

## Application Note

## 转换率对噪声的影响



Dean Banerjee

## 摘要

输入时钟转换率可能会对 PLL (锁相环)、缓冲器和数据转换器的相位噪声与信噪比产生重大影响。当输入时钟转换率足够高时,才可获得理想性能。本文探讨了为什么会出现这种情况,并使用理论方法和测量结果量化了相位噪声与转换率、功率和频率的关系。

## 内容

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| 1 闪烁噪声、本底噪声和总噪声.....                           | 2  |
| 1.1 闪烁噪声.....                                  | 2  |
| 1.2 本底噪声.....                                  | 2  |
| 1.3 总噪声.....                                   | 2  |
| 2 得出转换率.....                                   | 3  |
| 2.1 使用示波器确定转换率.....                            | 3  |
| 2.2 根据功率和频率计算转换率.....                          | 3  |
| 3 转换率对相位噪声的影响.....                             | 4  |
| 3.1 输入时钟转换率、固有器件噪声和输出抖动的建模.....                | 4  |
| 3.2 High Slew rate 转换率对闪烁噪声和本底噪声的影响.....       | 4  |
| 4 将转换率规则应用于 PLL 合成器.....                       | 7  |
| 4.1 PLL 闪烁噪声.....                              | 7  |
| 4.2 PLL 品质因数.....                              | 8  |
| 4.3 PLL 中转换率对于性能的其他影响方面.....                   | 9  |
| 4.4 提高 PLL 转换率以优化性能.....                       | 9  |
| 5 将转换率规则应用于数据转换器.....                          | 10 |
| 6 总结.....                                      | 11 |
| 7 参考资料.....                                    | 11 |
| 附录 A : 将转换率、功率和频率相关联.....                      | 12 |
| 附录 B : 将转换率、频率、抖动和相位噪声相关联.....                 | 13 |
| 附录 C : 数据转换器公式.....                            | 15 |
| 8.1 将采样信号转换率与 SNR 相关联.....                     | 15 |
| 8.2 在转换率受限情况下输入功率每降低 1dB SNR 随之降低 1dB 的理由..... | 15 |
| 附录 D : 数据转换器计算示例.....                          | 16 |

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 闪烁噪声、本底噪声和总噪声

在对时钟缓冲器、PLL 和数据转换器的输入级进行建模时，总噪声可以分解为闪烁噪声和本底噪声。

### 1.1 闪烁噪声

闪烁噪声（也称为  $1/f$  噪声）来自从一个时钟周期到下一个时钟周期关联的固有器件噪声。这种噪声的特征表现是随输出（载波）频率的变化而变化（ $20\text{dB}/十倍频$ ），并随偏移频率的降低而降低（ $10\text{dB}/十倍频$ ）。

$$PN_{\text{Flicker}}(f, \text{offset}) \propto 20 \times \log(f) - 10 \times \log(\text{offset}) \quad (1)$$

### 1.2 本底噪声

本底噪声产生于固有器件噪声，该噪声从一个时钟周期到下一个时钟周期不关联。这种噪声的特征表现为噪声相对于偏移频率是平坦的，它随输出频率而变化（ $10\text{dB}/十倍频$ ）。

$$PN_{\text{NoiseFloor}}(f) \propto 10 \times \log(f) \quad (2)$$

### 1.3 总噪声

通过将闪烁噪声与本底噪声相加，可以得出总噪声。

$$PN_{\text{Total}}(f, \text{offset}) = 10 \cdot \log[10^{(PN_{\text{Flicker}}(f, \text{offset})/10)} + 10^{(PN_{\text{NoiseFloor}}(f)/10)}] \quad (3)$$

请注意，随着闪烁噪声和本底噪声随输出频率的变化以不同方式变化，总相位噪声的形状也会随载波频率而变化。图 1-1 显示了总噪声的示例计算。

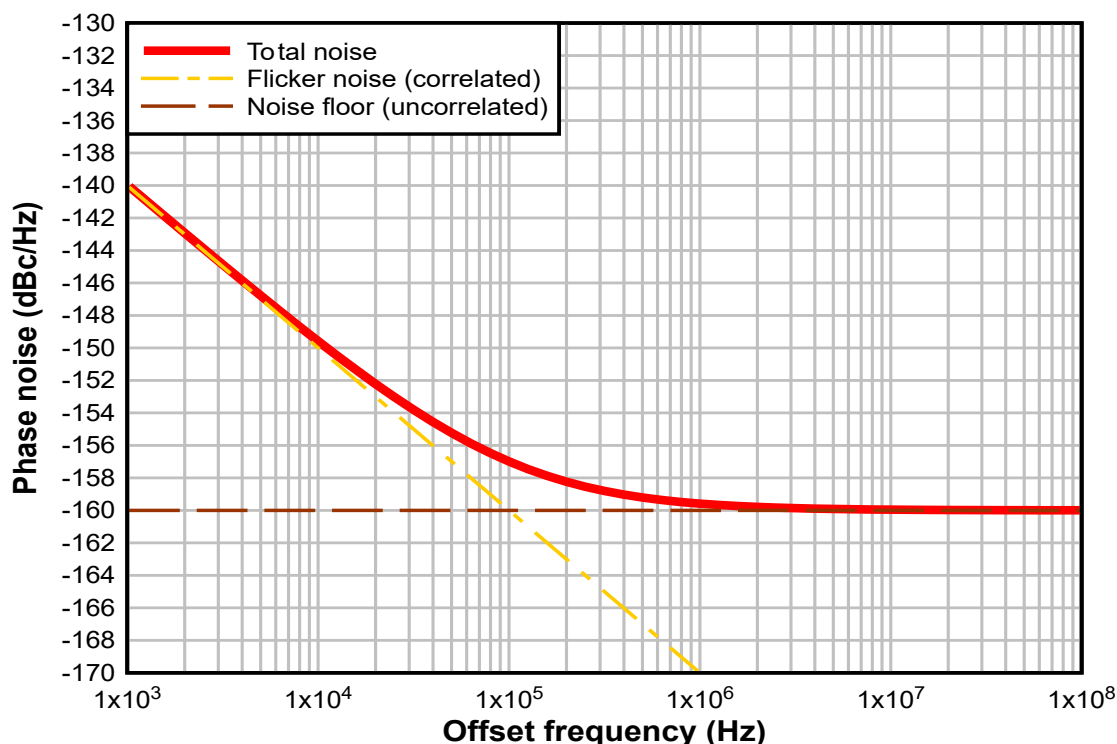


图 1-1. 通过闪烁噪声和本底噪声计算总噪声

## 2 得出转换率

### 2.1 使用示波器确定转换率

可以通过找到一个接近信号中间电平的范围并将电压变化 ( $\Delta V$ ) 除以给定时间 ( $\Delta t$ ) 内的变化来测量转换率 (SR)。

$$SR = \frac{dV}{dt} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4)$$

如果当信号越过阈值电压时信号看起来呈线性，并且有一个具有足够带宽进行测量的示波器，则此方法很有效。

### 2.2 根据功率和频率计算转换率

如果信号是正弦波，则转换率 (SR)、频率 (f) 与功率 (p) 之间的关系以及相关计算请参阅 [附录 A：将转换率、功率和频率相关联](#)，关键关系如下所示：

