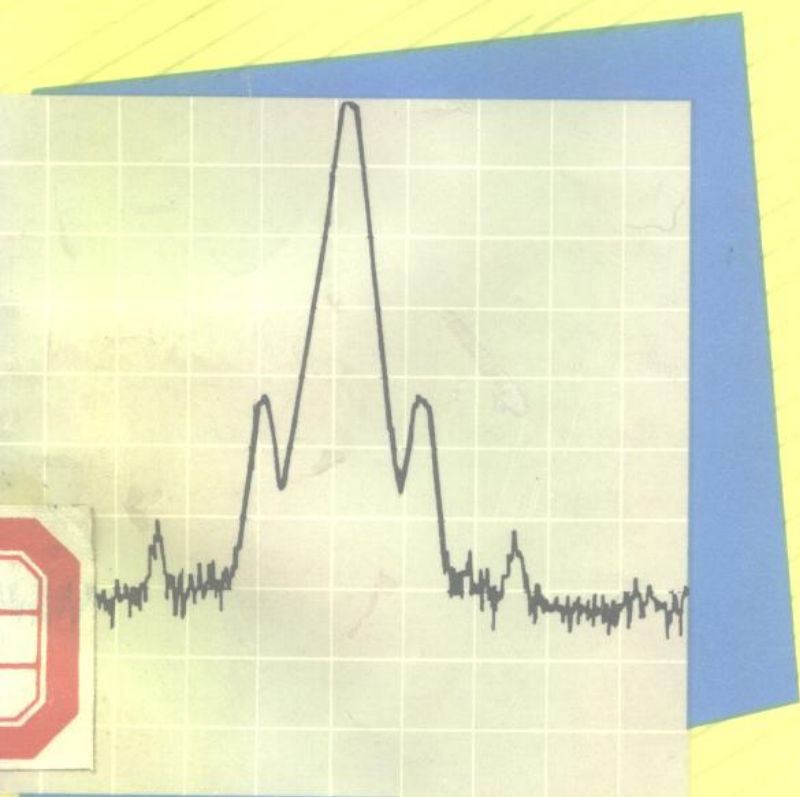


低噪声频率合成

白居易



西安交通大学出版社

低噪声频率合成

白居宪

西安交通大学出版社

内 容 简 介

全书共分10章。作者根据多年从事无线电通信设备研究工作的总结和—些有关资料,集中、系统地论述了现代低相位噪声频率合成技术、应用及其实现。本书取材新颖,内容丰富,从工程应用的角度,把理论与实践相结合,全面地介绍了各种最新频率合成技术,具有较强的实用性。书中所提供的电路和图表都是目前很有代表性的,可以直接使用。

本书作为一本新科技应用图书,主要是为通信、雷达、电视、电子测量、仪器仪表和频率标准源等无线电技术领域从事频率合成和低噪声研究、设计的工程技术人员和研究人员撰写的,也可供大专院校通信专业高年级本科生和从事这方面教学的教师与研究生参考,是一本很有实用价值的—应用参考书。

(陕)新登字 007 号

低噪声频率合成

白居易

责任编辑 曹晓梅

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路28号 邮政编码710049)

西安地矿所印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.25 字数:281千字

1995年5月第1版

1995年5月第1次印刷

印数:1—4000

ISBN7-5605-0746-8/TN·47 定价:14.50元

前 言

频率合成技术是在本世纪 30 年代开始建立的。那时的频率合成是用几个不同频率的多晶体振荡器参考源的直接式合成方法,通过混频得到多个稳定而准确的频率。但因为这种方法要使用多个晶体振荡器参考源,设备笨重,难于做到一致性,也不能满足各种不同频率的需要,因而后来被淘汰。新的方法是用一个晶体振荡器的标准参考源,通过分频、混频和倍频得到更多种频率。

锁相环路(PLL)频率合成技术是在 40 年代初根据控制理论的线性伺服环路发展起来的,最早用于电视接收机的扫描同步电路,以减少噪声对同步的影响,从而使电视的同步性能得到重大改进。它的低噪声跟踪特性得到人们高度重视,发展越来越快,以致今天广泛应用于无线电技术领域的各个方面。

迄今为止,频率合成技术已有 60 年的历史了。在这 60 年中,大致经历了四个发展阶段。如果以合成技术来分,它们是:直接式合成、NPLL 合成、FNPLL 合成和 PSG 单环路合成,以及现在的 DDS。这些不同阶段的典型产品分别是:美国的 5100B 和 R/S SMDH; HP8660A 和法国的 7100; HP8662A 和 HP8663A; HP8644A, HP8645A 和 HP8665A 等。DDS 发展很快,高性能产品即将问世。

频率合成技术和任何其它科学技术一样都是从实际需要中产生,并在实践中不断地得到提高和发展。最近 20 年来,随着大规模集成(LSI)和超大规模集成(VLSI)电路技术的迅速发展,电子计算机、无线电通信、雷达和宇宙航空等技术取得了巨大进步,已经进入电子革命的时代。频率合成技术在这一革命中起了重大作用,

要是没有先进的频率合成技术(器)为现代无线电技术提供所需要的高质量而灵活多变的本机振荡器和高性能的测量参考源,很难说现代的无线电技术会是什么样的情形!

