

第五章 低频偏相位噪声测量技术

5.1 鉴相法相位噪声测量中的低频缺损

5.1.1 低频缺损

基于鉴相法的相位噪声测量方法的原理框图如图 5.1 所示，按照 3.1.3 节分析的鉴相法测量原理，该方法为提取被测信号的相位噪声，要求参考源必须与被测源同频且正交。为此，该方法中采用锁相环电路调整参考源相位，调整中通过低通滤波电路后的正交指示器指示参考源和被测源的正交状态。

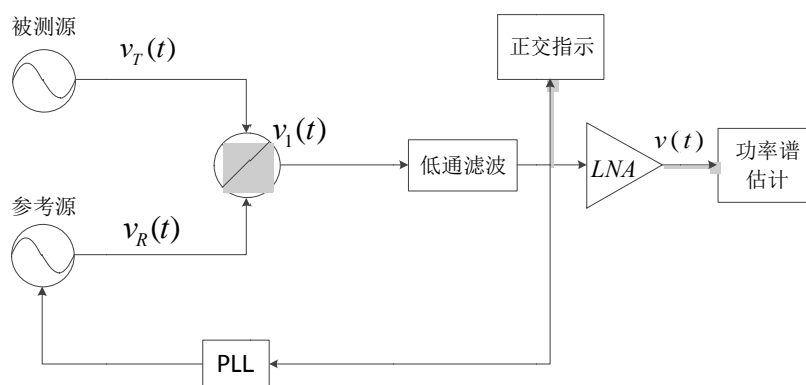


图 5.1 鉴相法相位噪声测量原理框图

图 5.2 所示为某鉴相法相位噪声测量电路输出的测量结果，图中绿色曲线为 Rohde & Schwarz 仪器的测量结果，红色曲线为由 Tektronix 示波器采样时域数据后进行功率谱估计得到。由这两种测量结果均可看出，当频偏小于 10Hz 时噪声功率谱出现了明显的下降，本文将鉴相法相位噪声测量中的这种现象称为低频缺损。

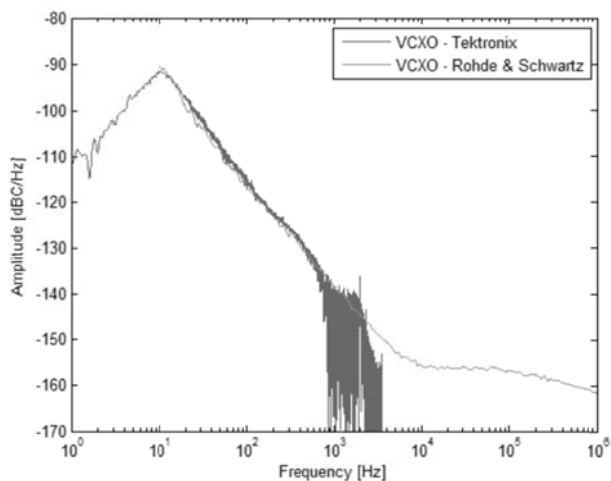


图 5.2 鉴相法测量中的低频缺损

根据锁相环原理和锁相环电路的频率特性，对频偏高于锁相环频率带宽以上的噪声，锁相环可以调整参考源相位，以保证参考源频率与被测源载波频率相等，这样可以有效提取和测量被测源信号的相位噪声。但对于频偏低于锁相环环路带宽以内的相位噪声，该噪声可看做是被测源信号的频率波动，而该波动范围在锁相环电路环路带宽内。这时锁相环会调整参考源频率跟随被测源的频率波动，这种情况下鉴相电路无法正常提取和测量被测源的相位噪声。因此，鉴相法测量结果将表现出对频偏小于锁相环环路带宽内的噪声，其噪声功率会表现出较大的衰减。因此锁相环电路的环路带宽是产生低频缺损问题的主要原因。

5.1.2 鉴相法测量的频率响应和低频缺损分析

1. 鉴相法测量电路频率响应分析

如 5.1.1 所述，鉴相法测量中的低频缺损主要是由锁相环电路的环路带宽产生的，因此可由鉴相电路和锁相环电路的频率特性分析鉴相法测量中的低频缺损特性。图 5.3 为锁相环电路的模型框图。