$$SR = \frac{2\pi \cdot f \times 10^{\frac{p}{20}}}{\sqrt{10}} \quad (5)$$

此公式表示，将频率加倍会使转换率加倍，将功率增加 6dB 也会使转换率加倍，如 [图 2-1](#) 所示。

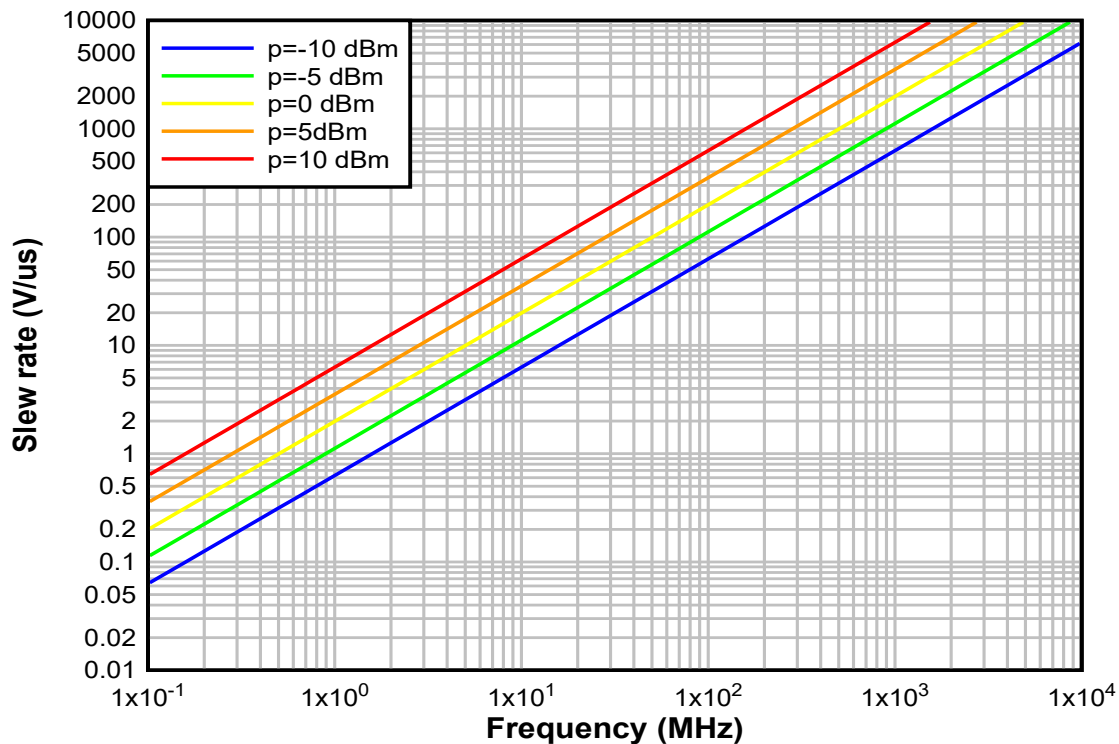


图 2-1. 正弦波信号下功率、转换率与频率之间的关系

### 3 转换率对相位噪声的影响

#### 3.1 输入时钟转换率、固有器件噪声和输出抖动的建模

要了解转换率对相位噪声的影响，首先要在简单缓冲器上进行建模，如图 3-1 所示。然后可以进一步拓展这一理解，以了解输入时钟转换率对 PLL、数据转换器和时钟缓冲器的影响，因为它们都包含输入缓冲器。要进行噪声建模，首先要假定输入时钟没有噪声且具有已知转换率。固有器件噪声可以建模为 RMS 电压，该电压添加到输入时钟以产生内部合成信号。该信号随后会经过一个比较器，该比较器对信号进行平方处理以产生输出信号。

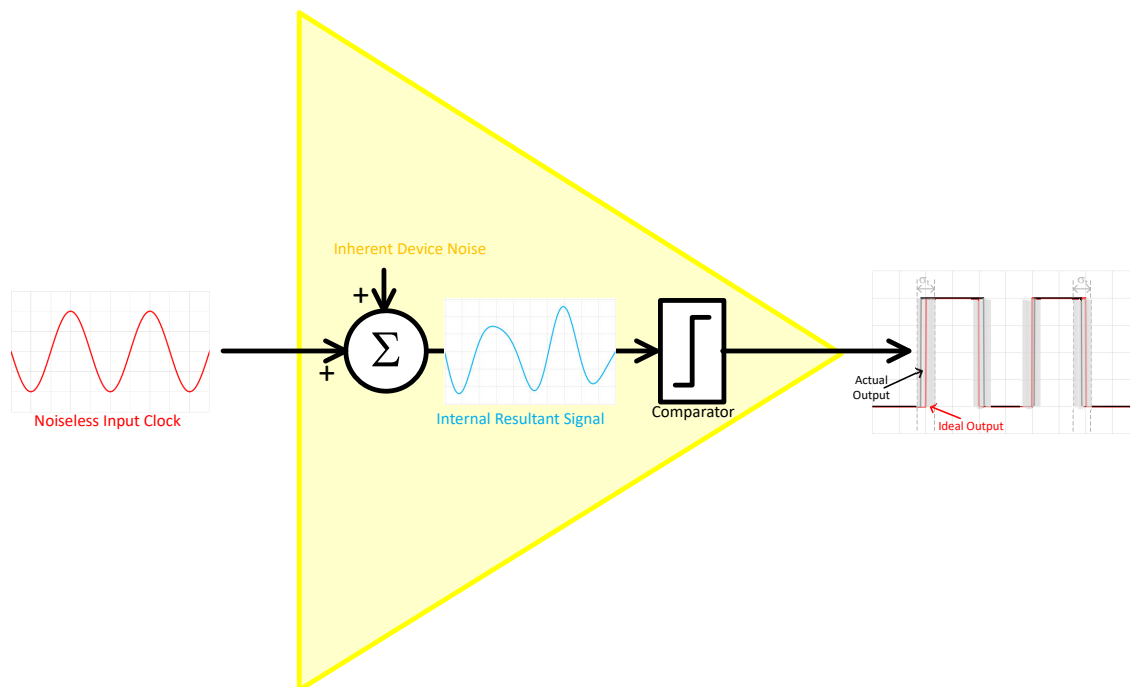


图 3-1. 对于转换率对输出抖动的影响进行建模

#### 3.2 High Slew rate 转换率对闪烁噪声和本底噪声的影响

可将固有器件噪声 (RMS 电压噪声) 视为一个常量，在较高转换率下，由此产生的抖动较低，如以下公式所示：

$$\text{RMS Jitter} = \frac{\text{RMS Voltage Noise}}{\text{Slew Rate}} \quad (6)$$

