

SPICE

実用電子回路講座



第14回 電子部品から生じる雑音の解析

遠坂 俊昭
Toshiaki Enzaka

雑音は、センサなどが出力する微小信号の検出感度の限界を決定します。

一口に雑音と言っても実にさまざまで、目的の信号以外はすべて雑音です。雑音は、大きく下記の3種類に分けられます。

- (1) 自然界からの雑音：雷など
- (2) 人為的雑音：モータ、スイッチ、蛍光灯のスタータ、インバータ、無線機
- (3) 真性雑音 (intrinsic noise)：熱雑音 (thermal noise)、ショット雑音、フリッカ雑音

今回は(3)の真性雑音と呼ばれる、抵抗やトランジスタなどの電子部品から発生する雑音について説明します。

● 真性雑音の発見

自然界の不規則運動を R. Brown氏が1817年に発見してブラウン運動と名付けました。この考えをもとにして、抵抗内の電子の熱擾乱による雑音(熱雑音)をジョンソン(J. B. Johnson)氏が発見しました。

さらにショットキー(W. Schottky)氏が、真空管やダイオード、トランジスタなどから、電子や正孔のゆらぎによって同様な雑音(ショット雑音)が発生することを発見しました。

熱雑音はジョンソン雑音とも呼ばれ、周波数特性が平坦という特徴があります。また、半導体から発生する雑音のうち周波数特性が平坦な部分をショット雑音とも呼びます。

| 抵抗値 | 雑音電圧密度 |
|-------|-------------|
| 1 Ω | 129 pV/√Hz |
| 50 Ω | 910 pV/√Hz |
| 75 Ω | 1.11 nV/√Hz |
| 100 Ω | 1.29 nV/√Hz |
| 600 Ω | 3.15 nV/√Hz |
| 1 kΩ | 4.07 nV/√Hz |
| 10 kΩ | 12.9 nV/√Hz |
| 1 MΩ | 129 nV/√Hz |

表14-1
抵抗値と雑音電圧密度

彼らの発見は、今日の雑音理論の基礎となっています。

すべての抵抗体から発生する「熱雑音」

● 実効値を求める式

半導体も含め導体には、大小はありますが、必ず抵抗があります。

これらの抵抗からは原理的に雑音が発生し、その大きさはナイキスト^{Nyquist}氏が発見した数式で求められます。つまり、熱雑音電圧を v_n [μV_{RMS}] とすると、

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (14-1)$$

ただし、 k ：ボルツマン定数 (1.38×10^{-23}) [J/K]、 T ：絶対温度 [K]、 R ：抵抗値 [kΩ]、 B ：帯域幅 [kHz]

が成り立ちます。温度 $T = 300\text{ K}$ とすると次のようになります。

$$v_n = 0.129\sqrt{RB} \dots\dots\dots (14-2)$$

式(14-2)からわかるように、抵抗から発生する熱雑音は、温度/抵抗値/周波数帯域幅の積の平方根に比例します。

● 1 Hz 当たりの電圧密度で表現する

前述のように、熱雑音の周波数スペクトラムは平坦です。同じ帯域幅であれば、どの周波数においても振幅は同じです。

単位周波数当たりの雑音電圧がわかれば、任意の周波数帯域での雑音電圧を算出できます。例えば、1 Hz 帯域幅の雑音電圧が $10\text{ nV}_{\text{RMS}}$ の信号源の DC ~ 20000 Hz における雑音電圧は、 $10\text{ nV}_{\text{RMS}}$ の $\sqrt{20000}$ 倍になります。つまり、

$$10\text{ nV}_{\text{RMS}} \times \sqrt{20000/1} \approx 1.41\text{ }\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

となり、これが雑音電圧の実効値になります。

単位帯域幅 (1 Hz) での雑音電圧を **雑音密度** といいます。

熱雑音は帯域幅の平方根に比例するので、単位は $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ です。代表的な抵抗値での熱雑音電圧密度は表14-1に示すとおりです。グラフで表すと図14-1

になります。

「1 k Ω のとき4 nV」と覚えておけば、熱雑音は抵抗値の平方根に比例するので、「10 k Ω だったら4 nVの $\sqrt{10}$ 倍」というように簡単に求まります。

● 雑音の波形から実効値を読み取る方法

写真14-1に示すのは、抵抗で発生した熱雑音を増幅し、帯域制限してオシロスコープで観測した波形です。

このように熱雑音はまったく不規則な波形をしているのですが、図14-2のように熱雑音の波形を一定時間でサンプリングして振幅の確率密度をグラフにすると、きれいな正規分布(ガウス分布)になります。

