

无间隙采样在近载频相位噪声测量中的应用

沈小青, 楼 扬, 石明华, 叶玲玲

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 本地振荡器是雷达或通信系统的核心器件, 其相位噪声指标决定了发射机和接收机的性能; 通过对常用相位噪声测试方法的比较, 分析了这几种方法各自的特点, 特别是针对时间频率中高分辨率及无间隙测量能力结合的计数器, 研究了其在近载频相位噪声中的测试及数据分析处理方法, 该方法在查找和消除高性能振荡器的噪声源中具有较大的价值。

关键词: 相位噪声; 近载频; 无间隙采样; 高分辨率

Application of Gapless Sample in Measurement of Phase Noise Close to a Carrier Signal

Shen Xiaoqing, Lou Yang, Shi Minghua, Ye Lingling

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: The local oscillator is the core device in radar or communications system, phase noise indicator of which determines the performance of the transmitter and receiver. This paper analysed the characteristics of each of these methods by comparing the common measurement methods of phase noise. This paper Researched the measurement and processing methods of the counter in phase noise close to a carrier signal, the counter combined with high resolution and gapless measure especially. This method has a great value in locating and eliminate the noise source in high performance oscillator.

Key words: phase noise; close to a carrier signal; gapless sample; high resolution

0 引言

在雷达系统中, 接收机本振相位噪声确定了探测目标的返回信号最小电平。相位噪声影响到雷达接收机的选择性, 从而决定了整个系统的有效范围。由于雷达系统的所有动态范围受发射机噪声影响, 进行载频的绝对相位噪声测量来确定系统总体性能是非常有必要的。对于远离载频的噪声, 频谱分析仪或信号分析仪就可以分析载频周围的频谱内容, 但这种测量方案对于分析非常接近载频(如偏离载频小于 10 Hz 的噪声)的相位噪声就不适宜。

1 近载频相位噪声测试方法比较

相位噪声测量分为连续波和调制波两大类, 每一类又可分为频率源的相位噪声(称绝对相位噪声)和频率控制部件(二端口、三端口部件)的相位噪声(称附加噪声)测量。本文论述的仅指连续波相位噪声测量。

1.1 直接频谱仪法

在直接频谱仪法中, 被测连续波信号直接输入频谱仪或与参考源混频后进入频谱仪进行测试, 其中使用参考源时其相位噪声应比被测源的低 10 dB 以上, 否则应考虑参考源对测量结果的影响。单边带相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ 计算公式如式(1)所示。

$$\mathcal{L}(f) = P_m - P_c - 10 \log B_n + C \quad (1)$$

式中, P_m 为偏离载频 f 处的边带电平, 单位为 dBm; P_c 为载频功率电平, 单位为 dBm; B_n 为频谱仪的等效噪声带宽, 单位为 Hz; C 为频谱仪测量随机噪声的修正值, 单位为 dB。

直接频谱仪法测试结果为单边带相位噪声, 无须转换计算。适用于直接测量低性能连续波近载频相位噪声。由于频谱仪性能限制, 不宜测量高频谱纯度的源。该方法不能区分调幅噪声和相位噪声, 适用于调幅噪声远小于相位噪声的连续波测试。

1.2 相位检波法

相位检波法采用相位正交锁相原理。被测信号与参考信号同频正交, 相位起伏可以转换为电压起伏, 参考信号的相位起伏足够小的情况下, 即可通过电压起伏计算出被测连续波的相位起伏。

设被测信号为:

$$U_1(t) = U_s \sin(2\pi f_0 t + \varphi_s(t)) \quad (2)$$

参考信号为:

$$U_2(t) = U_r \sin(2\pi f_0 t + \varphi_r(t) + \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

式中, U_s 、 U_r 为信号幅度, f_0 为信号频率, $\varphi_s(t)$ 、 $\varphi_r(t)$ 为相位起伏。两个信号的频率相等, 相位相差 90° , 经过鉴相器(鉴相器的作用相当于乘法器)后, 和频被低通滤波器滤除, 差拍信号为:

$$\Delta U = \frac{1}{2} K U_s U_r \sin(\varphi_s(t) - \varphi_r(t)) = \frac{1}{2} K U_s U_r \sin \Delta \varphi(t) \quad (4)$$

