

Application Note

组合两个以上信号以改善噪声



Dean Banerjee

摘要

改善相位噪声的一种方法是将多个信号进行组合。如果将两个信号组合在一起，则理论上相位噪声可改善 3dB。然而，在某些情况下，可以将两个以上信号组合在一起，这样不仅可以改善噪声，还可以获得更好的相位差电阻。本文档探讨了组合两个以上源、组合可以使用的电路、理论优点和相位误差的影响。

内容

1 引言.....	2
2 创建输入信号的多个副本.....	2
2.1 偏斜和压摆率注意事项.....	2
2.2 对比缓冲器与电阻分压器.....	2
2.3 使用缓冲器时的相位噪声注意事项.....	2
3 组合输出的注意事项.....	3
3.1 源之间的隔离.....	3
3.2 对比单端输出与差分输出.....	3
3.3 组合导致的损耗.....	3
4 用于组合多个信号的电阻法.....	3
4.1 源输出阻抗可能与负载阻抗不同的一般情况.....	3
4.2 源阻抗和负载阻抗相同的特殊情况.....	4
4.3 增大 R1 以改善隔离.....	5
5 与无功电路的阻抗匹配.....	6
6 相位误差导致的损耗.....	7
7 通过组合多个信号来改善相位噪声.....	8
7.1 针对同相设计的多个信号的理论改进.....	8
7.2 组合多个信号与相位误差.....	8
8 总结.....	9
9 参考资料.....	10
A 附录：电阻匹配网络的计算.....	11
B 附录：无功匹配网络的计算.....	12
C 附录：计算相位误差导致的损耗.....	14

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

当相位噪声性能至关重要，但一个 PLL 合成器无法正常工作，一种方法是组合多个合成器。[组合两个 LMX2820 合成器输出以改善相位噪声](#)可以很好地分析组合两个信号以改善相位噪声的效果，展示理论上和实际测得的 3dB 优势，并展示信号不同相时的影响。此外，组合 N 个合成器可以获得 $10 \times \log(N)$ 的理论优势，但也存在如何缓冲或分离输入信号、如何组合多个输出以及允许多大的相位误差（对于两个以上器件）等问题。

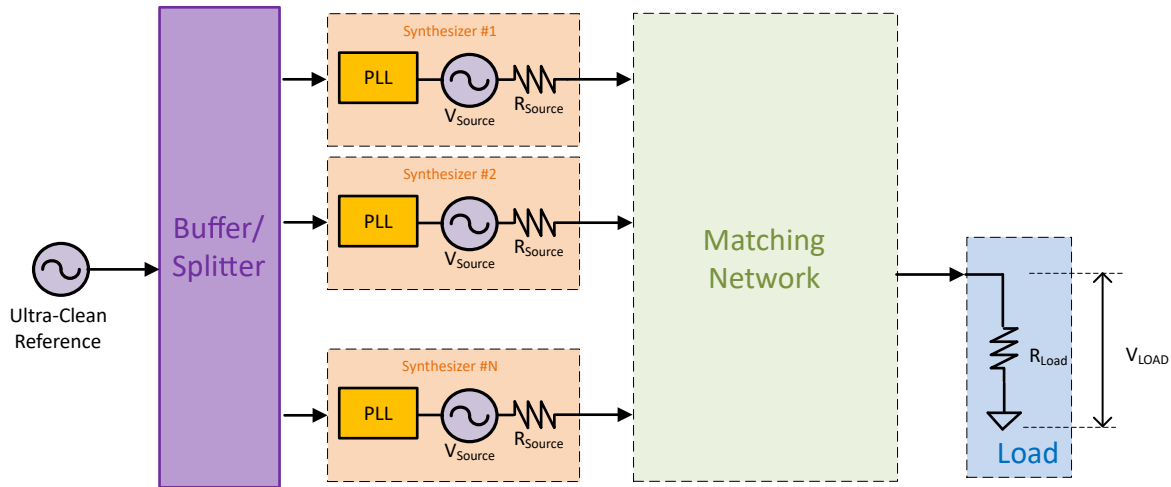


图 1-1. 组合 N 个频率合成器的一般方法

图 1-1 显示了组合多个合成器以改善相位噪声的一般方法。假设先使用一个比合成器和缓冲器相位噪声更低的超洁净源。为撰写本文，假设使用无噪声源。从该基准开始，需要将此基准分配给合成器，并将合成器组合为负载的单个输出。本文讨论了噪声、偏斜和匹配等注意事项。尤其是在较高的频率下，了解可容许的相位误差以及这如何随合成器数量的变化而变化非常重要。尽管校准例程和可编程延迟可以调整相位，但这些都需校准并可能增加噪声。

2 创建输入信号的多个副本

2.1 偏斜和压摆率注意事项

缓冲引入的任何偏斜都会增加合成器传播延迟差异所引入的任何偏斜。稍后将讨论总偏斜的影响，但从总体上来看，最好远小于来自合成器的影响。对于许多 PLL，相位噪声取决于压摆率，如果压摆率不够，则 PLL 相位噪声可能会增加。