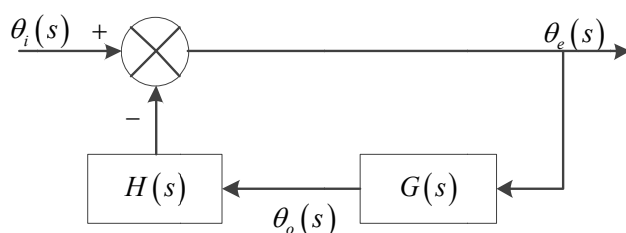


图 5.3 鉴相法测量中的锁相环电路原理框图

如图 5.3 所示， $\theta_i(s)$ 表示被测信号的相位信息， $\theta_o(s)$ 表示参考信号的相位信息， $\theta_e(s)$ 表示鉴相器输出的相位信息。由于鉴相法相位噪声测量中以鉴相器输出 $\theta_e(s)$ 为测量变量，图 5.3 中锁相环的布局与传统方式略有不同，将 $\theta_e(s)$ 作为输出，更便于分析鉴相电路特性。由于鉴相器后的低通滤波器将滤除鉴相器输出的和频分量，因此这里只考虑鉴相器输出的差频分量，即：

$$\theta_e(s) = \theta_i(s) - \theta_o(s) \quad \text{式(5.1)}$$

由图 5.1 和图 5.3 比较可知，鉴相法测量相位噪声时，测量目的是要获得被测信号的相位信息 $\theta_i(s)$ ，但直接测量得到的是 $\theta_e(s)$ ，因此通过分析 $\theta_i(s)$ 和 $\theta_e(s)$ 的频域关系即可研究鉴相法测量电路的频率响应。

由图 5.3 可得：

$$\theta_e(s) = \frac{1}{1 + H(s)G(s)} \cdot \theta_i(s) \quad \text{式(5.2)}$$

鉴相电路和锁相环电路的模型参数如图 5.4 所示。其中 K_p 为鉴相器鉴相常数，

K_f 为环路滤波器传递函数， K_o 为参考源调相灵敏度增益系数， K_n 为分频器分频系数。在鉴相电路中 $K_n = 1$ 。

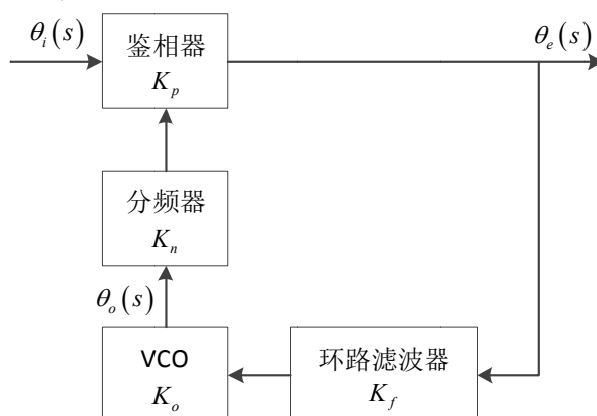


图 5.4 鉴相和锁相电路模型参数

由图 5.3 和图 5.4 比较可知：

$$G(s) = K_p \cdot K_f \cdot K_o \tag{5.3}$$

$$H(s) = K_n = 1 \tag{5.4}$$

将式(5.3)和式(5.4)代入式(5.2)得：

$$\theta_e(s) = \frac{1}{1 + K_p \cdot K_f \cdot K_o} \cdot \theta_i(s) \tag{5.5}$$

因此由鉴相电路中锁相环路的 K_p 、 K_f 、 K_o 参数，根据式(5.5)即可求得鉴相电路的提取相位 $\theta_e(s)$ 和输入信号相位 $\theta_i(s)$ 之间的关系，由此可以分析鉴相法测量电路的频率响应。

2. 鉴相电路频率响应和低频缺损的 MATLAB 仿真

为说明式(5.5)和上述鉴相电路频率响应和低频缺损分析方法，以下针对某鉴相法相位噪声测量电路的实际参数在 MATLAB 软件中利用式(5.5)分析其低频缺损性能。

