



数据加载失败，请稍后重试！

相 位 噪 声

W.P. 罗宾斯 著

秦 士 姜遵富 译

人民邮电出版社

PHASE NOISE IN
SIGNAL SOURCES
(Theory and Applications)
W.P. Robins

内 容 提 要

相位噪声是微波和卫星通信及全相参雷达、动目标显示雷达、电视以及锁相、频率合成技术中的一个重要课题。本书介绍了相位噪声的基本概念、电路中相位噪声的分析计算、由相位噪声引起的系统性能恶化的计算、相位噪声和时域频率稳定度的换算等内容。原著于1982年出版,编为IEEE电信丛书第九卷,是有关相位噪声的一本简明专著。国内尚无类似的著作。

本书阐述简练、系统、物理概念清楚。对于从事频率稳定和频率测量技术及数字微波通信、卫星通信及雷达等通信系统和电路两方面的设计、研究人员均有参考价值,亦可供大专院校有关专业的师生参考。

相 位 噪 声

W.P.罗宾斯 著

秦 士 姜遵富 译

责任编辑:梁素梅

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1988年8月第一版
印张: 11³/₈ 1988年8月河北第1次印刷
字数: 305千字 印数: 1-2 000册

ISBN7115-03517-2/TN

定价: 2.95元

译者序

近十多年，随着通信、雷达技术的发展，相位噪声的重要性日益显著。在采用PSK（相移键控）、SCPC-FM（单路单载波调频）和FDM/FM（频分复用/调频）等微波干线和卫星通信系统以及MTI（活动目标显示）、CW（连续波）、FM（调频）等雷达中，系统性能指标，成本与系统相位噪声性能的关系很密切。在频率合成和锁相环等电路中，相位噪声的分析、计算尤为重要。以往有关相位噪声的论述大都分散地刊于期刊论文和有关书籍的个别章节之中。W. P. Robins（罗宾斯）著的这本书是一本有关相位噪声的专著，它系统地阐述了相位噪声的机理、性质、计算方法和系统指标的关系以及它与时域频率稳定度的转换关系。著者在上述一些系统方面从事研究、设计工作多年，经验丰富，写得比较完整。本书是IEEE电信丛书的第九卷，该丛书中的多数已由人民邮电出版社出版了中译本。

尽管本书篇幅不大，但全书叙述简明扼要。它是我们接触到的有关相位噪声课题的一本好书。国内还很缺乏这方面的专著，而涉及到相位噪声的研究项目，课程教学还不少。为此，我们把它译出来推荐给广大读者。由于水平有限，译文难免有误，敬请指正。

本书的第一至七章由姜遵富翻译，第八至十章由秦士翻译，并经互相校对，最后由秦士校订全文。

译者

1986.9

主要符号表

- f_0 载波频率。
- ω (或 w) 载波的角频率 $=2\pi f_0$ 。
- f (或 f_m) 偏移载波的频率。
- P 角偏移频率 $=2\pi f_m$ 。
- $N_0(f)$ 在偏移频率 f 处的单边带噪声密度。它代表一个长期统计平均。 $N_0=kT$, 其中 k 为波尔茨曼常数, T 为有效噪声温度, 单位为 K 。
- $n_0(f)$ 在指定的一秒时间内、在偏移频率 f 处的单边带噪声功率密度。
- N 在某个感兴趣的射频频带上积分出来的总噪声功率。它对应双边带还是单边带噪声将在文中用到它的地方来进行说明。它代表长期统计值($LTSV$)。
- C 载波功率, 单位为 W 。
- θ 载波的峰值相位抖动, 单位为 $\text{rad}(LTSV)$ 。
- $\theta_0(f)$ 每 $\sqrt{Hz}$ 基带带宽的峰值相位抖动, 单位为 $\text{rad}/\sqrt{Hz}(LTSV)$ 。
- ϕ 在某个基带频率范围内积分出来的载波根均方相位抖动, 单位为 $\text{rad}(LTSV)$ 。
- $\phi_0(f)$ 每 $\sqrt{Hz}$ 基带带宽的载波根均方相位抖动, 以 $\text{rad}/\sqrt{Hz}$ 为单位($LTSV$)。
- $\overline{\phi^2}$ 在某个基带频率范围内积分出来的相位抖动方差, 单位为 $(\text{rad})^2(LTSV)$ 。
- $\overline{\phi_0^2}(f)$ 每 Hz 基带带宽的相位抖动方差, 单位为 $(\text{rad})^2 Hz(LTSV)$ 。
- N_P 在某个感兴趣的偏移频段上积分出来的单边带相位噪声功率($LTSV$)。

$N_{op}(f)$ 对应偏移频率 f 的每Hz射频带宽的单边带相噪密度 (LTSV).

