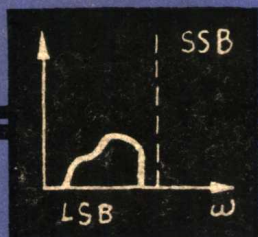


单边带通信原理与电路

姚金满 编



人民邮电出版社

单边带通信原理与电路

姚金满 编

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书较系统地叙述了单边带通信的工作原理及电路特点。全书共分六章。第一章简要地介绍了单边带通信的基本概念及设备组成原则。第二章至第四章比较系统地讨论了单边带信号的产生、放大和解调的工作原理、实际线路及特点。第五章比较详细地讨论了在单边带通信线路上数据信号的各种传输方式的原理及实际电路。第六章扼要地介绍了无线电高频通信技术的发展动向和实时选频、扩展频潜通信、时频调制及自动调谐等新技术的基本知识。

本书除了着重阐明单边带通信系统及其各部分的工作原理外，还紧密联系现有单边带设备，并适当地介绍了有关的工程设计内容。章末附有小结和复习思考题。

本书可作为高等院校无线电通信专业的教材或教学参考书，亦可供从事无线电通信、单边带通信的工程技术人员参考。

单边带通信原理与电路

姚金满 编

责任编辑：刘惠云

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

西安空军通信学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/16 1985年11月第一版

印张：28 12/16 页数：230 1985年11月西安第一次印刷

字数：715 千字 插页：5 印数：1—8,600册

统一书号：15045·总3193·教727

定价：5.50元

编 者 的 话

由于计算机和其它新技术在无线电通信中的应用，极大地提高了单边带通信的稳定性和可靠性，使单边带通信在国防、航空、航海、铁路、气象、矿山、林业以及救灾等方面得到了广泛应用。为了满足读者的需要，根据我们多年的教学实践，参阅了大量资料，在原有的单边带原理教材的基础上，经过较大地删节和增补，编写了此书。

全书包括单边带通信的概述，单边带信号的产生、放大和解调，在单边带通信线路上数据信号的传输，短波通信技术的发展共六章。为适应通信设备迅速发展的需要，本书在编写中，删减了一些通信专业课程中的有关内容和一些次要内容，加强了在单边带通信线路上数据信号传送的有关内容，增补了短波通信发展的动向和实时选频、扩展频谱通信、时频调制及自动调谐等新技术介绍。为了有较宽的适应性，本书在介绍各部分的工作原理时，对单边带信号的各种产生和解调方式及其部件和电路，对大、中、小功率放大器，对数据传输的各种调制和解调方式及其线路都作了较为广泛地分析。读者可根据自己的需要，选学有关内容，且不失系统掌握单边带通信的基本工作原理。

本书在编写中，着重了物理概念的阐述，并对必要的数学分析，作了较为严谨的推证，同时还适当地介绍了部分工程设计的内容。为了便于读者自学，本书讲解力求通俗易懂，章末附有小结和复习思考题，并以附录形式对某些结论作了较为仔细地分析或论证。另外，为了减少版本，本书注意到在避开较为繁琐的数学分析的情况下，可供具有中专文化程度的同志作参考。

为了便于读者在理论和实际上全面系统地掌握单边带通信，我们还计划编写单边带通信手册，从单边带通信系统的开设、测试、调整、检修等方面广泛搜集实践资料，作为本书的配套读物。

对本书的修编，阎培义、徐鲁强、贾风林、阮民伟、谢绍斌等同志以及南京无线电厂的同志都提出了宝贵的意见。阎培义同志审阅了大部分书稿，谢绍斌同志摘写了自动调谐部分。在此深表感谢。

由于编者的学术水平不高，实践经验缺乏，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正，以供今后修订时参考。