如果输入缓冲器的噪声占优，并且增加转换率（同时保持频率恒定）可产生明显改善，则称为相位噪声受到转换率限制。在某些时候，来自器件其他部分的相位噪声占优，称为相位噪声不受转换率限制。此时，增加转换率会带来收益递减，例如，转换率加倍时，收益仅为 0.1dB。

表 3-1 展示了闪烁噪声和本底噪声随输出频率和转换率变化的基本趋势。总相位噪声是受转换率限制和不受转换率限制的相位噪声源的总和。有关此表的推导，请参阅节 附录 B：将转换率、频率、抖动和相位噪声相关联。

**表 3-1. 转换率和载波频率对闪烁噪声和本底噪声的影响**

| 噪声类型 | 受转换率限制                                                  | 不受转换率限制                             |
|------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 闪烁噪声 | $PN \propto 20 \times \log(f) - 20 \times \log(SR)$ (7) | $PN \propto 20 \times \log(f)$ (8)  |
| 本底噪声 | $PN \propto 10 \times \log(f) - 20 \times \log(SR)$ (9) | $PN \propto 10 \times \log(f)$ (10) |

对于正弦波或削波正弦波，转换率与频率成正比。将此假定应用于表 3-1 可得出表 3-2。一个观察结果是，当频率较高时，器件往往不受转换率限制，且闪烁噪声随频率增加，增加速度高于本底噪声。因此，在高频率 (>10GHz) 下，闪烁噪声是缓冲器的一项重要考虑因素。

**表 3-2. 正弦波情况下的闪烁噪声和本底噪声趋势**

| 噪声类型 | 受转换率限制                               | 不受转换率限制                             |
|------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 闪烁噪声 | $PN = \text{constant}$ (11)          | $PN \propto 20 \times \log(f)$ (12) |
| 本底噪声 | $PN \propto -10 \times \log(f)$ (13) | $PN \propto 10 \times \log(f)$ (14) |

表 3-3 中的数据取自德州仪器 (TI) LMK00301 中的图表，该图表演示了受转换率限制的本底噪声的行为。正如预测的那样，在保持转换率恒定的同时将频率提高至四倍会使本底噪声降低约 6dB。在保持频率恒定的同时，将转换率加倍会使本底噪声提高 6dB。

**表 3-3. LMK00301 本底噪声随转换率和频率的变化**

| 转换率 (V/μs) | f = 156.26MHz | f = 625MHz |
|------------|---------------|------------|
| 1          | -148          | -143.5     |
| 1.5        | -152          | -145.5     |
| 2          | -154.5        | -149       |
| 2.5        | -156          | -150.5     |

图 3-2 给出了一个假设示例，通过假设采用恒定振幅的无噪声正弦波输入时钟，展示了输入缓冲器噪声的一般趋势。闪烁噪声最初相对于时钟频率保持恒定，因为噪声受转换率限制这一事实抵消了频率增加的一般趋势。由于闪烁噪声不受转换率限制，因此在约 100MHz 之后，闪烁噪声会增加。本底噪声在较低频率下受转换率限制，因此随着频率的增加，本底噪声在一段时间内会提高。在 40MHz 左右，转换率足够，本底噪声开始随频率降低。

