

SIMatrix!リアルタイムノイズ

目次

- リアルタイムノイズ解析とは？
- ノイズ源
 - ノイズ波形
 - スペクトル成分
 - $1/f$ ノイズ
- 実行中での実施

小信号ノイズ

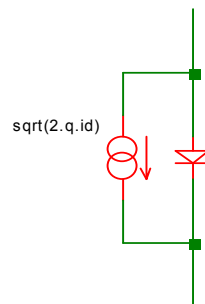
- 従来の**SPICE**ノイズ解析は、小信号です。
- 小信号解析は高速で、ノイズ源について詳細な情報を提供することができます。
- しかし:
 - 小信号ノイズは、一つの動作点において、直線の小信号動作と仮定しています。
 - 小信号ノイズは、ノイズ自体は動作点に大きく影響しないという前提に基づいています。
 - 小信号ノイズは、ノイズを信号とは独立した要素として扱えるという前提に基づいています。
 - 多くの場合、小信号の前提条件が正しいかどうかを決めるのは、困難または不可能です。
- 従って、小信号ノイズは、常に適切な解析手法であるとは限りません。特に、ミキサー、スイッチドキャパシター回路、サンプルホールドに通常は適していません。

リアルタイムノイズとは？

- リアルタイムノイズとは、時間領域内の実際のノイズです。ランダムに生成されたノイズ信号が、回路内のノイズを発する素子に適用されます。
- 小信号を線形化する仮定はしていません。
- あらゆる種類の回路のノイズ解析に使用できます。

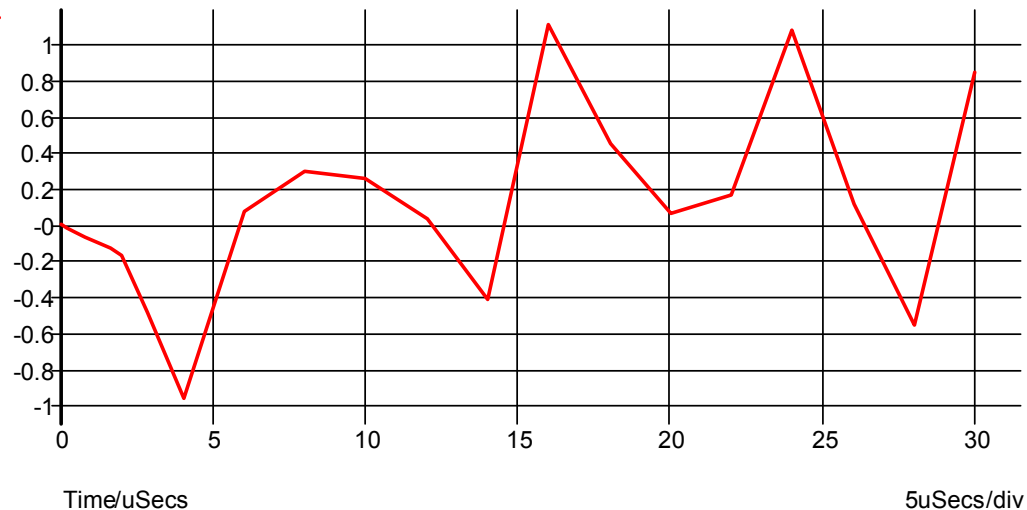
リアルタイムノイズ解析はどのように行われるか？

- 小信号ノイズ解析で使用するノイズ源の代わりに、**PWLノイズ源**が接続され、小信号ノイズ解析の場合と同じ計算式を用いて、ノイズの大きさを設定します。
- 例えば、ダイオードのショットノイズは、単純な電流源によりモデリングされます。



