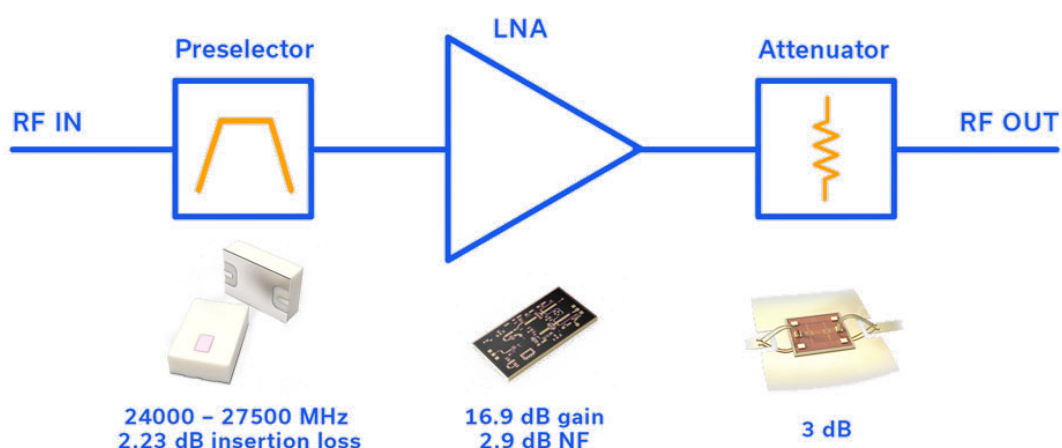


# 簡単なマイクロ波フロントエンドのノイズと信号対ノイズ比SNR



技術的な議論がノイズに及ぶと、特に複数のカスケード接続された部品が関係する場合は計算や用語は理解しやすいですが、多くの場合必要以上にこれが面倒になることがあります。信号対ノイズ比(SNR)は、設計者が日常的に計算すべきもう一つのパラメータですが、それでも不確実性が生じます。このアプリケーションノートの目的は、一般的なノイズ、ノイズフロア、帯域幅、および信号対ノイズ比(SNR)全般に向き合い、基本的な3コンポーネント構成のRFフロントエンドのこれらのパラメータを計算することです。このシリーズの他のアプリケーションノートでは、ノイズ指数(NF)、P1dB、およびIP3のカスケード接続について深く掘り下げています。

## RFフロントエンドとは何か?

この質問の答えは人によって様々です。ウィキペディアの定義では、RFフロントエンドは、「受信機のアンテナ入力からミキサ段までの間のすべての回路」を含むとされています<sup>1</sup>。Christopher Bowick氏は著書「RF Circuit Design」の中で、RFフロントエンドを「アンテナとデジタルベースバンドシステムの間すべて」と定義しています<sup>2</sup>。

次の説明では、ミキサの前にあるコンポーネントに焦点を当てます。

24,000~27,500MHzの周波数帯をカバーできるRFフロントエンドを図1に示します。また、フロントエンドを非常に小さな面積で構築できるように、フットプリントが小型のデバイスケースを採用しました。実際、3つのデバイスパッケージを合わせても、占有面積は20mm<sup>2</sup>以下しかありません。

このカスケードで実現可能なアプリケーションの1つは、24,250~26,500MHzの周波数帯域をカバーする、point-to-pointマイクロ波システムが考えられます。ここで使用される部品は一般的なものではありませんが、長年使用されてきたアプリケーションに、ユニークで斬新な部品を組み込むことは、純粹に概念的なブロック図の単純な議論よりも、常に興味深いものです。

ブロック図には3つの部品の主な特長を示し、データシートへのリンクとして、ブロック図の下側に部品品番を記載しています。

- **プリセレクト**: Mini-Circuits BFHK-2582+, 24,000 - 27,500 MHz バンドパス (2.23 dB 挿入損失)
- **LNA**: Mini-Circuits AVA-0233LN-D(G)+, 16.9 dB ゲイン、2.9 dB NF
- **アッテネータ**: Mini-Circuits YAT-3A-D(G)+, 3 dB

