

21

世纪高等学校辅导教材

● 电子与信息类丛书

高频电子线路 学习指导与题解

严国萍 编著

- 学习引导、典型例题分析
- 精选习题试题并解答
- 考研真题、模拟试题与解答

华中科技大学出版社

21 世纪高等学校辅导教材

高频电子线路

学习指导与题解

严国萍 编著

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路学习指导与题解/严国萍 编著
武汉:华中科技大学出版社, 2003年10月
ISBN 7-5609-3014-X

I. 高…

II. 严…

III. 高频-电子线路-高等学校-教学参考资料

IV. TN7

高频电子线路学习指导与题解

严国萍 编著

责任编辑:周芬娜

封面设计:潘 群

责任校对:封春英

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录 排:华大图文设计室

印 刷:武汉市新华印刷有限责任公司

开本:787×960 1/16

印张:18

字数:323 000

版次:2003年10月第1版

印次:2003年10月第1次印刷

定价:23.80元

ISBN 7-5609-3014-X/TN·73

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是高频电子线路(通信电子线路)的学习指导用书及题解。它提炼了本课程各章节中的基本要点、重点和难点,并精心挑选了典型例题进行分析解答,提供了大量自测自评试题和解答供学生进行训练和自查。全书共分八章,前七章中每章都包括三部分,即学习要点、典型例题和自测自评。第八章收有本科生高频电子线路期末考题和硕士研究生入学考题,以及相应的详细解答。

本书重点突出,题目取材广泛多样,强调解题思路 and 技巧。可作为高等学校各相关专业学生学习本课程的辅导教材和报考电子、信息、通信等学科硕士研究生考生的复习参考用书。

前 言

高频电子线路是电子信息工程与通信工程专业的必修课程,也是相关专业硕士研究生入学考试科目之一。

高频电子线路是一门理论与实践性很强的课程,主要讲述组成模拟通信系统各功能电路的基本原理,指标、参数的理论计算和电路分析与设计。该课程学习有一定难度,为了配合高频电子线路课堂学习和辅导学生应战研究生入学考试,编者根据多年教授该课程的体会和资料积累,编写了这本学习辅导书。

全书共分八章,内容包括高频电子线路的基础知识,高频小信号放大器和功率放大器,正弦波振荡器,线性频率变换—调幅、检波、混频及非线性频率变换—调频、鉴频等。在各章中,首先介绍本章重点基础知识,继而进行典型例题分析,分析中强调了重点和难点;为了达到学习提高的目的,每章还选编了各种类型的自测试题,并附有试题详解。第八章给出了本科生期末考试试题和硕士研究生入学考试试题及详细解答,读者可进行实战测试。通过这些环节学习,读者可以牢固掌握本课程的知识,提高分析和解决实际问题的能力。

本书包含了张肃文等编著的《高频电子线路》(第三版)教材和严国萍等编著的《非线性电子电路》教材的主要内容。题目大部分选自这两本教材,同时还收集、选编了兄弟院校教材中有代表性的习题,以拓展学生对这门课程的视野。

