

6.5.5 算法性能分析

根据先前的分析，利用 Moose 算法估计频偏时，能够准确估计的频偏值 \hat{f}_e 的范围为 $[-\frac{1}{2T_s N_t}, \frac{1}{2T_s N_t}]$ ，即估计范围受到符号速率与训练序列长度的限制。为了验证这个结论，我们可以生成一段仅包含训练序列的数据，对其加以可调频偏后输入 Moose 算法中进行频偏估计，进而验证估计范围与符号速率及训练序列长度的关系。

测试程序的输入部分如图 4-27 所示，选用预调制的 5 位与 11 位巴克码序列重复四次作为训练序列，便于对训练序列长度与估计范围之间的关系进行验证，而另一个影响因素符号速率也可以通过采样率与过采样系数的商定义。将生成的训练序列通过“add freq offset.vi”加以一定大小的频偏后输入 Moose 算法中，模拟接收机利用训练序列的周期性估计频偏的流程。

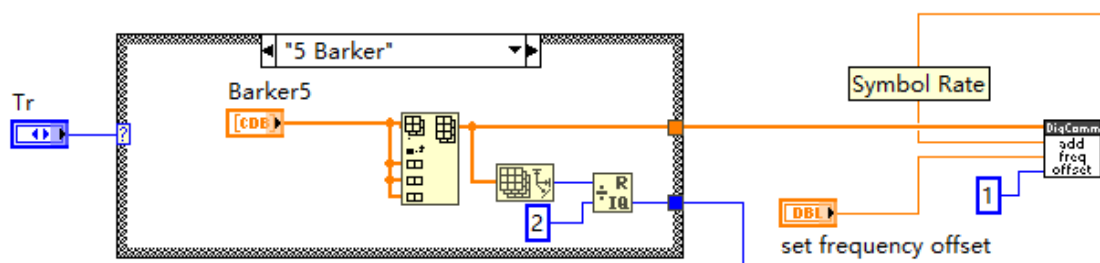


图 4-27 频偏估计范围测试输入

通过 Moose.vi 对数据进行频偏纠正的程序与图 4-23 类似。在 Moose 算法的输出端（如图 4-28 所示），我们得到了频偏估计的结果“estimated freq offset”与频偏纠正的输出，利用星座图可以非常直观地观察符号序列的相位旋转，有助于我们分析测试结果。

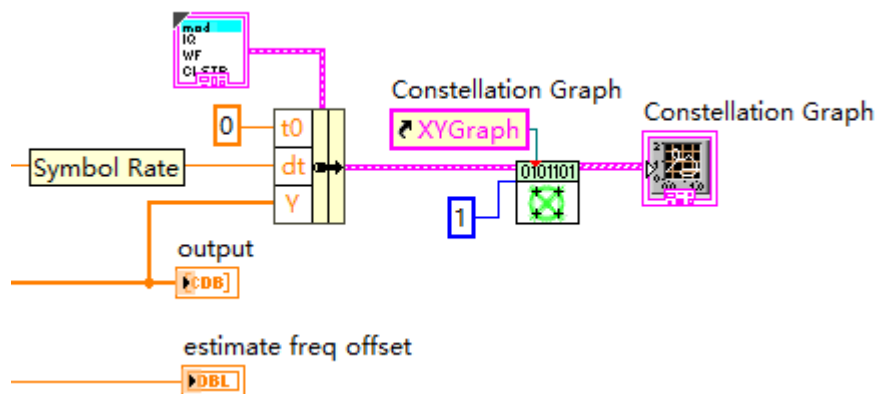


图 4-28 频偏估计范围测试输入

在探究频偏估计范围的影响因素前，需要先用一组基准参数对频偏估计的范围进行测试。这里我们设置符号速率 $T_s = 1\text{MHz}$ ，训练序列使用 11 位巴克码。由于 Moose 算法中将重复四次后的训练序列分割为两段周期序列进行频偏估计，实际的窗口长度 $N_t = \frac{11 \cdot 4}{2} = 22$ 。首先对无频偏时的复序列星座图进行观察，如图 4-29 所示。