熱雑音電圧の瞬時値の発生頻度は、理論的に表14-2のようになります。

オシロスコープの輝度を上げて、熱雑音を観測すると、0.01%程度まで見えます。おおよそですが、観測したピーク・ツー・ピークの1/5~1/10程度が実効値になります。

シミュレーション解析の例

● 抵抗から生じる雑音電圧密度の周波数特性

PSpiceでは、抵抗に熱雑音モデリングされているので、雑音特性を簡単にシミュレーションできます。

図14-3(a)に示すのは、抵抗の熱雑音特性をシミュレーションする回路です。R₁から熱雑音が発生し、

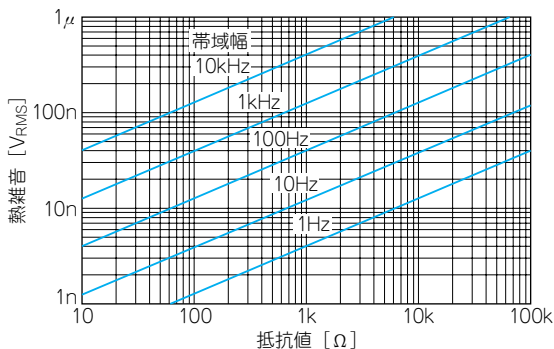


図14-1 抵抗値，帯域幅，熱雑音の実効値の関係

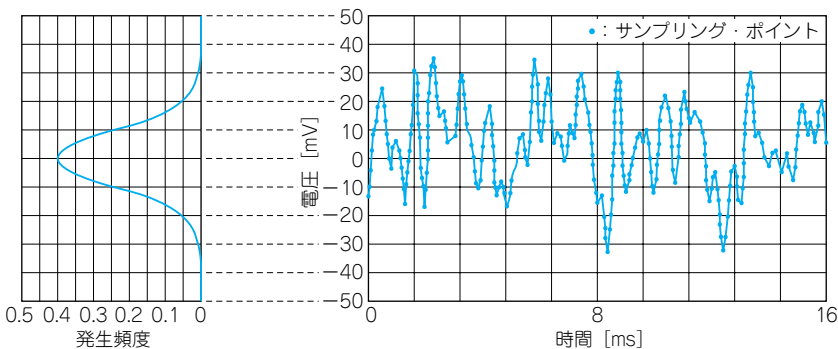
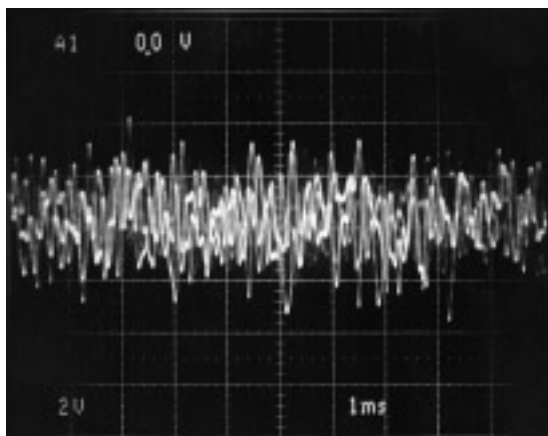


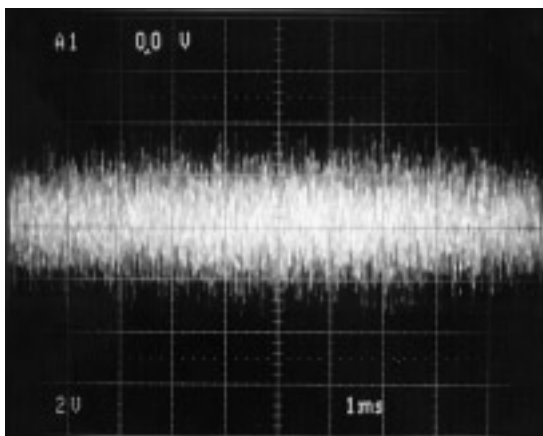
図14-2 熱雑音の振幅の発生確率

表14-2 熱雑音の振幅頻度と波高率

| 頻度 [%] | 波高率 [peak/RMS] |
|--------|----------------|
| 1.0 | 2.6 |
| 0.1 | 3.3 |
| 0.01 | 3.9 |
| 0.001 | 4.4 |
| 0.0001 | 4.9 |



(a) 上限周波数5 kHz(-3 dB), 1 V_{RMS}



(b) 上限周波数100 kHz(-3 dB), 1 V_{RMS}

写真14-1 熱雑音の波形(1 ms/div.)