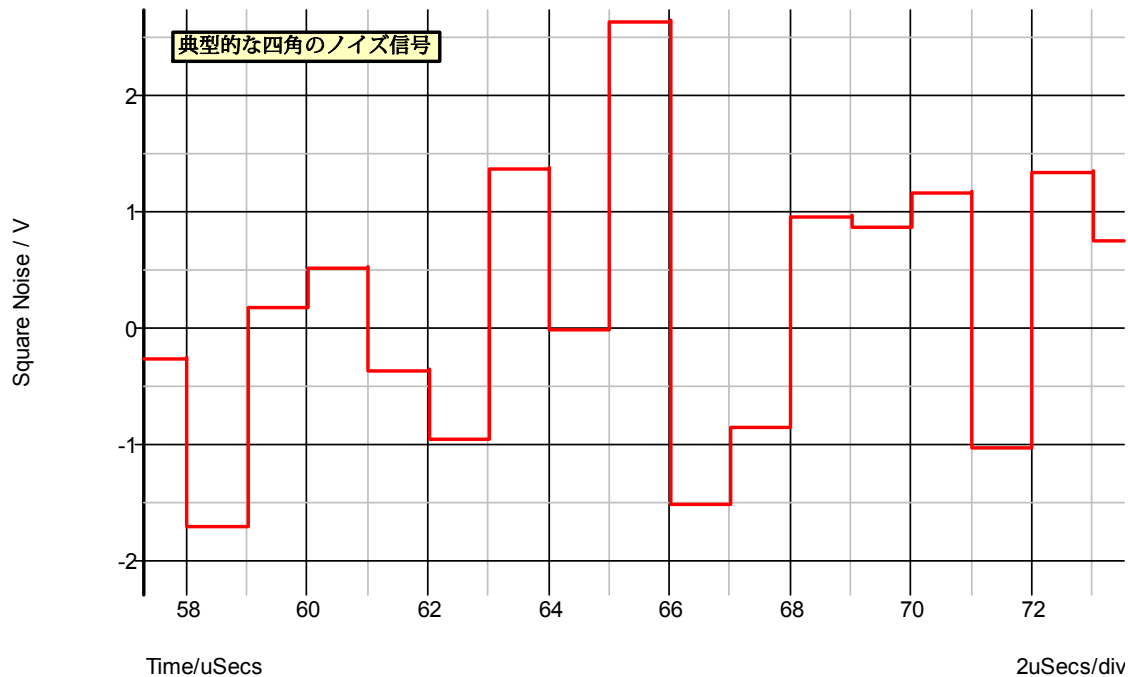
ノイズ源の波形

- 各ホワイトノイズ源はPWL波形を生成し、その各ポイントはガウス分布のランダムな値を持っています。



代替ノイズ源

- 四角のノイズ源を使用することができます。
- より幅広いスペクトルを持つが、早いエッジはパフォーマンスの問題につながります。また、 $1/f$ ノイズのベースとしては劣っています。これについては後述します。