现在的频率合成技术已达到相当完美的程度,表现在技术的先进性和高性能指标的统一。在性能指标中,最主要的是低相位噪声。作者基于这个思想,根据多年的科研工作经验和成果,并参考有关资料撰写了本书。作者的最大体会是:低噪声设计是很棘手的问题,往往给人以模糊不清的感觉,甚至茫然无从下手。而这方面的实用资料比较零散,要想很快地从理论和实践的结合上搞清这个问题,又不是那么容易。本书企图集中、系统地对低相位噪声的概念、基本理论、设计准则和应用作一概括的论述和总结。作者希望总结是成功的,能供读者参考,并从中获益。

本书以新技术为基础,低相位噪声为主题,特别详细地分析了最佳振荡器——李森(Leeson)模型、分数- N 锁相环路(FNPLL)频率合成技术,包括新型转换电感电抗的VCO和PSG单环路频率合成技术——它集现代频率合成技术于一身,是80年代末的最新技术。现在,一种叫作DDS的频率合成技术在现代数字集成电路的基础上正在迅速发展。有人认为,这种技术是产生频率的理想方法,它将成为频率合成器的第三代方案。本书对这种技术也作了基本概述。另外对低相位噪声测量方法和构成智能化测量仪器的IEEE-488标准接口系统(总线)从应用的角度作了简明扼要的介绍。

本书蒙西安电子科技大学张厥盛教授仔细审阅,并提出了宝贵修改建议。作者谨表示衷心感谢。

限于作者的学识水平,不妥和错误之处,在所难免。敬请广大读者予以批评指正。

作者

1994年10月

主要符号表

A	正弦信号幅度
$A(s)$	放大器的传输函数
B	滤波器带宽
B_N	等效噪声带宽
ΔB_{NO}	门限环路噪声带宽
C_m	测量系统校正系数
$e(t)$	瞬时误差函数
e_m	峰值跟踪误差
$E(s)$	$e(t)$ 的拉普拉斯变换
E_T^2	环路瞬时误差等效功率
f_0	载波频率
f_o	输出频率
f_c	闪烁噪声拐角频率;低通滤波器截止频率
f_D	多普勒频移
f_m	傅里叶频率(边带、偏离、调制、基带频率)
$f_{m\text{ cal}}$	测量系统校正频率
f_r	参考频率
f_R	微波参考频率
f_{spur}	杂散信号频率
$f(t)$	瞬时频率
$\Delta f(t)$	瞬时频率起伏
Δf_p	最大频偏
Δf_{res}	残留 FM(累积频率噪声)
F	放大器噪声指数
$F(s)$	M/N 环路闭环传输函数
$F_L(s)$	LPF 的传输函数($h(\tau)$)的拉普拉斯变换

$G(s)$	闭环传输函数
$G_o(s)$	开环传输函数
$h(\tau)$	LPF 单位冲激响应函数
h_{an}	晶体的内部磁场
$H(j\omega_m)$	带通等效低通传输函数
$H(s)$	M/N 环路部分传输函数
H_0	静磁场强度
K	环路增益常数
$K_A(s)$	衰减器传输函数
K_d	频率鉴频器灵敏度(常数)
K_G	环路总增益常数
K_L	滤波器常数
K_n	整形器常数
K_V	VCO 灵敏度(常数)
K_ϕ	鉴相器灵敏度(常数)
K_ϕ	等效鉴相器灵敏(常数)
$\mathcal{L}(f_m)$	单边带相位噪声定义符号
$\mathcal{L}_{ref}(f_m)$	参考源相位噪声
$\mathcal{L}_{DUT}(f_m)$	DUT 源相位噪声
$\mathcal{L}_{sys}$	系统噪声底部
$L(j\omega_m)$	李森等效低通传输函数, 即 $H(j\omega_m)$
$m(t)$	乘法器(鉴相器)的输出
M	倍频系数; FNPLL 环路 VCO 输出频率倍乘系数
N	可变分频系数
p	环路滤波器极点频率
P	微波环路固定分频系数
P_{cal}	测得的校正功率
P_{DUT}	DUT 源的实际噪声功率