编者 一九八五年七月

目 录

第一章 单边带通信概述	(1)
§ 1—1 单边带信号的分析	(1)
一、单音调制	(1)
(一) 单音调制的调幅信号	(1)
(二) 单音调制的单边带信号	(2)
二、双音调制	(3)
(一) 等幅双音信号的分析	(3)
(二) 等幅双音调制的调幅信号	(5)
(三) 等幅双音调制的单边带信号	(5)
三、语音调制	(6)
(一) 语音调制的调幅信号	(6)
(二) 语音调制的单边带信号	(7)
§ 1—2 单边带通信制和调幅通信制的比较	(8)
一、节约频谱	(8)
二、节约功率	(8)
三、受电波传播条件影响小	(9)
(一) 电离层对电波吸收所造成的影响	(9)
(二) 电离层对电波折射所造成的影响	(10)
四、便于实现多路复用	(12)
§ 1—3 单边带通信机的组成	(14)
一、单边带信号的产生	(14)
二、单边带发信机的组成	(15)
(一) 单边带发信机的组成原则	(16)
(二) 单边带发信机的组成举例	(20)
三、单边带信号的接收	(22)
四、单边带受信机的组成	(22)
(一) 单边带受信机的组成原则	(23)
(二) 单边带受信机的组成举例	(23)
§ 1—4 兼容信号及其解调	(24)
一、兼容信号的分析	(26)
(一) 兼容信号的包络	(27)
(二) 兼容信号的换相点	(27)
二、兼容信号的接收	(28)
本章小结	(29)
本章复习思考题	(30)
第二章 单边带信号的产生	(31)

§ 2—1 单边带调制器	(31)
一、对单边带调制器的要求	(31)
二、单个二极管调制器	(32)
(一) 载波电压较小时, 二极管简单调制器工作情况分析	(33)
(二) 载波电压很大时, 二极管开关调制器工作情况分析	(36)
三、二极管平衡调制器	(38)
四、二极管环形调制器	(40)
(一) 环形调制器的工作原理	(41)
(二) 实际环形调制器中应考虑的几个问题	(42)
五、其它调制器电路的介绍	(51)
(一) 桥式调制器	(51)
(二) 推挽式平衡调制器	(52)
(三) 并联式平衡调制器	(54)
(四) 差动式平衡调制器	(57)
§ 2—2 边带滤波器	(58)
一、对边带滤波器的要求	(58)
(一) 对通带的要求	(59)
(二) 对阻带的要求	(59)
(三) 对过渡带的要求	(59)
二、晶体滤波器	(60)
(一) 石英晶体谐振器的特性	(60)
(二) X型滤波器的传通条件	(62)
(三) 双晶体X型滤波器	(65)
(四) 四晶体X型滤波器	(67)
(五) 差接式晶体滤波器	(70)
三、机械滤波器	(74)
(一) 机械滤波器的物理基础及分析方法	(74)
(二) 机械谐振体	(79)
(三) 机械滤波器的基本原理	(82)
(四) 机械滤波器的组成及机电换能器	(86)
(五) 机械滤波器实例	(90)
§ 2—3 单边带信号产生部分的线路举例	(96)
一、250W单边带发射机的单边带信号产生部分	(98)
(一) 上边带话路系统	(98)
(二) 下边带话路系统	(98)
(三) 上、下边带信号的合成和放大系统	(98)
(四) 低载频供给系统	(100)
二、400W单边带发射机的单边带信号产生部分(中音频部件)	(101)
(一) 上边带话路部分	(101)
(二) 下边带话路部分	(103)
(三) 公共中频放大部分	(103)

(四) 500kHz 低载频供给系统	(105)
三、10W 单边带电台的单边带信号产生部分	(105)
(一) 音频部分	(106)
(二) 单边带报部分	(107)
(三) 500kHz 低载频产生部分	(108)
(四) 平衡调制器和机械滤波器	(109)
(五) 中频放大电路	(109)
§ 2—4 产生单边带信号的其它方法的简单介绍	(110)
一、移相法	(110)
(一) 相位补偿法	(110)
(二) 滤波相位补偿法	(113)
二、合成法	(119)
(一) 合成法的概念及初始单边带信号	(119)
(二) 利用合成法产生单边带信号的原理方框图	(121)
三、几种产生单边带信号方法的简单比较	(124)
附 录 均匀细长圆棒的纵振动	(125)
本章小结	(133)
本章复习思考题	(134)
第三章 单边带信号的放大	(136)
§ 3—1 概述	(136)
一、对单边带信号放大器的基本要求	(136)
二、线性高频功率电子管放大器概述	(137)
§ 3—2 单边带信号功率放大器的失真分析	(142)
一、用时域法分析放大器的非线性失真	(142)
(一) 包络失真	(142)
(二) 相位失真	(147)
二、用频域法分析放大器的非线性失真	(148)
(一) 互调失真的数学分析	(148)
(二) 三阶互调失真的分析	(150)
(三) 互调失真和包络平顶百分比的关系	(153)
(四) 减小互调失真的措施	(156)
§ 3—3 单边带信号放大器中的负反馈	(157)
一、负反馈放大器减小失真的基本工作原理	(158)
(一) 高频负反馈	(158)
(二) 包络负反馈	(160)
二、负反馈放大器的实际电路	(162)
(一) 高频负反馈放大器的实际电路	(162)
(二) 包络负反馈放大器的实际电路	(165)
三、关于负反馈放大器激励电压和失真改善量的计算	(166)
(一) 加负反馈后输入激励电压的计算	(167)
(二) 加负反馈后失真改善量的计算	(168)