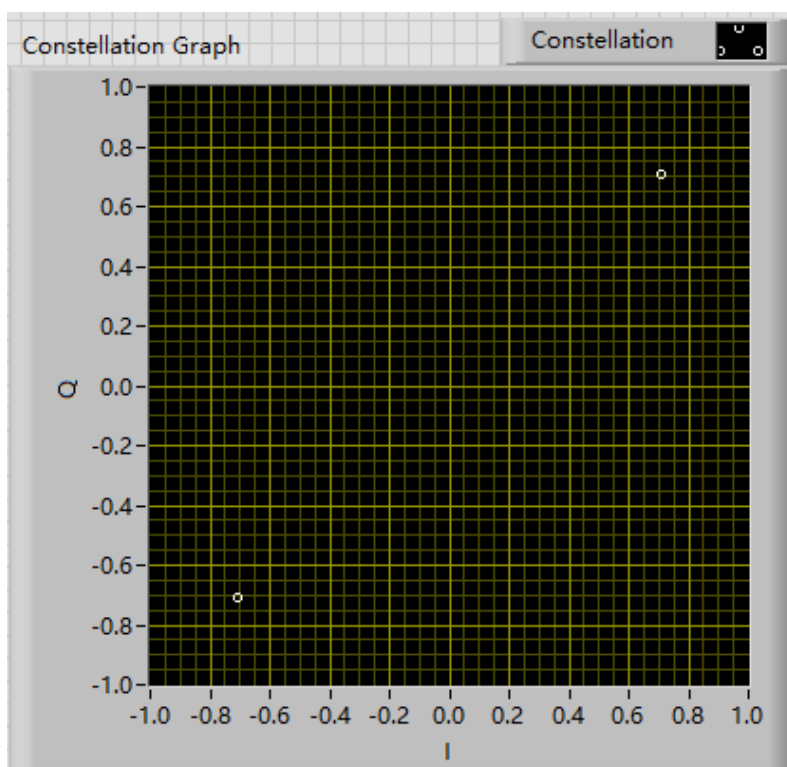


图 4-29 基准参数无频偏星座图

接着我们逐渐增大频偏，并通过开关换频偏纠正功能，观察 Moose 算法是否能准确地估计出频偏量并进行修正，测试结果（以频偏为 6kHz 为例）如图 4-30 所示。