P_m	测得的噪声功率
P_{ref}	参考源的实际噪声功率
P_s	信号功率
P_{SSH}	单边带功率
Q_L	有载品质因数
Q_{UL}	无载品质因数
$R(\tau)$	自相关函数
s	复数频率
SF_{bw}	测量带宽变换系数
SF_{sys}	系统换算系数
ΔSB_{cal}	校正的边带-载波比
$S_{sf}(f_m)$	频率起伏谱密度
$S_y(f_m)$	分数频率起伏谱密度
$S_{\phi}(f_m)$	相位噪声谱密度
$S_{\omega}(f_m)$	相位起伏谱密度
t_n	VCO 建立时间
T_{acq}	捕获时间
T_{BW}	带通滤波器包络延时
T_{LTF}	低通滤波器包络延时
T_s	频率转换时间
$u(t)$	瞬时电压
V	运动目标速度
V_0	正弦信号峰值电压
$V_d(s)$	VCO 控制电压(激励函数)
V_s	载波信号电压
V_{SSH}	单边带信号电压
V_{rms}	有效信号电压
V_{nrms}	等效噪声电压

ΔV_{bp}	正弦拍频信号峰值
W_c	储存在电容器中的最大能量
$y(t)$	偏离载波的瞬时分数频率
z	环路滤波器零点频率
ξ	环路的衰减因子
τ	抽样时间;延迟时间
τ_1, τ_2	环路滤波器电容时间常数
λ	拉格朗日乘数
σ_N^2	最小均方误差
σ_y^2	阿仑方差
σ_ϕ	VCO 相位噪声标准方差
$\sum^2$	总的平均平方误差
$e(t)$	瞬时幅度起伏
$\phi(t)$	瞬时相位
$\phi_i(t)$	锁相环路输入相位
$\phi_o(t)$	VCO 输出相位
$\Delta\phi(t)$	瞬时相位起伏
$\Phi(s)$	$\phi(t)$ 的拉普拉斯变换
$\Phi_i(s)$	$\phi_i(t)$ 的拉普拉斯变换
$\Phi_o(s)$	$\phi_o(t)$ 的拉普拉斯变换
$\Delta\Phi(s)$	$\Delta\phi(t)$ 的拉普拉斯变换
ω_0	正弦角频率
ω_n	环路自然谐振频率
Ω_{acq}	捕捉带
χ	置信因子
$\Delta\theta_{rms}$	总的相位起伏

目 录

前言

主要符号表

第1章 绪论

- 1.1 本机振荡器相位噪声对接收机选择性的影响 (1)
- 1.2 相位噪声对数字通信系统的影响 (3)
- 1.3 载波相位噪声对多普勒雷达系统的影响 (3)
- 1.4 接收机信道内外性能的测试 (5)
- 1.5 残留相位噪声和绝对相位噪声 (7)

第2章 相位噪声

- 2.1 什么是相位噪声 (9)
- 2.2 相位噪声的定量表示 (11)
 - 2.2.1 时域表示法 (13)
 - 2.2.2 频域表示法 (14)
- 2.3 单边带相位噪声与 $\mathcal{L}(f_m)$ 的定义 (15)
- 2.4 频率起伏谱密度 $S_M(f_m)$ (19)
- 2.5 相位起伏谱密度 $S_{\phi}(f_m)$ (19)
- 2.6 累积相位噪声 (20)
- 2.7 阿仑方差与 $\mathcal{L}(f_m)$ 的关系 (22)
- 2.8 相位噪声和信号源 (25)

第3章 相位噪声的产生

3.1 频谱纯度	(28)
3.2 加性噪声引起的相位噪声	(30)
3.3 振荡器的李森(Leeson)模型数学分析	(36)
3.4 振荡器的相位噪声李森模型	(40)
3.5 振荡器的相位噪声最佳化	(47)
3.6 振荡器增益、相位和Q的计算机分析	(50)

第4章 直接式频率合成

4.1 直接式频率合成器工作原理	(53)
4.2 几个主要参数的选择原则	(57)
4.3 直接式频率合成器的基本问题	(61)
4.4 几个主要的电路	(65)
4.4.1 混频器	(65)
4.4.2 倍频器	(78)
4.4.3 再生分频器	(88)