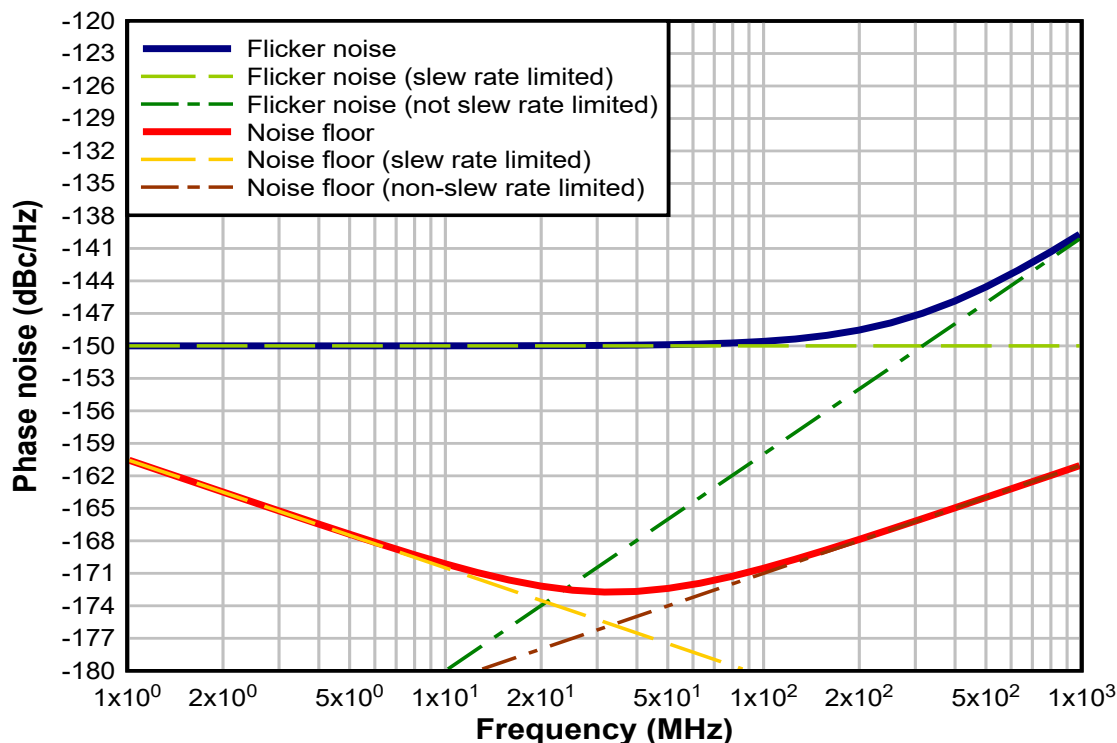


图 3-2. 闪烁噪声和本底噪声随频率的变化趋势

图 3-3 显示了摘自德州仪器 (TI) LMX1214 高频分频器缓冲器的本底噪声数据，并展示了本底噪声的一般碗形趋势，类似于图 3-2。

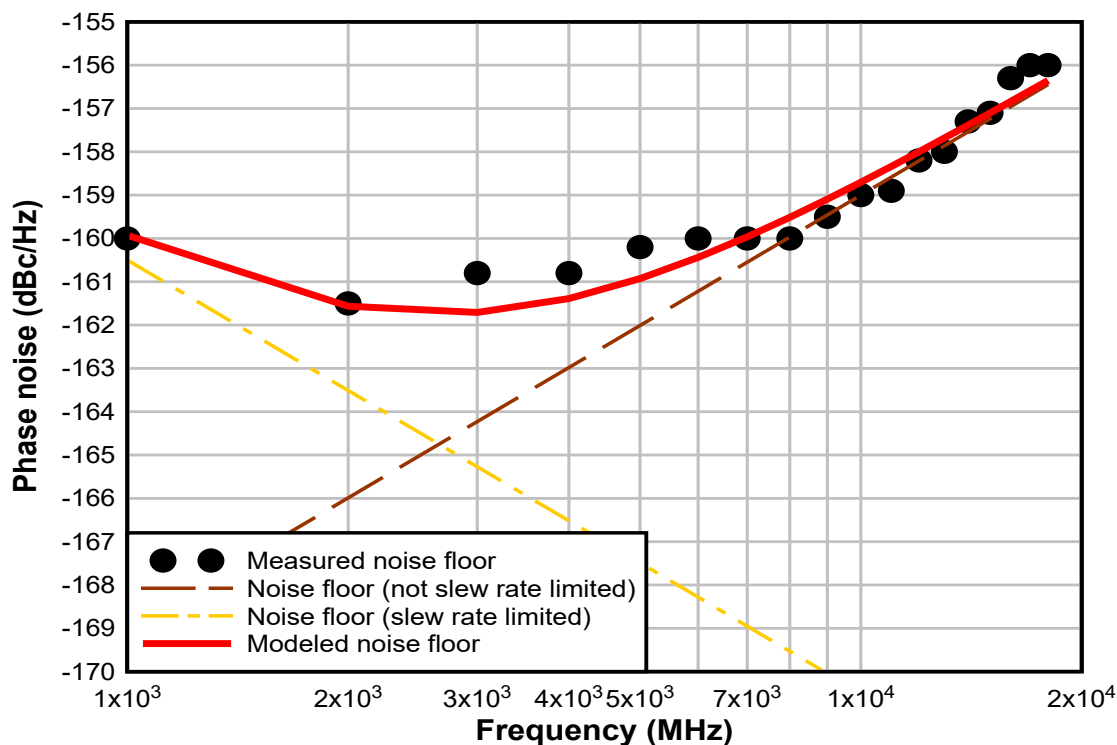


图 3-3. LMX1214 本底噪声趋势与频率间的关系

表 3-4 可以通过假定频率恒定、功率不断变化并利用方程式 5 应用表 3-1 来推导得出。这表明在该情况下，闪烁噪声和本底噪声均以相同方式受到输入功率的影响。图 3-4 以相位噪声下降角度展示了这一点。

表 3-4. 假定转换率与频率成正比时的闪烁噪声和本底噪声

| 噪声类型 | 受转换率限制               | 不受转换率限制                     |
|------|----------------------|-----------------------------|
| 闪烁噪声 | $PN \propto -p$ (15) | $PN = \text{constant}$ (16) |
| 本底噪声 | $PN \propto -p$ (17) | $PN = \text{constant}$ (18) |

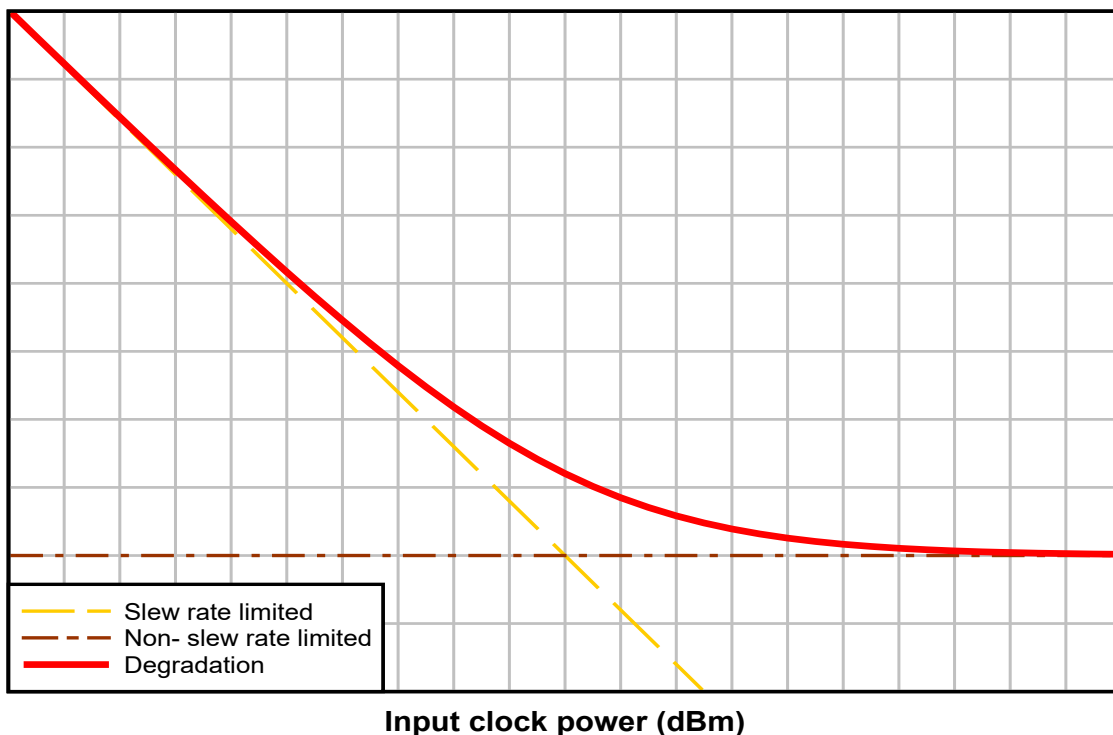


图 3-4. 相位噪声下降随转换率的变化

## 4 将转换率规则应用于 PLL 合成器

### 4.1 PLL 闪烁噪声

PLL 可以包含一个输入缓冲器，这在某些情况下可以限制相位噪声。近端  $1/f$  噪声的行为非常类似于缓冲器，不同之处在于噪声乘以  $20 \times \log(N)$  的系数，其中  $N$  是反馈分压器值。闪烁噪声通常归一化为 1GHz 载波频率和 10kHz 偏移，但也可以通过其他方法来建立度量。图 4-1 展示了如果德州仪器 (TI) LMX2615-SP PLL 的输入功率使用恒定 100MHz 输入频率，PLL 闪烁噪声下降与它的函数关系。请注意，其行为与缓冲器非常相似。