四、负反馈放大器的稳定性问题	(168)
(一) 单级放大器的增益相位特性	(169)
(二) N级放大器的增益相位特性	(170)
§3—4 单边带信号功率放大器的工程估算	(171)
一、线性功率放大器的折线计算法	(171)
(一) 单音调制时线性功率放大器的估算	(172)
(二) 双音调制时线性功率放大器的估算	(173)
(三) 用折线法估算的损耗和效率与实际的差异	(175)
二、线性功率放大器的图解计算法	(176)
(一) 电子管的恒流特性曲线	(176)
(二) 在 $e_a \sim e_g$ 平面上确定放大器负载线的方法	(178)
(三) 利用恒流特性曲线图解计算放大器工作状态的方法	(181)
三、放大器三阶互调失真的估算	(182)
(一) 精确绘制放大器振幅特性的方法	(183)
(二) 近似绘制放大器振幅特性的方法	(184)
§3—5 宽频带线性单边带信号放大器	(185)
一、阻容耦合宽频带放大器	(186)
(一) 阻容耦合放大器高频增益下降原因的分析	(186)
(二) 展宽阻容耦合放大器通频带的方法	(193)
二、带有传输线型变压器的宽带放大器	(194)
(一) 普通变压器及其存在的问题	(194)
(二) 传输线变压器	(195)
§3—6 单边带信号功率放大器的线路举例	(208)
一、400W单边带发信机的线性功率放大部分	(208)
(一) 方框图	(208)
(二) 各级电路特点	(208)
(三) 强放级的阻抗匹配原理	(211)
二、6000W单边带发信机的线性功率放大部分	(215)
(一) 方框图	(215)
(二) 推动级	(215)
(三) 强放级	(219)
附录3—1 i_a 对过P点之纵轴是偶对称的证明	(225)
附录3—2 由阳流瞬时值求 I_{a0} 和 I_{a1} 的方法	(226)
附录3—3 补偿电容最佳值公式的证明	(228)
本章小结	(229)
本章复习思考题	(229)
第四章 单边带信号的接收	(231)
§4—1 单边带信号的调解	(232)
一、单边带信号解调的基本工作原理	(232)
(一) 中频单边带信号与恢复载频的合成	(233)
(二) 振幅检波	(234)

二、单边带信号解调过程中的失真·····	(235)
(一) 由于恢复载频电压振幅不够大所引起的非线性失真·····	(235)
(二) 由于恢复载频不同步所产生的失真·····	(242)
三、单边带信号解调器实际电路介绍·····	(243)
§ 4—2 单边带收信机中恢复载频产生的方法·····	(244)
一、用高稳定度的晶体振荡器产生恢复载频·····	(245)
二、利用锁相环路使收信机中产生的恢复载频锁定在导频信号的频率上·····	(246)
(一) 具有锁相环路跟踪系统的单边带收信机方案·····	(246)
(二) 利用锁相环使恢复载频精确跟踪导频信号的基本原理·····	(247)
三、利用锁相环锁定恢复载频的单边带收信机, 在设计中应注意的问题·····	(247)
(一) 导频电平的选择·····	(247)
(二) 导频滤波器通带的选择·····	(248)
(三) 如何抗选择性衰落·····	(249)
§ 4—3 单边带收信机线性系统设计方案中应注意的问题·····	(251)
一、外部干扰·····	(251)
二、单边带收信机线性系统的方案设计·····	(252)
(一) 混频次数的选择·····	(252)
(二) 中频频率的选择·····	(253)
(三) 选择性分配·····	(254)
(四) 解调前增益分配·····	(258)
(五) 收信机前端电路的选择·····	(258)
(六) 对频率合成器的要求·····	(261)
§ 4—4 单边带收信机的自动增益控制系统 (AGC)·····	(261)
一、概述·····	(261)
二、利用导频信号产生控制电压的 AGC 系统 (简称PAGC系统)·····	(262)
三、利用单边带信号的包络产生控制电压的AGC系统 (简称EAGC 系统)·····	(263)
四、综合 AGC 系统·····	(265)
本章小结·····	(266)
本章复习思考题·····	(267)
第五章 在单边带通信线路上数据信号的传送·····	(269)
§ 5—1 概述·····	(269)
一、数据信号简述·····	(269)
二、在单边带通信线路上传输数据信号的要求·····	(270)
(一) 要求错码率 (误码率) 小·····	(270)
(二) 要求数据的传输速率高·····	(271)
三、数据信号在单边带通信线路上传输的几种键控制度·····	(271)
(一) 振幅键控制 (ASK制)·····	(272)
(二) 频率键控制 (FSK制)·····	(272)
(三) 相位键控制 (PSK制)·····	(273)
§ 5—2 频率键控信号的产生·····	(275)
一、在单边带发射机内频率键控信号的形成及搬移过程·····	(275)