$N_{\bullet}$ 在某个感兴趣的偏移频段上积分出来的单边带幅度噪声功率 (LTSV).

$N_{\bullet\bullet}(f)$ 对应偏移频率 f 的每Hz射频带宽的单边带幅度噪声功率密度 (LTSV).

$\frac{N_P}{C}$ 单边带相位噪声对载波之比 (LTSV).

$(\frac{N_{op}}{C})_f$ 在一个偏移频率 f 处的单边带相噪密度对载波之比 (LTSV).

$\frac{N_{\bullet}}{C}$ 单边带幅度噪声对载波之比 (LTSV).

$(\frac{N_{\bullet\bullet}}{C})_f$ 在一个偏移频率 f 处的单边带幅度噪声密度对载波之比 (LTSV).

$(n_{\bullet\bullet})(f)$ 在指定所考虑的某一秒内在偏移频率 f 处的单边带相噪密度.

$(\frac{n_{\bullet\bullet}}{C})_f$ 在指定所考虑的某一秒内在偏移频率 f 处的单边带相噪密度对载波之比.

b 基带带宽(在一数字系统中这常常是做得等于比特率).

$B=2b(=\pm b)$ 射频带宽, 即在 $\pm b$ 之间

δf 载波的根均方频偏, 单位为Hz. 若频偏起因于噪声, 它也是一个长期统计值. 在FDM/FM(频分复用/调频)系统中, 它也代表每路测试音调的根均方偏移.

Δf 载波的峰值频偏, 单位为Hz. 对确知的和噪声的调制两种情况都有 $\Delta f = \sqrt{2} \delta f$.

δf_0 每 $\sqrt{\text{Hz}}$ 的根均方频偏. 它是长期统计值. 它也被定义为一系列与平均频率的频差测量结果、折合到1Hz带宽时的标准离差.

Δf_0 每 $\sqrt{\text{Hz}}$ 的峰值频偏密度. 它是长期统计值.

在不考虑印刷上的方便的情况下, 可把它写成 $(\langle \Delta f_0^2 \rangle)^{1/2}$.

后者的形式也代表两次平均频率测量值之差归一化到1Hz带宽的标准偏差。

Q_s 谐振电路的无载品质因数。

Q_L 有外部负荷时谐振电路的品质因数。

Q' 由于正反馈作用形成的振荡器调谐电路的(很高值的)有效 Q 。

f_s 振荡器相位噪声密度服从 $1/f^3$ 律的最高偏移频率。

K_d 相位检波器增益常数, 单位为 V/rad 。

K_0 VCO(压控振荡器)的增益常数, 单位为 rad/s/V 。

f_n 锁相环的自然频率, 单位为 Hz 。

ζ 锁相环的阻尼系数。

n 常常是一个倍频比或分频比。

y_i 归一化频率的一个样本, 即 f_i/f_0 。

ΔF 线性调频雷达的峰值或峰到峰值频偏。

F_m 线性调频雷达的调制速率。

S/N 基带信噪比。

x 要求热噪声的相噪分量超过本振相噪的数值比。

E 在数字通信系统中接收到的每比特的能量。

wrt 对应于。

SMO (地球站)主振。

MO 主振。

目 录

第一章 序 言

1.1 频谱纯度的重要性	(1)
1.2 着重物理概念的理解	(3)
1.3 噪声密度的概念	(4)
1.4 窄带噪声的正弦表示	(6)

第二章 调制理论复习

2.1 调幅 (AM)	(9)
2.2 调相 (PM)	(10)
2.3 调频 (FM)	(12)
2.4 加上任意的相角	(13)
2.5 线性近似	(14)
2.6 相量表示	(14)
2.7 相容性概念	(15)
2.8 相容信号的相干解调	(17)

第三章 相位抖动和噪声密度的关系

3.1 正弦相位抖动	(20)
3.2 窄带噪声的表示	(21)
3.3 叠加单边带噪声引起的相位抖动	(22)
3.4 由叠加的双边带白噪声引起的相位抖动的简化分析	(28)
3.5 对双边带叠加白噪声比较完全的分析	(30)
3.5.1 调相指数	(30)
3.5.2 调幅指数	(33)
3.5.3 各边带功率关系	(33)
3.5.4 相位抖动	(34)