当 $\Delta \varphi(t)$ 的峰值小于 0.2 rad, 上式可近似写成:

$$\Delta U = \frac{1}{2} K U_s U_r \Delta \varphi(t) \quad (5)$$

由上式可以看出, 当参考信号影响足够小, 连续波相位起伏可以通过电压起伏进行测量。

相位检波法测量灵敏度高、具有调幅抑制能力, 适用于高

收稿日期: 2013-12-10; 修回日期: 2014-01-29。

作者简介: 沈小青(1971-), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事计量测试方向的研究。

稳定低噪声原子频标、高稳晶振等相位噪声测量。由于相位检波法与直接频谱仪法不同, 测量的是相位起伏谱密度 $S_p(f)$, 只有满足小角度调制条件下才能计算求得单边带相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ [1]。

1.3 鉴频器法

鉴频器法中, 鉴频器种类繁多, 经常使用的为延迟线/混频器鉴频器法, 简称延迟线鉴频器法。被测连续波频率起伏 Δf 通过延迟线后转化成相位起伏, 检测出来, 变成电压起伏 ΔU_{ms} , 再用频谱仪分析测量。

延迟线鉴频器的宽带噪声底部由混频器决定, 故其远离载频的灵敏度与相位检波器法相同, 有极低的宽带噪声底部, 同样具有对调幅噪声的抑制能力; 但近载频噪声高, 不适用于测量具有低的近载频噪声的信号, 同相位检波器法一样, 只有满足小角度调制条件下才能计算求得单边带相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ 。

1.4 计数器法

计数器法是一种时域分析法。适用于测量高频谱纯度信号的近载频相位噪声, 在靠近载频处, 计数器法的灵敏度在目前的各种方法中最高, 特别适合测量高稳定时频标准的近载频相位噪声。

计数器法测得的是阿伦方差或哈达玛方差, 系统灵敏度随所选混频输出频率 f_b 的降低而提高, 随分析的频率的增加而按频率的倒数规律改善。因此在分析近载频 (低于 100 Hz) 的相位噪声时, 由于可选用低的 f_b , 系统具有极高的灵敏度, 这是差拍计数器法的主要优点。

1.5 四种测量方法比较

相位噪声测量方法原理不同, 适用场合也不同, 应根据测量需求选择合适的测量方法及合适的测量设备, 表 1 给出了通用相位噪声测量方法解决方案, 并做了比较。

表 1 通用相位噪声测量解决方案

测量原理	优点	局限	典型测量仪器
直接频谱测量法	操作简易; 可快速测量	不能测量如晶振高稳定源近载频相噪; 测量包含调幅信号	FSP, E4440A, N9020A 等
相位检波法 (参考源/锁相环)	配置低噪参考源 可测近载频相噪; 可测量脉冲调制相噪	相噪测量受参考源限制; 使用和校准复杂	PN9000, E5500A, 3048A 等
鉴频器法	可测载频远端极低相噪; 适合测量 YIG 振荡器	不适合测量载频近端相噪; 使用和校准复杂	PN9000, E5500A, 3048A 等
计数器法	测量灵敏度高; 可进行调制域分析 (需无间隙测量), 成本低	适合于近载频相噪测量; 测量结果为阿伦方差需进行转换得到相位噪声	5390A, 53230A

2 无间隙测量及数据分析

2.1 无间隙测量

随着计数器技术的发展, 真正意义的无间隙采样技术近两年在国外的新款计数器 Agilent 53230A 上得到了应用, 无需采用修正阿伦方差, 即可直接按定义计算, 减少了不确定度来源。无间隙采样是计数器测量频率和定时事件的一种方式, 测