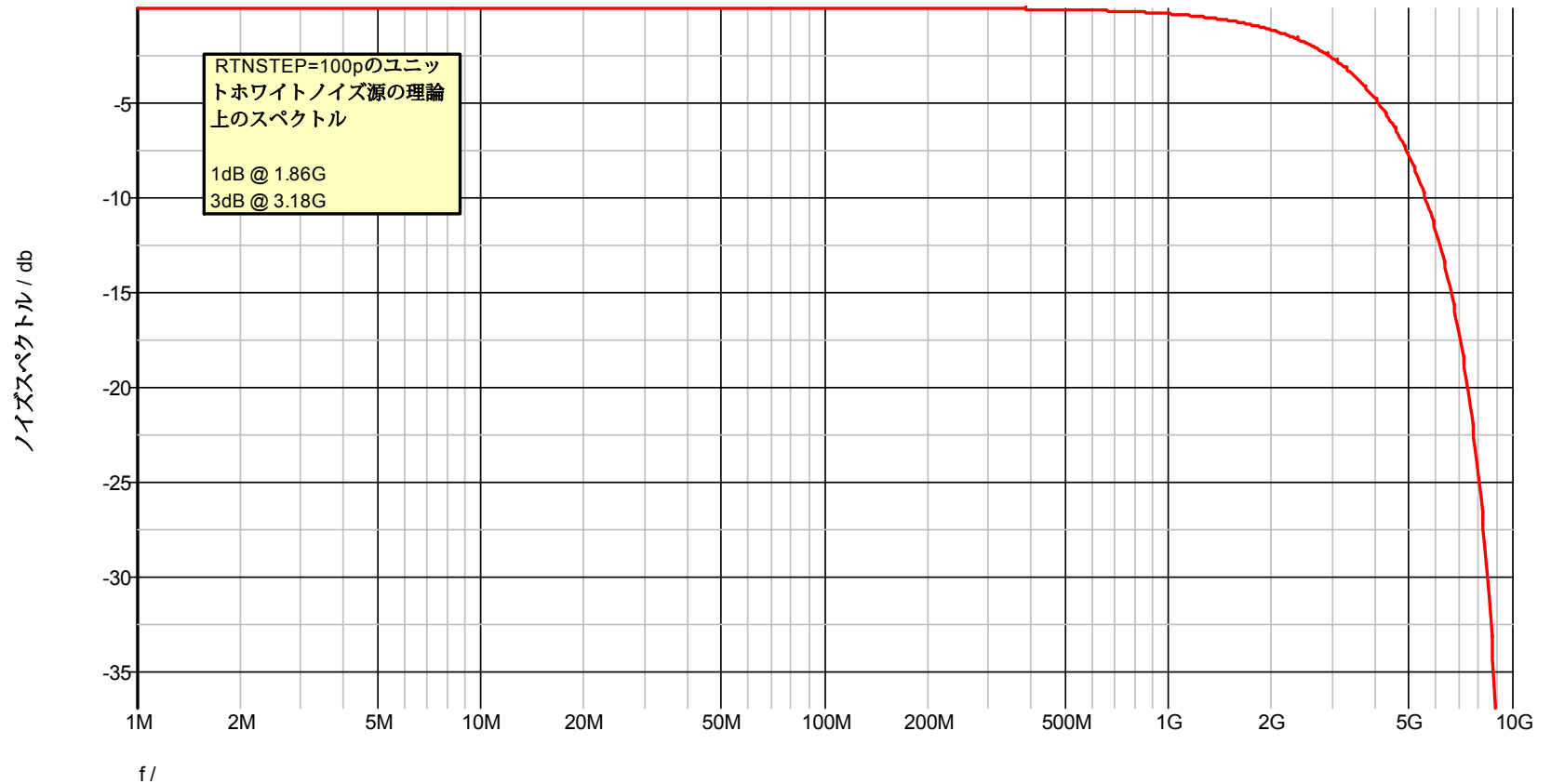
ノイズ源

- 平坦なスペクトルを持つノイズ源を作成する必要があります
- サンプルングしたノイズ源（実際のノイズ信号を一定の間隔でサンプルングしたもの）を使います
- 実際のノイズサンプルは、ガウス分布を示します。
- スペクトル成分は下記の特性に従います

