



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 非线性电子线路

沈琴 主编 沈琴 何晶 贺涛 李长法 编

FEI XIAN XING  
DIAN ZI DIAN LU

 高等教育出版社

TN711.4  
1D

普通高等教育“十五”国家级规划教

# 非线性电子线路

沈 琴 主编

沈琴 何晶 贺涛 李长法编

高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,全书共九章,包括绪论、功率放大器、正弦波振荡器、模拟相乘器与混频电路、振幅调制与解调电路、角度调制与解调电路、数字调制与解调电路、锁相环路与频率合成、稳压电路、EDA 综述以及附录(谐振回路和通信系统举例)等组成。

本书可作为高等学校电子信息类、通信工程类、计算机及自动控制类等相关专业本科教材和远程教学本科及专升本教材,也可作为成人教育用书及相关专业人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

非线性电子线路 / 沈琴主编. —北京: 高等教育出版社, 2004. 11

ISBN 7-04-015603-2

I. 非... II. 沈... III. 非线性电路 - 高等学校 - 教材 IV. TN711.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 106556 号

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787×960 1/16  
印 张 33.5  
字 数 630 000

版 次 2004 年 11 月第 1 版  
印 次 2004 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 46.00 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:15603-00

# 前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,与之配套的有立体教材光盘和电子教案。

随着新元器件的出现、集成电路工艺的发展、计算机软件的不断升级、现代电子设计工具的出现以及多媒体技术的广泛应用,电子技术领域中的电子电路发生了很大变化。根据教育部对人才培养的目标,经多年的教学改革实践与探索,在原教材的基础上,本书进行了新编、重编、修订、补充和整合,加强了应用实例和实践调测,加强了对集成电路的介绍,加强了例题的编写并重新筛选了各章习题,增加部分 PSpice 习题。本书引进了近年来出现的新技术,例如电流模技术、开关电容振荡器等,使读者能跟上电子技术的发展。本书融入了部分数字电路内容,例如数字调制与解调、数字锁相环等,打破了模拟与数字间的严格界限,便于知识的融会贯通和综合应用。本书介绍了现代电子设计自动化的基本工具,列举了仿真实例,为培养使用软件工具的能力和对电路的分析和设计能力奠定了基础。本书力求做到深入浅出、思路清晰、理论联系实际、便于教学和自学。

本书在原教材的基础上重编了第一章功率放大器、第二章正弦波振荡器、第七章锁相环路与频率合成以及附录 II,其中第一章重编并整合了原教材的第一、二章,增添了新的电路,加强了集成电路的应用内容,简化了数学推导。第二章详细讨论了正弦波振荡器工作原理,对各种典型正弦波振荡电路进行了论述,并定性分析了振荡频率不稳定的因素以及改善方法,同时介绍了开关电容基本知识和 RC 开关电容振荡器。第七章加强了频率合成技术,介绍了频率合成的原理、主要技术指标、频率合成器的三种类型,特别强调锁相环频率合成和直接数字式频率合成技术以及典型的直接数字式频率合成器电路的介绍。附录 II 中除了指出一般读图方法外,还列举了通信系统应用实例,甚至现代通信中的移动通信等,不仅能激发读者对本课程学习兴趣,也使读者能把所学的各种电路在各通信系统中的作用有机地联系起来,达到学以致用目的。

本书新编入了第六章数字调制与解调电路、第九章 EDA 综述及附录 I。根据多年教学实践,由于读者对谐振回路概念模糊不清,导致本课程学习障碍,所以本书特别新编入了附录 I 内容,为读者能较顺利地进入课程学习排忧解难,打下学习的基础。

本书对第三章模拟相乘器与混频电路、第四章振幅调制与解调电路、第五章

角度调制与解调电路、第八章稳压电路进行了一定修改,其中第三章、第四章突出了频率变换的核心器件模拟相乘器而且展开说明了它在频率变换中的作用,并且对近年来出现的电流模技术以及电流模相乘器进行了介绍,使读者能紧跟电子技术的发展。

引进多媒体教学手段可以克服传统教学模式的缺点,增加读者学习兴趣,提高教学质量。本书附有网络版光盘,其中包括绪论及各章的知识点讲解、小结、思考题、例题与练习、各单元电路应用实例以及大量综合应用实例、总复习、自测试题,还包括参考资料园地(推荐参考书、课程设计实际举例、外文阅读、研究生试卷、专业技术小讲座等)。