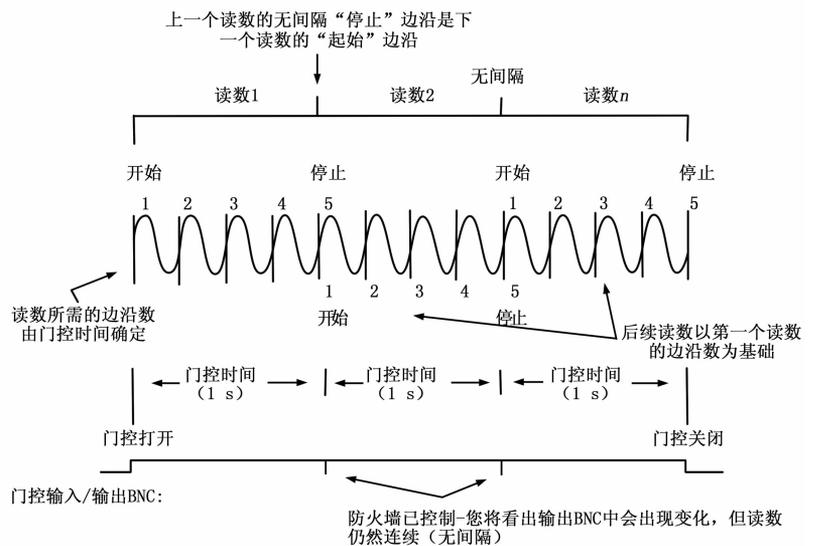


图 1 53230A 连续无间隙的测量序列 [2]

量原理如图 1 所示, 它依靠一个边缘触发或捕获一个边缘事件, 之后捕获另一个之后再返回, 可以不断地捕捉或捕获信号边缘, 一个接一个, 无需重新配置, 也不会中断, 无间隙的测量能力, 由于无须重置时间, 信号边沿可以连续无间隙测量, 从而可以得到信号的完整轮廓而不跳过信号的任何一个部分。普通计数器, 计数器经过测量闸门和下一个闸门开始需前经历一个重置周期, 此时信号数据因仪器重置被错过。

2.2 数据分析

计数器法测量相位噪声是一种间接测量方法, 由于是一种时域分析方法, 测量过程与时域的差拍法 (测阿伦方差) 完全一样。阿伦方差法是 20 世纪 60 年代由美国国家标准局的 David Allan 提出, 1971 年 CCIR 正式决定用阿伦方差作为时域频率稳定度的表征。

设连续波信号:

$$V(t) = [V_0 + \epsilon(t)] \cos[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] \quad (6)$$

则时间偏差 $x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu_0}$; 频率偏差 $y(t) = \frac{\varphi'(t)}{2\pi\nu_0}$ 。

阿伦方差的定义:

$$\sigma_y^2(\tau) = \sigma_y^2(2, \tau, \tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle = \frac{1}{2\tau^2} \langle (x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n)^2 \rangle \quad (7)$$

阿伦偏差:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)} \quad (8)$$

阿伦方差是基于两次取样测量之间无间隙得到, 在过去的计数器法测量中, 由于技术限制, 往往做不到两次取样测量之间没有间隙, 测量结果只能有用间隙阿伦方差 $\langle \sigma_y(2, T, \tau) \rangle$ 来替代无间隙阿伦方差 $\langle \sigma_y(2, \tau, \tau) \rangle$, 产生误差是必然的。

如何从有间隙阿伦方差测量中得到无间隙阿伦方差, 巴纳斯研究了广义阿伦方差 $\langle \sigma_y(N, T, \tau) \rangle$ 、有间隙阿伦方差和无间隙阿伦方差之间的关系, 提出了巴纳斯偏函数^[3]来表示它们。

巴纳斯第一偏函数:

$$B_1(N, \gamma, \mu) = \frac{\text{广义阿伦方差}}{\text{有间隙阿伦方差}} = \frac{\sigma_y^2(N, T, \tau)}{\sigma_y^2(2, T, \tau)} \quad (9)$$

巴纳斯第二偏函数:

$$B_2(\gamma, \mu) = \frac{\text{有间隙阿伦方差}}{\text{无间隙阿伦方差}} = \frac{\sigma_y^2(2, T, \tau)}{\sigma_y^2(2, \tau, \tau)} \quad (10)$$

式中, γ 为取样比, $\gamma = T/\tau$;

