

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108386

本振相位噪声对解调损失影响的评估方法研究

余清华 邱斌 沈小青 王志虎 孙建

(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

摘要: 针对频率源的相位噪声随着频偏变化难以准确取值以致无法实现其对解调损失的影响进行评估的问题,提出了采用相位噪声等效面积法替代单点取值的方法。通过对相位噪声曲线分段计算面积再积分的方式计算相位噪声总功率,并以面积等效计算平均相位噪声功率。以计算的平均相位噪声功率为输入,在 MATLAB 中仿真 PCM/BPSK 调制解调过程受相位噪声的影响,并与相同条件下实际设备上的测试结果进行对比,两者在相同误码率水平下的 E_b/N_0 相差在 0.7 dB 范围内,扣除高斯白噪声下的解调损失后最大相差 0.3 dB。对比试验表明,该方法可用于实际测试。

关键词: 解调损失评估;相位噪声;等效面积法

中图分类号: TB973 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Research on evaluation of demodulation loss due to phase noise of OCXO

Yu Qinghua Qiu Bin Shen Xiaoqing Wang Zhihu Sun Jian

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

Abstract: To acquire the optimum value of the phase noise of signal source which is changing with the deviation of frequency from the carrier, area equivalent algorithmic is proposed to replace single-point method. The average power of phase noise is calculated by area equivalent algorithmic which utilize integration of area assuming the acquisition interval as a rectangle. Simulation was carried out using the average power of phase noise as only inference in the PCM/BPSK demodulation process, and the difference between the results of experiment in the same condition and simulation is no more than 0.7 dB termed as E_b/N_0 in the input, which is within 0.3 dB compare to the demodulation loss acquired in white Gaussian noise. Experiments results prove that it is a practical method in test.

Keywords: demodulation loss evaluation; phase noise; area equivalent algorithmic

0 引言

在理想的线性数字传输系统中,一旦调制/解调方式选定,则误码率取决于 E_b/N_0 值,这时的 E_b/N_0 值称为 E_b/N_0 理论值。但实际系统可能并未达到“理想”,存在着各种影响误码的因素,因此要达到同一要求的误码率时,实际上需要更大的 E_b/N_0 ,其增大的数值称为 E_b/N_0 恶化量,也就是解调损失^[1]。影响解调损失的因素很多,如相位噪声、时钟抖动、带宽受限以及带内平坦度等^[2-9]。其中相位噪声指的是各种频率源所具有的相位噪声,它包括主振器、收/发本振、原子钟以及各种频率基准源,其对解调损失影响的评估很特别,它们的相位噪声是一条曲线,且该曲线随着离载波频偏大小而改变,无法直接在曲线上取单值去代替整条曲线,很难实现曲线数学解析化,也无法将整条曲线作为输入评估相位噪声的影响(过于复杂)^[10-14]。基于以

上原因,本文针对现代相位噪声测量仪器的测量结果离散量化的特点,提出积分法求等效相位噪声功率,并将这种方法的得到的结论作为仿真和实验的输入来评估相位噪声对解调损失的影响,来对比验证该方法的合理性。

1 相位噪声的量化及对解调损失的影响分析

幅度高斯白噪声引起的相位噪声谱密度是平坦的相位白噪声,其单边带相位噪声功率谱密度值 φ_{n_0} ,可表示为^[15]:

$$\varphi_{n_0} = N_0/C \quad (1)$$

式中: N_0 为噪声功率谱密度, C 为信号功率, φ_{n_0} 其单位为 rad^2/Hz 或者 dBc/Hz 。那么幅度噪声引起的相位抖动均方值 σ_φ^2 可表示为:

$$\sigma_\varphi^2 = 2\varphi_{n_0} B_n = 2(N_0/C)B_n \quad (2)$$

其中, B_n 为接收系统的等效带宽, σ_φ^2 的单位为 rad^2 。

收稿日期: 2021-11-18

以 PSK 系统为例进行分析, E_b/N_0 的表达式如下:

$$E_b/N_0 = \frac{C}{N_0} \cdot \frac{1}{b_r} \quad (3)$$

其中, b_r 为码速率, 将式(2)代入式(3)得到相位白噪声引起的等效 E_b/N_0 , 即:

$$E_b/N_0 = 1/(\varphi_{n_0} b_r) \quad (4)$$

由于幅度噪声引起 PSK 误码的实质是幅度噪声引起了 PSK 的相位抖动(其均方值为 σ_φ^2)。它使 PSK 解调出的数字码信号有幅度起伏, 从而产生误码, 因此相位噪声对误码率的影响可等效于产生相同相位噪声的幅度噪声 E_b/N_0 的影响, 由式(4)可知在高速数传时(b_r 大)和高载频时(φ_{n_0} 大), 相位噪声对误码率的影响越大。