本书由沈琴主编。绪论、第一章至第六章、第七章的7-3、7-4节、附录由沈琴编写,第七章的7-1、7-2、7-5节由何晶编写,第八章由李长法编写,第九章由贺涛编写。在本书的编写修订和光盘制作过程中,李焕忠老师做了大量的工作,在此表示衷心感谢。

全书承北京理工大学罗伟雄教授审阅,对全书具体内容提出许多宝贵意见,为保证本书质量起了重要作用,在此也表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中和光盘中难免有不妥之处和不完善的地方,恳请读者批评指正。

编者

2004年2月于北京广播学院

# 目 录

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 绪论 .....                            | 1   |
| §0-1 线性电子线路与非线性电子线路 .....           | 1   |
| §0-2 非线性电子线路在通信系统中的作用 .....         | 1   |
| 0-2-1 通信系统的框图 .....                 | 1   |
| 0-2-2 无线电信号的特点 .....                | 2   |
| 0-2-3 无线电通信调幅广播发射机、接收机组成与工作原理 ..... | 5   |
| 0-2-4 非线性电子线路的功能 .....              | 7   |
| §0-3 本课程特点 .....                    | 8   |
| 思考题 .....                           | 9   |
| 习题 .....                            | 9   |
| 第一章 功率放大器 .....                     | 10  |
| §1-1 功率放大器概述 .....                  | 10  |
| 1-1-1 功率放大器的特点 .....                | 10  |
| 1-1-2 功率放大器的分类与分析方法 .....           | 13  |
| §1-2 非谐振功率放大器 .....                 | 15  |
| 1-2-1 变压器耦合甲类单管功率放大器 .....          | 15  |
| 1-2-2 乙类推挽功率放大器 .....               | 21  |
| 1-2-3 功率合成技术 .....                  | 40  |
| §1-3 谐振功率放大器 .....                  | 54  |
| 1-3-1 丙类谐振功率放大器的工作原理 .....          | 54  |
| 1-3-2 丙类谐振功率放大器的性能 .....            | 61  |
| 1-3-3 谐振功率放大器线路 .....               | 69  |
| 1-3-4 晶体管倍频器 .....                  | 84  |
| *1-3-5 高效功率放大器 .....                | 84  |
| 思考题 .....                           | 95  |
| 习题 .....                            | 97  |
| 第二章 正弦波振荡器 .....                    | 112 |
| §2-1 概述 .....                       | 112 |
| §2-2 反馈振荡器的工作原理 .....               | 112 |
| 2-2-1 平衡条件 .....                    | 113 |

|         |                     |     |
|---------|---------------------|-----|
| 2-2-2   | 起振条件                | 114 |
| 2-2-3   | 稳定条件                | 116 |
| 2-2-4   | 振荡器基本组成及分析方法        | 119 |
| § 2-3   | LC 正弦振荡器            | 120 |
| 2-3-1   | 三点式振荡器              | 120 |
| 2-3-2   | 差分对管振荡器和集成 LC 正弦振荡器 | 129 |
| 2-3-3   | LC 振荡器的频率稳定度        | 133 |
| 2-3-4   | 改进型三点式振荡器           | 136 |
| § 2-4   | 晶体振荡器               | 138 |
| 2-4-1   | 石英晶体谐振器             | 138 |
| 2-4-2   | 石英晶体振荡电路            | 140 |
| § 2-5   | RC 振荡器和开关电容振荡器      | 145 |
| 2-5-1   | RC 振荡器              | 145 |
| 2-5-2   | 开关电容振荡器             | 150 |
| * § 2-6 | 负阻振荡器               | 152 |
| 2-6-1   | 负阻器件基本特性            | 152 |
| 2-6-2   | 负阻振荡器原理及电路          | 154 |
| * § 2-7 | 寄生振荡和间歇振荡器          | 155 |
| 2-7-1   | 寄生振荡                | 155 |
| 2-7-2   | 间歇振荡器               | 156 |
| 思考题     |                     | 157 |
| 习题      |                     | 158 |
| 第三章     | 模拟相乘器与混频电路          | 172 |
| § 3-1   | 模拟相乘器               | 172 |
| 3-1-1   | 概述                  | 172 |
| 3-1-2   | 二极管模拟相乘器            | 176 |
| 3-1-3   | 晶体管模拟相乘器            | 181 |
| 3-1-4   | 实用集成模拟相乘器           | 187 |
| 3-1-5   | 电流模电路及电流模相乘器        | 194 |
| 3-1-6   | MOS 集成模拟相乘器         | 217 |
| § 3-2   | 混频电路                | 221 |
| 3-2-1   | 混频概念与实现模式           | 221 |
| 3-2-2   | 混频器的质量指标            | 224 |
| 3-2-3   | 晶体管混频器              | 225 |
| 3-2-4   | 集成混频电路              | 235 |
| 3-2-5   | 二极管混频器              | 236 |
| 3-2-6   | 场效晶体管混频电路           | 239 |