本书突出课程内容重点,强调知识点的融会贯通,注重实际分析和应用。本书若能解决学生学习本课程的疑惑,提高应战水平,则达到作者编写本书的心愿。

感谢胡东参与本书部分题目的选编,以及张琼、游超和文小军老师为本书所做的有益工作;感谢龙占超副教授,本科生期末考题和硕士研究生入学考题收有其教学的成果。

由于编写时间仓促,书中难免有不妥之处或者错误,恳请读者及时指正,编者不胜感激。

编 者

2003年8月于武昌

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 学习要点	(1)
1.1.1 高频电子线路课程研究对象	(1)
1.1.2 通信系统	(1)
1.1.3 信号与频谱	(1)
1.1.4 无线电波的传输特性	(2)
1.1.5 调制与解调	(2)
1.1.6 高频电子线路的分析方法	(2)
1.2 典型例题	(4)
1.3 自测自评	(6)
1.3.1 自测试题	(6)
1.3.2 自测试题解答	(6)
第2章 选频网络	(9)
2.1 学习要点	(9)
2.1.1 选频网络的作用与分类	(9)
2.1.2 谐振频率与串、并联谐振回路	(9)
2.1.3 串、并联谐振回路的特点与参量	(10)
2.1.4 串、并联阻抗等效互换与回路抽头时的阻抗变换	(11)
2.1.5 耦合回路	(13)
2.1.6 选择性滤波器	(16)
2.2 典型例题	(17)
2.3 自测自评	(21)
2.3.1 自测试题	(21)
2.3.2 自测试题解答	(24)
第3章 高频小信号放大器	(30)
3.1 学习要点	(30)
3.1.1 高频小信号放大器的分类	(30)
3.1.2 高频小信号放大器的质量指标	(30)
3.1.3 晶体管高频小信号等效电路与参数	(32)

3.1.4	y 参数等效电路与混合 π 等效电路参数的转换	(34)
3.1.5	晶体管谐振放大器	(34)
3.1.6	谐振放大器的稳定性	(37)
3.1.7	非调谐回路式放大器与集成电路放大器	(39)
3.2	典型例题	(39)
3.3	自测自评	(44)
3.3.1	自测试题	(44)
3.3.2	自测试题解答	(47)
第4章	谐振功率放大器	(55)
4.1	学习要点	(55)
4.1.1	谐振功率放大器的作用及特点	(55)
4.1.2	谐振功率放大器的原理	(56)
4.1.3	谐振功率放大器的电压、电流波形	(56)
4.1.4	谐振功率放大器的功率关系和效率	(56)
4.1.5	晶体管谐振功率放大器的折线近似分析法	(57)
4.1.6	晶体管谐振功率放大器的电路	(64)
4.1.7	晶体管倍频器	(67)
4.1.8	小结	(68)
4.2	典型例题	(69)
4.3	自测自评	(77)
4.3.1	自测试题	(77)
4.3.2	自测试题解答	(80)
第5章	正弦波振荡器	(89)
5.1	学习要点	(89)
5.1.1	反馈型振荡器的基本工作原理	(89)
5.1.2	反馈型振荡器的平衡条件	(90)
5.1.3	振荡器平衡状态的稳定条件	(90)
5.1.4	互感耦合振荡器	(91)
5.1.5	LC 三端振荡器	(92)
5.1.6	LC 三端振荡器组成法则(相位平衡条件的判断准则)	(96)
5.1.7	振荡器的频率稳定问题	(96)
5.1.8	石英晶体振荡器	(98)
5.1.9	其他形式的振荡器	(101)
5.2	典型例题	(102)

5.3 自测自评	(114)
5.3.1 自测试题	(114)
5.3.2 自测试题解答	(121)
第6章 调幅、检波与混频——频谱搬移电路	(137)
6.1 学习要点	(137)
6.1.1 频谱搬移电路的特性	(137)
6.1.2 振幅调制原理	(139)
6.1.3 振幅调制方法与电路	(144)
6.1.4 振幅解调(检波)原理与电路	(151)
6.1.5 混频器原理及电路	(159)
6.1.6 小结	(169)
6.2 典型例题	(170)
6.3 自测自评	(180)
6.3.1 自测试题	(180)
6.3.2 自测试题解答	(188)
第7章 角度调制与解调——频谱非线性变换电路	(211)
7.1 学习要点	(211)
7.1.1 频谱非线性变换电路的特点	(211)
7.1.2 调角波的性质	(211)
7.1.3 调频方法及电路	(218)
7.1.4 调角信号解调	(224)
7.1.5 小结	(229)
7.2 典型例题	(230)
7.3 自测自评	(238)
7.3.1 自测试题	(238)
7.3.2 自测试题解答	(244)
第8章 试题与解答	(256)
8.1 本科生期末考试试题	(256)
8.2 硕士研究生入学考试试题	(269)
参考文献	(279)