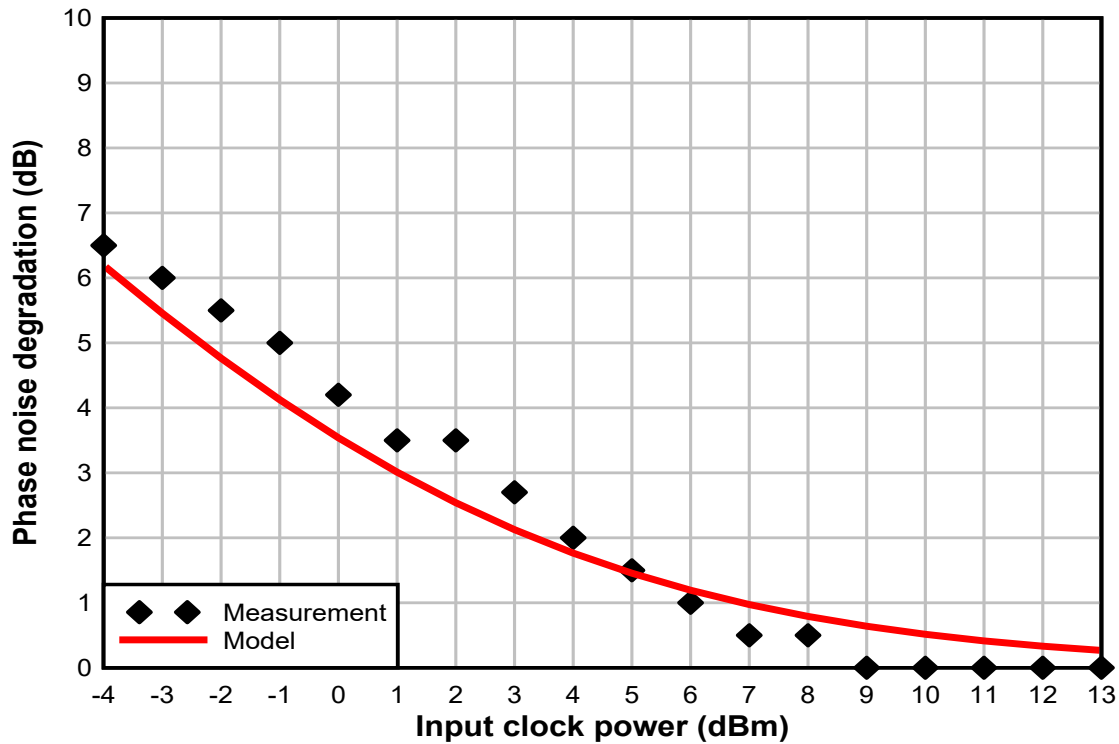


图 4-1. LMX2615-SP PLL 时钟输入功率对闪烁噪声的影响

该模型假定对于低输入功率，输出功率每降低 1dB，趋势下降 1dB。在 3dB 输入功率附近会达到一个拐点，在该拐点处，受转换率限制的噪声和不受转换率限制的噪声对总噪声的影响相同。

## 4.2 PLL 品质因数

对于本底噪声，PLL 通常使用品质因数 (FOM) 对其进行表征。该指标很有用，因为它允许使用单个数字来表征 PLL 本底噪声。可以使用反馈分频器值 (N) 和相位检测器频率 ( $f_{PD}$ )，通过 PLL 品质因数计算本底噪声。

$$\text{PN Noise Floor} = \text{FOM} + 20 \times \log(N) + 10 \times \log(f_{PD}) \quad (19)$$

图 4-2 显示了输入功率对 PLL 品质因数的影响



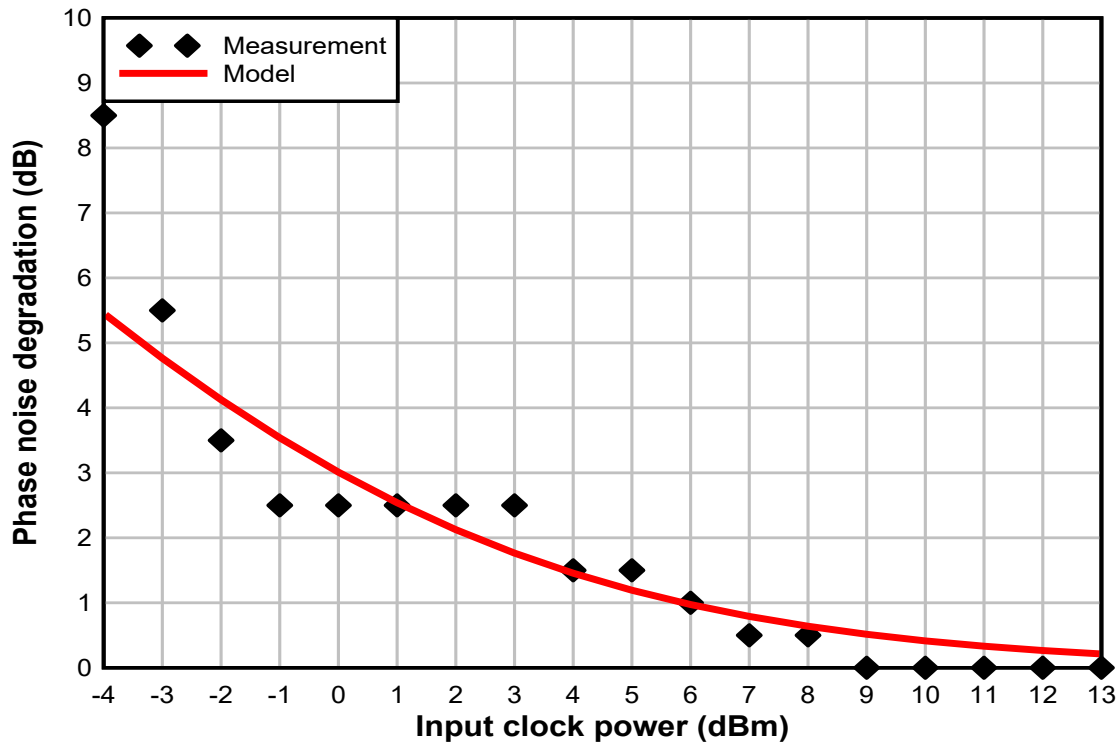


图 4-2. LMX2615-SP PLL 时钟输入功率对 PLL 品质因数的影响

图中未显示使用恒定输入功率、但更改输入频率的影响。对于 PLL，R 分频器可以对输入时钟频率进行分频，这样可以改善相位噪声。在改变输入频率并进行分频时，这也会对内部缓冲器输入噪声进行分频。所以在很多情况下，将输入时钟频率加倍和将 R 分频器加倍可以改善 PLL 的相位噪声。

#### 4.3 PLL 中转换率对于性能的其他影响方面

输入时钟转换率会影响 PLL 小数杂散。这是因为来自小数分频电路的小数杂散能量会耦合到 PLL 的输入路径。其行为方式与图 3-1 中的固有器件噪声非常相似。产生的抖动乘以  $20 \times \log(N)$ 。在输入时钟转换率足够低，可导致杂散受到转换率限制的情况下，输入功率增加 1dB，可将杂散提高 1dB。但是，过多地增加时钟转换率会在输入端产生更强的信号，这可能会产生耦合和混合。因此，我们专为 PLL 杂散设计了高转换率的低频输入（如 LVDS）。