实验电路中鉴相器采用 ADE-2 混频器，参考源选用 IQD 频率产品的 10MHz 的 VCXO，首先需要确定电路的 K_p 、 K_f 、 K_o 三个部件的参数。

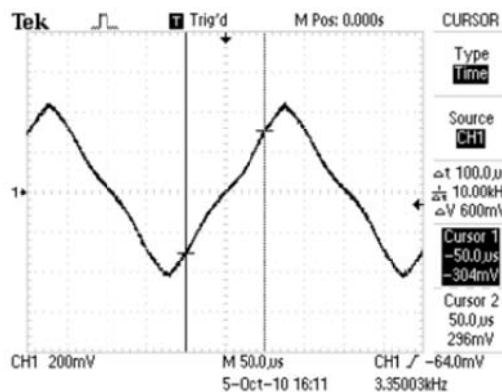


图 5.5 参数 K_p 的测量

混频器 ADE-2 的数据手册中未给出其增益 K_p ，可通过以下方法进行测量。将两个相同的 VCXO 输入混频器。将 VCXO 的输出功率均设为 10dBm，其频率设置具有微小的频率差。混频器的输出信号通过一个平行电容构成的低通滤波器，低通滤波器滤除混频器输出中的和频信号，保留差频信号。则低通滤波器输出为频率等于预设的微小频率差的正弦信号，该信号利用示波器的测量结果如图 5.5 所示。

由此可求得实验使用的鉴相器的鉴相常数 K_p ：

$$K_p = \frac{dV}{d\phi} = \frac{600mV}{(2\pi \cdot 3.35kHz) \times 100\mu s} = 285.05mV / rad \quad \text{式(5.6)}$$

做为参考源的压控振荡器 VCO 传递函数为

$$K_o = \frac{K_{VCO}}{s} \quad \text{式(5.7)}$$

其中 K_{VCO} 为 VCO 的灵敏度增益，利用 VCO 的灵敏度曲线可得 VCO 的灵敏度增益为：

$$K_{VCO} = 4.333 \times 10^3 \text{ rad} / s / V \quad \text{式(5.8)}$$

于是，

$$K_o = \frac{4.333 \times 10^3}{s} \text{ rad} / s / V \quad \text{式(5.9)}$$

本例中环路滤波器为 II 类滤波器，为保证环路的稳定性，为该滤波器增加了一个零点。可得到 PLL 滤波器的传递函数形式为：

$$K_f = \frac{s+a}{s} \quad \text{式(5.10)}$$

由该传递函数形式可设计滤波器传递函数为：

$$K_f = \frac{R_2Cs+1}{2R_1Cs} \quad \text{式(5.11)}$$

其中取： $C = 10\mu F$ 、 $R_1 = 130k\Omega$ 、 $R_2 = 4.7k\Omega$ 。

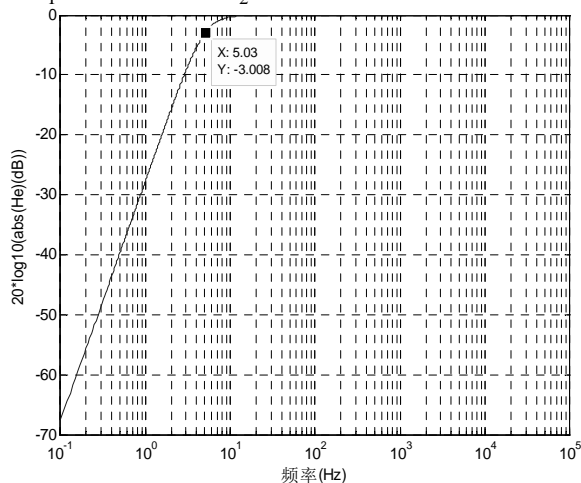


图 5.6 鉴相电路的频率响应仿真结果

将式(5.6)、式(5.9)、式(5.11)的参数代入式(5.5)得到实验中鉴相电路的频率响应。在 MATLAB R2010a 中进行仿真，仿真结果如图 5.6 所示。