|            |                      |     |
|------------|----------------------|-----|
| 3-2-7      | 混频器的干扰和非线性失真         | 245 |
| *3-2-8     | 参量电路                 | 250 |
| 思考题        |                      | 256 |
| 习题         |                      | 257 |
| <b>第四章</b> | <b>振幅调制与解调电路</b>     | 265 |
| §4-1       | 振幅调制的基本原理            | 265 |
| 4-1-1      | 标准调幅波的特性和实现的数学模型     | 265 |
| 4-1-2      | 单边带、双边带调制波的基本特性和数学模型 | 269 |
| 4-1-3      | 残留边带调幅               | 274 |
| §4-2       | 振幅调制电路               | 277 |
| 4-2-1      | 晶体管差分对振幅调制电路         | 277 |
| 4-2-2      | 集成模拟调制器              | 279 |
| 4-2-3      | 二极管振幅调制器             | 283 |
| §4-3       | 振幅调制的解调电路            | 289 |
| 4-3-1      | 检波概述                 | 289 |
| 4-3-2      | 标准调幅波的解调电路           | 290 |
| 4-3-3      | 双边带和单边带调幅信号的解调电路     | 307 |
| 思考题        |                      | 308 |
| 习题         |                      | 309 |
| <b>第五章</b> | <b>角度调制与解调电路</b>     | 319 |
| §5-1       | 角度调制的基本特性            | 319 |
| 5-1-1      | 调角波的表达式              | 319 |
| 5-1-2      | 调角波的频谱结构和带宽          | 324 |
| 5-1-3      | 调频波的平均功率             | 327 |
| 5-1-4      | 调频与调幅的比较             | 327 |
| 5-1-5      | 调频电路的主要性能指标          | 328 |
| §5-2       | 直接调频电路               | 329 |
| 5-2-1      | 电抗管调频电路              | 329 |
| 5-2-2      | 变容二极管直接调频电路          | 330 |
| 5-2-3      | 晶振变容二极管直接调频电路        | 338 |
| 5-2-4      | 非正弦波调频转换为正弦波调频       | 339 |
| §5-3       | 间接调频电路               | 342 |
| 5-3-1      | 间接调频的工作原理            | 342 |
| 5-3-2      | 实现调相的电路              | 343 |
| §5-4       | 扩大线性频偏的方法            | 348 |
| §5-5       | 调频波解调的方法和电路          | 349 |
| 5-5-1      | 鉴频的方法                | 349 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 5-5-2 | 鉴频器的性能指标 .....          | 349 |
| 5-5-3 | 斜率鉴频器 .....             | 350 |
| 5-5-4 | 相位鉴频器 .....             | 355 |
| 5-5-5 | 脉冲数字式鉴频器 .....          | 360 |
| 5-5-6 | 符合门鉴频器 .....            | 362 |
| § 5-6 | 限幅器 .....               | 366 |
| 5-6-1 | 二极管限幅器 .....            | 367 |
| 5-6-2 | 晶体管限幅器 .....            | 368 |
| 5-6-3 | 差分对管限幅器 .....           | 369 |
| 思考题   | .....                   | 369 |
| 习题    | .....                   | 370 |
| 第六章   | 数字调制与解调电路 .....         | 377 |
| § 6-1 | 数字调幅 .....              | 378 |
| 6-1-1 | ASK 的工作原理 .....         | 378 |
| 6-1-2 | 2ASK 信号的产生和解调 .....     | 379 |
| § 6-2 | 数字调频 .....              | 380 |
| 6-2-1 | FSK 的工作原理 .....         | 380 |
| 6-2-2 | FSK 信号产生 .....          | 381 |
| 6-2-3 | FSK 信号解调 .....          | 383 |
| § 6-3 | 数字调相 .....              | 388 |
| 6-3-1 | 二进制绝对调相 .....           | 388 |
| 6-3-2 | 二进制相对调相 .....           | 391 |
| 6-3-3 | 四进制调相 .....             | 394 |
| 思考题   | .....                   | 400 |
| 习题    | .....                   | 400 |
| 第七章   | 锁相环路与频率合成 .....         | 402 |
| § 7-1 | 概述 .....                | 402 |
| § 7-2 | 锁相环路的基本原理 .....         | 403 |
| 7-2-1 | 锁相环路的基本组成和原理 .....      | 403 |
| 7-2-2 | 锁相环路的基本方程 .....         | 403 |
| § 7-3 | 环路的性能分析 .....           | 406 |
| 7-3-1 | 环路的跟踪性能分析 .....         | 406 |
| 7-3-2 | 环路的捕捉特性 .....           | 412 |
| § 7-4 | 锁相环的应用 .....            | 420 |
| 7-4-1 | 锁相倍频、分频和混频 .....        | 420 |
| 7-4-2 | 锁相调频、调相、鉴相和锁相同步检波 ..... | 422 |
| § 7-5 | 频率合成 .....              | 424 |