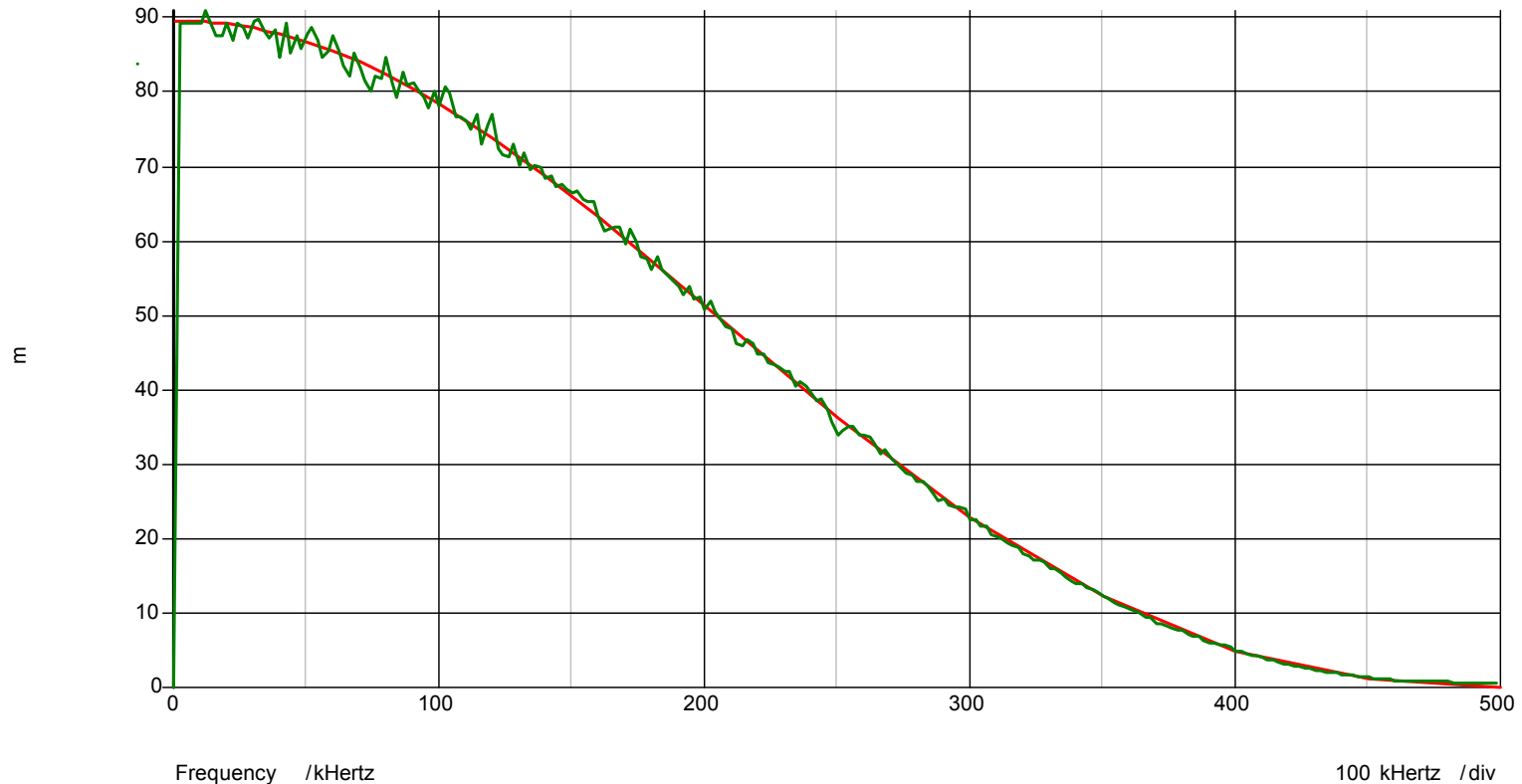
$$\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot f}{f_0}\right)}{\frac{\pi \cdot f}{f_0}} \right]^2$$