3.5.5	相量表示	(35)
3.5.6	实际的和可能的边带	(37)
3.5.7	哲理性的“困难”	(40)
3.6	符号注释	(42)
3.6.1	要区分的参量	(42)
3.6.2	相位噪声功率密度的概念	(42)
3.6.3	所用符号	(43)
3.7	在一个频带内的积分	(43)
3.7.1	纯噪声	(43)
3.7.2	相位噪声	(43)
3.8	相位抖动和噪声之间关系小结	(44)
3.8.1	纯相位噪声	(44)
3.8.2	叠加的热噪声	(45)

第四章 噪声引起的频偏

4.1	基本关系	(47)
4.2	频偏概念的局限性	(48)
4.3	相位噪声和频偏的比较	(51)

第五章 振荡器噪声

5.1	非线性效应	(53)
5.2	分析	(54)
5.3	相位噪声密度与偏移频率的关系	(61)
5.4	反馈 Q 值	(62)
5.5	有载 Q 值	(64)
5.6	参数选择	(68)
5.7	例题	(69)
5.7.1	120MHz晶体振荡器	(69)
5.7.2	5MHz高级振荡器	(71)
5.7.3	600MHz压控振荡器	(72)
5.8	振荡器相位噪声的积分	(74)

5.9	影响振荡器相位噪声的其它因素	(74)
6.9.1	压控振荡器(VCO)调谐电压上的干扰	(74)
5.9.2	在其它电源引线上的干扰	(77)
5.9.3	在输出端的干扰	(78)
5.9.4	振动	(79)
5.9.5	手动调谐机构	(81)
5.9.6	双谐振器	(83)
5.9.7	后续滤波	(83)
5.10	一个简单的误解	(84)

第六章 倍频器链

6.1	需要倍频	(85)
6.2	倍频的影响	(85)
6.2.1	调幅波	(85)
6.2.2	调相波	(86)
6.2.3	倍频对相位噪声的影响	(88)
6.2.4	倍频对热噪声的影响	(88)
6.3	附加放大器的噪声	(92)
6.3.1	基频源	(92)
6.3.2	倍频前放大的信号源	(94)
6.3.3	倍频后放大的信号源	(95)
6.4	实例——X波段晶振/倍频信号源	(96)
6.5	简单振荡器和振荡器/倍频器信号源的限制	(98)
6.6	一些X波段信号源的性能	(102)
6.7	信号源的寄生输出	(104)

第七章 锁相环的使用

7.1	引言	(105)
7.2	锁相环的组成	(107)
7.2.1	压控振荡器(VCO)	(108)
7.2.2	相位检波器	(109)

7.2.3	环路滤波器(以及环路放大器)	(114)
7.2.4	开环增益	(118)
7.2.5	闭环增益	(118)
7.2.6	环路自然频率和阻尼因数	(119)
7.3	锁相环特性	(123)
7.3.1	频率传输特性	(123)
7.3.2	剩余相位误差	(124)
7.3.3	锁相环对 $1/f^3$ 噪声数学收敛的影响	(130)
7.4	分频的需要	(131)
7.5	可编程分频器	(132)
7.5.1	工作原理	(132)
7.5.2	商用可编程分频器	(135)
7.6	分频对校正率和锁相环参数的影响	(136)
7.7	相位检波器的噪声基底	(139)
7.7.1	模拟相位检波器	(139)
7.7.2	采用异或门的数字相位检波器	(145)
7.7.3	采用边沿触发的数字相位检波器	(146)
7.7.4	饱和放大器的采用	(147)
7.7.5	分频的影响	(148)
7.8	锁相环中的频率变换	(149)

第八章 频率合成器

8.1	合成器类型	(153)
8.1.1	直接合成	(153)
8.1.2	用锁相环的合成	(154)
8.2	影响组态选择的因素	(155)
8.3	几个实例的分析	(160)
8.3.1	一台UHF合成器	(160)
8.3.2	一台X波段合成器	(168)
8.4	在指定频段上积分求相位抖动的程序TI58/59.....	(174)