|                                 |                  |            |
|---------------------------------|------------------|------------|
| 7-5-1                           | 频率合成概述 .....     | 424        |
| 7-5-2                           | 锁相频率合成器 .....    | 426        |
| 7-5-3                           | 直接数字式频率合成器 ..... | 431        |
| 思考题                             | .....            | 437        |
| 习题                              | .....            | 438        |
| <b>第八章 稳压电路</b>                 | .....            | <b>443</b> |
| §8-1 集成稳压电路 .....               |                  | 444        |
| 8-1-1 串联型稳压电路的工作原理 .....        |                  | 444        |
| 8-1-2 稳压电路的性能指标 .....           |                  | 445        |
| 8-1-3 集成串联稳压电路 .....            |                  | 447        |
| §8-2 开关稳压电路 .....               |                  | 453        |
| 8-2-1 开关稳压电路的工作原理 .....         |                  | 454        |
| 8-2-2 自激式开关稳压电路 .....           |                  | 459        |
| 8-2-3 集成开关稳压电路控制器 .....         |                  | 461        |
| 思考题                             | .....            | 463        |
| 习题                              | .....            | 463        |
| <b>第九章 EDA 综述</b>               | .....            | <b>466</b> |
| §9-1 电子设计自动化软件工具概述 .....        |                  | 466        |
| 9-1-1 PSpice 介绍 .....           |                  | 466        |
| 9-1-2 EWB 介绍 .....              |                  | 466        |
| 9-1-3 Max + Plus II 介绍 .....    |                  | 467        |
| §9-2 PSpice 应用 .....            |                  | 467        |
| 9-2-1 直流工作点分析 .....             |                  | 467        |
| 9-2-2 交流小信号分析 .....             |                  | 468        |
| 9-2-3 瞬态分析 .....                |                  | 468        |
| 9-2-4 傅里叶分析 .....               |                  | 468        |
| 9-2-5 蒙特卡罗分析和最坏情况分析 .....       |                  | 468        |
| 9-2-6 分析实例 .....                |                  | 469        |
| §9-3 EWB 使用简介 .....             |                  | 471        |
| 9-3-1 软件使用介绍 .....              |                  | 471        |
| 9-3-2 分析实例 .....                |                  | 471        |
| §9-4 Max + Plus II 开发工具介绍 ..... |                  | 473        |
| 9-4-1 组合逻辑电路设计 .....            |                  | 475        |
| 9-4-2 时序逻辑电路设计 .....            |                  | 475        |
| <b>附录 I 谐振回路</b>                | .....            | <b>478</b> |
| § I -1 串联谐振回路 .....             |                  | 478        |
| § I -2 并联谐振回路 .....             |                  | 481        |