二、“相位不中断”频率键控法	(277)
(一)“相位不中断”频率键控法的组成及原理	(277)
(二)“相位不中断”频率键控法的实际电路	(279)
三、“相位中断”频率键控法	(284)
(一)“相位中断”频率键控法的组成及原理	(284)
(二)“相位中断”频率键控法的实际电路	(285)
四、“相位中断”和“相位不中断”频率键控信号的频谱分析	(291)
(一)“相位中断”型频率键控信号的频谱	(291)
(二)“相位不中断”型频率键控信号的频谱	(294)
§ 5—3 频率键控信号的接收	(298)
一、概述	(298)
(一)鉴频法	(298)
(二)零交点法	(300)
二、频率键控信号解调器的实际电路	(302)
(一)滤波和放大电路	(304)
(二)译码器	(305)
(三)数据信号恢复电路	(307)
(四)监听器	(309)
§ 5—4 频率键控控制的抗干扰性	(313)
一、正弦干扰	(314)
(一)限幅器中存在的“大信号抑制小信号”现象	(314)
(二)在正弦干扰的作用下,发生错码的条件	(316)
二、起伏干扰	(316)
(一)起伏干扰的主要特性	(319)
(二)在频率键控制收信机中起伏噪声是如何引起错码的	(318)
(三)码元错误率的计算	(318)
(四)频率键控制和振幅键控制抗起伏干扰的比较	(320)
三、脉冲干扰	(321)
(一)脉冲干扰的性质	(321)
(二)脉冲干扰通过收信机谐振系统的情况	(322)
(三)在频率键控制中脉冲干扰是如何引起错码的	(324)
(四)“宽—限—窄”系统提高抗脉冲干扰能力的分析	(328)
§ 5—5 频分制多路数据传输系统	(334)
一、频率键控——单边带制	(334)
二、相位键控——单边带制	(338)
(一)二相制调制	(338)
(二)四相制调制	(344)
(三)动态多路调相系统	(352)
三、数据传输对单边带电台性能的要求	(370)
(一)频率稳定度	(370)
(二)互调失真	(371)

(三) 传输特性	(371)
(四) 话路频带的利用	(374)
附录5—1 信息量概念	(374)
附录5—2 矩形脉冲在谐振回路上激起的电流	(374)
附录5—3 理想带通滤波器中的暂态过程	(376)
本章小结	(377)
本章复习思考题	(379)
第六章 短波通信技术的发展	(381)
§ 6—1 短波单边带通信设备发展动向	(381)
一、当代短波单边带通信设备简介	(381)
(一) 短波单边带发射机	(381)
(二) 短波单边带接收机	(381)
(三) 短波单边带电台	(381)
二、短波通信的发展动向	(381)
(一) 采用微处理机控制, 赋予短波通信设备智能化	(381)
(二) 实现短波自适应通信	(382)
(三) 提高短波通信设备抗核电磁脉冲的能力	(382)
(四) 提高短波通信设备的可维修度和组合能力	(383)
§ 6—2 短波的自动实时选频系统	(384)
一、实时选频的概念及其在短波通信中的重要性	(384)
二、评价频率所依据的测试参数	(386)
(一) 信噪比	(386)
(二) 多径时延	(387)
(三) 多普勒散布	(387)
三、国内外实时选频系统方案简介	(387)
(一) CURTS系统	(388)
(二) 短波测试设备选频系统 (即Chirp 系统)	(391)
(三) 斜向返回探测系统	(396)
§ 6—3 扩展频谱通信	(399)
一、概述	(400)
(一) 扩展频谱通信的基本概念	(400)
(二) 扩展频谱通信的特点	(402)
(三) 处理增益与干扰裕度	(402)
二、直接序列调制系统	(403)
(一) 直接序列调制系统的组成及工作原理	(403)
(二) 直接序列调制系统的性能	(405)
三、频率跳变系统	(408)
(一) 频率跳变系统的基本组成及工作简介	(408)
(二) 跳频系统有关问题的讨论	(409)
(三) 跳频信号的产生与接收	(414)
(四) 跳频系统的抗干扰性能	(419)