μ 为时域噪声系数, 对应频率随机游动噪声、调频闪变噪声、调频白噪声、调相闪变噪声、调相白噪声分别为 1, 0, -1, -2, -2。

巴纳斯偏函数法给出了几种方差之间的关系, 但实际测量中如果存在测量间隙, 还需判别信号所含噪声类型才能确定采样指数, 然后才能查找巴纳斯偏函数表计算阿伦方差。通过分析, 可以看出通过无间隙测量实现真正的无间隙阿伦方差测量具有较大的优势。

计数器法一般用于高质量连续波近载频测试, 而高质量连续波噪声边带以频谱特性中不同斜率区分, 由频率随机游动噪声、调频闪变噪声、调频白噪声、调相闪变噪声、调相白噪声组成, 谱密度的幂率谱模型如图 2 所示, 测量得到的是时域量阿伦方差, 相位噪声作为频率频域稳定度的表征, 而阿伦方差作为频率频域稳定度的表征, 两者可以相互转换。如需转换成频域量相对频率起伏谱密度, 按表 2 可实现时域参数到频域参数的转换。

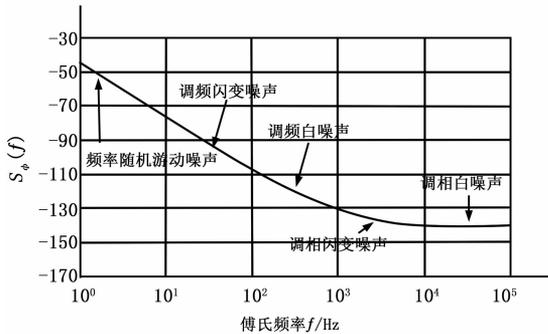


图 2 幂率谱模型

表 2 由 $\sigma_y^2(\tau)$ 转换为 $S_y(f)$

噪声类型	α	μ	$\sigma_y^2(\tau)$	$S_y(f)$
调相白噪声	2	-2	$\sigma_y^2(+2)$	$\frac{4\pi^2\tau^2}{3f_h}\sigma_y^2(+2)$
调相闪变噪声	1	-2	$\sigma_y^2(+1)$	$\frac{4\pi^2\tau^2\sigma_y^2(+2)}{C+3\ln(2\pi f_h\tau)}$
调频白噪声	0	-1	$\sigma_y^2(0)$	$2\omega_y^2(0)$
调频闪变噪声	-1	0	$\sigma_y^2(-1)$	$\frac{\sigma_y^2(-1)}{2\ln 2}$
频率随机游动噪声	-2	1	$\sigma_y^2(-2)$	$\frac{3\sigma_y^2(-2)}{2\pi^2\tau}$

2.3 分析应用

下面以具体实例来说明无间隙测量方法在近载频相位噪声

测量的优势, 第一个例子中信号发生器模拟 100 MHz 载频, 0.5 Hz 三角波噪声频率调制信号, 频偏设置为 2 Hz, 频谱仪测试结果如图 3, PN9000 测试结果如图 4。

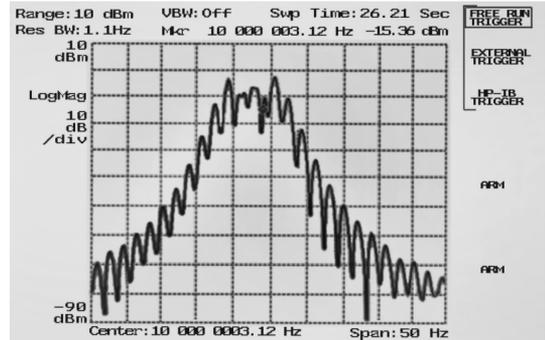


图 3 频谱仪测试结果

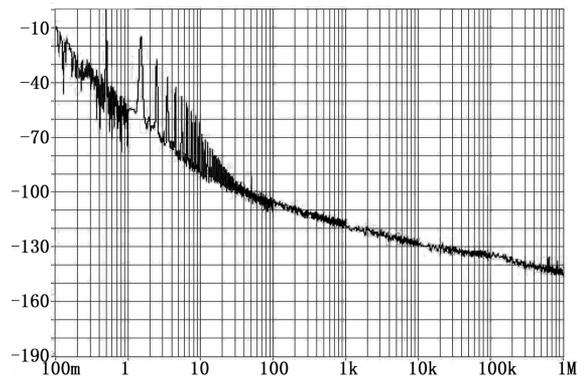


图 4 PN9000 测试结果

使用 53230A 测量时, 设置无间隙测量速率为 10 ms, 获取 1 000 次测量数据, 通过 MATLAB 绘制频率时间图进行快速的调制域分析, 得到的测试结果如图 5。