当不是相位白噪声时(实际工程中, 大多是此类), 可以用一个等效的单边相位白噪声谱密度 φ_{n_0} 来代替 $\varphi_{n_0}(f)$ 。由 Φ_{n_0} 就可求得误码率, 因此误码率对相位噪声的要求就可转变为对 Φ_{n_0} 的要求。这个替代的条件是:

$$\Phi_{n_0} b_r = \int_0^{b_r} \varphi_{n_0}(f) df \quad (5)$$

用式(5)求 Φ_{n_0} 有如下 2 种方法:

1) 当已知 $\varphi_{n_0}(f)$ 的测量值时, 用计算机求积分, 如图 1 所示。

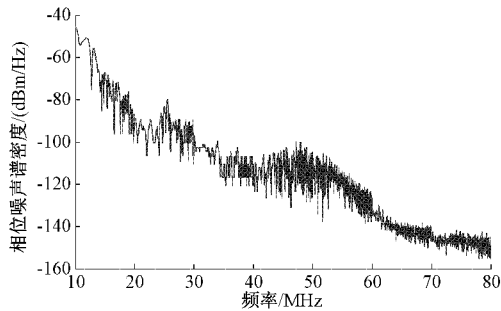


图 1 频率源的相位噪声曲线

利用测量仪器对待测设备的相位噪声进行测量, 将测量数据存储为 MATLAB 可读取的格式。将整段曲线分割为有限个矩形窗(以测量仪器频率采样间隔为长, 以频率间隔两端的相位噪声谱密度的中值为宽, 并计算面积, 即为相位噪声功率), 其示意图如图 2 所示, 再将所有矩形窗的面积进行累加, 得到指定频偏范围内的相位噪声总功率。阴影部分面积即为阴影部分相位噪声功率 $S_i = \frac{\varphi(f_1) + \varphi(f_2)}{2} \cdot (f_2 - f_1)$, 指定频率范围内的相位噪声总功率为 $S = \sum_{i=1}^m S_i$, 再根据式(5)计算等效噪声功率谱密度 Φ_{n_0} 。

2) 当已知如图 3 所示的相位噪声幂律谱曲线时, 式(5)可用作图法求解^[16], 使式中左、右两端的面积相等来代替件 $\varphi_{n_0}(f)$ 。在面积 $A=B$ 时求得 Φ_{n_0} , 然后再计算由相位噪声引起的误码率。由图 3 可知, $\varphi_{n_0}(f)$ 的主要分量

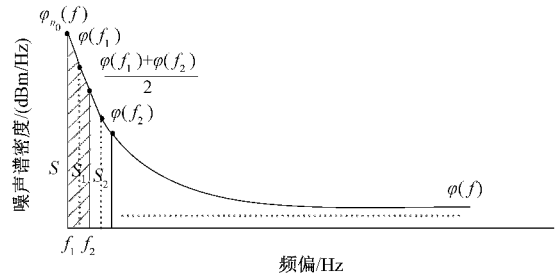


图 2 积分法原理示意图

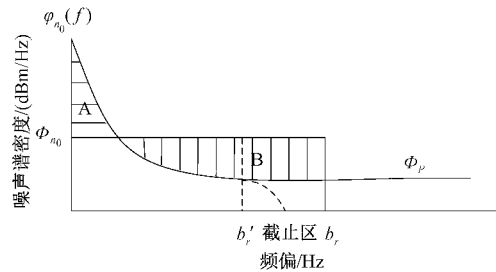


图 3 等效面积法

为相位白噪声频谱密度 Φ_p , 则 $\Phi_{n_0} \approx \Phi_p$ 。

值得指出的是: 图 1 中, 在 f 很高时, 其 $\varphi_{n_0}(f)$ 为恒值, 假设只是一个幂律谱理论模型(相位噪声指标往往基于这种模型), 而实际的信号源相位噪声, 在 f 高端不一定是恒值(如锁相环、电路频响等影响), 而可能是存在一个如图 3 中虚线所示的截止区, 这就会使等效 Φ_{n_0} 减小, 减小为 $\varphi_{n_0} \frac{b_r'}{b_r}$ (b_r' 为截止区的带宽), 这时对应的一定误码率要求下的为 $E_b/N_0 = 1/(\varphi_{n_0} b_r')$, 因此一定误码率要求下的噪声功率谱密度为:

$$\Phi_{n_0} \approx \Phi_p = \frac{N_0}{E_b} \frac{1}{b_r} \quad (6)$$

下面分析由相位噪声引起的等效载噪比恶化量 L_r (它对应于 E_b/N_0 的变化量)。式(6)由幅度噪声引起的相位抖动均方值为:

$$\sigma_\varphi^2 = 2(N_0/C)B_n \quad (7)$$

相位噪声引起的抖动均方值为:

$$\sigma_\Phi^2 = 2\Phi_{n_0} B_n \quad (8)$$

二者之和为 $\sigma_\varphi^2 + \sigma_\Phi^2$, 由式(7)可见, σ_φ^2 随 N_0/C 的增加而成比例增加, 故由相位噪声的加入而引起的相位抖动增加量等效于载噪比的恶化量 L_r , 即:

$$L_r = (\sigma_\varphi^2 + \sigma_\Phi^2)/\sigma_\varphi^2 = 1 + \frac{\sigma_\Phi^2}{\sigma_\varphi^2} \quad (9)$$