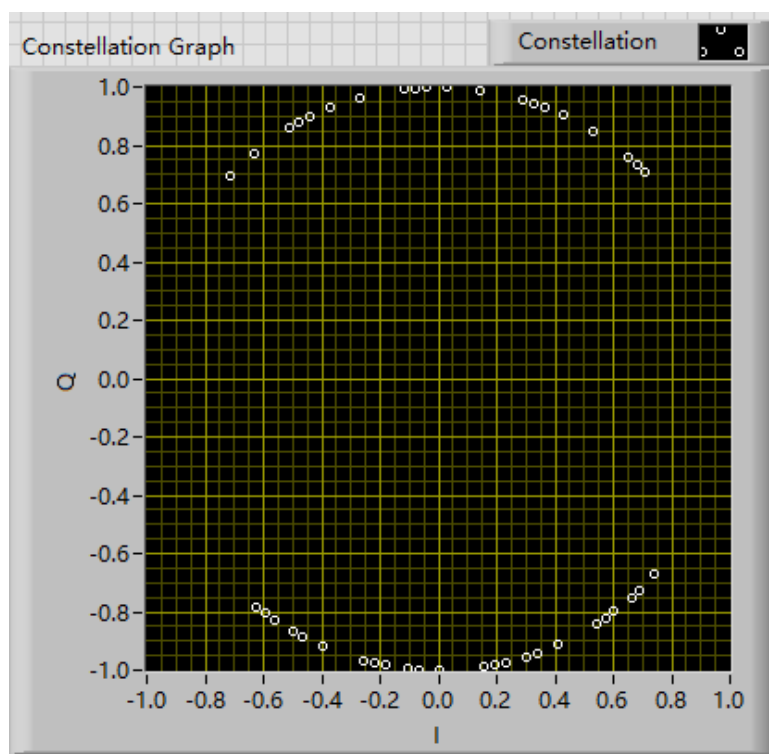


图 4-30(a) 6kHz 频偏未修正星座图

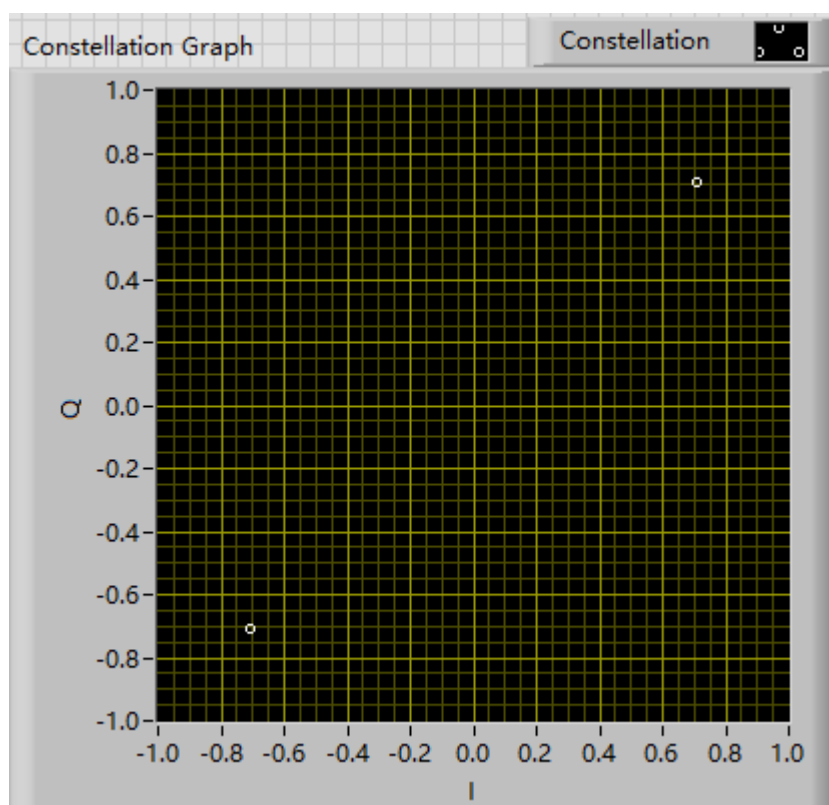


图 4-30(b) 6kHz 频偏修正后星座图

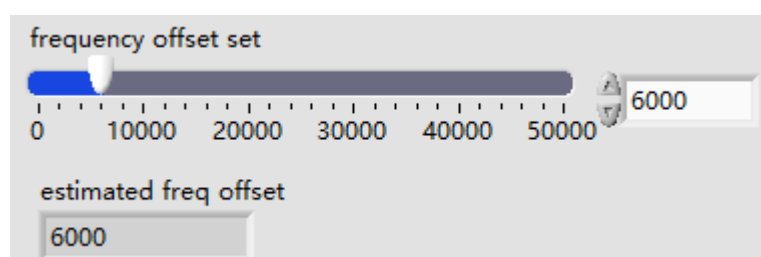


图 4-30(c) 6kHz 频偏估计结果

可见，Moose 算法能够有效地估计出频偏量，并对符号序列进行频偏纠正。接下来我们通过逐渐增大频偏量，找到程序无法准确地估计出频偏量的临界点，确定频偏估计的有效范围。