通过比较可以看出, 由于 FM 调制信号频率与载频频率仅相差 2 Hz, 频谱分析仪显示为载频附近的 FM 或 PM 杂乱的频谱内容, PN9000 虽然能看出近载频处有周期性的噪声, 但无法判断噪声的波形, 两者都难以发现噪声的根源。与此相反, 调制域绘图清楚显示出了底层噪声源的时域形状, 即加入到 100 MHz 的载频的 FM 三角波噪声。这对查找寄生耦合噪声非常有用, 杂散耦合噪声往往可能由电源, 变压器或机电元件产生的。

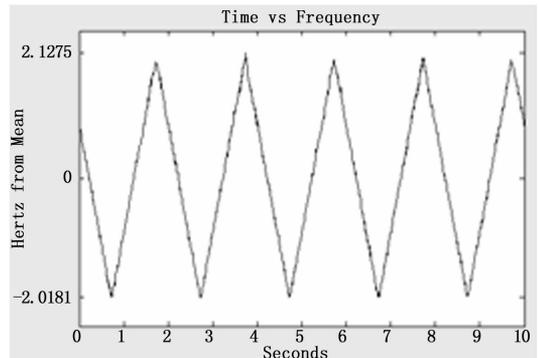


图 5 调制域图显示出加入到 100 MHz 的载频的 FM 三角波噪声

模过程中,采用 2008 年的 200 组数据对 ESN 网络进行学习,2010 年的 200 组数据用于测试。图 6 显示了两种方式下 ESN 的建模效果(图 6 (a) 为在线学习,图 6 (b) 为离线学习)。

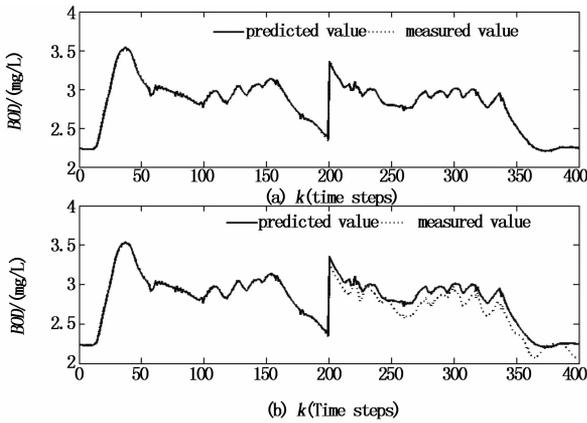


图 6 不同工况下的模型适应性对比

由图 6 (a) 可见,在线学习的情况下,ESN 预测模型能够在不同的工况下获得较好的预测结果。而离线学习(图 6 (b))的 ESN 模型虽然在学习时获得了较高的精度,但是,当工况发生变化时,模型预测的精度明显降低。这说明在线模型较离线模型有更好的适应性,其能够适应变化的情况。

3 结论

BOD 是污水处理过程的关键水质参数之一,对其进行实时的预测对于实现水质参数的闭环优化控制具有重要意义^[9]。

BOD 的在线 ESN 模型在学习算法收敛的情况下,能够获得较高的精度,与离线的模型相比,在线 ESN 模型具有较好的工况适应性。

参考文献:

[1] Dellana S A, West D. Predictive modeling for wastewater applications: Linear and nonlinear approaches [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24 (1): 96-106.
 [2] 刘载文,崔莉凤,祁国强,等. SBR 出水 BOD 值的 RBF 软测量法[J]. *中国给水排水*, 2004, 20 (5): 18-20.
 [3] 田奕,乔俊飞. 基于遗传算法的 BOD 神经网络软测量[J]. *计算机技术与发展*, 2009, 19 (3): 127-133.
 [4] 杨维维,乔俊飞. 基于高阶递归神经网络的污水处理系统建模[J]. *信息与控制*, 2011, 40 (5): 710-714, 720.
 [5] Jaeger H. The echo state approach to analysing and training recurrent neural networks [R]. GMD Report German National Research Center for Information Technology, 2001, 12 (8): 1-43.
 [6] Lukochecksevicius, Jaeger H. Reservoir computing approaches to recurrent neural network training [J]. *Computer Science Review*, 2009, 3 (3): 127-149.
 [7] Jaeger H. Harnessing Nonlinearity: Predicting Chaotic Systems and Saving Energy in Wireless Communication [J]. *Science*, 2004, 304 (5667): 78-80.
 [8] Ozturk M C, Xu D G, Principe J C. Analysis and Design of Echo State Networks [J]. *Neural Computation*, 2007, 19: 111-138.
 [9] 孙红,吴钱忠,王晓婉,等. BAF 小区生活污水处理智能控制系统应用[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21 (5): 1233-1235.



(上接第 1332 页)

第二个例子使用了阿伦偏差来分析一个 4 GHz LO 信号。测试信号为调制 0.5 Hz 三角波 2 Hz 频偏的调频信号。53230A 设置无间隙测量速率为 10 ms,进行 1 000 次测量,产生 10 s 数据。阿伦偏差计算时 τ 值范围从 10 ms 至 5 s,执行“all tau analysis”数据分析^[4]。通过“all Tau analysis”可以很容易辨认低频周期干扰^[4]。“all tau analysis”绘图使用 MATLAB 产生如图 6。

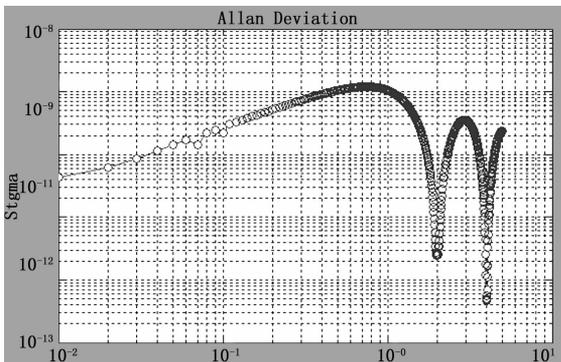


图 6 执行“all tau analysis”数据分析可以很容易辨认低频周期干扰

文献 [4] 揭示了“all tau analysis”数据分析中阿伦方差的极点以周期性干扰信号的半周期或全周期出现,在图 6 中,

阿伦方差极点对应的 τ 值与附加的调制信号周期完全吻合,在阿伦偏差测量中对应某些 τ 值的下降及趋势变化,揭示出影响信号寄生噪声频率范围。这种噪声分析尤其有助于查明接近被测信号的噪声来源,可以用来减少或消除噪声。

3 结束语

相位噪声参数是评估连续波信号频率短期稳定度的重要指标^[5],尤其是近载频相位噪声性能对雷达系统的作用距离,目标分辨率,数字通信系统的误码率等都有直接影响。本文论述的无间隙采样技术不仅可以方便地捕捉近载频相位噪声,还可以查找高性能振荡器噪声源的线索,从而减少甚至消除高性能振荡器中的噪声。

参考文献:

[1] Agilent, Agilent Radar Measurements [Z]. 5989-7575EN, 70-76.
 [2] Agilent, Agilent 53, 220A/53, 230A user guide [Z]. 53220-90417, p71.
 [3] Riley W J. Handbook of Frequency Stability Analysis [M]. NIST Special Publication 1065, p59.
 [4] Riley W J. Methodologies for Time - Domain Frequency Stability Measurement and Analysis [DB/OL]. <http://www.wiley.com/M-ETHODOLOGIES.pdf>, p8-9.
 [5] 战永红,等. 一种改进的时钟定时抖动估计方法[J]. *计算机测量与控制*, 2008, (3): 411-414.