将式(7)和(8)代入得:

$$L_r = 1 + \frac{E_b}{N_0} b_r \frac{b_r'}{B_n} \quad (10)$$

当 $b_r = B_n$ 时, $L_r = 1 + \frac{E_b}{N_0} \Phi_{n_0} b_r'$ 。由式(10)可求得一定的误码率(对应于 E_b/N_0) 和码速率 b_r 时, 由等效相

位白噪声 Φ_{n_0} 引起的等效载噪比恶化量。

积分法和作图法均可作计算等效相位噪声谱密度的方法,但一般来说,作图法的计算精度较差,因为一般不会出现如图 3 所示的完美曲线,且纵轴为对数刻度,不好取值,难免产生误差,因此建议在数据可获取的情况下采用积分法计算。

2 仿真与实验

为验证积分法求等效噪声谱密度的有效性,拟采用对比实验。方法 1:将相位噪声恶化后的信号直接输入接收设备,实测系统的误码率,建立 E_b/N_0 与误码率曲线;方法 2:通过积分法求等效噪声谱密度后,以等效噪声谱密度作为仿真输入,仿真得到 E_b/N_0 与误码率曲线,并在每个误码率点上将设备的解调损失扣除(解调损失由在高斯白噪声下测试得到),并重新绘制曲线。对比两条曲线的差异。

以 5182A 输出的 10 MHz 信号作为基带设备的频标输入外参考,通过仪器自带模块实现输出信号的相位噪声恶化。利用频谱仪在 70 MHz 中频输出处测量恶化后的相位噪声,将测量的结果经计算处理后作为仿真的输入,仿真得到与误码率的关系,同时数字基带中频闭环测量误码率,记录并计算此时输入端的 E_b/N_0 ,解调损失为高斯白噪声下同一误码率下的理论与实测的差值。

利用 FSW 测量基带设备 70 MHz 中频输出的相位噪声(未恶化前)以及相位噪声(外参考相位噪声恶化后),并通过计算机软件将相位噪声的测量数据采集,测得的相位噪声如图 4 所示。将测量得到进行换算得到功率;将相位噪声采集的数据,根据第 2 节中提到的方法 1 进行计算,计算时,仅考虑 1 MHz 范围内的相位噪声(因为 BPSK 调制体制的码率为 1 Mbit/s,中频带宽为 2 MHz),得到如表 1 所示数据。

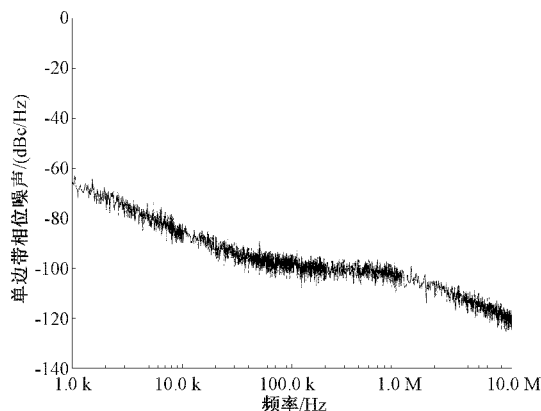


图 4 70 MHz 中频输出的相位噪声

表 1 实验参数表

测试条件	参数 1	参数 2	计算参数 1	计算参数 2
相位噪声未恶化	$C = -12$ dBm	$N_0 = -83.4$ (dBm/Hz)	$\frac{E_b}{N_0} = 11.4$ dBHz	$\sigma_\varphi^2 = -20.4$ dBm
相位噪声恶化后	—	—	$\Phi_{n_0} = -92.6$ dBm/Hz	$\sigma_\varphi^2 = -32.6$ dBm (单边带)