|            |                    |     |
|------------|--------------------|-----|
| § I - 3    | 阻抗变换网络与接入系数 .....  | 483 |
| I - 3 - 1  | 理想变压器的阻抗变换网络 ..... | 484 |
| I - 3 - 2  | 电感分压式电路 .....      | 485 |
| I - 3 - 3  | 电容分压式电路 .....      | 488 |
| 附录 II      | 通信系统举例 .....       | 490 |
| § II - 1   | 概述 .....           | 490 |
| II - 1 - 1 | 简介 .....           | 490 |
| II - 1 - 2 | 读图的前提 .....        | 490 |
| II - 1 - 3 | 读图的原则 .....        | 490 |
| § II - 2   | 通信系统举例 .....       | 492 |
| II - 2 - 1 | 单片集成电路彩色电视机 .....  | 492 |
| II - 2 - 2 | 集成 AM 单片接收机 .....  | 494 |
| II - 2 - 3 | 移动通信——双频手机 .....   | 498 |
| 索引         | .....              | 508 |
| 参考文献       | .....              | 516 |

# 绪 论

## § 0-1 线性电子线路与非线性电子线路

众所周知,电子线路包含各基本单元电路均是由无源线性元件、有源器件及无源网络构成。无源线性元件(如电阻、电容、电感)和无源网络(如变压器、串并谐振回路、振荡回路、移相网络、滤波器等)均属线性器件和组件,而各种有源电子器件(如晶体管、场效晶体管等)都是非线性器件,若从这含义上讲,包含有源器件的电子线路均为非线性电子线路。但由于使用条件不同,各有源电子器件表现出非线性程度也不相同,它在足够小的信号作用下,对信号处理时尽量使用有源电子器件非线性特性的近似线性部分,所以对足够小的信号而言,要求不失真地放大信号的电路可以采用线性电子线路的分析方法(即等效电路分析方法)。若从分析观点看,一方面,对大信号输入的功率放大电路,就不能用线性等效电路分析方法;另一方面,利用有源电子器件的非线性特性产生新的频率分量完成振荡、频率变换等功能的电路也不能用线性分析方法,而必须采用非线性分析方法。

总之,凡是采用线性等效电路分析方法的单元电子线路统称为线性电子线路,凡是采用非线性电路分析方法的单元电子线路统称为非线性电子线路。由此可见,非线性电子线路包括功率放大器(非谐振功率放大器和谐振功率放大器)、振荡器、混频器、振幅调制器与检波器、调频器与鉴频器、调相器与鉴相器以及倍频器等频率变换的单元电路。

## § 0-2 非线性电子线路在通信系统中的作用

### 0-2-1 通信系统的框图

非线性电子线路被广泛应用于通信系统和各种电子设备中,这里以非线性电子线路在无线电通信系统中应用为例来说明它在通信系统中的作用。能完成

信息的发射、传送和接收的系统称为通信系统。声音、图像、文字、数据等称为信息。按传输媒质不同,通信系统可分为有线通信和无线通信。电视、卫星通信、移动通信、数据通信或计算机通信等各种不同类型的通信系统,其系统的组成和设备的复杂程度都有很大不同,但是组成设备的基本电路及基本原理都是相同的。以无线电通信系统为例,它由发射设备、接收设备和传输媒质组成的,如图0-2-1所示。发送设备首先将发送信息转换成电信号,通过发射机把电信号装载到足够强的高频电振荡信号,变成已调制高频信号,馈送到发射天线,将高频已调电振荡信号转换为电磁波,向传输媒质辐射。无线电信号传输媒质是自由空间,电磁波通过自由空间到达了接收设备;接收是发射的逆过程,由接收天线得到微弱的电磁波变换为已调高频电信号,接收机从已调制高频电信号经过处理还原电信号,换能器将电信号还原为所传送的信号,完成了无线电信号传送目的。

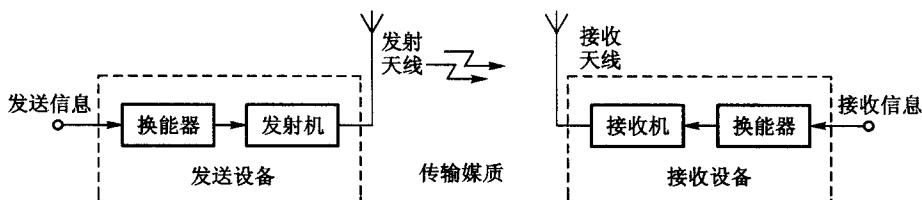


图0-2-1 无线电通信系统的组成框图

## 0-2-2 无线电信号的特点

在无线电信号传送过程,要处理的电信号主要包括调制信号(或称基带信号)、载波信号和已调波信号。没有进行调制的原始信号(发送信号)称为调制信号;用来装载调制信号的高频振荡信号称为载波信号(一般为单一频率的正弦波或脉冲信号);完成将调制信号对载波进行调制后的高频信号称为已调信号。