2.2 对比缓冲器与电阻分压器

电阻式分压器可能会提供更小的偏斜，并且不会增加相位噪声。但是，如果要驱动的合成器过多，这会降低压摆率，从而增加 PLL 噪声。从压摆率来看，缓冲器是一种很好的设计，但这可能会引入偏斜，并且缓冲器噪声也会进入输出。缓冲器噪声的处理非常复杂。从输入到缓冲器的噪声对于所有源来说是共有的，因此会直接进入输出。同一缓冲器的不同输出的噪声不相关，这意味着该相位噪声得以降低。缓冲器数据表通常不会将输入噪声和输出噪声分为不同的噪声，但如果我们假设它们相等，则意味着我们可以假设输入缓冲器比总本底噪声低 3dB，并且输出缓冲器比总本底噪声低 3dB。

2.3 使用缓冲器时的相位噪声注意事项

假设采用无噪声输入源，我们希望缓冲器噪声低于 PLL 的噪声。对于 PLL，当多个合成器组合在一起时，该噪声会降低。对于缓冲器，组合只会降低输出状态噪声，但输入级直接进入输出端。[表 2-1](#) 显示了仅使用一个源进行的分析，体现了寻找具有足够相位噪声的缓冲器所面临的挑战。

表 2-1. 缓冲器相位噪声比较

频率	LMX2820 PLL	LMK12C104 缓冲器	LMK12D104 缓冲器	LMX1204 缓冲器
偏斜	Prop.延迟变化： 60ps (典型值)	输出到输出偏斜： 50ps (最大值)	输出到输出偏斜： 20ps (最大值)	输出到输出偏斜： 1ps (典型值) 15ps (最大值)
10MHz	-166	-170	-163.0	x
50MHz	-159	-170	-162.7	x
100MHz	-156	-170	-161.6	x
250MHz	-152	-168	-160.2	x
500MHz	-146	x	-159.1	-161
1GHz	-143	x	-158.1	-161

PLL 本底噪声可以通过取 PLL 品质因数并加 $10 \times \log(f_{PD})$ 来计算。 f_{PD} 是相位检测器频率，等于输入频率，前提是相位检测器变为高电平。如果不是，则噪声会增加。对于表 2-1，假设 PLL 品质因数为 -236dBc/Hz、最大相位检测器频率为 400MHz，这就是相位噪声在 250MHz 之后以更快的速率增加的原因。还需要比较 PLL 的 $1/f$ 噪声与缓冲器的 $1/f$ 噪声。请记住，这是针对单个合成器，组合多个合成器会使缓冲器的噪声要求更加严格。

3 组合输出的注意事项

3.1 源之间的隔离

将多个源连接在一起并以相同的频率运行，它们倾向于相互对抗。隔离的量取决于器件，但添加更多电阻、缓冲或使用现成组合器可能会有所帮助。可以将隔离视为源 A 在源 B 的源输出阻抗两端产生的电压。

此处的方法使用电感器或电阻网络进行匹配，但如果某些系统中存在需要更高匹配度的问题，则可以使用现成的组合器。但是，这会增加成本和尺寸，也会限制可组合的合成器数量。

3.2 对比单端输出与差分输出

在大多数情况下，假设信号是单端信号，组合单端信号比组合差分信号要容易得多。如果该器件输出差分信号，则可以使用平衡-非平衡变压器对其进行转换，或者只可以使用一侧，并且忽略互补侧。

3.3 组合导致的损耗

当信号组合过程为所需信号和噪声引入相同量的损耗时，这不会影响相位噪声。例如，电阻焊盘可以将信号和噪声降低 6dB，但这不会使相位噪声变大。由于组合多个信号，可以接受产生一些损耗，因为合成器数量的增加也会导致增益。