8.4.1	概述	(174)
8.4.2	原理	(174)
8.4.3	程序	(175)
8.5	离散寄生输出	(175)
8.5.1	离散寄生输出的产生	(175)
8.5.2	由离散寄生输出引起的相位抖动	(176)
8.5.3	主振寄生输出的增强	(178)
8.5.4	相位检波器各信号的穿通	(180)
8.5.5	倍频器所不需要的谐波	(184)
8.5.6	输出频率的谐波	(184)
8.5.7	由电源纹波或由振动产生的离散信号	(185)
8.6	工程设计要求	(185)
8.6.1	电源	(185)
8.6.2	接地	(186)
8.6.3	屏蔽和滤波	(187)
8.6.4	振动	(188)
8.7	相噪测量的某些主要问题	(188)
8.7.1	测量 N_{ϕ}/C (相噪密度/载波)和(或)总相位抖 动的一个简便方法	(188)
8.7.2	校准方法	(189)
8.7.3	校准常数的推导	(190)
8.7.4	统计方面的问题	(192)
8.8	相噪密度概念的推广	(196)

第九章 相位噪声和频率稳定度之间的相互关系

(频域到时域的变换及其反变换)

9.1	引言	(197)
9.2	相位噪声密度和频率偏移密度之间的相互关系	(198)
9.3	从已知的相位噪声密度特性计算总的频率抖动	(199)
9.3.1	理论关系	(199)

9.3.2	TI58/59程序	(200)
9.3.3	有关的偏移频率范围	(204)
9.3.4	统计方面的问题	(207)
9.4	总合成的频率抖动的测量	(207)
9.4.1	各种概念的初评	(208)
9.4.2	阿伦方差	(213)
9.4.3	一个重要的关系	(214)
9.4.4	对于以频率抖动为输入的传递函数	(215)
9.4.5	对于以相位噪声为输入的传递函数	(219)
9.4.6	统计方面的问题	(225)
9.5	用时域法的密度测量	(228)
9.5.1	频率抖动密度的测量	(228)
9.5.2	相位噪声密度的测量	(232)
9.5.3	统计方面的问题	(232)
9.5.4	哈达玛方差	(232)
9.6	已知总的频率抖动时相位噪声密度的计算	(233)
9.6.1	(N_{ϕ}/C) 服从 $1/f^3$ 律的情形	(233)
9.6.2	其它已知分布律的情形	(235)

第十章 系统相位噪声要求

10.1	单抛物面天线纯连续波雷达系统	(237)
10.1.1	概述	(237)
10.1.2	具有寄生调幅和调相的信号延迟反射	(241)
10.1.3	允许的调幅	(245)
10.1.4	允许的调相	(252)
10.1.5	单边带信号和双边带干扰	(258)
10.2	采用高频偏线性调频的雷达	(260)
10.2.1	调频雷达的类型	(260)
10.2.2	要求的频偏	(262)
10.2.3	寄生调幅和调相	(265)

10.3	用单路单载波调频(SCPC-FM)的通信系统	(268)
10.3.1	引言	(268)
10.3.2	简单调频系统的相噪要求	(270)
10.3.3	附加预加重和去加重	(277)
10.4	频分复用/调频(FDM/FM)通信系统	(280)
10.4.1	引言	(280)
10.4.2	要求的 C/N_0 值	(280)
10.4.3	相噪要求	(283)
10.5	采用相移键控(PSK)的通信系统	(285)
10.5.1	引言	(285)
10.5.2	载波恢复环	(288)
10.5.3	信号差错率(相干解调)	(296)
10.5.4	时钟恢复	(303)
10.5.5	PSK信号的差分检测	(304)
10.5.6	相位瞬变的影响	(313)
10.6	天线跟踪	(317)
附录一	重要公式汇总	(322)
附录二	噪声系数和噪声温度复习	(329)
附录三	窄带噪声的正交表示	(345)
附录四	变容管调谐振荡器的 Q	(350)
附录五	甘氏振荡器的相噪性能	(356)
	参考文献	(358)

第 一 章

序 言

1.1 频谱纯度的重要性

在通信、雷达和类似的系统中，需要采用信号源作为日趋复杂的基带信息的载波。为实现频率的转换，也要利用信号源作为本机振荡器或泵源。简单的信号源可能只是一个单独的晶体振荡器或者是一个手动调谐振荡器。随着频谱用处的增多，信号源标定频率的允许容差不断地减小。这就有必要研制更加复杂的信号源。对单频工作来说，这些信号源通常是由晶体振荡器后面跟随放大器和倍频器组成的。需要手动或遥控精确选择频率的场合，通常都指定要用频率合成器。

关于信号源的一个自然的看法可能是认为它在单一频率下有输出。就是说，在频域中，它的频谱是一根无限窄的线（ δ 函数）。实际上，只要振荡器不是在无限的时间内接通的，就会使最终的谱线具有一有限的宽度。实际的信号源，即使是那些质量最高的，也还存在其它一些不完善性，使载波产生不需要的调幅和调相。