第5章 PLL 频率合成

5.1 PLL 的基本方程	(90)
5.2 PLL 的线性化模型	(94)
5.2.1 闭环传输函数	(95)
5.2.2 调制跟踪误差	(98)
5.2.3 基本环路的相位噪声	(102)
5.2.4 门限预测	(106)
5.3 最佳PLL 传输函数	(108)
5.3.1 环路的传输函数	(108)
5.3.2 最佳PLL 滤波器的传输函数及其近似	(109)
5.4 PLL 基本电路的噪声	(111)

5.4.1	VCO 的噪声	(111)
5.4.2	鉴相器的噪声	(115)
5.4.3	除 N 分频器的噪声	(122)
5.5	典型的 FNPLL 环路系统噪声	(126)

第 6 章 FNPLL 频率合成

6.1	FNPLL 环路的组成	(134)
6.2	FNPLL 环路的工作原理	(136)
6.3	分数- N 简化频率合成	(141)
6.4	实用的 FNPLL 频率合成	(147)
6.5	先进的频率合成技术	(152)
6.5.1	直接合成参考部分	(154)
6.5.2	低频锁相环路部分	(156)
6.5.3	高频锁相环路部分	(158)
6.6	转换电感电抗的 VCO	(160)
6.7	脉冲吞除技术	(166)
6.8	集成电路频率合成器	(170)
6.8.1	简单集成电路频率合成器	(171)
6.8.2	复杂集成电路频率合成器	(173)

第 7 章 微波频率合成

7.1	微波频率合成环路	(180)
7.2	M/N 环路的简要分析	(183)
7.3	M/N 环路的实现	(186)
7.4	M/N 环路的噪声	(189)
7.5	辅助捕获电路	(192)
7.5.1	VCO 预调谐	(194)
7.5.2	转换环路参数	(196)
7.6	多环路微波频率合成	(197)

7.7	PSG 单环路微波频率合成	(201)
7.7.1	单环路设计的概念	(201)
7.7.2	用 FLL 降低相位噪声	(203)
7.7.3	频率调制	(207)
7.7.4	数字化 FM 的影响	(208)
7.8.	单环路频率合成器的设计	(210)
7.8.1	延迟线鉴频器的设计	(212)
7.8.2	YIG 调谐振荡器	(213)
7.8.3	PSG 单环路频率合成部分框图	(218)

第 8 章 直接数字频率合成

8.1	基本工作原理	(223)
8.2	DDS	(226)
8.3	全集成电路 DDS	(229)
8.4	DDS 噪声	(231)
8.4.1	相位噪声	(234)
8.4.2	杂散信号	(234)
8.5	DDS 杂散信号的降低	(237)

第 9 章 相位噪声测量

9.1	外差-计数测量方法	(241)
9.2	频谱分析仪直接测量方法	(242)
9.3	频率鉴频器测量方法	(244)
9.4	鉴相器测量方法	(251)
9.5	具有共同标准参考源的双源测量方法	(257)
9.6	自动相位噪声测量系统	(261)
9.7	用 HP8662A 测试接收机	(268)
9.7.1	接收机的邻道选择性测试	(270)
9.7.2	接收机的邻道假信号衰减测试	(272)

9.8 延迟线鉴频器与锁频环路	(275)
第10章 IEEE-488 传输系统	
10.1 概述	(281)
10.2 IEEE-488 接口总线的名词术语	(287)
10.3 IEEE-488 接口总线的功能	(291)
10.4 IEEE-488 接口总线的操作原理	(299)
10.5 IEEE-488 接口总线芯片与应用	(310)
附录 A 带通网络到低通网络的变换	(326)
附录 B 三个未知源的相位噪声计算	(330)
附录 C ASCII/ISO 和 IEEE 编码图表	(331)
英文缩写词	(332)
主要参考文献	(336)
索引	(342)

第 1 章

绪论

在现代无线电通信和雷达技术中,系统灵敏度和选择性一直是设计者的难点或重点。在以前,其主要限制因素是噪声指数和非线性器件。随着低噪声器件的改进、动态范围的扩大和系统增益的提高,这些问题已经得到了较好的解决。现在由于无线电通信和雷达技术的提高,对系统性能提出了更高、更严格的要求,因而新的限制因素又引起了从事这方面工作的科学技术人员的注意和研究。这些新的、主要限制因素之一就是相位噪声,更一般地说是边带噪声(即相位噪声和 AM 噪声的组合)。

为了说明相位噪声对现代无线电通信设备性能的影响,以及良好的低相位噪声信号源(或振荡器^①)对提高系统性能的重要作用,下面举几个实际应用的例子,以便使读者加深了解研究相位噪声的意义和重要性。