第1章 绪 论

1.1 学习要点

1.1.1 高频电子线路课程研究对象

本课程研究的对象是模拟无线通信系统中的发送设备和接收设备,重点研究它们的组成原理、基本电路和分析方法。

1.1.2 通信系统

从广义上说,传输信息的系统统称为通信系统。例如,广播电台是传输声音的系统,电视是传输图像信息与声音信息的系统,计算机通信是传送数据的系统,它们都是通信系统。

一个完整的通信系统应包括信号源(输入变换器)、发送设备、传输信道、接收设备和收信装置(输出变换器)等五部分,如图1-1所示。

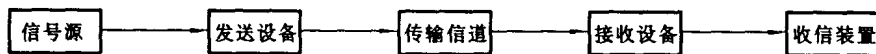


图1-1 通信系统

信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统,信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。

1.1.3 信号与频谱

在实际应用中的信号千变万化,多种多样,为了便于分析,常采用数学表达式、波形及频谱的方式来描述信号。

在表示信号频率变换的过程中,为了突出主要矛盾常采用信号频谱表示法。任何复杂的信号,都可分解为许多不同频率的正弦信号之和,因此,所谓“频谱”即是指组成信号的各正弦分量按频率分布的情况。为了更直观地了解信号的频率组成和特点,通常采用作图的方法来表示频谱。用频率 f 作横坐标,用信号的各正弦分量的幅度作纵坐标作出的关系曲线称之为频谱图。

1.1.4 无线电波的传输特性

不同频段的无线电信号,其传播特性不同。根据无线电信号频率的不同,无线电波的传播方式分为以下几种:

- ① 直线传播(视距):适于超短波以上频段的信号。
- ② 绕射(地波)传播:适于中、长波信号。
- ③ 折射和反射(天波)传播:适于短波信号。
- ④ 散射传播:适于超短波以上频段的信号。

1.1.5 调制与解调

无线电波通过天线传播时,只有当天线的长度与信号波长可比拟时才能有效地辐射。为了减小天线尺寸和区分不同的电台信号,必须把需要传送的基带信号调制到频率较高的载频上。

(1) 调制

调制是将基带信号装载到高频振荡上去的过程。模拟调制可分为三种方式:

- ① 振幅调制(AM):即用基带信号去改变载波的振幅。
- ② 频率调制(FM):即用基带信号去改变载波的瞬时频率。
- ③ 相位调制(PM):即用基带信号去改变载波的瞬时相位。

频率调制和相位调制统称为角度调制。

(2) 解调

解调是调制的逆过程,即从已调制信号中恢复出原基带信号的过程,根据调制信号的不同,它可分为振幅解调、频率解调和相位解调。

1.1.6 高频电子线路的分析方法

高频电子线路的内容涉及高频小信号放大器、高频功率放大器、各种频率变换电路。根据其信号大小、功能可采用以下几种不同的分析方法:

① 等效电路分析法:用于高频小信号放大器,如图1-2(a)、(b)所示的 y 参数等效电路、混合 π 等效电路。

② 折线分析法:用于高频功率放大器、包络检波器,如图1-3(a)、(b)所示。

③ 幂级数分析法:用于频率变换电路,如平方律调幅、平方律检波、平衡混频等。

④ 时变参量电路分析法:适于大小两个信号同时作用于一个有源器件,如晶体管混频。由时变参量元件所组成的电路,叫做参变电路,有时也称为时变线性电路,如图1-4所示。

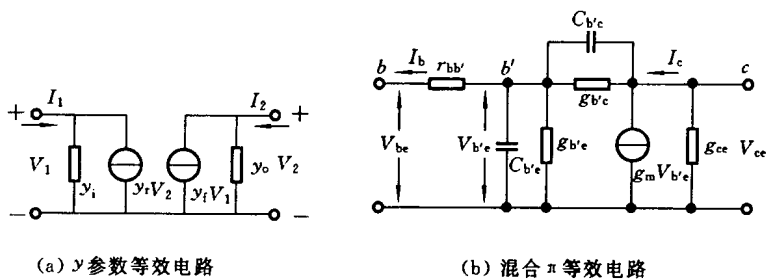


图 1-2 等效电路分析

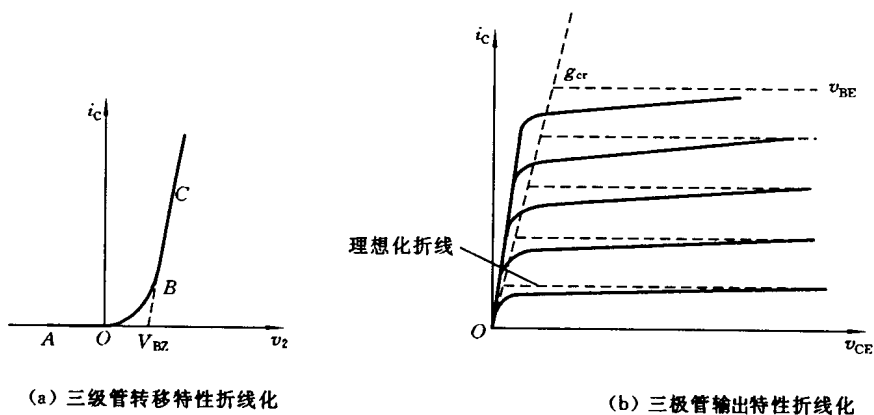
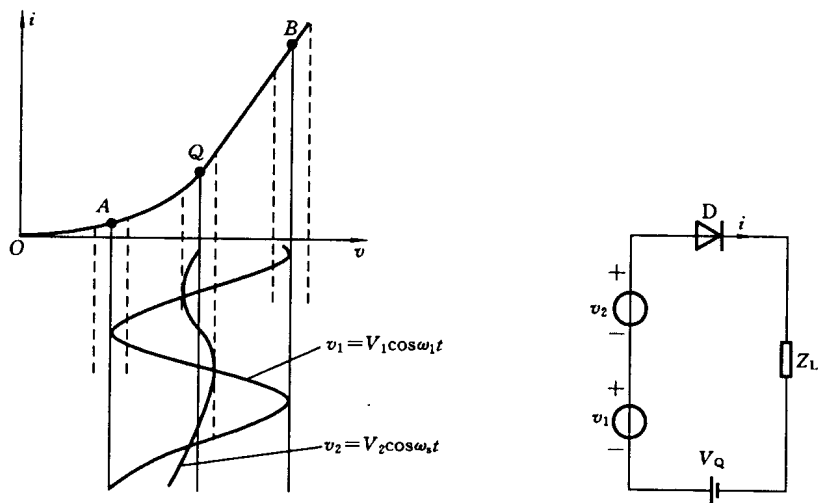


图 1-3 折线分析



1.2 典型例题

【例 1-1】 画出一个调幅广播发射机组成原理框图及各点对应波形,并说明各框的功能作用。

解 调幅广播发射机组成原理框图及各点对应波形如图 1-5 所示。图中各框功能如下:

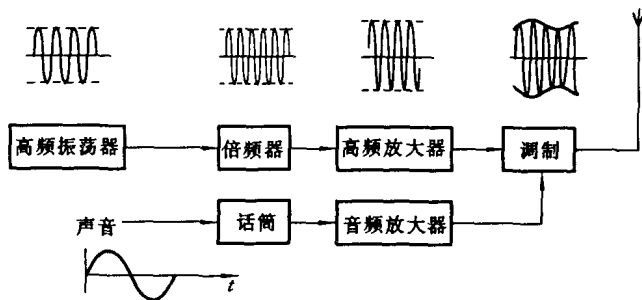


图 1-5 例 1-1 图

高频振荡器的作用是产生高频电振荡信号,这种高频电波是用来运载声音信号的,把它叫做载波,它的频率称为载频。倍频器的作用是提高高频振荡频率,高频振荡器所产生的电振荡的频率不一定恰好等于所需要的载波频率,一般低于载波频率若干分之一,这主要是为了保证振荡器的频率稳定度,所以需要用倍频器把频率提高到所需要的数值。