ここで f は周波数で $f_0 = 1/rtnstep$ です

ノイズスペクトル



ノイズスペクトル

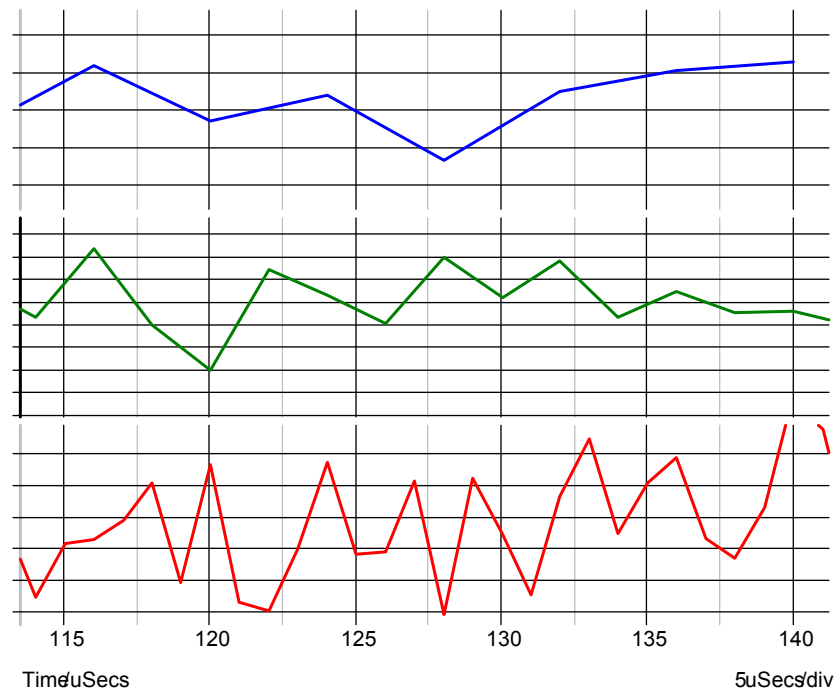


理論上のスペクトル vs “実測”のスペクトル

$T=1\text{ms}$, ノイズステップ = $2\ \mu$, $\sigma=1$

フリッカーノイズ

- 周波数依存ノイズについては、ステップサイズを上げながら、複数オクターブ源を合計します。
最大値 $\geq 1/T_{stop}$



フリッカーノイズ

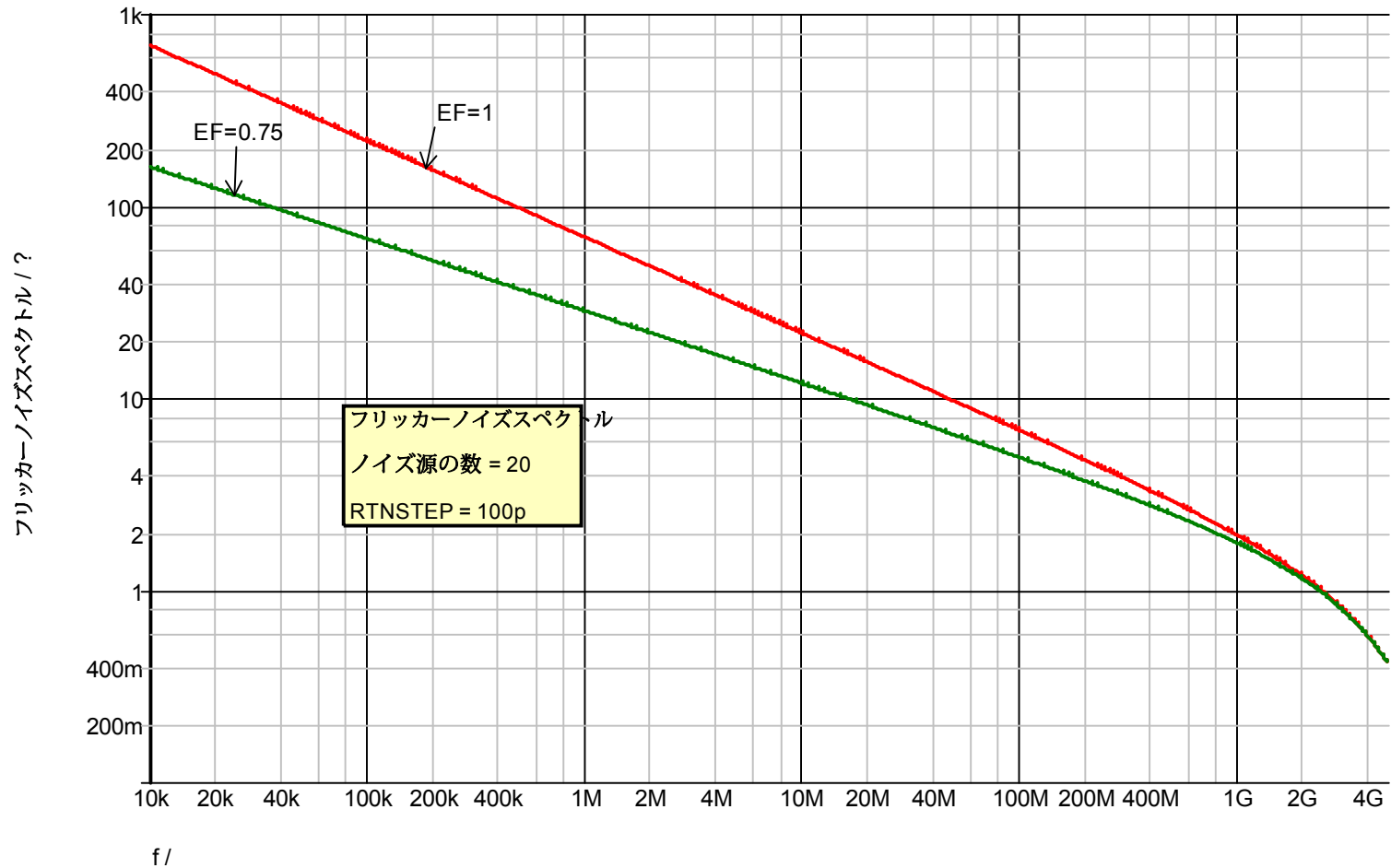
- 各オクターブ源の振幅は、 $1/f$ 指数（通称EF）を満たすように決められます。