经过测试，当频偏 $f_o = 22728\text{Hz}$ 时，Moose 算法不再能估计出频偏，其输出星座图与估计结果如图 4-31 所示。

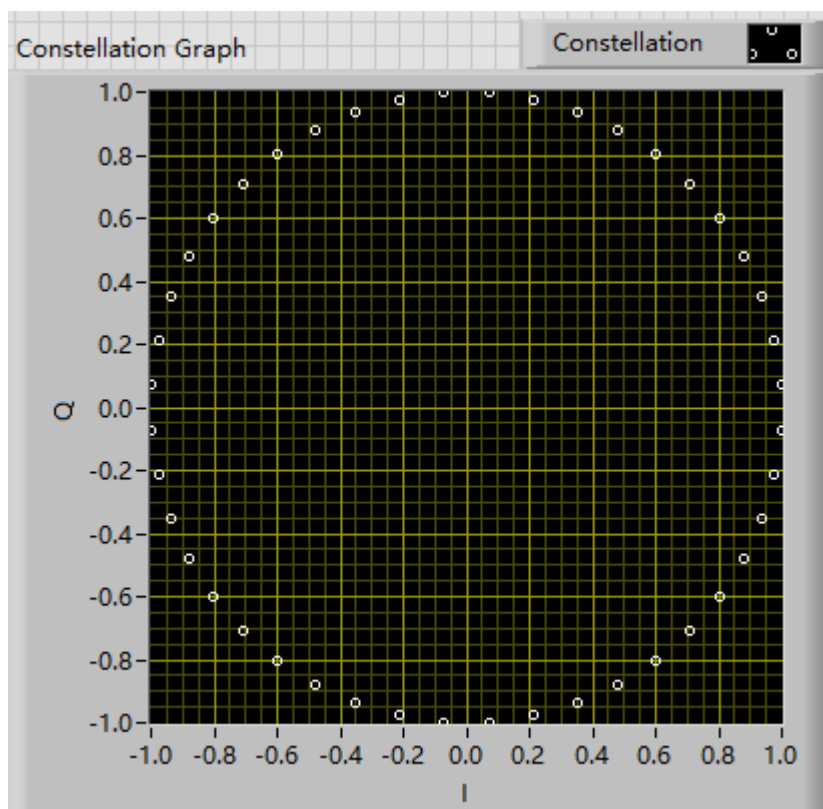


图 4-31(a) 22728Hz 频偏未修正星座图

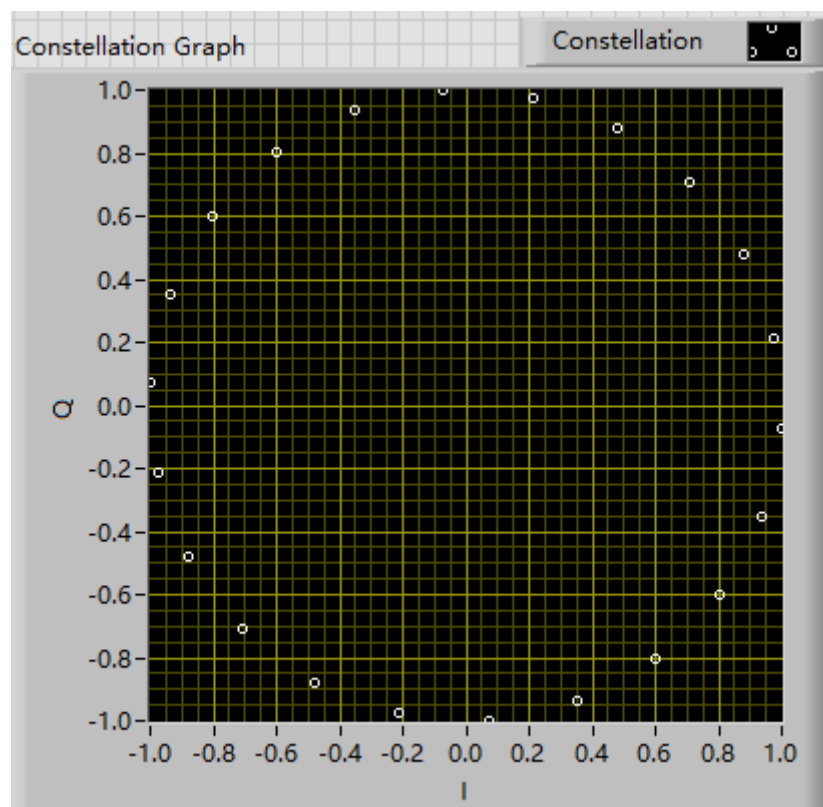


图 4-31(b) 22728Hz 频偏修正后星座图

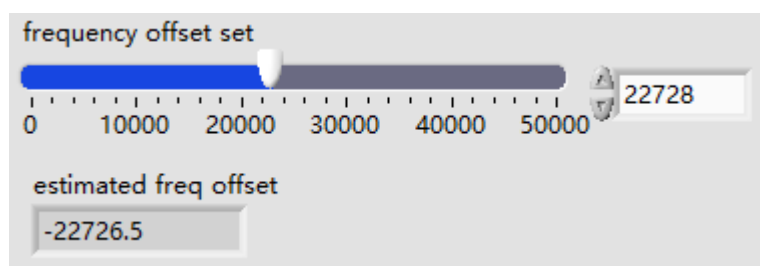


图 4-31(c) 22728Hz 频偏估计结果

根据以上测试，我们得到的频偏估计的实际范围为 $[-22727\text{Hz}, 22727\text{Hz}]$ 。而将基准参数 $T_s = 1\text{MHz}$ ， $N_t = 22$ 代入理论范围 $[-\frac{1}{2T_sN_t}, \frac{1}{2T_sN_t}]$ 中，得到的理论估计范围为 $[-22727.27\text{Hz}, 22727.27\text{Hz}]$ ，与基准测试的结果相符。接下来我们将通过改变输入参数，进一步验证参数与估计范围间的关系。

1. 将符号速率更改为 4MHz ，即原速率 1MHz 的 4 倍后，我们再利用基准测试中逐渐调节频偏的方法对频偏估计的有效范围进行测试，测试结果如图 4-32 所示。