不过，如果由于相位错位而导致信号功率损耗，这可以降低所需信号的功率，但不会降低噪声功率。在这种情况下，这可能会导致相位噪声变大。

4 用于组合多个信号的电阻法

4.1 源输出阻抗可能与负载阻抗不同的一般情况

图 4-1 显示了组合多个源来驱动单个负载的一般方法。假设所有源都具有相同的振幅和输出阻抗，并且单个源的输出阻抗等于负载。

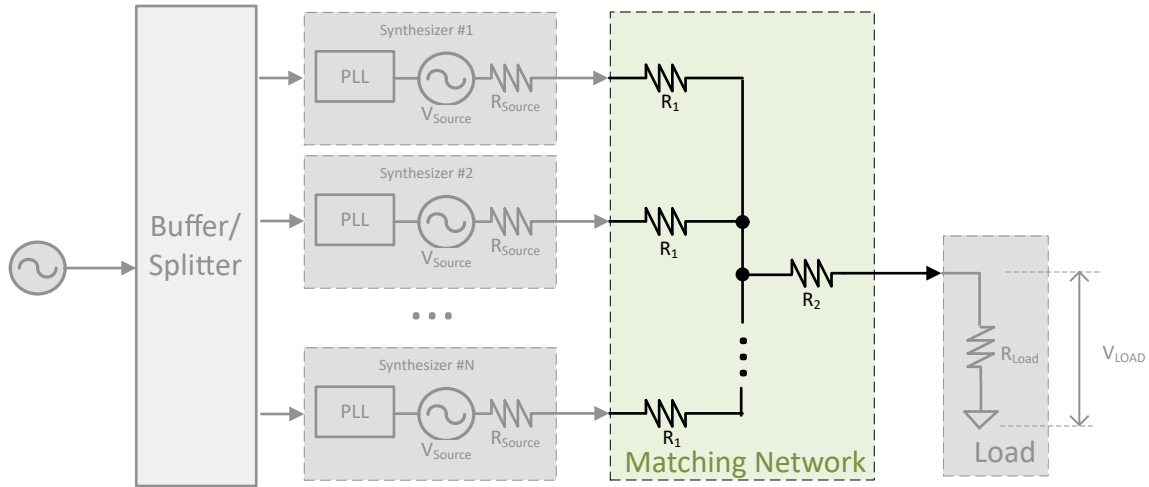


图 4-1. 通用电阻匹配网络

匹配电阻器的值可按以下方式 (附录 A) 进行计算：

$$R_1 = R_{Source} \times \left(\frac{2 \times R_{Load} \times N \times (N-1)}{N^2 \times R_{Load} - R_{Source}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$R_2 = R_{Load} \times \left(1 - \frac{2 \times R_{Source} \times (N-1)}{N^2 \times R_{Load} - R_{Source}} \right) \quad (2)$$

只要满足以下条件，即可进行此匹配：

$$\frac{R_{Load}}{R_{Source}} \geq \frac{2 \times N - 1}{N^2} \quad (3)$$

为了进行分析，需要使用一个有效量来了解与 N-1 源并联的负载的等效电阻。

$$R_{eq} = \frac{(R_1 + R_{Source}) \times (R_2 + R_{Load})}{R_1 + R_{Source} + (N-1) \times (R_2 + R_{Load})} \quad (4)$$

通过此公式可以计算出相对功率。

$$P_{Relative} = 20 \times \log \left[\frac{N \times R_{eq} \times (R_{Load} + R_{Source})}{(R_{eq} + R_{Load} + R_{Source}) \times (R_2 + R_{Load})} \right] \quad (5)$$

源 A 和源 B 之间的隔离可以定义为源 A 在源 B 的源阻抗上产生的电压，可以表示为 dB。

$$Isolation = 20 \times \log \left[\frac{R_{Source} \times R_{eq}}{(R_{eq} + R_1 + R_{Source}) \times (R_1 + R_{Source})} \right] \quad (6)$$