四、时间跳变系统	(421)
五、线性调频系统	(421)
六、混合系统	(423)
(一) 跳频/直扩系统	(423)
(二) 跳时/跳频系统	(424)
(三) 跳时/直扩系统	(425)
七、几种基本扩展频谱调制技术的性能比较	(425)
§ 6—4 时频调制	(427)
一、概述	(427)
二、时频调制的基本原理	(427)
(一) 时频调制的概念	(427)
(二) 时频调制信号的产生和解调原理	(429)
三、时频调制的编码原则	(432)
四、时频调制的优点	(434)
§ 6—5 自动调谐系统	(435)
一、概述	(435)
二、自动调谐系统的工作原理	(436)
(一) 自动调谐系统的组成及简单工作过程	(436)
(二) 自动调谐系统各部分工作原理介绍	(437)

第一章 单边带通信概述

本章着重介绍单边带信号的特点,比较单边带通信制和调幅通信制的优缺点,并对单边带收发信机的组成及基本工作原理作概括地说明。

§ 1—1 单边带信号的分析

随着无线电通信的迅速发展,在短波波段内出现两个突出问题,一是在本波段范围内尽量增加无线电通道数目,即力求压缩每个信道的频宽;二是减少不必要的辐射、增加通信距离。单边带通信制正是在解决上述矛盾中得到迅速发展和应用的。

在发信设备课程中已介绍过,调幅波的频谱是由载频和上、下边带所组成,被传递的信息仅包含在上、下边带之中。因此,从不失真地传递信息的要求来看,只要发送其中一个边带就可以了。这种把信息调制在一个边带上进行传输的通信方式称作单边带通信。由此可见,单边带通信制是在调幅制的基础上发展起来的,单边带的名称也是相对于调幅制中存在着载频和上、下边带信号而得名的。

为了弄清单边带信号的特点,可以从解析式、频谱图、波形图上将单边带信号和调幅信号作一比较。我们先从单音调制入手,然后再分析双音调制和语音调制的情形。

一、单音调制

(一) 单音调制的调幅信号

假如载波电压为

$$u_c(t) = U_c \cos \omega_c t$$

单音调制信号为

$$u_\Omega(t) = U_\Omega \cos \Omega t$$

则对应的调幅信号是

$$u_{AM}(t) = (U_c + \Delta U_c \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

式中 ΔU_c 为调制后的高频振幅增量,它与调制信号的振幅 U_Ω 有一定的正比关系,即

$$\Delta U_c = K U_\Omega$$

K 是比例常数,表示调制信号强度和低频振幅增量之间的比例关系,由调幅方式和电路结构决定。所以

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) &= (U_c + K U_\Omega \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

式中 $m = K \frac{U_\Omega}{U_c}$ 是调幅系数,为了避免过调制引起的失真,通常要求 $m \leq 1$ 。

式 (1-1-1) 表示单音调制的调幅信号, 其包络 $U_c(1+m\cos\Omega t)$ 是随着调制信号 $U_\Omega\cos\Omega t$ 的变化而变化。利用三角公式可将调幅信号展开成

$$u_{AM}(t) = U_c\cos\omega_c t + \frac{1}{2}mU_c\cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2}mU_c\cos(\omega_c - \Omega)t \quad (1-1-2)$$

由此式看出, 单音调制的调幅信号是由载频 ω_c 、上边频 $\omega_c + \Omega$ 、下边频 $\omega_c - \Omega$ 三个频率分量组成的。被传递的信息, 即调制信号 $U_\Omega\cos\Omega t$ 的振幅和频率 仅包含在上、下两个边频中。