1.1 本机振荡器相位噪声对接收机选择性的影响

在各种高性能、宽动态范围的频率变换中,相位噪声是一个主要的限制因素。例如,现代高性能超外差通信接收机,在多信号环境中,第一下变频级是从强干扰信号中提取弱有用信号的关键。假如两个信号同时出现在接收机的输入端,那么所发生的情况如图

^① 在本书中信号源和振荡器是等同的。

1-1 所示。图 1-1(a) 表示两个输入的射频(RF)信号(f_1 为强干扰, f_2 为有用信号)和本机振荡器(LO)输出的信号。显然, LO 信号不纯, 有边带频谱, 即边带相位噪声。

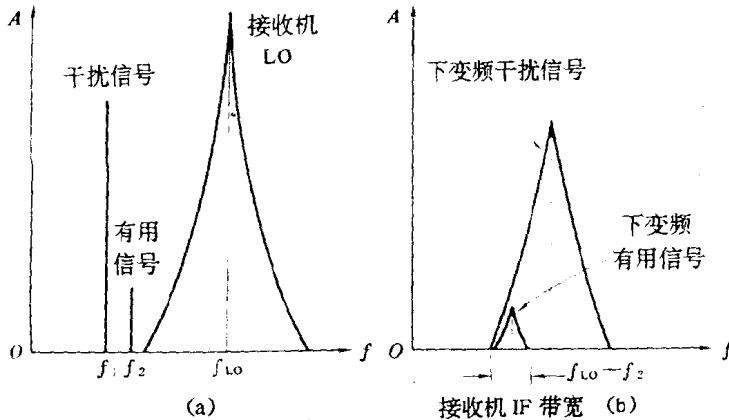


图 1-1 LO 相位噪声对接收机选择性的影响
(a) RF 输入和 LO 信号; (b) 下变频混频器输出信号

在下变频过程中, 混频器把输入的两个 RF 信号与 LO 信号及其边带一起混频, 得到有用的中频(IF)信号和干扰的中频信号。中频选择滤波器可分离出其中的一个信号供放大、检波和基带处理。如果有用信号是一个比较大的信号, 那么恢复该信号就不存在什么困难; 如果有用信号是一个比较小的信号, 那么困难的问题就产生了。因为 LO 信号的边带噪声会直接转换成强干扰中频信号的边带噪声, 并落入中频带宽内, 淹没了有用的中频信号, 如图 1-1(b) 所示。在这种情况下, 尽管中频滤波器可以滤除强干扰信号, 但对强干扰中频边带是无能为力的, 我们把这种混频过程叫作倒易混频。这时弱的有用信号的恢复就不再可能了, 或者说是很困难的。这种影响在高选择性和宽动态范围接收机中是非常明显的。关键问题在于 LO 信号的边带相位噪声电平决定了接收机的性

能。也就是说,大的 LO 信号边带相位噪声电平会降低接收机的选择性和动态范围。为了达到接收机最好的性能要求,必须采取措施使 LO 信号的边带相位噪声最小。

1.2 相位噪声对数字通信系统的影响

图 1-2 表示了数字调制 16-QAM(正交幅度调制)系统的状态图,也叫 IQ 图(同相对正交相位)。

在典型的音频信道范围内,累积相位噪声对一个给定的状态沿弧形位置移动。如果 LO 信号有一个较大的相位噪声,那么对应于给定状态的“点”就移到这个象限的另一个状态,产生一个错误比特位(bit),因而增加了误码率。系统中的状态越多,系统对相位噪声就越敏感。

在数字通信系统中,载波信号的相位噪声还要影响载波跟踪精度。例如,卫星地面终端上变频器、卫星频率转发器和地面接收终端下变频器的 LO 信号都要对系统产生相位噪声,这将直接影响数字调制系统的误码率。不但如此,而且

由于相位噪声引起的这些问题还将随着系统中再生状态之间载波信号源的个数的增加而增加。当然,类似问题同样会出现在其它调制系统中。

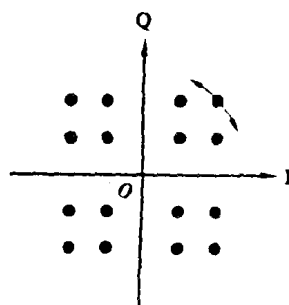


图 1-2 16-QAM 调制系统的 IQ 图

1.3 载波相位噪声对多普勒雷达系统的影响

多普勒雷达系统是通过测量有用回波信号所产生的小的多普勒频移来确定运动目标的速度。运动目标和其有用信号分两种:一种是向着雷达运动而来的目标叫作近场雷达目标。这种目标产生