频器	27
1.7.1 单栅场效应晶体管倍频器的分析	28
1.7.2 双栅场效应晶体管倍频原理	35

第二章 变容管倍频器的理论分析

2.1 非线性电抗倍频中的能量关系	39
2.2 变容管倍频器的分析	41
2.2.1 变容管的特性	41
2.2.2 变容管的电压-电荷特性	46
2.2.3 变容管的电流-电压关系及电路阻抗	47
2.2.4 倍频器的功率和效率	53

2.2.5 变容管倍频器的设计表格	54
2.2.6 空闲电路的作用	58
2.3 突变结变容管二倍频器的简化分析	61
2.3.1 统一的设计方程	61
2.3.2 调谐情况下的立方方程及其解	66
2.3.3 最大输出功率下的设计曲线	70

第三章 阶跃管倍频器的频域和时域分析

3.1 阶跃管的特性	79
3.2 阶跃管倍频器的频域分析法	81
3.2.1 理想阶跃管正向电流特性与储存电荷的关系	81
3.2.2 理想阶跃管上电压和功率的关系	82
3.2.3 实际阶跃管的功率、效率关系	86
3.2.4 阶跃管倍频器的设计公式	91
3.3 阶跃管倍频器的时域分析法	92
3.3.1 阶跃管倍频器的组成和工作过程	92
3.3.2 阶跃管脉冲发生器	94
3.3.3 谐振电路	107
3.3.4 输出滤波器	112
3.3.5 倍频效率	113

第四章 倍频器的偏置、激励和匹配、滤波

4.1 倍频器的偏置和激励	117
4.1.1 变容管、阶跃管倍频器的偏置电路	117
4.1.2 C类倍频器的偏置电路	119
4.1.3 C类混合型倍频器的激励和偏置	121
4.2 阻抗匹配和滤波	122
4.2.1 分立元件匹配网络及计算公式	123
4.2.2 分布参数匹配网络	134

4.2.3 分布参数滤波网络	136
4.3 用导抗圆图设计匹配网络	142

第五章 倍频器的信噪比和相位稳定度

5.1 倍频器信噪比的下降和附加噪声	150
5.1.1 倍频器的信噪比	150
5.1.2 倍频器引入的附加噪声	152
5.2 倍频器的调幅-调相(AM-PM)转换效应	154
5.2.1 倍频器的相位噪声功率谱密度	155
5.2.2 AM-PM 转换系数的测试电路	157
5.2.3 晶体三极管 C 类倍频器的 AM-PM 转换效应测试曲线	158
5.3 变容管倍频器中 AM-PM 转换和回滞现象的分析	162
5.3.1 突变结变容管倍频器的数学模型	163
5.3.2 稳态条件下倍频器的网络方程	166
5.3.3 倍频器的效率	169
5.3.4 影响调幅-调相变换和回滞现象的因素	171
5.4 温度和电压变化引起的相位漂移	180
5.5 倍频器的不稳定性	183
5.5.1 偏置电路引起的寄生振荡	183
5.5.2 匹配的谐振电路调节不当引起的寄生振荡	183

第六章 晶体管倍频器的设计

6.1 设计要点	185
6.2 小功率晶振倍频固态源的设计	187
6.2.1 选择电路方案	188
6.2.2 计算偏置电路、输出谐波阻抗、电流振幅和激励功率	191
6.2.3 谐振滤波和匹配网络元件参数的计算	194
6.2.4 电路结构设计和调试	199
6.3 晶体管 C 类倍频器的设计	200

6.3.1	工作状态的选择和计算	201
6.3.2	选频回路及谐波抑制问题	204
6.3.3	C类倍频器的调谐和调整	206
6.4	晶体管参量倍频器	208
6.4.1	工作原理	208
6.4.2	基本的电路形式	210
6.4.3	晶体管参量倍频器设计举例	211
6.5	Ku波段双栅场效应晶体管倍频器	214
6.6	晶体管倍频电路实例	218
6.6.1	120→240 MHz 晶体管二倍频电路(200 mW)	219
6.6.2	240→480 MHz 晶体管二倍频电路(300 mW)	220
6.6.3	175→525 MHz 晶体管三倍频电路(150 mW)	222
6.6.4	200→400 MHz 晶体管二倍频电路(3 W)	223
6.6.5	150→450 MHz 晶体管三倍频电路(3 W)	225
6.6.6	400→800 MHz 晶体管二倍频电路(3 W)	226

第七章 阶跃管倍频器的设计

7.1	阶跃管的结构和电参量	229
7.1.1	结构特点	229
7.1.2	主要电参量	230
7.2	X波段阶跃管三倍频器的设计	232
7.2.1	9 GHz 阶跃管三倍频器的设计计算	232
7.2.2	9 GHz 阶跃管三倍频器的调测	242
7.3	18 GHz 阶跃管七倍频器的设计	250
7.3.1	18 GHz 七倍频器的组成	250
7.3.2	用时域法设计七倍频器	251
7.3.3	七倍频器的测试结果	253