(二) 单音调制的单边带信号

将式 (1-1-2) 的调幅信号取出一个边频分量 (如上边频), 即

$$u_{SSB}(t) = \frac{1}{2}mU_c\cos(\omega_c + \Omega)t \quad (1-1-3)$$

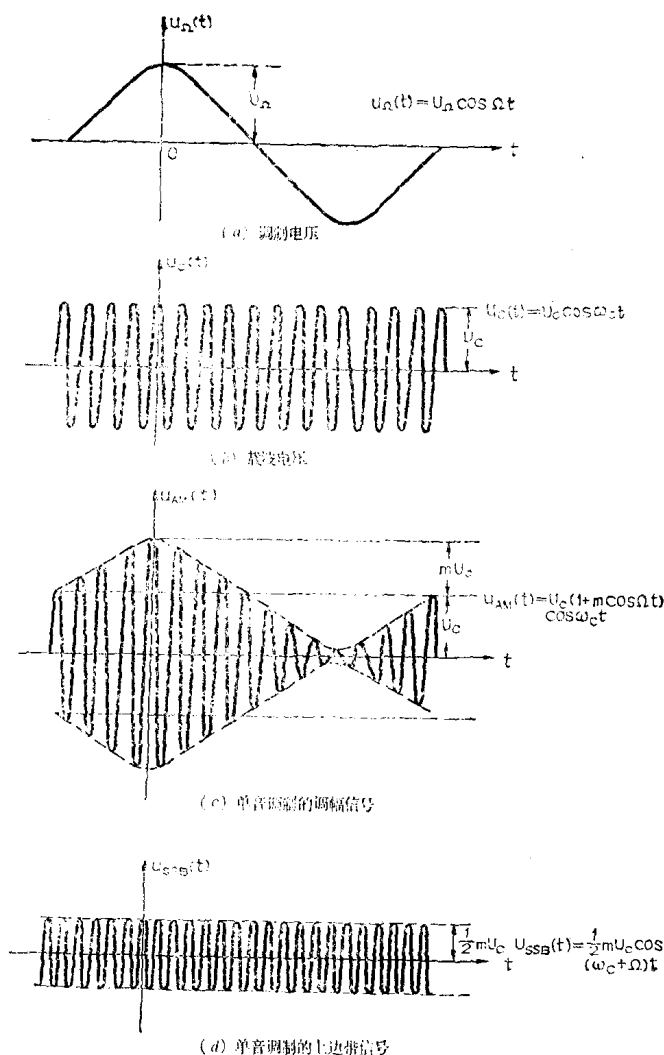
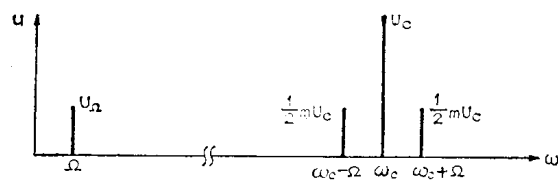


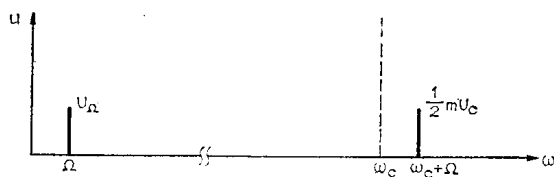
图 1-1-1 单音调制的调幅信号和上边带信号波形

显然, 这是一个角频率为 $\omega_c + \Omega$ 、幅度为 $\frac{1}{2}mU_c$ 的等幅波, 它和调制信号的幅度及频率相关连。所以, 可用单边带信号来传递信息。

单音调制的调幅信号和上边带信号的波形如图1-1-1所示, 其频谱如图1-1-2所示。



(a) 单音调制的调幅信号频谱



(b) 单音调制的上边带信号频谱

图1-1-2 单音调制的调幅信号和上边带信号频谱

二、双音调制

由于单边带调制的特殊性, 单音调制不能完全反映出单边带信号的特点, 至于复杂的信息, 如语言信号, 因它带有随机性, 故由它调制的单边带信号, 分析和计算比较困难, 于是在研究和测试单边带信号的特性时, 多用双音信号, 通常是用等幅双音代替复杂信息。