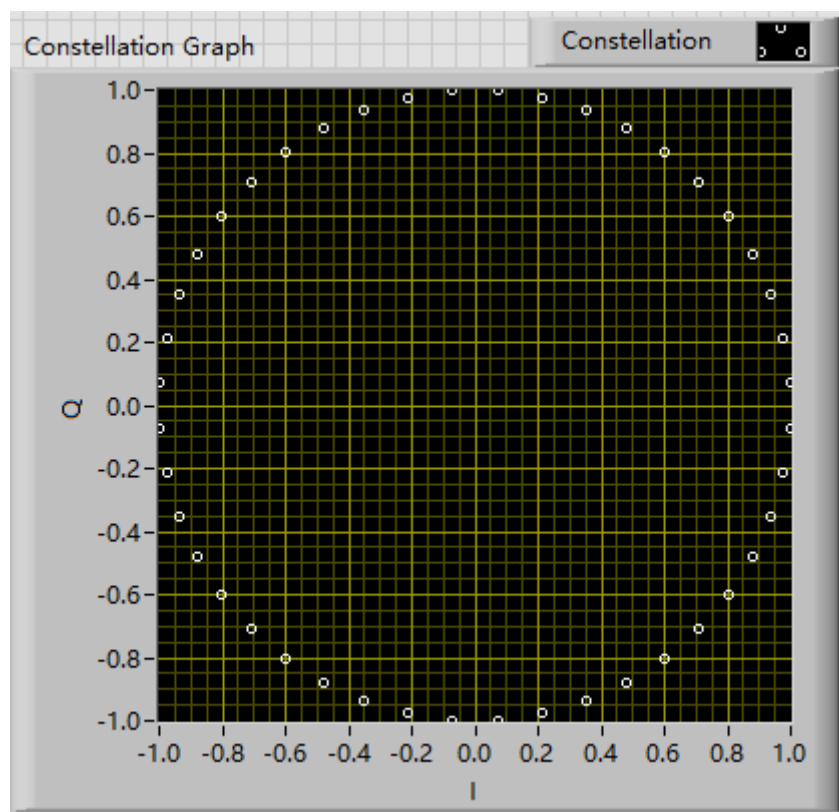


图 4-32(a) 符号速率为 4MHz 时频偏估计范围测试结果——未修正

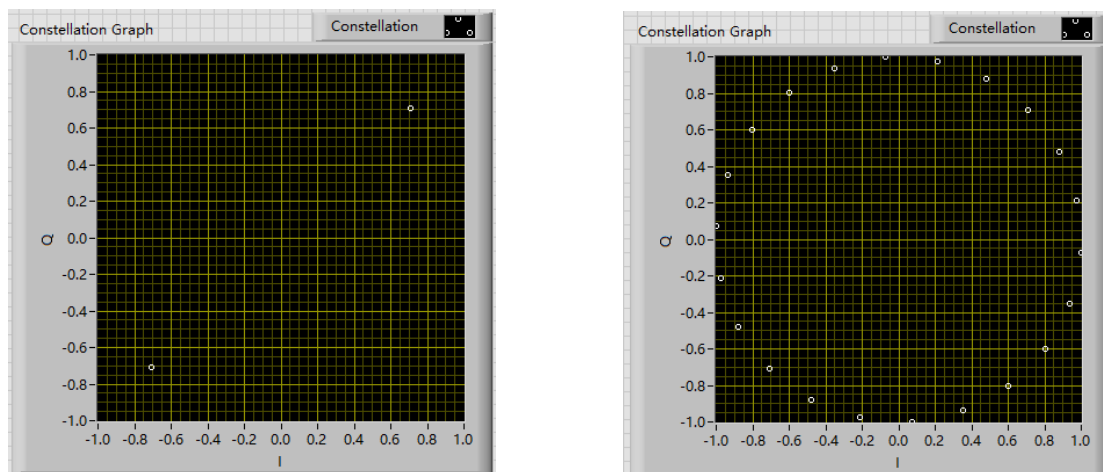


图 4-32(b) 符号速率为 4MHz 时频偏估计范围测试结果——修正后

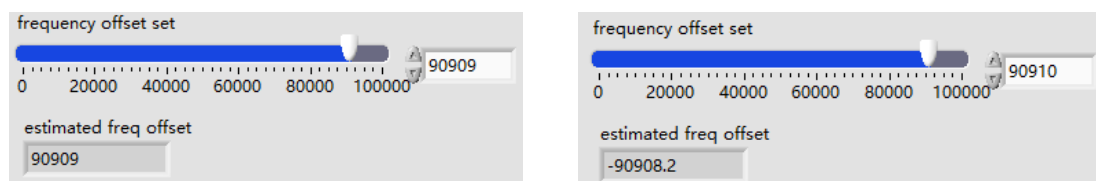


图 4-32(c) 符号速率为 4MHz 时频偏估计范围测试结果——估计值

其中图 4-32 (b) 中左图为频偏为 90909Hz 时的修正结果，右图为频偏为 90910Hz 时的修正结果。由测试结果可知此时频偏估计的实际范围为 $[-90909\text{Hz}, 90909\text{Hz}]$ ，与计算得到的理论范围 $[-90909.09\text{Hz}, 90909.09\text{Hz}]$ 基本一致，越高的符号速率会增大频偏估计的范围，符号速率对频偏估计范围的影响得到验证。

2. 将训练序列更改为 5 位巴克码序列，Moose 算法的对比窗口长度由原本的 22 位缩短至 10 位，我们再利用基准测试中逐渐调节频偏的方法对频偏估计的有效范围进行测试，测试结果如图 4-33 所示。