高频放大器的作用即把振荡器产生的高频振荡放大到一定的强度。

调制的作用与方法:调制就是把图像或声音信息装载到载波上的过程。

将信息装载到高频振荡中的方法有好几种:调频、调幅、调相等,电视中图像是调幅,伴音是调频。广播电台中常用的方法是调幅与调频。

调制后高频振荡的振幅可以写成 $V_0(1 + m\cos\Omega t)$,相应的高频电振荡叫做“调幅波”,它的表示式为

$$v(t) = V_0(1 + m\cos\Omega t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

m 是一个小于 1 的常数,叫做调幅系数,它应该和音频信号的 V_a 成正比,调幅信号没有失真。

声音信号对高频载波进行调幅以后,利用尺寸较小的天线,就可以把它从空中辐射出去,传送给远方的听众。这就是无线电广播发射信号的基本过程。

【例 1-2】 在无线通信中为什么要采用调制与解调,各自的作用是什么?

解 调制就是把图像或声音信息装载到载波上的过程。而解调则是调制的逆过程,即从已调制的高频振荡中取出原调制信号。调制的原因有两点:

① 为了天线易于实现。无线通信是利用天线向空中辐射电磁波来传送信息的,而天线长度必须和电磁波的波长可以比拟,才能有效地把电振荡辐射出去。而声音信号的频率约为 $20\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$,即其波长范围是 $15\times 10^3\sim 15\times 10^6\text{ m}$,要制造出与此尺寸相当的天线显然是很困难的。因此直接将音频信号辐射到空中去是不可能的。

② 为了区分不同的电台信号。因为各种声音信号频率都在 $20\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$,如果不调制则它们在空中混在一起,收听者也无法选择所要接收的信号。因此,有必要将不同的信息调制到不同的高频载波上去。

【例 1-3】 画出一个超外差调幅广播接收机组成原理框图及各点对应波形,并说明各框的功能作用。

解 超外差调幅广播接收机组成原理框图及各点对应波形如图 1-6 所示。

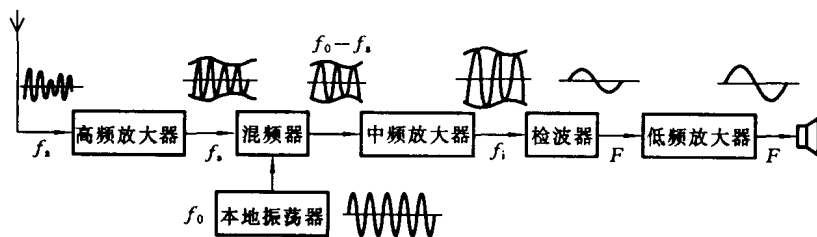


图 1-6 例 1-3 图

超外差接收机的主要特点:把被接收的高频调幅信号的载波频率 f_s 先变为频率固定不变的中频 f_i ,再利用中频放大器加以放大,然后进行检波。由于中频是固定的,因此中频放大器的选择性与增益都与接收的载波频率无关。