(一) 等幅双音信号的分析

通常选用的双音信号是等幅的, 频率靠近的两个音频信号 (如1000Hz和1575Hz), 其解析式如下

$$\begin{aligned} u_{\Omega}(t) &= u_{\Omega 1}(t) + u_{\Omega 2}(t) \\ &= U_{\Omega 1} \cos \Omega_1 t + U_{\Omega 2} \cos \Omega_2 t \\ &= U_{\Omega 0} (\cos \Omega_1 t + \cos \Omega_2 t) \\ &= 2U_{\Omega 0} \cos \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} t \cos \frac{\Omega_2 + \Omega_1}{2} t \end{aligned}$$

设 $\Omega_2 - \Omega_1 = \Delta\Omega$

$$\text{则 } u_{\Omega}(t) = 2U_{\Omega 0} \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t \cos \left(\Omega_1 + \frac{\Delta\Omega}{2} \right) t \quad (1-1-4)$$

式 (1-1-4) 表示等幅双音信号是一个调幅调相波。其包络 $2U_{\Omega 0} \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t$ 的角频率为 $\frac{\Delta\Omega}{2}$, 包络内填充的角频率为 $\Omega_1 + \frac{\Delta\Omega}{2}$ 。当 $\frac{\Delta\Omega}{2} t$ 在 $2n\pi + \left(\frac{\pi}{2} \sim \frac{3}{2}\pi \right)$ 范围内时, $\cos \frac{\Delta\Omega}{2} t$

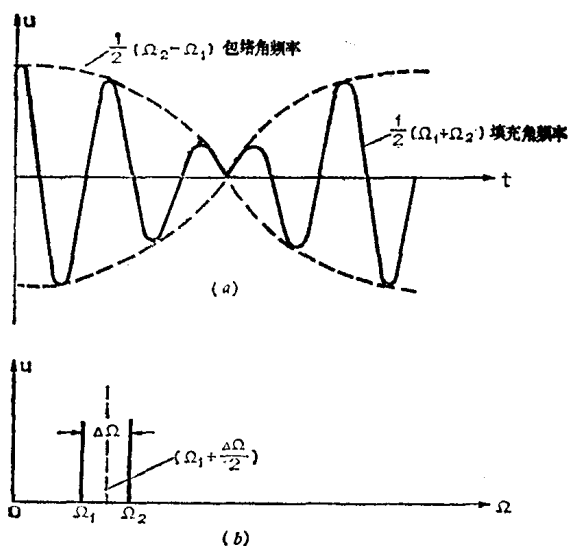


图1-1-3 等幅双音调信号的波形和频谱

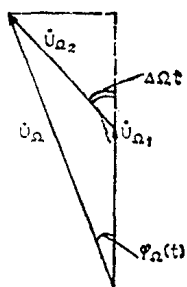
为负，即包络为负，因此波形在此范围内要反相。这就是说，在点 $2n\pi + \frac{\pi}{2}$ 和点 $2n\pi + \frac{3}{2}\pi$ 上双音信号的波形发生换相。图1-1-3为等幅双音信号的波形和频谱。

等幅双音信号的上述特性也可通过向量迭加的方法进行分析，即用两个旋转向量 $\dot{U}_{\Omega 1}$ 和 $\dot{U}_{\Omega 2}$ 分别表示信号 $u_{\Omega 1}(t)$ 和 $u_{\Omega 2}(t)$ ，由于 $u_{\Omega 2}(t)$ 比 $u_{\Omega 1}(t)$ 的角频率高 $\Delta\Omega$ ，故 $\dot{U}_{\Omega 2}$ 以角频率 $\Delta\Omega$ 相对 $\dot{U}_{\Omega 1}$ 反时针旋转。 $\dot{U}_{\Omega 2}$ 和 $\dot{U}_{\Omega 1}$ 的合成向量 $\dot{U}_{\Omega}$ 的相位和振幅都随时间而变化，其表示式可记作

$$u_{\Omega}(t) = U_{\Omega}(t) \cos[\Omega_1 t + \varphi_{\Omega}(t)]$$

根据矢量图1-1-4，可求出上式中的振幅为

$$\begin{aligned} U_{\Omega}(t) &= \sqrt{(U_{\Omega 1} + U_{\Omega 2} \cos \Delta\Omega t)^2 + (U_{\Omega 2} \sin \Delta\Omega t)^2} \\ &= U_{\Omega 1} \sqrt{1 + \frac{2U_{\Omega 2}}{U_{\Omega 1}} \cos \Delta\Omega t + \left(\frac{U_{\Omega 2}}{U_{\Omega 1}}\right)^2} \end{aligned}$$