4.2 源阻抗和负载阻抗相同的特殊情况

如果源电阻和负载电阻相同，则 方程式 1 和 方程式 2 简化为：

$$R_1 = R_2 = R_{Match} = R_{Source} \times \frac{N-1}{N+1} \quad (7)$$

$$P_{Relative} = 0 \quad (8)$$

在有两个源的情况下，图 4-2 显示了可以组合使用的一种常见方法。

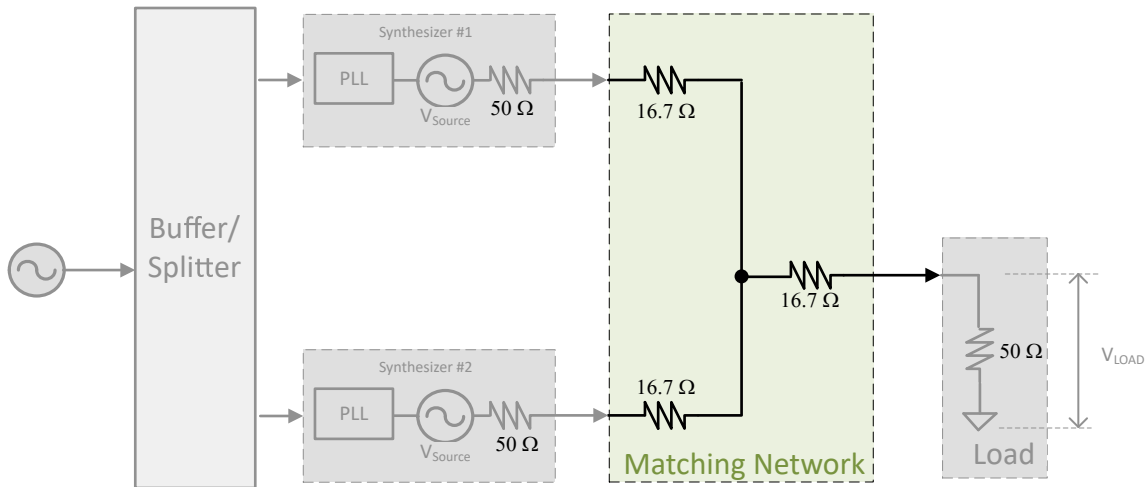


图 4-2. 组合两个 50 Ω 源

也可以通过这种方式组合三个源。

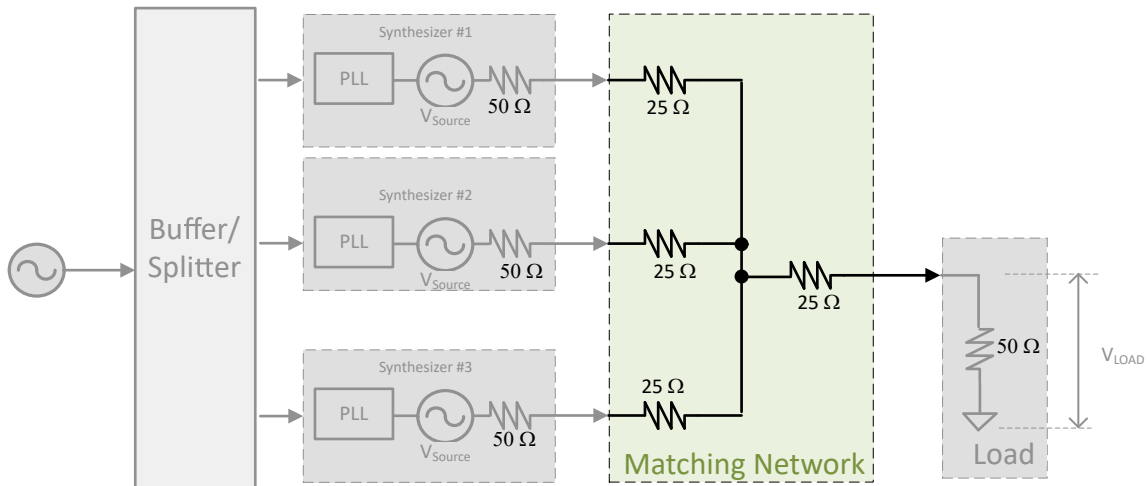


图 4-3. 组合三个 50 Ω 源

4.3 增大 R1 以改善隔离

为了改善隔离，一种方法是可视化添加一个串联电阻 R_{ISO} 到每个源，然后像以前一样进行计算，但使用增加的源电阻 ($R_{Source} + R_{ISO}$)。极端情况是为满足 [方程式 3](#) 的 R_{ISO} 做出最大选择。

$$R_{ISO} = \frac{N^2}{2 \times N - 1} \times R_{Load} - R_{Source} \quad (9)$$

做出此选择时，可以按以下公式求解其他元件：

$$R_1 = N \times R_{Load} - R_{Source} \quad (10)$$

$$R_2 = 0 \quad (11)$$

在源阻抗和负载阻抗相同的情况下，这种选择会产生非常相似的功率，或者可能高出零点几 dB。问题可能是布线阻抗需要匹配到与 50 Ω 相差很大的电阻。在 [图 4-4](#) 中，从技术上讲，这些电阻之间的布线阻抗需要是 66.7 Ω。 [图 4-5](#)。在本例中，计算得出的功率大约低了 0.7dB，但电源之间的隔离改善了约 8dB。