把高频信号的载波降低为中频的任务是由混频器来完成的。把一个载频为 f_s 的调幅波和一个频率为 f_0 的正弦波同时加到混频器上,经过变频以后所得到的仍是一个调幅波,不过它的载波频率已经不是原来的载频 f_s ,而是这两个频率之差,即等于 (f_0-f_s) 。通常这个新的载波频率比原来的载频低,但比音频信号的频率高,习惯上就把它叫做中频,变频后产生的新的调幅信号叫做中频信号,通过中频放大器可将其进行放大。由于变频后的载波频率是固定的,所以中频放大器的谐振回路不需要随时调整,不管信号频率怎么变,中频总是不变的,选择性容易做好,这也是超外差接收机的优点。为了从已调幅信号中取出其载有信息的包络则采用了检波电路。

1.3 自测自评

1.3.1 自测试题

1-1 调幅接收机里为什么要“检波”? 检波前后的波形有什么变化? 请粗略画出检波前后的波形。

1-2 超外差式接收机里“混频”的作用是什么? 如果接收信号的频率是2100 MHz, 希望把它变成70 MHz的中频, 该怎么办? 画出方框图并标明有关频率。

1-3 某非线性器件可用幂级数表示为 $i = a_0 + a_1v + a_2v^2 + a_3v^3$, 信号 v 是频率150 kHz和200 kHz的两个余弦波, 问电流 i 中能否出现50 kHz, 100 kHz, 250 kHz, 300 kHz, 350 kHz的频率分量?

1-4 接收机收到的信号 $v(t) = V(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega_s t$, 本地振荡器信号角频率为 ω_0 , 经混频作用后输出信号还是不是调幅波? 试画出混频前后的波形。频带宽度与 $v(t)$ 相比是否发生变化?

1-5 (1) 中波广播波段的波长范围为187~560 m, 为避免邻台干扰, 两个相邻电台的载频至少要相差10 kHz。问在此波段中最多能容纳多少个电台同时广播?

(2) 短波广播的波长范围是16.7~136.5 m, 问最多能容纳多少个电台?

1-6 已知图1-7(a)中二极管的特性为 $i = Kv^2$, 式中 K 为常数, 若输入电压 v_1, v_2 为已知, 试求输出电压 v_o 的表达式。若图1-7(b)中二极管的特性为 $i = b_0 + b_1v + b_2v^2 + b_3v^3$, 输入电压 v_1, v_2 为已知, 试求输出电压 v_o 的表达式。

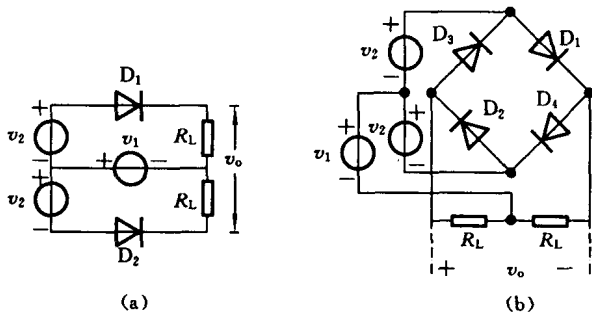


图 1-7 自测试题 1-6 图

1-7 在什么情况下适宜用时变参量来分析非线性电路?

1.3.2 自测试题解答

1-1 调幅是用基带信号来改变载波的振幅, 在接收端为了恢复原基带信号

(从已调制的高频振荡中取出原基带信号)必须进行解调,调幅波的解调过程称为检波。检波前后的波形图如图1-8所示。由图可知,检波是从已调幅波中取出其包络。

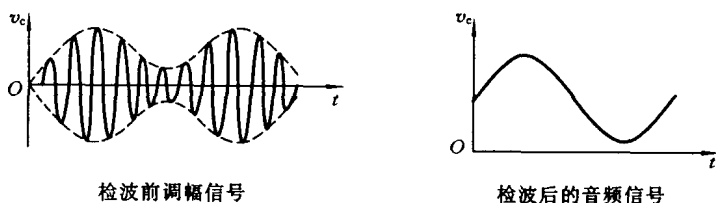


图1-8 自测试题1-1 解答图

1-2 “混频”的作用是将接收的已调信号的载波频率变为一固定中频信号。如果接收信号的频率是2100 MHz,希望把它变成70 MHz的中频则需要加一个振荡频率为2170 MHz的本地振荡器。将接收信号和本地振荡信号同时加到某一非线性器件上,经过频率变换后再通过一个谐振频率为70 MHz的选频网络即可。其实现框图如图1-9所示。