对一个无线电的信号,在时域可用波形或数学表示式来描述电压或电流随时间变化的规律;也可以在频域用频谱来表示,这是因为任何一个时域波形都可以用傅氏变换成信号的频谱,任何信号都占据一定频带宽度,带宽就是信号主要部分的能量所占据的频带。若发射的频率越高,则可利用的频带宽度也就越宽。

不同的无线电信号的波长和频率是不同的,波长 $\lambda$ 和频率 $f$ 关系为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中, $c$ 为光速, $f$ 为频率, $\lambda$ 为波长。

按频率或波长可划分不同的频段(或波段),不同频率信号的产生、放大和

接收方法以及传播方式都不同,应用的场合也不同,如表 0-2-1 所示。

表 0-2-1 无线电波的波段划分表

| 频段名称/波段名称               | 波长范围             | 频率范围            | 传播方式           | 应用场合                          |
|-------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|
| 低频(LF)/长波<br>波段(LW)     | 1 000 ~ 10 000 m | 30 ~ 300 kHz    | 地波             | 远距离通信                         |
| 中频(MF)/中波<br>波段(MW)     | 100 ~ 1 000 m    | 300 ~ 3 000 kHz | 地波,天波          | 广播,通信,导航                      |
| 高频(HF)/短波<br>波段(SW)     | 10 ~ 100 m       | 3 ~ 30 MHz      | 天波,地波          | 广播,中距离通信                      |
| 甚高频(YHF)/超短<br>波波段(VSW) | 1 ~ 10 m         | 30 ~ 300 MHz    | 直线传播,<br>对流层散射 | 移动通信,电视广<br>播,调频广播,雷<br>达,导航等 |
| 超高频(UHF)/分米<br>波波段(USW) | 10 ~ 100 cm      | 300 ~ 3 000 MHz | 直线传播,<br>散射传播  | 通信,中继通信,<br>卫星通信,电视广<br>播,雷达  |
| 特高频(SHF)/厘米<br>波波段(SSW) | 1 ~ 10 cm        | 3 ~ 30 GHz      | 直线传播           | 中继通信,雷达,<br>卫星通信              |
| 极高频(EHF)/毫米<br>波波段(ESW) | 1 ~ 10 mm        | 30 ~ 300 GHz    | 直线传播           | 微波通信,雷达                       |

电磁波的传播有以下几种传播方式:地波、天波、空间波(包括直射波和反射波等)。

电磁波沿地球表面传播的方式称为地波,如图 0-2-2(a)所示,大地表面是导体,沿地面传播(绕射)时,一部分电磁波的能量会被损耗掉,并且频率越高,损耗就越大,所以适合于波长长(或频率低)的中、长波信号,以地波的方式绕射传播很远,由于地面的电性能在较短时间内的变化不大,也比较稳定,一般多用作远距离通信与导航。

利用电离层的反射而进行传播(天线传播)的方式称为天波,如图 0-2-2(b)所示,电离层在大气层的上层,离地面 60 ~ 600 km 的区域,它是由太阳和星际空间辐射引起大气电离的结果,电离层也是一层介质,到达电离层的电磁波一方面被吸引,另一方面也会被反射与折射地面,频率越高,电离层吸引的能量就越小,这是短波波段信号的主要传输方式,但对于频率超过一定值的超短波,电

离层的电子密度不够大,电磁波会穿过电离层而不能射回地面,所以超短波波段的电磁波主要沿空间的直线传播,如图0-2-2(c)所示,直线传播的距离有限,通常只能为视距,因此也称为视距传播,例如电视广播即属此类。在离地面大约10~12 km 范围内的大气层称为对流层,人们利用对流层(或电离层)对电波的散射作用,使超短波以上的电磁波能够传播距离大大超过视距的地区,所以超短波以上频段信号主要以直线传播方式,也可采用对流层散射的方式传播,如图0-2-2(d)所示。