如果一个带有不需要的调幅或调相的载波被载有信息的基带信号调幅或调相，则信号质量或通信线路的误码率将因存在不需要的载波调制而变坏。实际上，寄生调相在技术上和经济上比寄生调幅更重要。这部分地是因为大多数大容量因而也是昂贵的通信系统是采用角调制的，即调频或调相的；同时也由于复杂信号源中的寄生调幅电平通常比寄生调相低得多。在许多稳定的高频信号源中，倍频是必需的，它将使不需要的角调制恶化，但并不一定使不需要的调幅恶化，这一点将在本书6.2节的分析中看到。寄生角调制显

得更加重要的另一个理由在于一发射机或接收机中的本机振荡器的调频或调相将直接转移到要进行频率转换的信号上去，而本机振荡器调幅的影响可采用平衡混频器来显著地减弱。

通信线路性能的少量恶化在经济上很重要，这一点通过考虑一国际卫星通信系统可以充分地加以说明（方式很粗略，但结果很明白）。寿命十年以上的卫星通信系统的总价值（包括空间部分和全部地球站的价值以及职员薪金）可能超过 3 亿英镑。3dB 的性能恶化会使通信容量减半。恢复最初要求的通信容量的一个方法（虽然明显地不是最经济的）可能是再化 3 亿英镑复制该完整系统。因此，我们可以粗略地说，在该系统中，3dB 相当于 3 亿英镑，因而 0.1dB 大约相当于 1 千万英镑。举这个很不合理的例子纯粹是为了强调：在这样一个系统中，少量的信号恶化的代价是很高的。因此，采用相当复杂的步骤来降低线路恶化，在经济上证明是合理的。

随着卫星通信系统的发展、星上射频功率和天线增益的增加，出现一种发展趋势：即设计采用廉价的、在数量上可能很多的小型地球站的系统，从而可以节省联系遥远的用户和地球站之间的地面线路（参考文献〔1〕和〔2〕）。采用低劣值指数的小型地球站意味着每个站的话务容量是有限的。为了避免在各地球站进行复杂的信号处理，通向单个地球站的信号（可能是一路电话信道或是一个或多个数据信道）通常是调制在一个专门通向该站的载波上的。因此，对这样一个系统来说，有采用单路单载波（SCPC）工作的发展趋势。通向某一很小的地球站的载波实际上可能仅载有单个低速率的信道。如果是利用频移键控或相移键控对有关载波进行角调制，则载波的任何寄生调相（其调制速率与数据流的速率相当时）将使信号恶化。当使用的比特率很低时，做到低电平的低调制速率寄生调相就变得越来越重要。时域中较低速率的寄生调相等效于频域中紧邻载波的寄生相位边带。

在靠近载波处，即在小的偏移频率处，达到频谱纯净要比在大

的偏移频率处更加困难。其原因将在以后说明。在时域中，这意味着高速率的寄生调制比低速率的这一调制更易于控制。为此，了解信号源中相位噪声的机理作为控制和减小它的第一步就变得日益重要。

1.2 着重物理概念的理解

本著作的主要意图着重于帮助读者求得物理意义的理解，使用的数学分析只是足以对每一因素作出定量估计。在作不可避免的数学分析时将选用一些符号来表示其物理意义和它们与可测参量间的关系。书中将尽可能采用常用符号，但当这些符号的用法与物理意义的理解有抵触时将采用新符号，并说明它们与常用符号的关系。

除了在后面章节中会提到的那些情况以外，所用到的每一个公式都将从最初的原理导出。此外，分析将以不断完善的方式来实现。首先处理比较简单、而通常又是重要的问题。

作者认为，如果读者坐在安乐椅中，不拿纸和笔对那些通常是留给读者的问题进行中间过程的计算，是不可能有效地理解大多数教科书和技术论文的。当然，就简单而言，这一方法是便利的。但是，除那些对数学运算极其熟练的人以外，对不熟悉该领域的新手来说则是个大缺点。因此，我们打算阐明每一行数学讨论并采用最基本的数学形式，这与充分的讨论是一致的。

大多数通信和雷达工程师是熟悉放大器和变频器的噪声性能的，但通常不大熟悉与信号源相位噪声有关的问题以及相位噪声的要求，而这些在任何一种特定的系统中是必定会遇到的。为此，尽管在附录二中给出了一个简单的复习，我们将假定读者是了解系统噪声温度、放大器噪声和变频器噪声系数计算的。据此设想，我们希望对相位噪声的分析达到简洁而又逐步详尽的程度。

因此，本书讨论的主要论题如下：