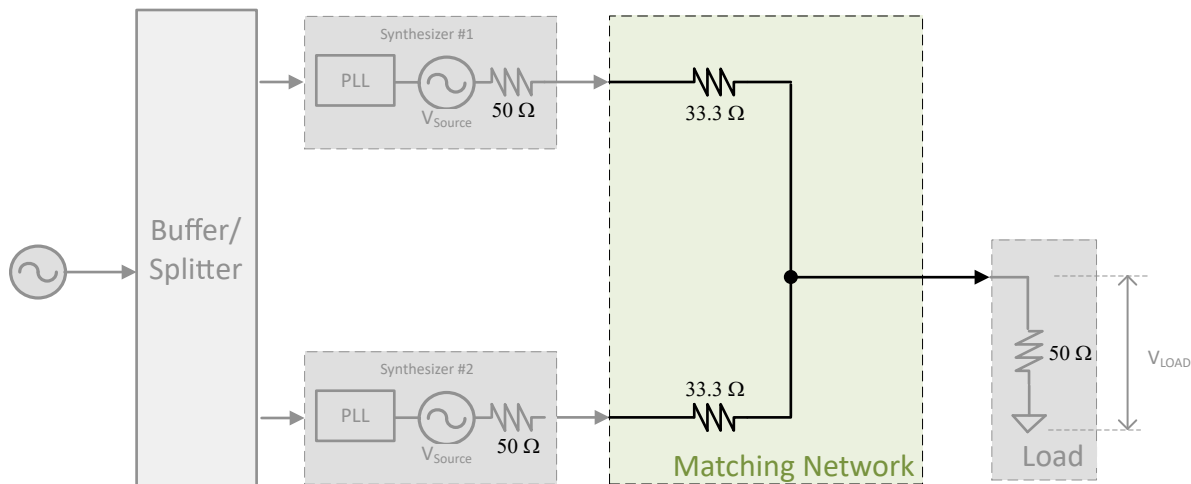


图 4-4. 组合两个源并添加隔离

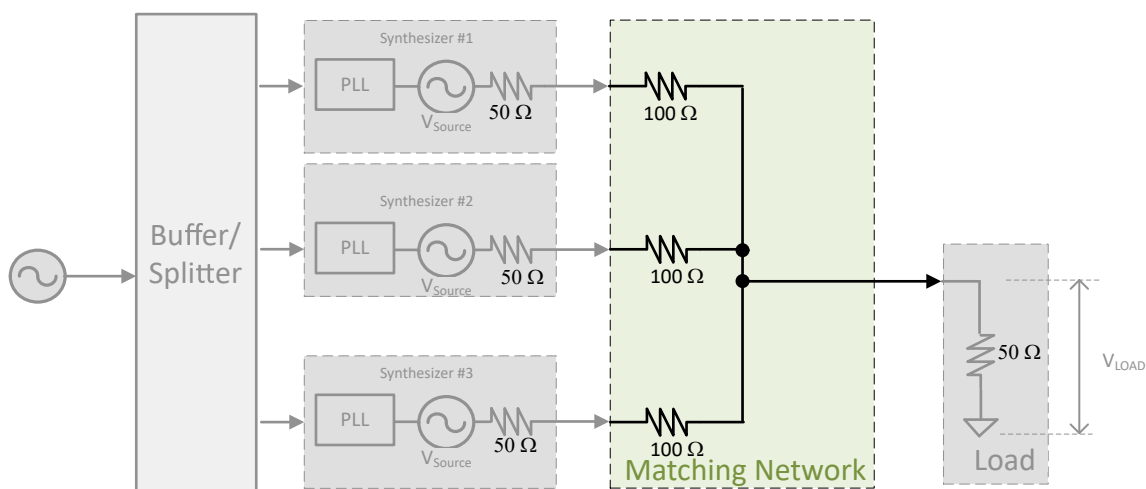


图 4-5. 组合三个源并添加隔离

对于三个源的情况，添加隔离电阻理论上可以提供完全相同的功率，但可以将隔离提高 10dB。不过，需要考虑布线阻抗匹配，因为这会使匹配远远超出 50 Ω 系统。

5 与无功电路的阻抗匹配

电阻匹配电路简单，可提供良好的匹配。但此电路会牺牲输出功率。通过使用电感器和电容器，可以提供匹配，以使理论上的输出功率高 6dB。但是，在高频率下，需要注意电感器和电容器的非设计行为。

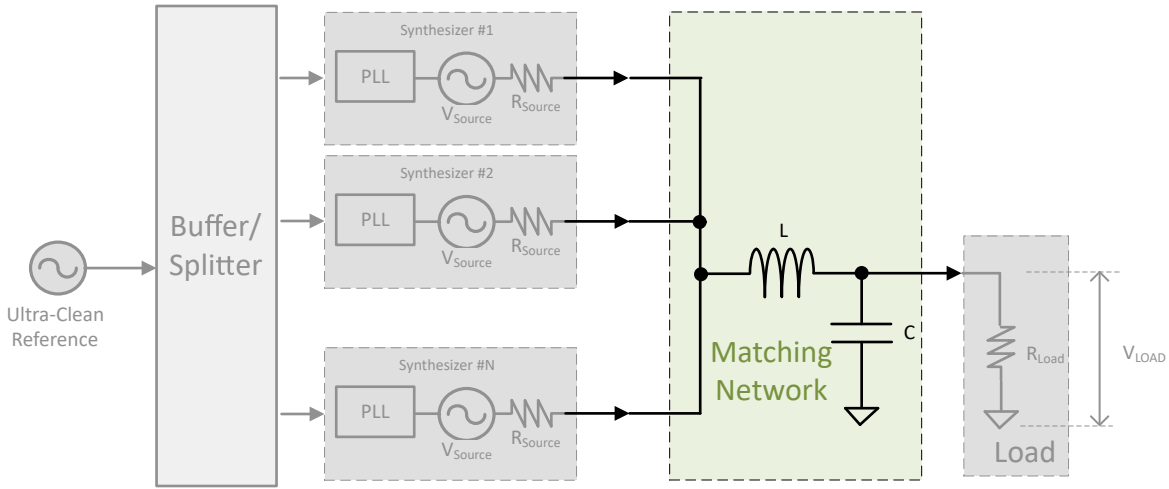


图 5-1. 无功匹配电路

可以使用以下方法 (附录 B) 计算 L 和 C 的值：

$$L = \frac{j \times \frac{Q \times R_{Source}}{N}}{2\pi \times f \times j} = \frac{R_{Source} \times Q}{2\pi \times f \times N} \quad (12)$$

$$C = \frac{-j}{2\pi \times f \times X_C} = \frac{Q}{R_{Load} \times 2\pi \times f} \quad (13)$$

这些计算假设满足以下限制条件。

$$\frac{R_{Source}}{N} < R_{Load} \quad (14)$$

将输出直接短接在一起可能会引起一些关于电源之间隔离的问题。为了缓解此问题，可以添加一个串联电阻，然后重新计算包含此电阻的 R_{Source} 。但是，这种方法会牺牲一些功率。