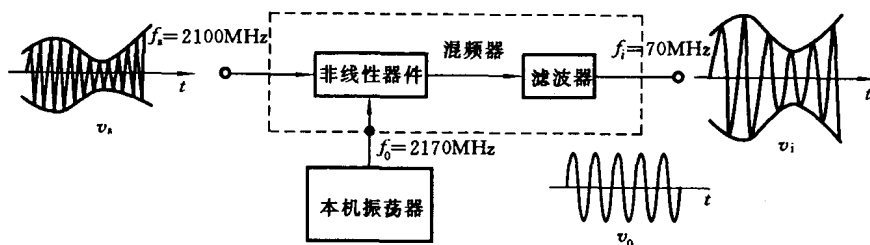


图1-9 自测试题1-2 解答图

1-3 将 $v = v_1 + v_2$ ($v_1 = \cos 2\pi f_1 t$, $v_2 = \cos 2\pi f_2 t$, $f_1 = 150$ kHz, $f_2 = 200$ kHz)代入

$$i = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3$$

经过幂级数变换可得以下分量:

$$v = v_1 + v_2, \quad (v_1 + v_2)^2 = v_1^2 + 2v_1 v_2 + v_2^2$$

$$(v_1 + v_2)^3 = v_1^3 + 3v_1^2 v_2 + 3v_1 v_2^2 + v_2^3$$

其中频率分量有:

$$f_1 + f_2 = 350 \text{ kHz}, \quad f_2 - f_1 = 50 \text{ kHz}, \quad 2f_1 = 300 \text{ kHz}$$

$$2f_2 - f_1 = 250 \text{ kHz}, \quad 2f_1 - f_2 = 100 \text{ kHz}$$

1-4 经混频作用后输出信号还是调幅波,与 $v(t)$ 相比其频带宽度并没有发生变化。混频前后的波形及频谱如图1-10所示。

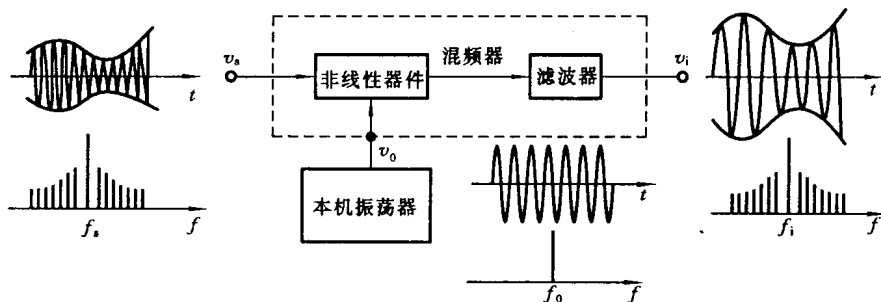


图 1-10 自测试题 1-4 解答图

1-5 (1) 中波广播波段的频宽为 $C/187 - C/560 = 1071$ kHz, 其中电波传播的速度 $C = 30 \times 10^4$ km/s, 因此该波段中最多能容纳 107 个电台同时广播。

(2) 短波广播波段的频宽为 $C/16.7 - C/136.5 = 15.7$ MHz, 其中电波传播的速度 $C = 30 \times 10^4$ km/s, 因此该波段中最多能容纳 1577 个电台同时广播。

1-6 (1) 设 i_1 为流过 D_1 的电流, 设 i_2 为流过 D_2 的电流, 则

$$i_1 = K(v_1 + v_2)^2 = K(v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2)$$

$$i_2 = K(v_1 - v_2)^2 = K(v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2)$$