由图 5.6 的鉴相电路的频率响应仿真结果可知，其频率特性为高通特性，通带平坦，在频率约为 10Hz 处开始频率再减小时响应特性开始出现幅度下降的趋势，下降的 3dB 半功率点为 5.03Hz。即电路对频偏大于 10Hz 的相位噪声具有良好的测量性能，而对频偏小于 10Hz 的相位噪声测量结果将出现明显的噪声功率衰减。本文将鉴相法相位噪声测量中的这一现象称之为低频缺损。

5.1.3 实际测量电路仿真分析

为进一步说明基于鉴相法的相位噪声测量中的低频缺损问题，本小节针对实际的测量电路根据设计的电路参数在 Advanced Design System (ADS) 软件中对电路特性进行了仿真。仿真采用的电路^[115]如图 5.7 所示。

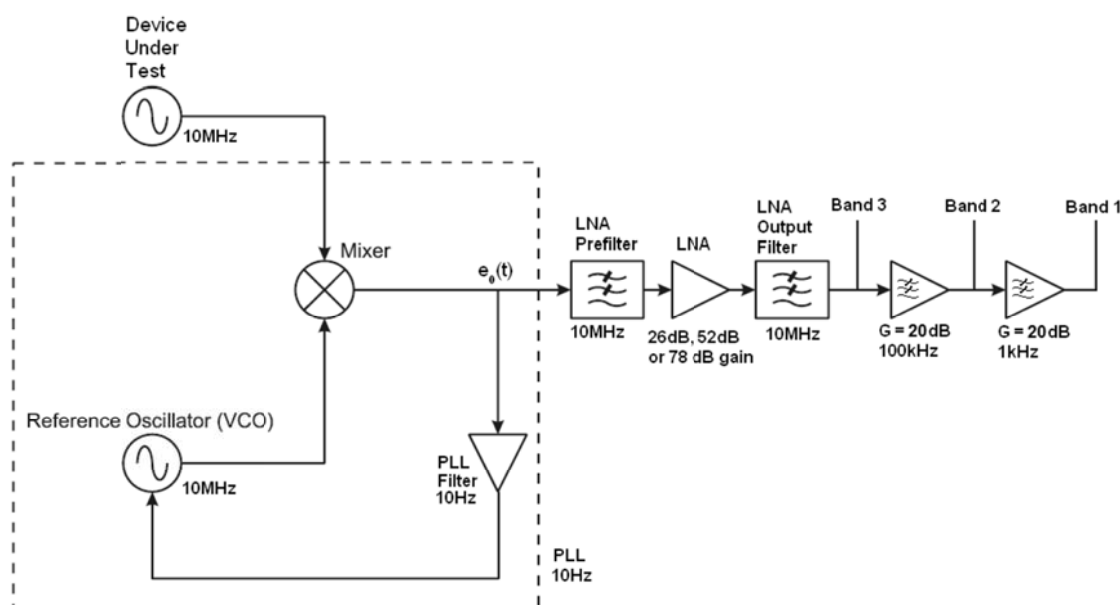


图 5.7 仿真采用的鉴相法测量电路结构及参数示意图

如图 5.7 所示，该相位噪声测量电路的被测信号和参考信号频率均为 10MHz，锁相环的环路滤波器采用截止频率为 10Hz 的低通滤波器，鉴相器输出信号经低噪声放大器预滤波器、低噪声放大和输出滤波器后分为三个频带分别进行采样，采样后信号进行功率谱估计以实现相位噪声的测量。其中低噪声放大器预滤波器、输出滤波器和采样前将信号分为三个频带的滤波器均为低通滤波器，因此它们的截止频率将共同制约了电路测量相位噪声的高频范围。按 5.1.2 节分析的低频缺损现象及其产生的机理，锁相环路的带宽将制约电路的低频测量范围。

根据图 5.7 中所示的电路结构和电路参数，在 ADS 中建立的电路仿真模型如图 5.8 所示。图中上半部分为鉴相器和锁相环构成的鉴相电路，以 VCO(器件 X1)