仿真采用的是数字基带等效+蒙特卡洛仿真,仿真的码元数大于 $100/P_e$, P_e 为误码率。其仿真执行图如图 5 所示。

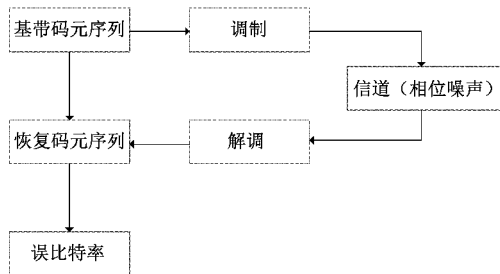


图 5 仿真执行图

对比试验的结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,实测结果与仿真结果减去设备在相位噪声未恶化时的解调损失对比,在误码率为 1×10^{-4} 、 1×10^{-5} 、 1×10^{-6} 时,对应的最大相差 0.3 dB。实验结果表明,采用积分法求等效相位噪声的方法评估本振相位噪声对解调损失的影响是有效的,可用于实际测试。

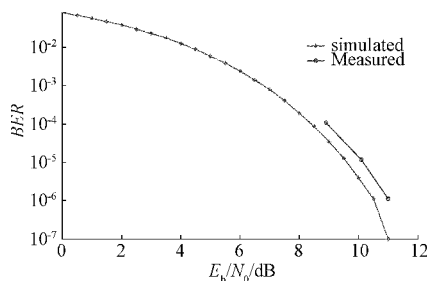


图 6 仿真与实验对比图

3 结 论

本文针对频率源的相位噪声随着频偏变化,不易取单点等效以及实现数学解析的特点,提出了积分等效和作图两种方法求等效相位噪声。充分利用现代数字仪器基于离散量化测量相位噪声的方法,采用分段求面积再求和(即利用积分的基本原理),计算等效相位噪声,相较于作图法估算,在计算结果精确度上有明显的优势。将积分等效法得到等效相位噪声数据作为仿真输入条件,仿真相位噪声对解调损失的影响,与在此相位噪声下系统解调损失

的实测的最大相差 0.3 dB,积分等效法的有效性和适用性得到了充分验证。因此,鉴于数字测量仪器普遍使用,量化数据获取计算相对容易,建议优先使用积分等效法计算等效相位噪声。

参考文献

- [1] 刘嘉兴. 飞行器测控与信息传输技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011: 178-179.
- [2] 余清华,沈小青,陈思,等. 数字通信基带设备误码率的估计方法[J]. 计量学报,2017,38(2):230-233.
- [3] 何钊,王淦,窦骄,等. 本振信号相位噪声对星载扩频应答机影响研究[J]. 遥测遥控,2019,40(5):28-33.
- [4] 闫鸿. 宽带信道增益平坦度仿真设计[J]. 电讯技术,2010,50(8):147-150.
- [5] 马兆慧,陈健,王萍,等. 带宽受限 QPSK 相干光侦听接收机最佳性能分析[J]. 光子学报,2016,45(10):92-98.
- [6] 张建志,张丽娜. 带通采样时钟沿抖动对解调性能的影响分析[J]. 无线电工程,2012,42(10):10-12.
- [7] 李惠民. 抖动分类与测量[J]. 中国集成电路,2016,25(3):67-74.
- [8] 宋伟,叶磊. 本振相位噪声及其对接收机性能的影响研究[J]. 中国新通信,2019,21(7):40-43.
- [9] 王伟平,余博嵩,王帧浩,等. 新一代天气雷达发射机相位噪声分析研究[J]. 电子测量技术,2020,43(19):16-21.
- [10] 杨俊,许强. 频率源的相位噪声对雷达系统性能的影响[J]. 舰船电子对抗,2016,39(1):58-61.
- [11] HAMAGUCHI K, SHOJI Y, OGAWA H. BER performance of coherent-QPSK transmission affect by phase noise form frequency converters [J]. IEEE Transaction on Communication, 2001,10(1): 23-31.
- [12] TAGGART D, KUMAR R. Impact of phase noise on the performance of the QPSK modulation [J]. Aerospace, IEEE Conference, 2011: 1-10.
- [13] 朱良彬. 相位噪声对 QPSK 解调性能的影响[J]. 无线电工程,2015,45(10):38-40.
- [14] 李永波. 本振相位噪声对接收机性能的影响[J]. 电讯技术,2012,52(4):562-565.
- [15] 田嘉,王伟,史平彦. 本振相位噪声对数字接收机的影响[J]. 空间电子技术,2012,9(1):17-22.
- [16] 刘嘉兴. 相位噪声对数传误码率的影响[J]. 电讯技术,2007,47(4):63-65.

作者简介

余清华,工程师,主要研究方向为无线电计量测试、电磁兼容等。

E-mail: yuqinghua005@sina.com

邱斌,高级工程师,主要研究方向为无线电计量测试。

E-mail: 16475978@qq.com

沈小青,高级工程师,主要研究方向为无线电计量测试。

E-mail: sxqlst@126.com

王志虎,工程师,主要研究方向为无线电计量测试。

E-mail: jshuzi@126.com

孙建,助理工程师,主要研究方向为无线电计量测试。

E-mail: m15192946556@163.com