所以

$$v_o = i_1 R_L - i_2 R_L = R_L(i_1 - i_2) = 4KR_L v_1 v_2$$

$$(2) i_{D_1} = f(v_1, v_2) = b_0 + b_1(v_1 + v_2) + b_2(v_1 + v_2)^2 + b_3(v_1 + v_2)^3$$

$$i_{D_2} = f(v_1, v_2) = b_0 + b_1(v_1 - v_2) + b_2(v_1 - v_2)^2 + b_3(v_1 - v_2)^3$$

$$i_{D_3} = f(v_1, v_2) = b_0 + b_1(-v_1 - v_2) + b_2(-v_1 - v_2)^2 + b_3(-v_1 - v_2)^3$$

$$i_{D_4} = f(v_1, v_2) = b_0 + b_1(-v_1 + v_2) + b_2(-v_1 + v_2)^2 + b_3(-v_1 + v_2)^3$$

所以

$$v_o = R_L(i_{D_1} + i_{D_3} - i_{D_2} - i_{D_4})$$

$$= R_L[b_1(v_1 + v_2) + b_1(-v_1 - v_2) - b_1(v_1 - v_2) - b_1(-v_1 + v_2)$$

$$+ b_2(v_1 + v_2)^2 + b_2(-v_1 - v_2)^2 - b_2(v_1 - v_2)^2 - b_2(-v_1 + v_2)^2$$

$$+ b_3(v_1 + v_2)^3 + b_3(-v_1 - v_2)^3 - b_3(v_1 - v_2)^3 - b_3(-v_1 + v_2)^3]$$

$$= R_L[b_2v_1^2 + b_2v_2^2 + 2b_2v_1v_2 + b_2v_1^2 + b_2v_2^2 + 2b_2v_1v_2 - b_2v_1^2 - b_2v_2^2$$

$$+ 2b_2v_1v_2 - b_2v_1^2 - b_2v_2^2 + 2b_2v_1v_2] = 8b_2R_L v_1 v_2$$

1-7 当两个信号同时作用于一个非线性器件, 其中一个振幅很小, 处于线性工作状态, 另一个为大信号工作状态时, 可以使这一非线性系统等效为线性时变系统。这时可用时变参量来分析非线性电路。

第2章 选频网络

2.1 学习要点

2.1.1 选频网络的作用与分类

1. 选频网络的作用

选频网络的作用是选出需要的频率分量和滤除不需要的频率分量。

2. 选频网络的分类

选频网络可分为谐振回路和滤波器两大类。

(1) 谐振回路

由电感和电容元件组成的振荡回路,振荡回路包含单振荡回路和耦合振荡回路,而单振荡回路又包含串联谐振回路和并联谐振回路。

(2) 滤波器

滤波器包含 LC 集中滤波器、石英晶体滤波器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器等。

2.1.2 谐振频率与串、并联谐振回路

(1) 谐振频率

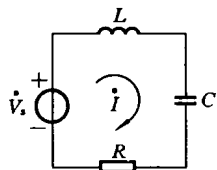
单振荡回路的阻抗在某一特定频率上有一最大值或最小值,这特定的频率称为谐振频率。

(2) 谐振回路

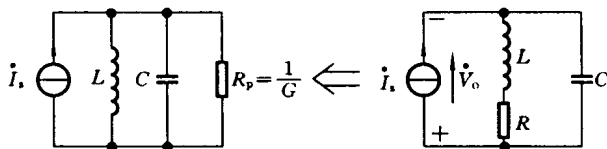
由电感、电容组成的单振荡回路在谐振频率和谐振频率附近工作时,称为谐振回路。

(3) 串联谐振回路

电感、电容、信号源三者串联,称之为串联谐振回路(见图 2-1(a))。



(a) 串联谐振回路



(b) 并联谐振回路

图 2-1 串、并联谐振回路