作为参考源，以 E_{phase} 表示鉴相器输出信号，图下半部分为鉴相后测量通道的低噪声放大和采样电路。

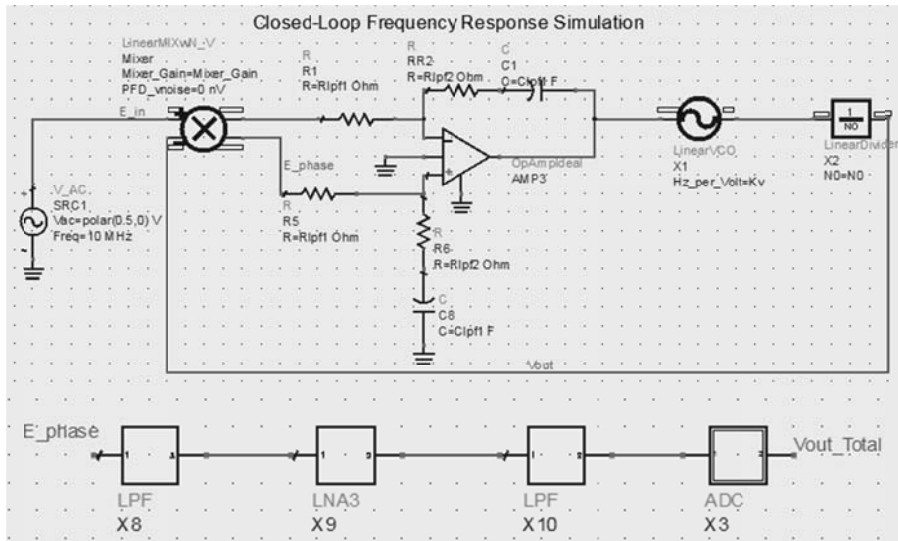


图 5.8 鉴相法测量电路的 ADS 仿真模型

为验证 5.1.2 节的分析结果，本节在 ADS 软件中按照实际的电路参数分别对鉴相器和锁相环构成的鉴相电路的频率响应和整个电路的测量带宽进行了仿真。图 5.9 为鉴相电路频率响应仿真结果，根据仿真结果，鉴相电路输出在频率为 12.05Hz 处具有一个明显的拐点，当频率低于 12.05Hz 时，其频率特性表现为明显的衰减，而在频率在 12.05Hz 与 10MHz 之间时表现为良好的测量特性。该结果与 5.1.2 节中的分析结果和由传递函数在 Matlab 中的计算结果基本一致。