第八章 毫米波和亚毫米波倍频器

8.1	概述	255
-----	----------	-----

8.2 毫米波砷化镓肖特基二极管的设计与制造	256
8.2.1 毫米波二极管的结构和直流参数	257
8.2.2 射频功率和阻抗的计算	259
8.2.3 电路特性阻抗的限制	263
8.2.4 载流子浓度和结直径的确定	263
8.3 毫米波倍频器	264
8.3.1 宽带(100~170 GHz)毫米波倍频器	264
8.3.2 比例模型设计法	266
8.3.3 性能测试结果	268
8.4 亚毫米波倍频器	270
8.4.1 输出 300 GHz 的二倍频器	270
8.4.2 输出 600 GHz 的四倍频器	278

附 录

附录一 第一类修正贝塞尔函数比值表	284
附录二 余弦脉冲系数表	286
附录三 变容管倍频器设计表格	291
附录四 微带线特性阻抗和有效介电常数曲线	298
附录五 分贝(dB)与电压和功率的关系	300
参考文献	306

第一章 非线性电阻倍频器的基本理论

1.1 倍频器概述

在电子技术领域中,广泛采用频率变换电路——调制、解调、变频、倍频、振荡等。本书将要讨论的是其中一种频率变换电路——倍频器。所谓倍频器是指能完成输入信号频率倍增功能的电子设备。图 1.1.1 是一个理想倍频器的方框图,输入信号是 $V_i \cos \omega_i t$, 其输入角频率为 ω_i , 通过 n 次倍频后输出信号是 $V_o \cos n \omega_i t$, 输出角频率变为 $n \omega_i$ 。 n 是倍频次数($\neq 1$ 的正整数)。原则上,各种非线性器件都能实现倍频,这里将主要讨论的是利用半导体器件的非线性实现倍频,即固态倍频器。最近十

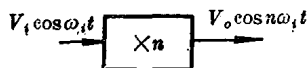


图 1.1.1 倍频器的方框图

多年来,固态倍频源发展十分迅速。从器件看,由早期的非线性电阻二极管发展到变容管、阶跃管、隧道二极管、雪崩二极管等,由双极晶体三极管发展到利用单栅、双栅场效应晶体管倍频;从波段看,由短波、超短波到厘米波乃至毫米波、亚毫米波倍频都取得惊人的进展;从功率看,采用放大倍频技术,在 L 波段,倍频输出功率可达几十瓦以上。目前,通过倍频能产生低至几兆赫以下,高至几千兆赫直至 600 GHz 频段的信号。300 GHz 的固态倍频源能输出 5 mW 以上的功率,600 GHz 的固态

倍频源已研制成功，其输出功率足以用作超导混频器的本振源。

1.1.1 倍频器的特点和应用

倍频器具有下述一些特点，使它在通信、雷达、频率合成器、测量等方面获得广泛的应用。

1) 能够降低电子设备的主振频率。这对于那些工作频率较高而对稳定性要求又较严格的通信机和高频设备极为重要。因为晶体频率越高，相对频率稳定度就越低。目前国内具有最高稳定度的晶体频率未超过 5 MHz，其相对频率稳定度是 $(3 \sim 0.5) \times 10^{-9}/\text{日}$ 。而一般基音晶体频率不高于 30 MHz，泛音晶体频率很少超过 400 MHz，其相对频率稳定度却降低 2~3 个数量级。为了解决固态发信机中高的稳定度和高的输出频率之间的矛盾，常在主振级和输出级间采用多次倍频的技术。

又如一个米波和分米波段的动目标显示雷达，当采用自激振荡的发射机时，对接收机本振源的长期和短期频率稳定度要求很高，若不辅以稳频措施，用一般 LC 振荡器是达不到的。但采用晶振放大倍频的方法却能容易地实现稳频的要求。

2) 扩展工作频段。在电子对抗中需要宽频带的干扰和反干扰收、发设备，若用一个振荡器难以使它覆盖一个倍频程的频段，而采用倍频方式却能做到一个或多个倍频程的工作频段。因此在电子战中倍频成为很重要的一种技术手段。

许多通信设备在主振器工作波段不扩展的条件下，利用倍频器亦易于扩展发射机输出级的工作波段。例如主振器工

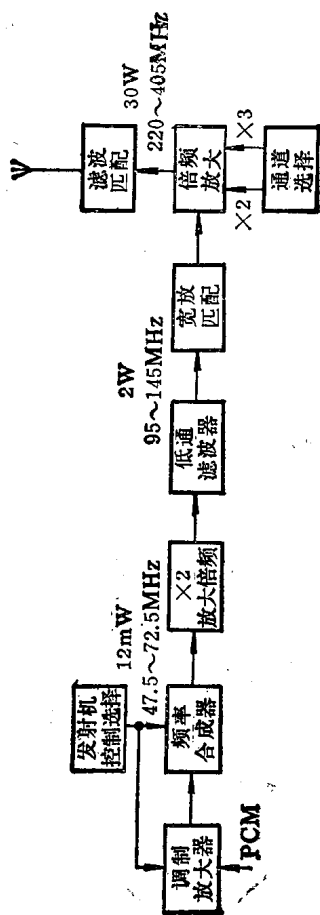


图 1.1.2 通信发射机倍频链方框图