转换率还会影响 PLL R 和 N 分频器灵敏度。灵敏度是计数器正常运行以及测量输出频率处于所需值的 1Hz 范围内所需的最小功率。这些计数器的输入具有内部电压噪声，因此灵敏度曲线通常具有碗形，如图 2-1 中的本底噪声所示。

#### 4.4 提高 PLL 转换率以优化性能

有时，会出现低输入时钟频率的情况，这不适用于 PLL。在这种情况下，如果策略性地选择缓冲器，那么缓冲器可以改善 PLL 相位噪声。德州仪器 (TI) LMK1C1102 CMOS 缓冲器具有出色的本底噪声，并且非常适合对信号进行平方处理。使用时钟缓冲器进行正弦波-方波转换展示了如何使用该缓冲器来改善 LMX2820 的相位噪声，即使对于最大允许输入功率 +10dBm 下的信号电平也是如此。对于 10MHz，它可提供出色的改善效果，甚至在 100MHz 输入频率下，也可提供一定程度的改善。

## 5 将转换率规则应用于数据转换器

数据转换器的一个关键指标是信噪比 SNR。信噪比是固定抖动（取决于热噪声、分辨率和其他频率无关因素）与抖动引起的 SNR 的组合。

$$\text{SNR} = -10 \times \log\left[\left(10^{\left(-\text{SNR}_{\text{Jitter}}/10\right)} + \left(10^{\left(-\text{SNR}_{\text{Fixed}}/10\right)}\right)\right] \quad (20)$$

可以使用以下公式计算由抖动引起的 SNR（节附录 C：数据转换器公式）：

$$\text{SNR}_{\text{Jitter}} = -20 \times \log[2\pi \times f \times \sigma] \quad (21)$$

此外，抖动（不包括采样信号）是时钟抖动和孔径抖动的组合。

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{\text{Clock}}^2 + \sigma_{\text{Aperture}}^2} \quad (22)$$

最后，节附录 C：数据转换器公式说明了在受转换率限制的情况下，时钟功率每增加 1dB，SNR 即提高 1dB。图 5-1 将这些公式应用于实际测量，在《能为下一个高速转换器设计带来优势的实用时钟注意事项》中对这些测量进行了深入介绍。在本例中，输入时钟具有固定 25MHz 频率，但使用了可变振幅在 5MHz 和 30MHz 采样信号下对模数转换器进行时钟计时。转换率受限趋势线显示 dB/1dB 趋势，5MHz 和 30MHz 趋势线之间的间隔为  $20 \times \log(30\text{MHz}/5\text{MHz}) = 15.6\text{dB}$ 。在振幅较低（如 -15dBm）时，性能受转换率限制，我们还看到 5MHz 和 30MHz 时钟测量之间存在同样的 15.6dB 间隔。在较高的输入振幅下，一些其他因素占优，这些因素不受转换率的影响。其结果是曲线中没有完整的 15.6dB 差异，但实际上在较高的输入功率级别下会更接近 5dB 左右。

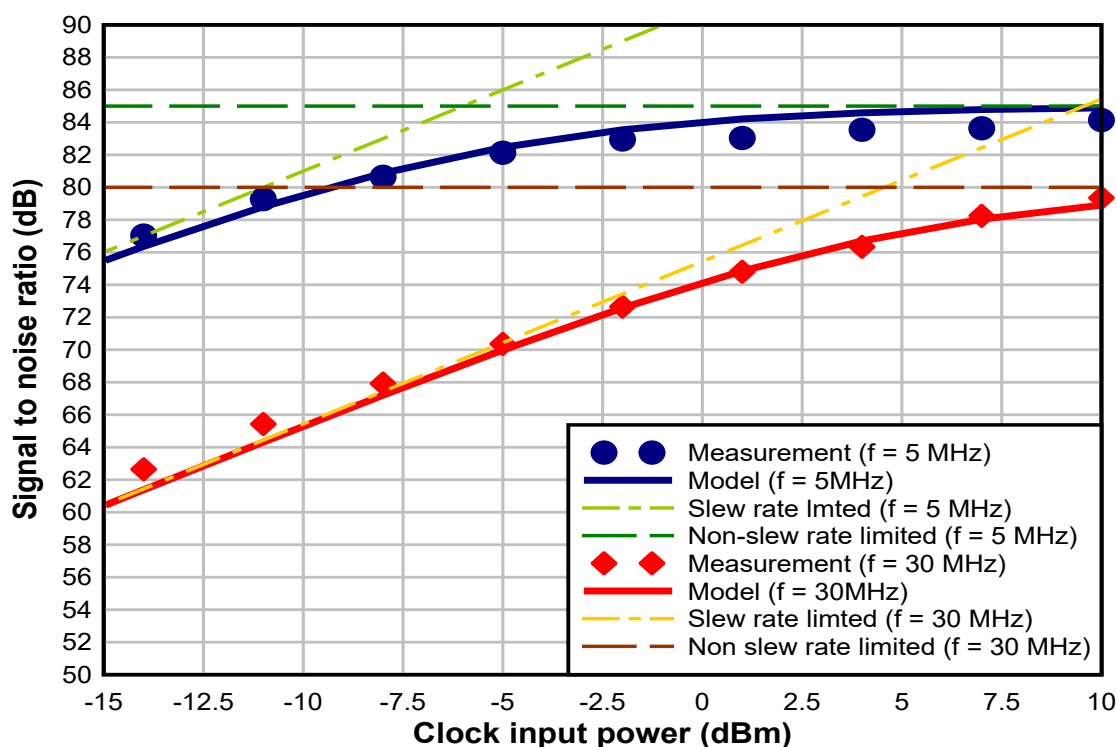


图 5-1. 使用 Rohde and Schwarz SMA100B 信号发生器时数据转换器 SNR 与输入时钟功率间的关系

为了说明抖动对采样信号的影响，使用了噪声较高的信号发生器重复进行实验，如图 5-2 所示。在这两个图中，通过使用噪声较高的信号发生器，两个采样频率下受转换率限制的情况降低了 3dB。在不受转换率限制的情况下，信号发生器在 5MHz 采样频率下产生 2dB 差异，在 30MHz 采样频率下产生 8dB 差异。对于这两个图，可以推断出 SNR 的固定部分和抖动部分，如表 5-1 所示。节附录 D：数据转换器计算示例介绍了推断方法。除了方程式 34 中提到的时钟抖动和孔径抖动之外，该抖动还包括采样信号抖动。