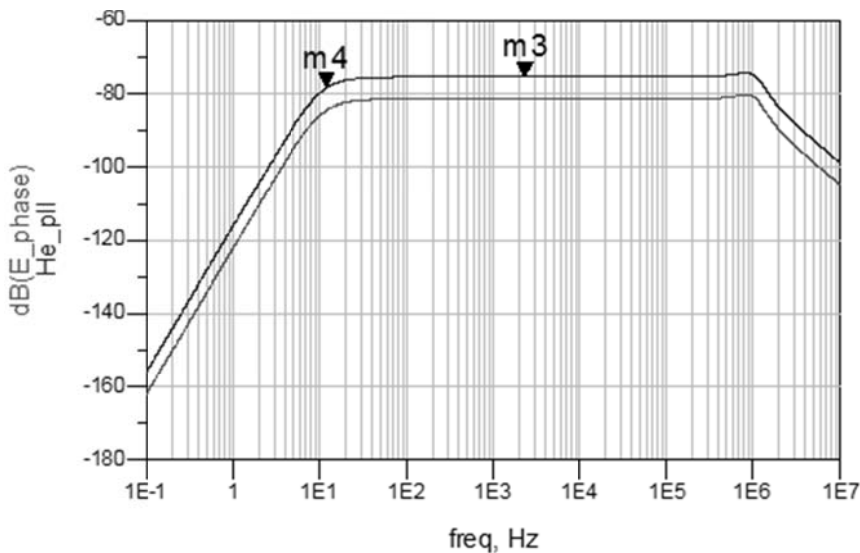


图 5.9 鉴相电路频率响应仿真结果

同时，低频缺损出现的频率拐点 12.05Hz 与锁相环的环路滤波器低频截止频率 10Hz 十分接近，这也进一步说明环路滤波器的带宽是产生低频缺损的直接原因。

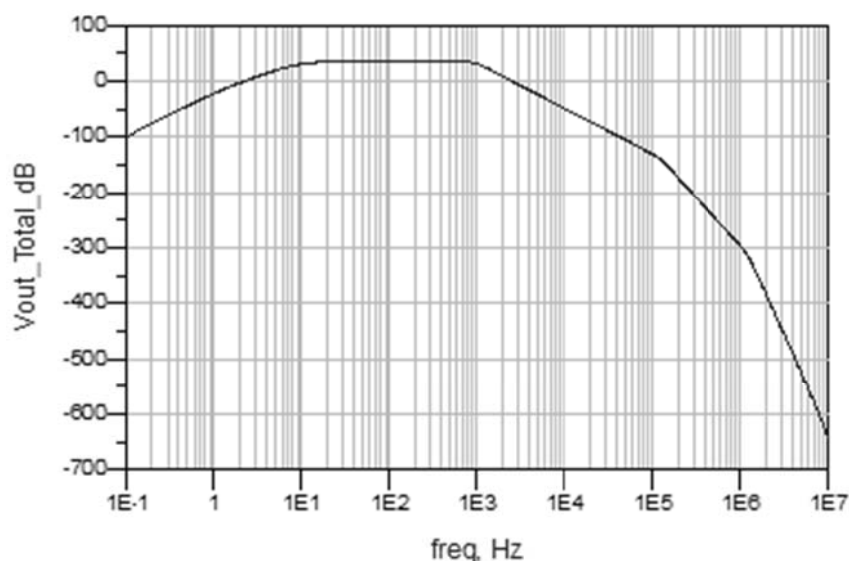


图 5.10 鉴相法测量电路的测量带宽

图 5.10 所示为本节所采用的鉴相法测量电路的测量带宽仿真结果，其中 AD 采样的信号节点选在图 5.7 中的 Band1 节点，即设定测量带宽为 1KHz 的频点。如仿真结果所示，其测量带宽的低频频点由低频缺损限制为 10Hz，而高频部分在 1KHz 处出现明显的拐点，在 10Hz 到 1KHz 之间具有良好的测量性能，该仿真结果与电路设计参数完全一致。

本节在 ADS 软件中进行的仿真结果与 5.1.2 节中的研究分析结果完全一致，进一步证明了鉴相法相位噪声测量中低频缺损存在的客观性及 5.1.2 节中分析的产生机理的正确性。

5.2 低频缺损补偿

5.2.1 低频缺损补偿方法

按照 5.1.2 节的分析，基于鉴相法的相位噪声测量中由于鉴相电路中锁相环的作用测量结果必然表现出低频缺损现象。为扩展鉴相法相位噪声测量的近载波测量能力，本节研究一种针对低频缺损的补偿方法。该方法依据鉴相法测量电路和低频缺损的频域特性，在对鉴相信号进行低通滤波、放大和采样后和功率谱估计之前，利用数字信号处理算法对硬件电路频率响应带来的低频缺损进行补偿，然后再进行功率谱估计，以改善相位噪声的近载波测量性能。

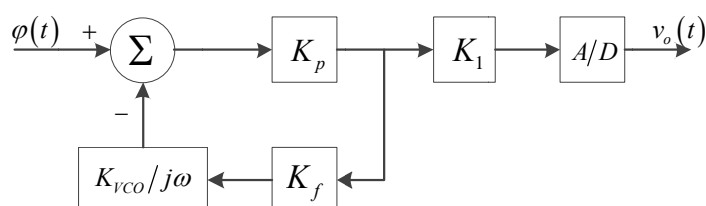


图 5.11 鉴相器到 AD 的信号通道参数模型

图 5.11 所示为从鉴相电路、锁相环、低通滤波到采样电路的完整信号通道模型框图，对应于 5.1.2 节的符号， K_p 表示鉴相器的鉴相常数， K_f 表示环路滤波器的频域响应， K_{VCO} 表示 VCO 的灵敏度增益，VCO 的频率响应为 $K_{VCO}/j\omega$ ， K_1 表示测量通道上的低噪声放大器预滤波器、低噪声放大和输出滤波器等器件的频率响应。用 $S_\phi(f)$ 表示输入到鉴相器的被测信号相位波动的功率谱密度， $S_o(f)$ 表示经过信号通道的采样信号的功率谱密度。由图 5.11 可得 $S_o(f)$ 和 $S_\phi(f)$ 的关系为：

$$S_o(f) = S_\phi(f) \left| \frac{jf}{K + jf} \right|^2 \cdot K_\phi^2 \cdot K_1^2 \quad \text{式(5.12)}$$