6 相位误差导致的损耗

信号之间的相位会导致功率损耗。附录 C 显示，当最坏情况相位误差 ϕ 被限制在不超过 180 度时，N 个信号的最坏情况组合为：

$$Loss = \begin{cases} 10 \times \log\left[\frac{1 + \cos \phi}{2}\right] & N \text{ even} \\ 10 \times \log\left[\frac{1}{n^2} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\left(\frac{1 + \cos(\phi)}{2}\right)\right] & N \text{ odd} \end{cases} \quad (15)$$

由此观察到，奇数个信号具有较高的相位误差电阻。

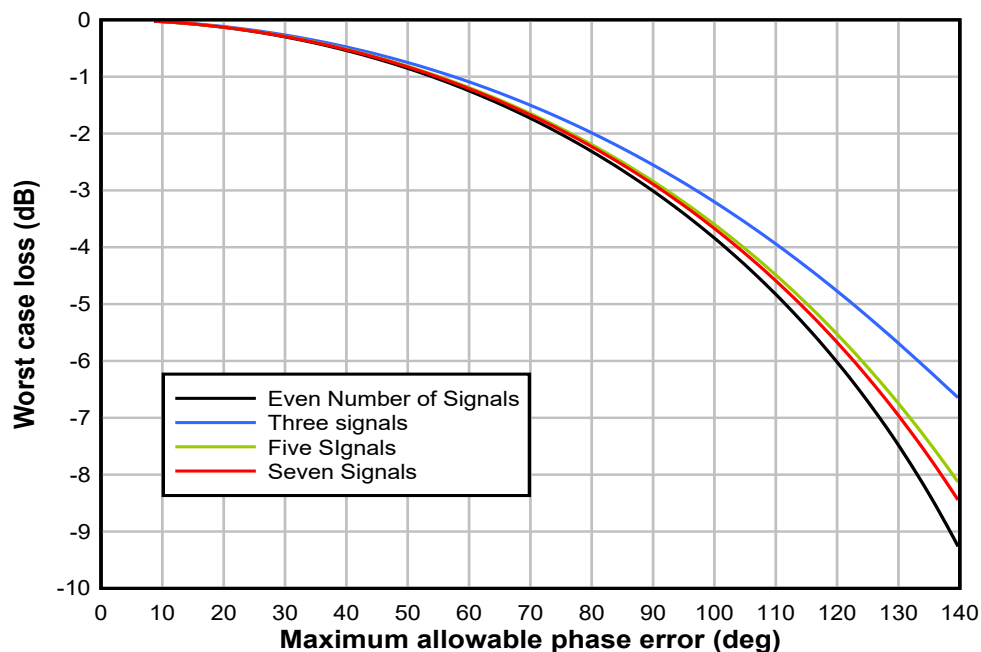


图 6-1. 相位误差导致的损耗

7 通过组合多个信号来改善相位噪声

7.1 针对同相设计的多个信号的理论改进

首先考虑组合两个振幅相同的同相合成器的情况。在这种情况下，电压可以翻倍，从而将输出功率增加 6dB。不过，这两个合成器的噪声不相关，因此噪声功率仅增加 3dB。这会使理论上的相位噪声改善 3dB。即使组合中存在损耗（例如在电阻电路的情况下），这也会同样适用于输出功率和噪声功率，因此相位噪声改善仍然为 3dB。一个考虑因素是输入基准时钟需要足够干净。由于此参考时钟的噪声是两个合成器所共有，因此这实际上会随着噪声功率的增加而增加 6dB。此外，这种方法会降低由合成器产生的噪声，但不会降低基准时钟产生的噪声。根据这一结果可以概括，将相位中的 N 个信号组合在一起时，相位噪声的理论改进为 $10 \times \log(N)$

7.2 组合多个信号与相位误差

当出现相位误差时，这会降低信号功率，但不会降低噪声功率。如果将这添加到理论噪声改善中，则可以求出考虑相位误差的相位噪声改善结果。

$$L(n) = \begin{cases} 10 \times \log(n) + 10 \times \log\left(\frac{1 + \cos(\phi)}{2}\right) & n \text{ even} \\ 10 \times \log(n) + 10 \times \log\left[\frac{1}{n^2} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\left(\frac{1 + \cos(\phi)}{2}\right)\right] & n \text{ odd} \end{cases} \quad (16)$$