- 従って、ノイズ信号は次のようになります：

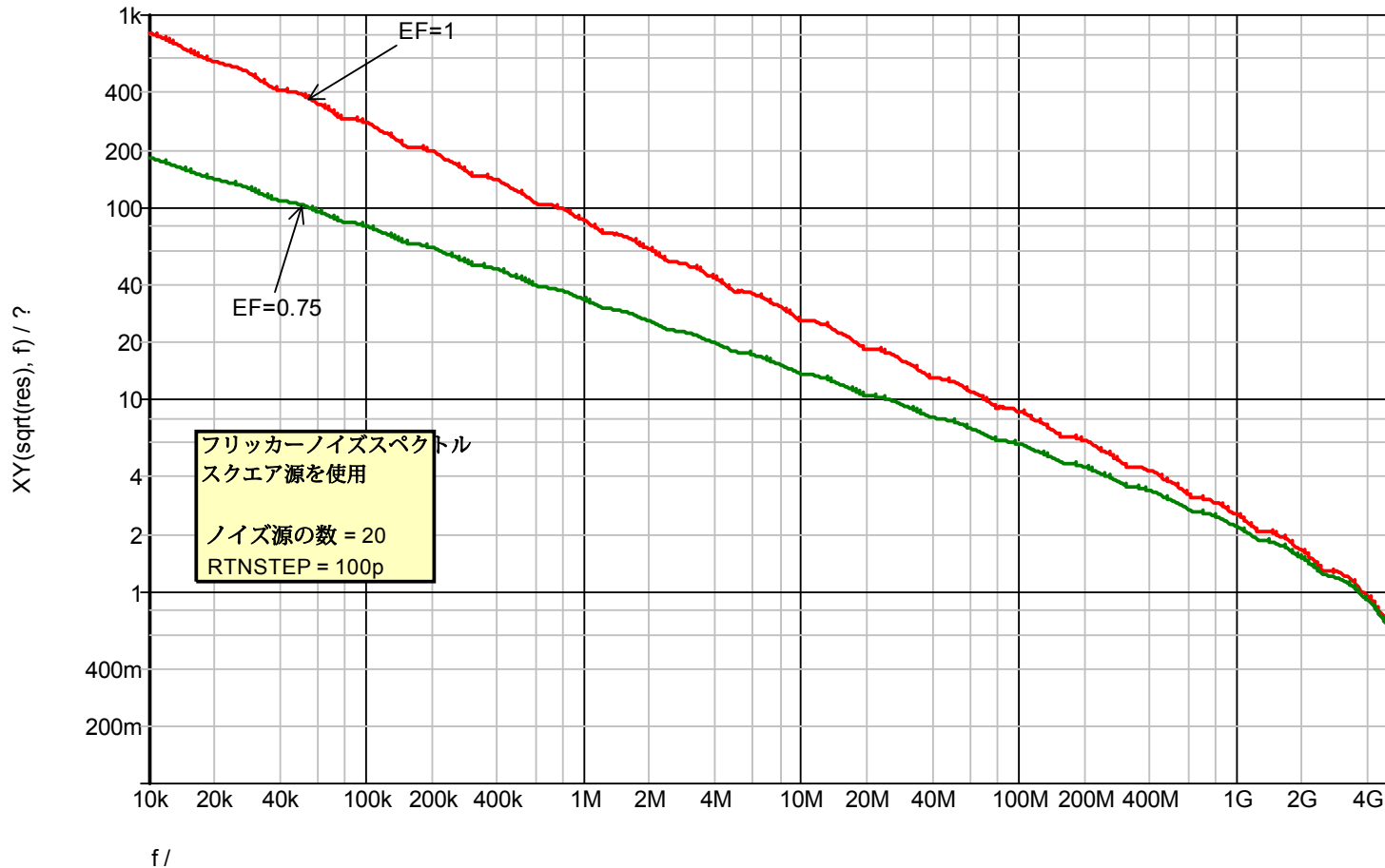
$$c_0 * W(t) + c_1 * W(t^2) + c_2 * W(t^4) \dots + c_n * W(t^{2^n})$$