其中 $K = K_\phi \cdot K_f \cdot K_{VCO} / 2\pi$ 。

由式(5.12)可得用 $S_o(f)$ 表示的 $S_\phi(f)$ 的表达式为：

$$S_\phi(f) = S_o(f) \cdot \left| \frac{K + jf}{jf} \right|^2 \cdot \frac{1}{K_\phi^2 \cdot K_1^2} \quad \text{式(5.13)}$$

即由采样获得的测量数据计算功率谱估计得到的结果为 $S_o(f)$ ，由 $S_o(f)$ 利用式(5.13)可计算得到被测信号相位波动的功率谱估计 $S_\phi(f)$ 。因此式(5.13)可作为鉴相法测量中对采样结果进行功率谱估计的补偿方法，通过该补偿可在很大程度上抵消鉴相法测量结果的低频缺损，改善鉴相法的低频测量性能^[39]。

实际实现时，可将上述补偿计算过程看做采样获得的相位波动时域数据通过一个数据处理单元，该单元的频率响应为：

$$H(jf) = \frac{K_f K_{VCO}}{K_1} \cdot \frac{1}{jf} + \frac{1}{K_\phi K_1} \quad \text{式(5.14)}$$

或对采样数据进行功率谱估计后按式(5.13)进行补偿修正。

5.2.2 仿真与实验

为说明和验证 5.2.1 节提出的低频缺损补偿方法，本小节采用本章设计电路的参数按照 5.2.1 节提出的方法进行补偿计算仿真。

将 5.1 采用的电路参数带入式(5.14)可得补偿单元的频域响应曲线如图 5.12 所示。

如图 5.12，该补偿系统为一个低通系统，对低频信号系统具有很大的增益，用以补偿鉴相电路带来的低频功率衰减，高频部分增益为 0dB，其频率拐点在 12.05Hz 处，其频率特性恰与鉴相电路的低频缺损特性相反，用于对测量数据的低频缺损进行补偿。

仿真实验在 Matlab 软件中进行。为说明和验证上述低频缺损补偿的效果，仿真中首先产生一个均值为 0，方差为 1 的高斯白噪声信号作为鉴相电路的输入信号，仿真结果如图 5.13 所示。

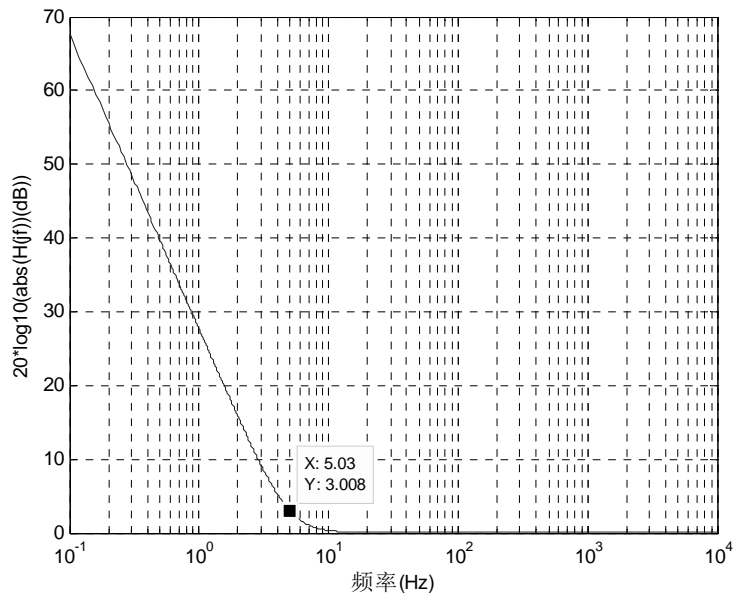


图 5.12 低频缺损补偿单元频率响应

图 5.13 上方的第一幅图曲线为做为鉴相器输入被测信号相位波动的高斯白噪声的频谱，该频谱基本为各频率均匀分布的水平谱线。图 5.13 中间的第二幅图曲线为鉴相电路输出的测量结果，由该曲线可以看出，相对于预定的高斯白噪声的相位波动，该测量结果具有明显的低频缺损，频率拐点出现在约 10Hz 处，与设计情况相符。图 5.13 下方的第三幅图曲线为按照本节方法补偿后信号的频谱，由该曲线可以看出，该补偿方法较好的补偿了鉴相法测量的低频缺损。