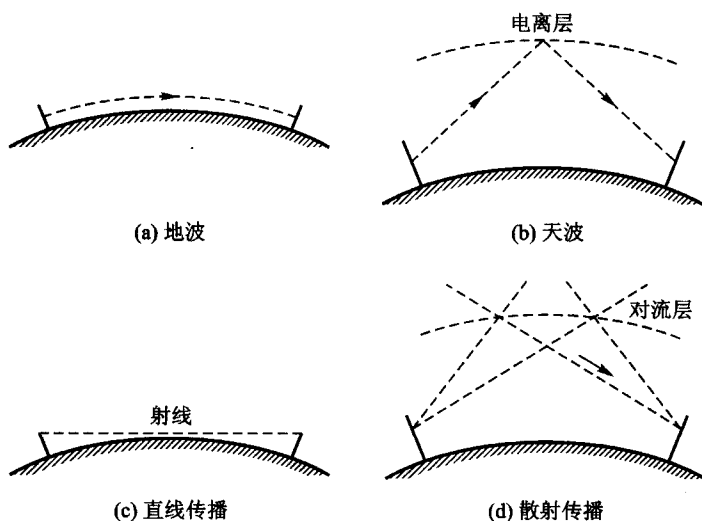


图0-2-2 无线电波的几种主要传播方式

电磁波传播情况很复杂,不属本课程讨论范围,这里仅为了帮助同学能建立一些基本通信系统的概念,这将对学好“非线性电子线路”课程打下良好基础。

为了适应电磁波传播特点,保证信息的有效传送、无线电通信系统中的发射机和接收机都必须借助线性和非线性电子线路对携有信息的电信号进行变换和处理,在这些变换和处理中,除放大以外,最主要的是调制和解调。

所谓调制,就是用调制信号去控制高频振荡信号(载波信号)的某一参数,使该参数随调制信号的规律变化。根据调制参数不同,调制分为三种基本方式,它们分别是振幅调制(AM)、频率调制(FM)、相位调制(PM),还可以有组合调制方式。当调制信号为数字信号调制时,通常称为键控,三种基本键控方式为振幅键控(ASK)、频率键控(FSK)和相位键控(PSK)。若载波为单一频率正弦波,对应调制称为正弦调制,若载波为一脉冲信号,对应调制称脉冲调制,本课程主要讨论模拟调制信号的正弦波的模拟调制,但这些电路的工作原理完全可以推广到数字调制中去。所谓解调或检波就是调制的逆过程,也就是将已调波信号

中不失真地检出原调制信号的变换过程。

调制在无线电通信中的作用至关重要。信息远距离的传送,用高频为载波的原因有两个:第一,高频(载频)频率愈高则频带愈宽,不仅能容纳许多互不干扰的信道,实现频分复用或频分多址,而且还可以传播像图像信号这些宽带的信息。第二,高频(载频)适合于天线辐射和无线电传播。只有馈送到天线上信号波长与天线的尺寸可以相比拟时,天线才能有效地辐射和接收电磁波。如果将调制信号(如声音的频率  $20\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$ )波长的范围为  $15 \times 10^3 \sim 15 \times 10^4\text{ m}$ ,则要制造长度为  $0.375 \sim 3.75\text{ km}$  的天线,这显然是无法实现的。即使能实现,各电台发出的信号频率都在相同的音频范围,在自由空间混在一起,接收机也无法选择要接收电台的信号。因此必须通过调制,将调制信号装载到高频载波信号中,构成已调波,再将这种已调波信号馈送到天线上,这样发射天线的尺寸就可以较小,不同的电台也可采用不同的高频振荡频率(载频)运载不同电台信息,接收机就能根据载波信号的频率选择出所需要的电台发送的信息,而抑制其他电台发送的信息与各种干扰。

### 0-2-3 无线电通信调幅广播发射机、接收机组成与工作原理

图 0-2-3 所示是中波调幅广播发射机的框图,图中并以单音的正弦调制信号为例,标识方框的波形。由高频振荡器产生稳定的频率  $f_{\text{osc}}$ ,其频率一般在几十千赫以上,振荡器产生的振荡信号,经由高频放大器(由多级小信号谐振放大器组成的)放大,并使其频率倍频到发射的频率  $f_c$ (载波频率)上,再经谐振功放提供足够大的功率电平,对于广播及电视发射机功率可高达几千瓦~几十千瓦。