$$t^{2^n} \geq T_{\text{stop}}$$

フリッカーノイズスペクトル



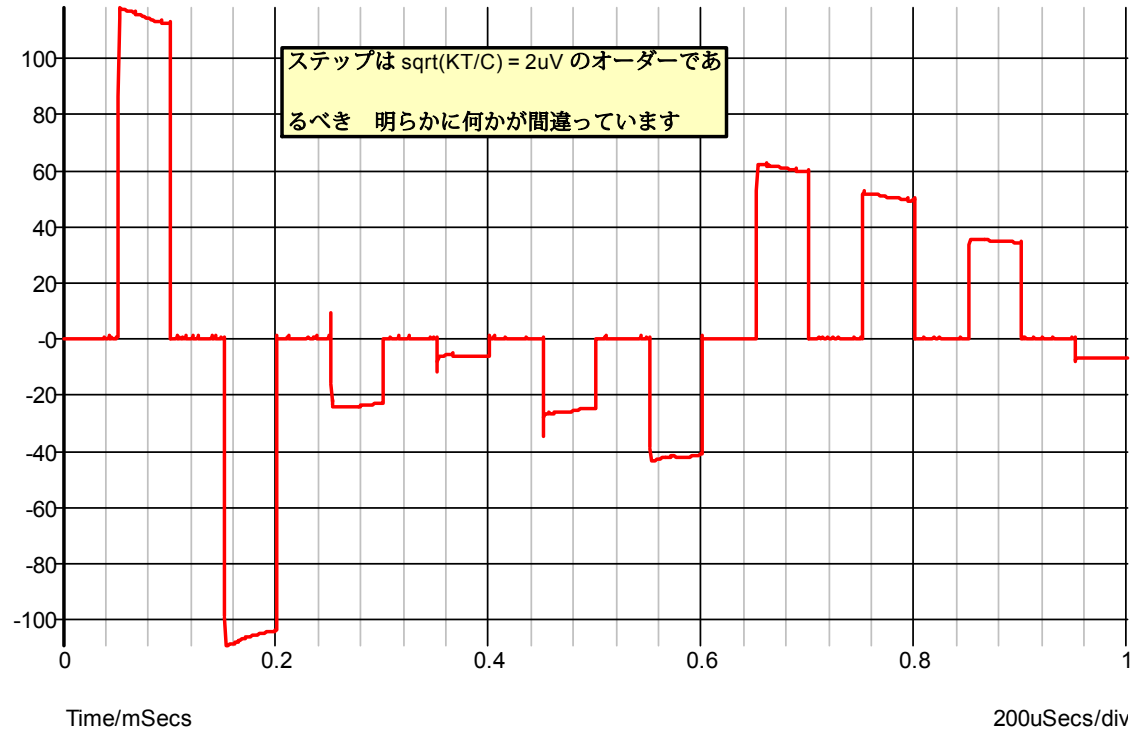
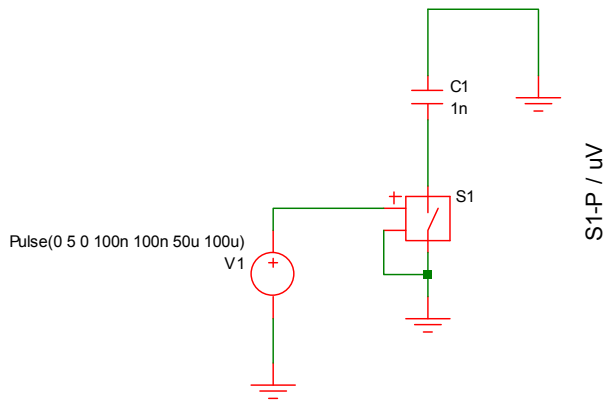
フリッカーノイズスペクトル (スクエア源を使用)