相位为

$$\begin{aligned} \varphi_{\Omega}(t) &= \text{tg}^{-1} \frac{U_{\Omega 2} \sin \Delta\Omega t}{U_{\Omega 1} + U_{\Omega 2} \cos \Delta\Omega t} \\ &= \text{tg}^{-1} \frac{\frac{U_{\Omega 2}}{U_{\Omega 1}} \sin \Delta\Omega t}{1 + \frac{U_{\Omega 2}}{U_{\Omega 1}} \cos \Delta\Omega t} \end{aligned}$$

图1-1-4 表示等幅双音的矢量图

代入等幅条件 $U_{\Omega 1} = U_{\Omega 2} = U_{\Omega 0}$ 则

$$\begin{aligned} U_{\Omega}(t) &= U_{\Omega 0} \sqrt{1 + 2 \cos \Delta\Omega t + 1} \\ &= 2U_{\Omega 0} \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\Omega}(t) &= \text{tg}^{-1} \frac{\sin \Delta\Omega t}{1 + \cos \Delta\Omega t} \\ &= \text{tg}^{-1} \frac{2 \sin \frac{\Delta\Omega}{2} t \cdot \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t}{2 \cos^2 \frac{\Delta\Omega}{2} t} \end{aligned}$$

$$= \frac{\Delta\Omega}{2} t$$

将 $U_o(t)$ 和 $\varphi_o(t)$ 的值代入合成向量的表示式, 则得

$$u_o(t) = 2U_{o0} \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t \cos \left(\Omega_1 + \frac{\Delta\Omega}{2} \right) t$$

显然, 用向量迭加分析的结果和直接用三角函数变换分析的结果是一致的, 都说明等幅双音信号是一个调幅调相波。

(二) 等幅双音调制的调幅信号

根据振幅调制概念, 受等幅双音调制的调幅信号表示式为

$$u_{AM}(t) = (U_c + K_1 U_{o0} \cos \Omega_1 t + K_2 U_{o0} \cos \Omega_2 t) \cos \omega_c t$$

若设 $K_1 = K_2 = K$, 将上述等幅双音信号的表达式代入, 则得

$$u_{AM}(t) = \left[U_c + 2KU_{o0} \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t \cos \left(\Omega_1 + \frac{\Delta\Omega}{2} \right) t \right] \cos \omega_c t \quad (1-1-5)$$

这表示受等幅双音调制的调幅信号的包络

$$U_c + 2KU_{o0} \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t \cos \left(\Omega_1 t + \frac{\Delta\Omega}{2} t \right)$$

和等幅双音信号的波形一致。利用三角公式可将受等幅双音调制的调幅信号展开, 即为

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) &= U_c (1 + m \cos \Omega_1 t + m \cos \Omega_2 t) \cos \omega_c t \\ &= U_c \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m U_c \cos (\omega_c + \Omega_1) t \\ &\quad + \frac{1}{2} m U_c \cos (\omega_c - \Omega_1) t + \frac{1}{2} m U_c \cos (\omega_c + \Omega_2) t \\ &\quad + \frac{1}{2} m U_c \cos (\omega_c - \Omega_2) t \end{aligned} \quad (1-1-6)$$

式(1-1-6)表示, 受等幅双音调制的调幅信号是由载频 ω_c 和上边频 $\omega_c + \Omega_1$ 、 $\omega_c + \Omega_2$, 下边频 $\omega_c - \Omega_1$ 、 $\omega_c - \Omega_2$ 五个频率分量组成, 被传递的信息分别包含在上、下边频之中。

(三) 等幅双音调制的单边带信号

将式(1-1-6)的调幅信号取出一个边带(如上边带), 即是

$$\begin{aligned} u_{SSB}(t) &= \frac{1}{2} m U_c \cos (\omega_c + \Omega_1) t + \frac{1}{2} m U_c \cos (\omega_c + \Omega_2) t \\ &= m U_c \cos \left(\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \right) t \cos \left(\omega_c + \frac{\Omega_2 + \Omega_1}{2} \right) t \\ &= m U_c \cos \frac{\Delta\Omega}{2} t \cos \left(\omega_c + \Omega_1 + \frac{\Delta\Omega}{2} \right) t \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

式(1-1-7)表示, 受等幅双音调制的上边带信号也是一个调幅调相波。将式(1-1-7)与式(1-1-4)比较可知, 受等幅双音调制的上边带信号的包络与等幅双音调制信号的包