图 7-1 显示了组合多个信号可以实现的改善。请注意，奇数个合成器（尤其是三个合成器）的组合似乎对较大的相位误差具有更高的抗扰度。

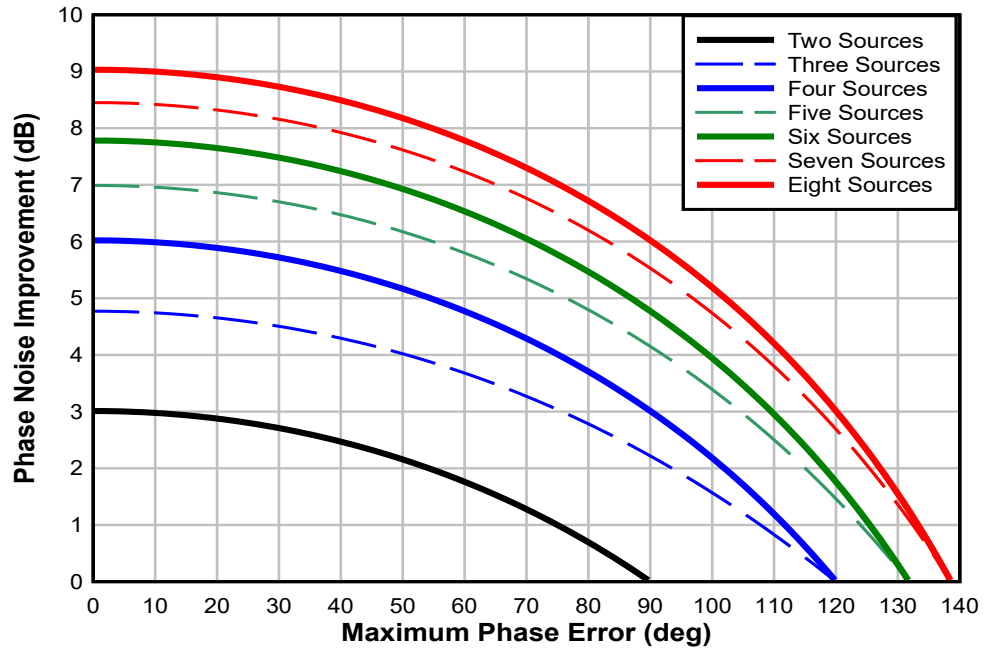


图 7-1. 组合多个信号时的相位噪声改善

8 总结

当存在增加成本、电路板面积和功率的空间时，组合多个信号源以获得更好的相位噪声是一种有效的方法。尽管经常使用两个源，但此过程也可以扩展以使用更多的源。

9 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [组合两个 LMX2820 合成器输出以改善相位噪声](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI), [适用于抖动小于 40fs \(100Hz 至 100MHz \) 的多个 PLL 组合参考设计](#) 设计指南。

A 附录：电阻匹配网络的计算

两个关键的限制是：

1. 从负载向外看的阻抗等于负载阻抗
2. 从任何源向外看的阻抗均等于该源输出阻抗

为了简化计算过程，首先引入这两个变量，即 x 和 y 。

$$x = R_1 + R_{Source} \quad (17)$$

$$y = R_2 + R_{Load} \quad (18)$$

现在，已知并联 N 个物体的组合可以得到等于原始阻抗除以 N 的阻抗，使用上述两个定义，得到以下关键公式：

$$R_{Load} = R_2 + \frac{x}{N} \quad (19)$$

$$R_{Source} = R_1 + \left(\frac{x}{N-1}\right) \parallel (y) = R_1 + \frac{x \times y}{x + (n-1) \times y} \quad (20)$$

这些公式可按如下方式重新排列：

$$\frac{x}{N} + y = 2 \times R_{Load} \quad (21)$$

$$\frac{x \times y}{x + (n-1) \times y} + x = 2 \times R_{Source} \quad (22)$$

公式 [方程式 22](#) 可简化为

$$2 \times N \times R_{Load} \times x = 2 \times R_{Source} \times (2 \times N \times R_{Load} - y) \quad (23)$$

可以组合公式 [方程式 21](#) 和 [方程式 23](#) 以得到

$$x = \frac{2 \times R_{Source} \times R_{Load} \times N \times (N-1)}{N^2 \times R_{Load} - R_{Source}} \quad (24)$$

可以组合公式 (11)、(12)、(18) 和 (19) 以得到 R_1 和 R_2 的值

$$R_1 = R_{Source} \times \left(\frac{2 \times R_{Load} \times N \times (N-1)}{N^2 \times R_{Load} - R_{Source}} - 1 \right) \quad (25)$$

$$R_2 = R_{Load} \times \left(1 - \frac{2 \times R_{Source} \times (N-1)}{N^2 \times R_{Load} - R_{Source}} \right) \quad (26)$$

通过设置以下条件，可以确保 $R_2 \geq 0$ ，也可以确保 $R_1 \geq 0$

$$\frac{R_{Load}}{R_{Source}} = \frac{2 \times N - 1}{N^2} \quad (27)$$

在许多情况下，源阻抗和负载阻抗相同。在这种情况下，公式 [方程式 25](#) 和 [方程式 26](#) 简化为：

$$R_1 = R_2 = R_{Match} \times \left(\frac{N-1}{N+1} \right) \quad (28)$$

B 附录：无功匹配网络的计算

引入以下术语：

$$X_L = 2\pi \times f \times j \times L \quad (29)$$

$$X_C = -j \times \frac{1}{2\pi \times f \times C} \quad (30)$$

$$z = X_L + \frac{R_{Source}}{N} \quad (31)$$

看向负载的阻抗需要与从负载向外看的阻抗相同。

$$R_{Load} = z \parallel X_C = \frac{z \times X_C}{z + X_C} \quad (32)$$

此公式可按以下方式重新排列：

$$z = \frac{X_C \times R_{Load}}{X_C - R_{Load}} \quad (33)$$

从电感器向外看的阻抗需要等于看向电感器的阻抗

$$2 \times \frac{R_{Source}}{N} = z + R_{Load} \parallel X_C = z + \frac{R_{Load} \times X_C}{R_{Load} + X_C} \quad (34)$$