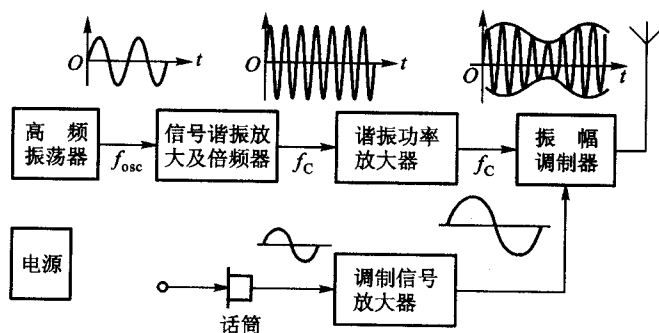


图 0-2-3 中波调幅广播发射机组成方框图

调制信号放大器(由多级放大器组成的低频放大器),前面几级放大器用来放大经话筒变换后的音频电信号,后面几级是低频功率放大器,用来提供足够功率的调制信号。

振幅调制总是将输入的载波信号与调制信号变换为所需要已调幅波,实现调幅功能,然后把已调幅波馈送到发射机天线上,转变成电磁波,辐射到自由空间。

如图 0-2-4 所示,为调幅广播接收机的框图。调幅广播接收机一般是超外差式接收机(目前多采用  $f_L = f_c \pm f_i$  方式,称为超外差接收方式),电磁波天线上感应的有用信号经高频放大器(由一级或多级小信号谐振放大器组成)选择放大并抑制其他无用信号。载波为  $f_c$  的已调幅波与本地振荡产生频率为  $f_L$  的本振信号进行混频,混频是超外差接收机的核心,其作用是将载波频率为  $f_c$  的高频已调信号不失真地变换为载波频率为固定中频  $f_i = f_L - f_c$  (或  $f_c - f_L$ ) 的中频已调波。调幅广播接收机的固定中频为 465 kHz。其中  $f_c$  是随接收机信号不同而不同,由于  $f_i$  是固定值,所以本地振荡器的振荡频率  $f_L = f_c + f_i$  也应是可调的,而且必须使它正确跟踪  $f_c$ 。

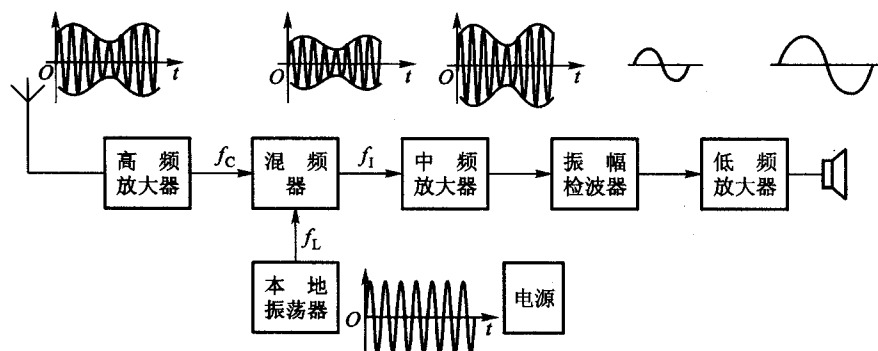


图 0-2-4 调幅广播接收机组成方框图

混频器产生的中频已调信号经(由多级中频小信号谐振放大器构成的)放大后进入振幅检波器,将中频已调信号不失真地变换为能反映被传送的调制信号,实现了解调功能。低频放大器(由小信号放大器和低频功率放大器组成)是放大调制信号,并经扬声器发出声音。

由上述可见,在调幅广播发射机中除小信号放大器(小信号放大器与小信号谐振放大器)以外,其他如功率放大器、振荡器、振幅调制器、检波器、混频器、倍频器等都属于非线性电子线路的基本单元电路,显然,它们的性能直接影响通信系统的质量。

实际的通信设备比上述调幅方式系统要复杂得多,况且还可采用调频等其他方式的无线电通信,但无论采用何种的调制方式,发射机和接收机都必须包括上述的组成方框,区别在于调制器和解调器的方式不同。例如采用调频方式的通信系统中调制器称为频率调制器,解调器称为鉴频器(或频率检波器)。