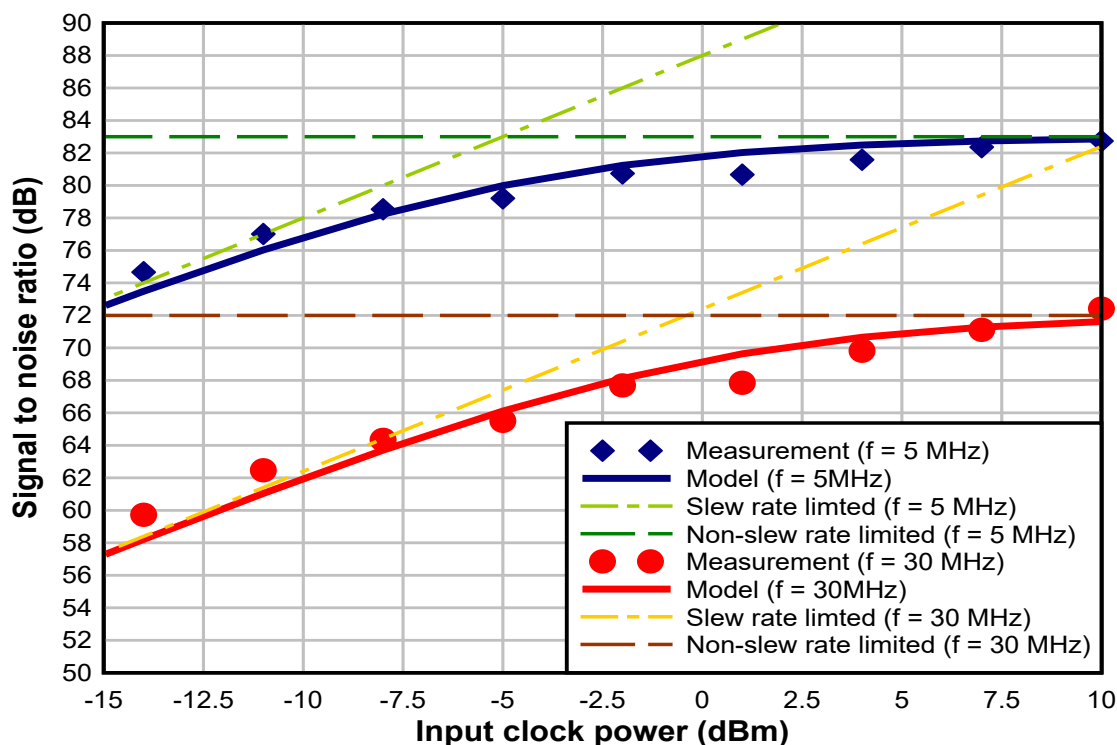


图 5-2. 使用 Agilent 4438C 信号发生器时数据转换器 SNR 与输入时钟功率间的关系

表 5-1. 推断抖动的计算

| 信号发生器                   | 抖动        | f     | SNR | SNR <sub>Jitter</sub> | SNR <sub>Fixed</sub> |
|-------------------------|-----------|-------|-----|-----------------------|----------------------|
| Rohde & Schwarz SMA100B | 440.91fs  | 5MHz  | 85  | 97.092                | 85.277               |
|                         |           | 30MHz | 80  | 81.529                |                      |
| Agilent 4438C           | 1296.71fs | 5MHz  | 83  | 87.800                | 84.747               |
|                         |           | 30MHz | 72  | 87.800                |                      |

ADC3683 的数据表提供的孔径抖动为 180fs。表 5-1 中的抖动是时钟抖动和孔径抖动的组合。在这种情况下，时钟抖动大于孔径抖动。

## 6 总结

本文讨论了输入时钟转换率的影响。由于时钟转换率与频率和功率相关，因此文中对相位噪声和抖动的一般趋势进行了建模，并与实际测量数据进行比较。了解这些趋势后，即可更好地优化系统以获得出色性能。

## 7 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[能为下一个高速转换器设计带来优势的实用时钟注意事项](#)应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[使用时钟缓冲器进行正弦波-方波转换](#)应用手册。

## 附录 A：将转换率、功率和频率相关联

正弦波是非常常见的输入时钟，因此正弦波可用于推导出该信号的转换率。考虑以下形式的正弦波：

$$v(t) = A \times \sin(2\pi \times f \times t) \quad (23)$$

使用一阶导数并估算它在过零处的值，可以得出转换率 (SR)。

$$SR = \left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi \times f \times A \times \cos(2\pi \times f \times t)|_{t=0} = 2\pi \times f \times A \quad (24)$$

峰峰值电压为  $2 \times A$ ，RMS 电压为  $A/\sqrt{2}$ 。因此，其功率如下：

$$P_{dBm} = 10 \times \log \left( \frac{\left( \frac{A^2}{2 \times 50\Omega} \right)}{0.001} \right) = 10 \times \log(10 \times A^2) \quad (25)$$

可以通过组合[方程式 24](#)和[方程式 25](#)，使功率与转换率相关。

$$P = 10 \times \log(10 \times A^2) = 10 \times \log \left( 10 \times \left( \frac{SR}{2\pi \times f} \right)^2 \right) \quad (26)$$

这可以进行排列以获得最终结果

$$SR = \frac{2\pi \times f \times 10^{\frac{P}{20}}}{\sqrt{10}} \quad (27)$$

## 附录 B：将转换率、频率、抖动和相位噪声相关联

考虑一下在缓冲器中使用具有转换率 **SR** 的理想干净输入时钟的情况。在缓冲器中，存在一些我们认为恒定的内部电压噪声。用符号表示，这可以用转换率 (**SR**) 和 **rms** 抖动 (以及电压抖动) 表示，即：

$$\sigma_v = \sigma_t \times \text{SR} \quad (28)$$

在本例中，未知值是由电压噪声引起的抖动。

$$\sigma_t = \frac{\sigma_v}{\text{SR}} \quad (29)$$

现在公式 [方程式 29](#) 仅针对信号的一个上升沿。实际上，在每个上升沿都有不同的抖动。在此情况下，周期数取决于测量时间 (**t**)。

$$n = \frac{t}{f} \quad (30)$$

现在，方差与噪声功率相关。所以考虑测量计时器间隔 **t** 内的功率。如果公式 [方程式 29](#) 中的抖动从一个周期到下一个周期具有相关性，则它显示为 **1/f** 噪声，也称为闪烁噪声。由于抖动是时间误差的标准差，如果用户采用 **n** 个周期的平均值，可计算出该平均值。

$$\sigma_{\text{flicker}} = \frac{n \times \sigma_t}{t} = \sigma_t \times f \quad (31)$$

如果公式 [方程式 29](#) 中的抖动从一个周期到下一个周期没有相关性，则它显示为本底噪声。由于抖动是时间误差的标准差，如果用户采用 **n** 个周期的平均值，可计算出该平均值。

$$\sigma_{\text{floor}} = \frac{\sqrt{n \times \sigma_t}}{n} = \sigma_t \times \sqrt{f} \quad (32)$$