组合这些方程即可得到

$$2 \times \frac{R_{Source}}{N} = \frac{R_{Load} \times X_C}{X_C - R_{Load}} + \frac{R_L \times X_C}{X_C + R_{Load}} = \frac{2 \times R_{Load} \times X_C^2}{X_C^2 - R_{Load}^2} \quad (35)$$

定义以下术语：

$$Q = \sqrt{\frac{N \times R_{Load}}{R_S} - 1} \quad (36)$$

要非常仔细，确保得到正确的根和正确的分支。例如，注意到这些公式可以组合为

$$\text{i.e.} \sqrt{\frac{1}{-1}} = -j \neq j \quad (37)$$

考虑到这一点，这些方程可以组合为

$$X_C = -j \times \frac{R_{Load}}{\sqrt{\frac{N \times R_{Load}}{R_S} - 1}} = -j \times \frac{R_{Load}}{Q} \quad (38)$$

将此值代回 x 和 y 的值，得到：

$$\frac{\left(-j \times \frac{R_{Load}}{Q}\right) \times R_{Load}}{\left(-j \times \frac{R_{Load}}{Q}\right) - R_{Load}} = X_{Load} + \frac{R_{Source}}{N} \quad (39)$$

这可以简化为：

$$X_L = \frac{\left(-j \times \frac{R_{Load}}{Q}\right) \times R_{Load}}{\left(-j \times \frac{R_{Load}}{Q}\right) - R_{Load}} - \frac{R_{Source}}{N} = \frac{j \times Q \times R_{Load} + R_{Load}}{Q^2 + 1} - \frac{R_{Source}}{N} = \frac{j \times Q \times R_{Load} + R_{Load}}{\frac{N \times R_{Load}}{R_{Source}}} - \frac{R_{Source}}{N} \quad (40)$$

$$= j \times \frac{Q \times R_{Source}}{N}$$

最后，可得出电感和电容值：

$$L = \frac{j \times \frac{Q \times R_{Source}}{N}}{2\pi \times f \times j} = \frac{R_{Source} \times Q}{2\pi \times f \times N} \quad (41)$$

$$C = \frac{-j}{2\pi \times f \times X_C} = \frac{Q}{R_{Load} \times 2\pi \times f} \quad (42)$$

C 附录：计算相位误差导致的损耗

首先考虑添加两个具有相同幅度的矢量。第一个矢量的角度为零度，第二个矢量的角度为 ϕ 。因此，向量为：

$$\langle 1 + \cos \phi, \sin \phi \rangle$$

幅度的计算公式为：

$$\| \langle 1 + \cos \phi, \sin \phi \rangle \| = \sqrt{(1 + \cos \phi)^2 + (\sin \phi)^2} = 2 \times \sqrt{1 + \cos \phi} \quad (43)$$

如果所得矢量的角度不直观，则通过识别该矢量计算的角度与相切的半角公式相关，可以更明显地看出这一点。

$$\tan \frac{\phi}{2} = \frac{\sin \phi}{1 + \cos \phi} \quad (44)$$

此外，这需要直观，如果将偶数个矢量组合在一起，则角度不会变化，幅度可以为：

$$\frac{N}{2} \times 2 \times \sqrt{1 + \cos \phi} = N \times \sqrt{1 + \cos \phi} \quad (45)$$

如果矢量的数量为奇数，则将除最后一个矢量外的所有矢量相加，此公式已知。显然，如果最后一个矢量在角度 $\phi/2$ 处，那么可以提供的功率最大，因此在不影响一般性的情况下，对于最坏的情况，最后一个矢量可以在零度处。因此，在矢量数量为奇数的情况下，幅度可以为：

$$\begin{aligned} \left\| \left\langle 1 + \frac{N-1}{2} + \frac{N-1}{2} \times \cos \phi, \frac{N-1}{2} \times \sin \phi \right\rangle \right\| &= \sqrt{\left(1 + \frac{N-1}{2} + \frac{N-1}{2} \times \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{N-1}{2} \times \sin \phi\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{N^2+1}{2} + \frac{N^2-1}{2} \times \cos \phi} \end{aligned} \quad (46)$$

需要注意与设计的 N 信号组合相比的功率损耗，该损耗可通过以下公式计算得出：

$$Loss = \begin{cases} 10 \times \log \left[\frac{1 + \cos \phi}{2} \right] & N \text{ even} \\ 10 \times \log \left[\frac{1}{n^2} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left(\frac{1 + \cos(\phi)}{2}\right) \right] & N \text{ odd} \end{cases} \quad (47)$$

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司