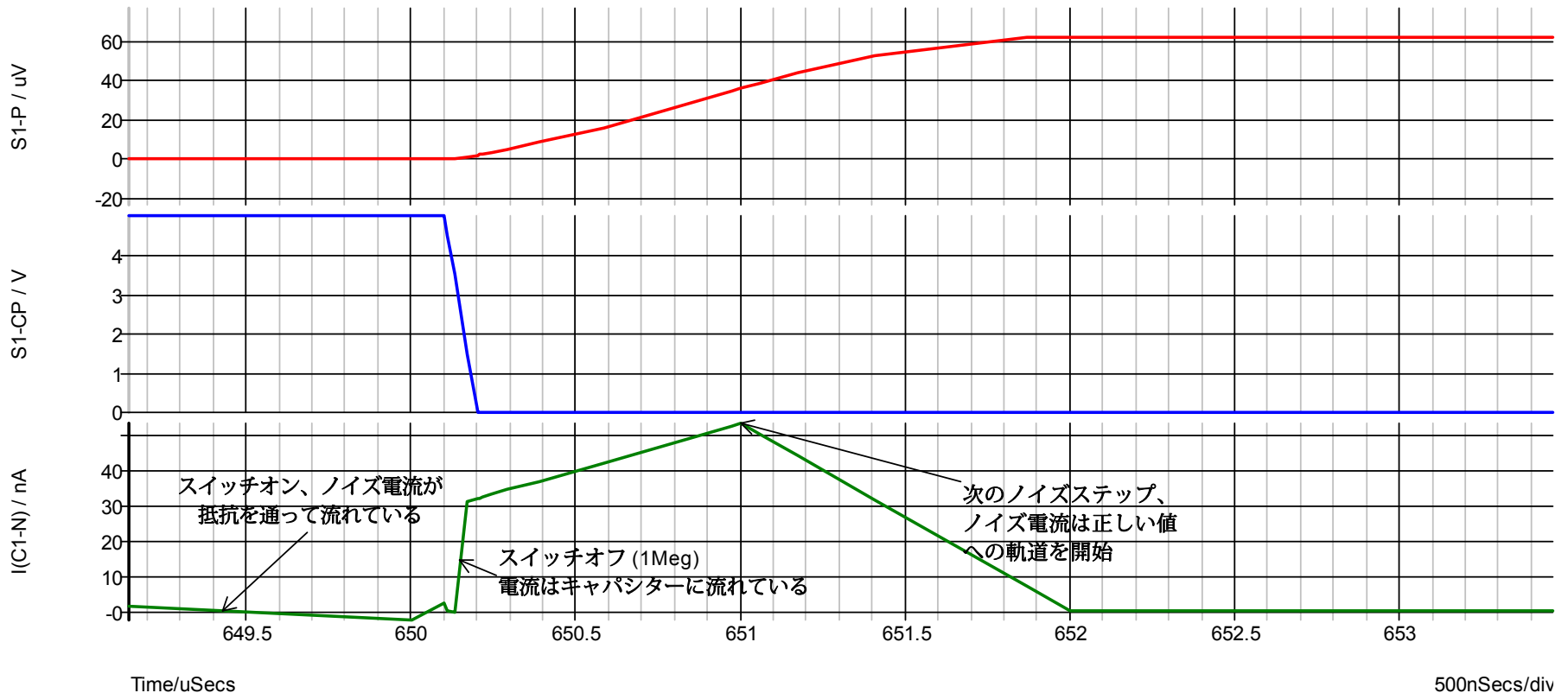
実行中での実施

- ノイズ源は、通常の信号源のように固定されていません。振幅は、デバイスのバイアス条件により変化します。
- ノイズ源は、通常の信号源のように扱うことができます。振幅はリアルタイムノイズの各ステップの開始時に決定・固定されます。
- これは単純な方法ではあるものの、ノイズステップよりも短い時間内に動作点が大幅に変わるようなシミュレーションにおいては、重大なエラーを招く可能性があります。

固定ノイズ源の問題点



固定ノイズ源の問題点



実行中での実施

- 各ノイズステップではなく、各タイムステップにおいてノイズ源が変調されているということを実際にすれば、問題を克服することができます。
- しかし、それを行った場合、そのノイズ源は固定とはみなされなくなり、デバイスの動作点に影響していることとなります

ダイオードの例

単純なダイオードの方程式

$$i_d = IS \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T}\right) - 1 \right)$$

$$i_{dnoise} = N(0) \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot i_d}$$

$$i_{dtot} = i_d + i_{dnoise}$$

上記の式において、 i_{dnoise} は i_d に依存するため、シミュレーターのジャコビ行列への入力を計算する際には、その派生物を含める必要があります。ほとんどのデバイスにおいて、これは行われておらず、収束を阻害する可能性があります。

ただし実際には、ノイズ素子は小さいため、通常これは問題にはなりません。

Verilog-Aデバイス（HicumやPSPを含む）は派生物を正確に評価するため、この問題は発生しません。

RTNモード

- **RTNMODE**オプションを使って、前述の2つの代替方法を選択することができます。
- **RTNMODE=1** は固定ノイズ源のオプション
- **RTNMODE=0** は変調されたノイズ源のオプション