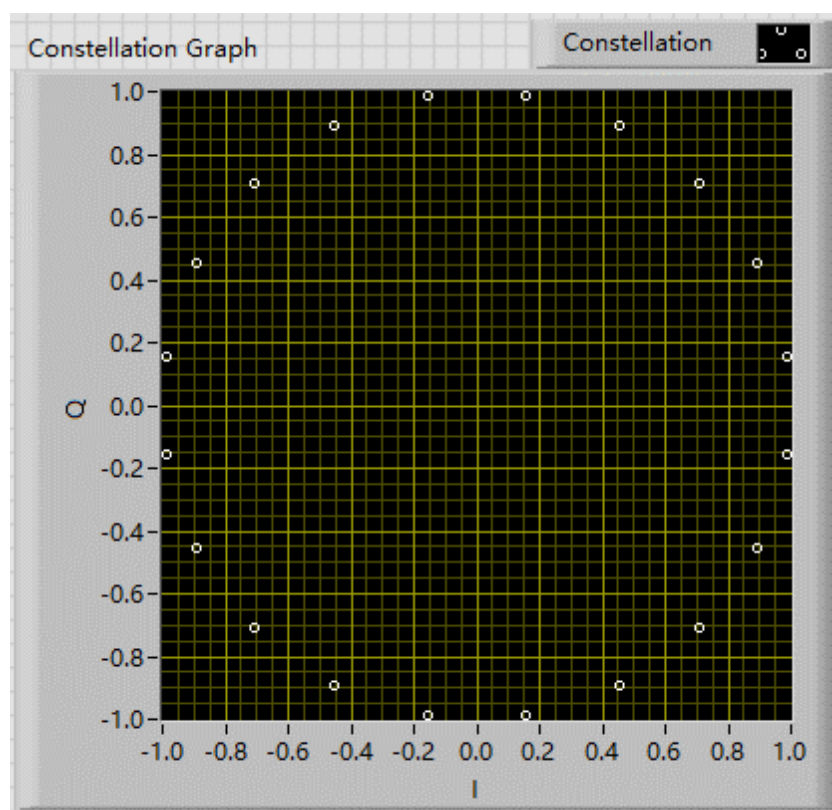


图 4-33(a) 使用 5 位巴克码序列时未修正的星座图

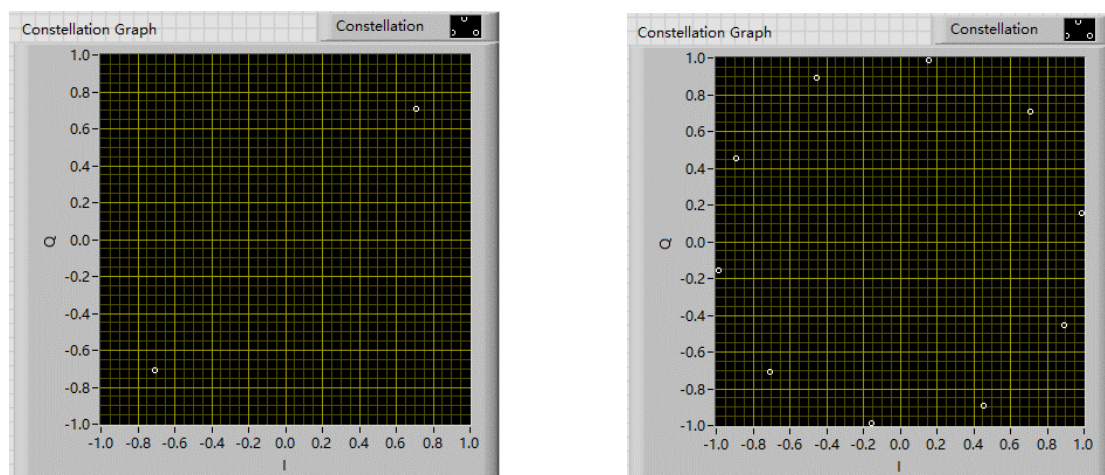


图 4-33(b) 使用 5 位巴克码序列时修正后的星座图

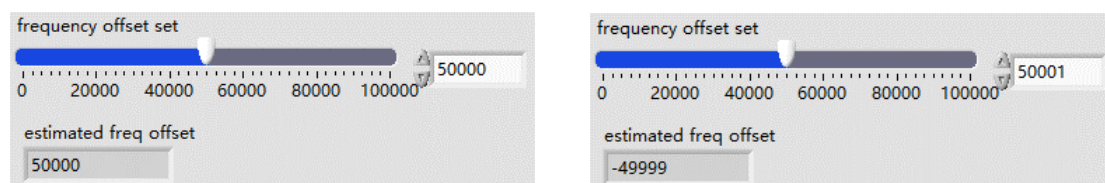


图 4-33(c) 使用 5 位巴克码序列时频偏估计的结果

其中图 4-33 (b) 中左图为频偏为 50000Hz 时的修正结果，右图为频偏为 50001Hz 时的修正结果。由测试结果可知此时频偏估计的实际范围为 $[-50000\text{Hz}, 50000\text{Hz}]$ ，与代入参数计算得到的理论范围一致。可见训练序列越长，频偏估计的范围越小，训练序列长度与频偏估计范围的关系式进一步得到验证。

通过以上的基准测试与调节参数后的测试，我们成功验证了利用 Moose 算法对频偏进行估计的有效范围为 $[-\frac{1}{2T_s N_t}, \frac{1}{2T_s N_t}]$ 。这对于后续实验中的训练序列长度、符号速率等参数的合理设置以及对实验结果的分析都会有所启发。