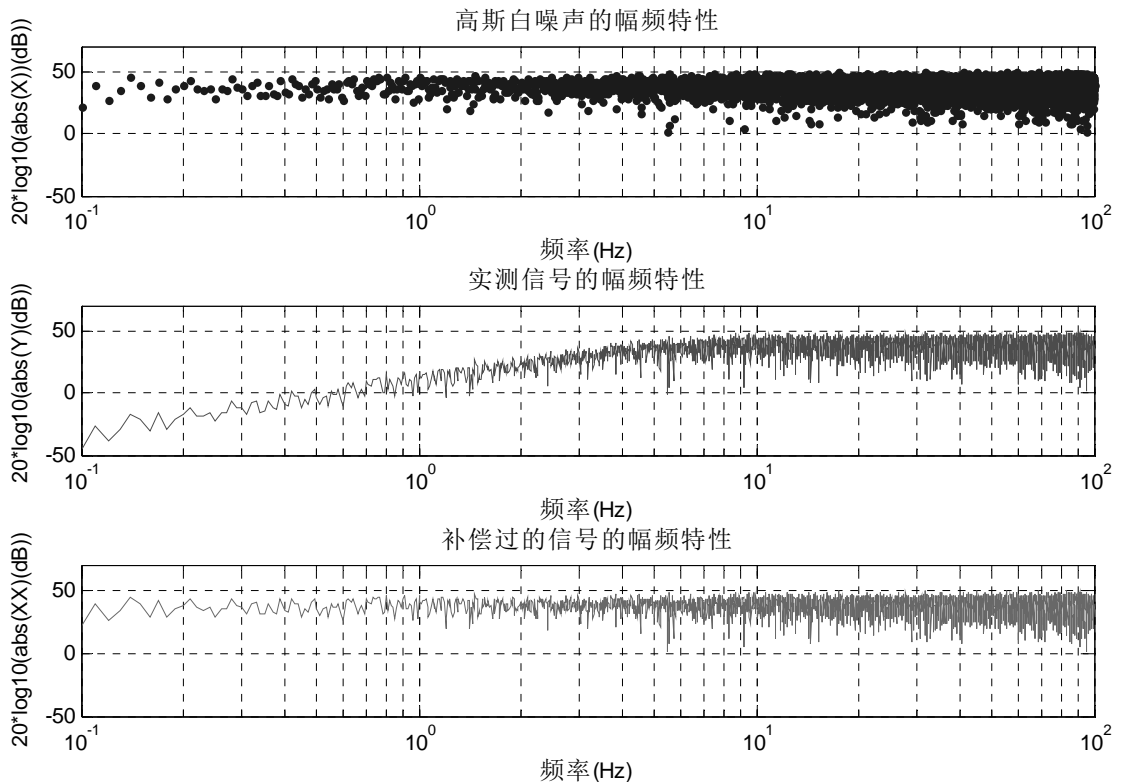


图 5.13 低频缺损补偿性能仿真结果

5.3 本章小结

在基于鉴相法的相位噪声测量系统中，鉴相器要求参考源与被测源频率相同且相位正交，实际测量电路中一般通过锁相环电路保证参考源与被测源的相位正交。但同时锁相环将影响相位噪声测量结果中频率偏离低于其环路带宽频率以下部分，具体将表现出明显的噪声功率衰减现象，即鉴相法测量的低频缺损。本章通过建立相位噪声测量电路的电路模型，分析其测量通道的传递函数和频率响应，研究和分析了低频缺损现象产生的机理。通过数字信号处理方法在数字域对低频缺损问题进行了补偿。该技术扩展了鉴相法的临近载波相位噪声测量性能，拓宽了该测量方法的分析带宽。