回想一下，抖动和相位噪声是相关的。

$$\sigma = \frac{\sqrt{2 \times \int_a^b L(w) \times dw}}{2\pi \times f} \quad (33)$$

对于积分，我们只关注相位噪声，因为它随频率和转换率的变化而变化，所以我们不关注积分限制，我们将它累积到一个常量中。

$$\sigma = \frac{\sqrt{2 \times 10^{PN/10} \times \int_a^b L(w) \times dw}}{2\pi \times f} = \frac{\text{constant} \times \sqrt{10^{PN/10}}}{f} \quad (34)$$

公式 [方程式 34](#) 可按如下方式排列。

$$\text{PN} = 20 \times \log(\sigma) + \text{constant} \quad (35)$$

对于闪烁噪声，结合 [方程式 31](#) 和 [方程式 35](#) 可得出：

$$\text{PN}_{\text{flicker}} = 20 \times \log(\sigma_t \times f) + \text{constant} \quad (36)$$

通过重新排列，可以得到 **1/f** 噪声的规则。

$$\text{PN}_{\text{flicker}} \propto 20 \times \log(\sigma_t) + 20 \times \log(f) \quad (37)$$

此结果可与 [方程式 29](#) 结合，得出：

$$\text{PN}_{\text{flicker}} \propto 20 \times \log\left(\frac{\sigma_v}{\text{SR}}\right) + 20 \times \log(f) \quad (38)$$

由于电压噪声是一个常量，可通过重新排列[方程式 38](#) 来得到闪烁噪声、转换率和频率之间的基本关系。

$$PN_{\text{flicker}} \propto 20 \times \log(f) - 20 \times \log(SR) \quad (39)$$

对于本底噪声，我们结合[方程式 32](#) 和[方程式 35](#) 可得出：

$$PN_{\text{floor}} = 20 \times \log(\sigma_t) + 20 \times \log(\sigma_t \times \sqrt{f}) + \text{constant} \quad (40)$$

通过重新排列，可以得出本底噪声规则。

$$PN_{\text{floor}} \propto 20 \times \log(\sigma_t) + 10 \times \log(f) \quad (41)$$

现在将该结果与[方程式 29](#) 结合，可得出：

$$PN_{\text{floor}} \propto 20 \times \log\left(\frac{\sigma_v}{SR}\right) + 10 \times \log(f) \quad (42)$$

由于电压噪声是一个常量，可通过重新排列[方程式 41](#) 来获得最终结果。

$$PN_{\text{floor}} \propto 10 \times \log(f) - 20 \times \log(SR) \quad (43)$$

## 附录 C：数据转换器公式

### 1 将采样信号转换率与 SNR 相关联

考虑以下形式的系统时钟输入：

$$v(t) = A \times \sin(2\pi \times f \times t) \quad (44)$$

因此转换率为：

$$SR = \left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi \times f \times A \times \cos(0) = 2\pi \times f \times A \quad (45)$$

将抖动乘以转换率可得出 RMS 电压误差。

$$\sigma_v = \sigma_t \times SR = \sigma_t \times 2\pi \times f \times A \quad (46)$$

现在可以得出信噪比。

$$SNR_{\text{Jitter}} = 10 \times \log \left[ \frac{A^2/R}{(\sigma_t \times 2\pi \times f \times A)^2/R} \right] = -20 \times \log[\sigma_t \times 2\pi \times f] \quad (47)$$

### 2 在转换率受限情况下输入功率每降低 1dB SNR 随之降低 1dB 的理由

首先假定时钟抖动占优且转换率受限。表 3-1 显示了相位噪声与  $20 \times \log(SR)$  相关。方程式 5 显示了时钟功率增加 6dB 会使转换率加倍。方程式 33 将相位噪声与抖动相关联。因此，输入功率增加 6dB，相位噪声将提高 6dB。这进而将抖动降低 1 倍。方程式 47 表明，这会使 SNR 提高 6dB。所以，对于数据转换器的转换率受限 SNR 概括了以下规则。

$$SNR \propto \text{Clock Input Power} \quad (48)$$

## 附录 D：数据转换器计算示例

重新排列[方程式 20](#) 可得出：

$$10^{-\text{SNR}/10} = 10^{-\text{SNR}_{\text{Fixed}}/10} + 10^{-\text{SNR}_{\text{Jitter}}/10} \quad (49)$$

此外，实现[方程式 21](#) 意味着如果  $f$  从 5MHz 增加到 30MHz，则  $\text{SNR}_{\text{Jitter}}$  会减少  $20 \times \log(6)$ 。现在将  $\text{SNR}_1$  定义为具有 5MHz 信号的 SNR，将  $\text{SNR}_2$  定义为具有 30MHz 信号的 SNR。

$$10^{-\text{SNR}_1/10} = 10^{-\text{SNR}_{\text{Fixed}}/10} + 10^{-\text{SNR}_{\text{Jitter}}/10} \quad (50)$$

$$10^{-\text{SNR}_2/10} = 10^{-\text{SNR}_{\text{Fixed}}/10} + 10^{-\frac{\text{SNR}_{\text{Jitter}} - 20 \times \log(6)}{10}} = 10^{-\text{SNR}_{\text{Fixed}}/10} + 36 \times 10^{-\frac{\text{SNR}_{\text{Jitter}}}{10}} \quad (51)$$

[方程式 50](#) 和 [方程式 51](#) 是一个包含两个方程和两个未知数的系统。从[方程式 51](#) 中减去[方程式 50](#)，并求解  $\text{SNR}_{\text{Jitter}}$ 。在 30MHz 下实现该公式，结果较低。

$$\text{SNR}_{\text{Jitter}} = 10 \times \log \left( \frac{10^{-\frac{\text{SNR}_2}{10}} - 10^{-\frac{\text{SNR}_1}{10}}}{35} \right) \quad (52)$$

在  $\text{SNR}_{\text{Jitter}}$  已知后，即可确定  $\text{SNR}_{\text{Fixed}}$ 。

$$\text{SNR}_{\text{Fixed}} = 10 \times \log \left( 10^{-\frac{\text{SNR}_1}{10}} - 10^{-\frac{\text{SNR}_{\text{Jitter}}}{10}} \right) \quad (53)$$

此外，我们可以重新排列[方程式 47](#) 以计算数据转换器感知到的抖动。

$$\sigma = \frac{10^{-\text{SNR}_{\text{Jitter}}/20}}{2\pi \times f} \quad (54)$$

[图 5-1](#) 和 [图 5-2](#) 用于得出要生成的受导通转换率限制的情况的 SNR 值，[表 5-1](#) 使用[方程式 52](#)、[方程式 53](#) 和[方程式 54](#) 计算得出。



## 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