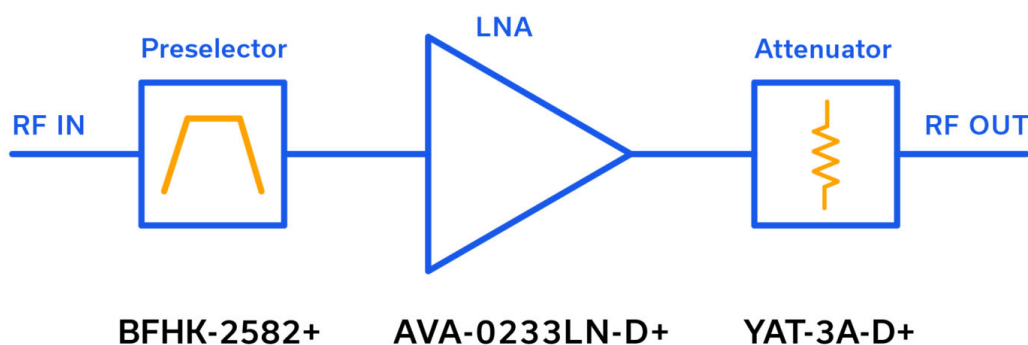


図1 : Point-to-pointマイクロ波フロントエンドのブロック図

## システム内のノイズレベル

システム全体のノイズレベルを決定するには、まず、設計者は-174dBm/Hzとして知られているサーマルノイズフロア $P_{\text{Thermal}}$ から始める必要があります。その数字はどこから来たのでしょうか。計算は簡単です:

$$P_{\text{Thermal}} = kT_0B$$

ここで、

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K (Boltzmann's constant),  $T_0 = 290$  K nom. per IEC

$$P_{\text{Thermal}} = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(290\text{K})(1 \text{ Hz}) = 4 \times 10^{-21} \text{ W} = 4 \times 10^{-18} \text{ mW}$$
$$\Rightarrow 10 \log(4 \times 10^{-18} \text{ mW}) = -174 \text{ dBm in a 1 Hz BW, or } -174 \text{ dBm/Hz}$$

次に、システムの3dB帯域幅を決定する必要があります。この場合、BFHK-2582+プリセレクタの帯域幅で定義します。

$$BW_{3\text{dB}} = 27,500 - 24,000 \text{ MHz} = 3,500 \text{ MHz}$$

このシステムは明らかに1Hzの帯域幅のシステムではないので、新しいノイズフロアを計算する必要があります。

$$P_{\text{Floor}(1)} = P_{\text{Thermal}} + 10 \log(BW_{3\text{dB}})$$
$$= -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \log(3500 \times 10^6 \text{ Hz})$$
$$= -174 \text{ dBm} + 95.44 \text{ dB} = -78.56 \text{ dBm}$$

これはなにか？ 正確には、室温での地球のサーマルノイズフロア( $P_{\text{Thermal}}$ )を取得し、対象システムの3dB帯域幅の対数の10倍を加算すると、システムのノイズフロアになります。

その結果、プリセレクタはノイズ帯域幅を3500MHzに制限します。これは-78.56dBmのノイズフロアに相当します。このノイズフロアは、システムを介したゲインと損失の影響を受けますが、例外としてプリセレクタBFHK-2582+の2.23dBの挿入損失は、サーマルノイズフロア $P_{\text{Thermal}}$ を-174dBm/Hz以下に減衰させることはできません。

▼ **注:** 本稿ではプリセレクタの3dB帯域幅を等価雑音帯域幅(ENB)の近似値として使用しています。詳細はこちらをクリックしてください。

厳密には、上記の計算でノイズ帯域幅として使用している値はフィルタの3dB帯域幅ですが、正確なノイズ電力の計算には等価雑音帯域幅(ENB)  $B_n$ を用いるべきです:

$$B_n = \frac{1}{|H(f_0)|^2} \int_0^\infty |H(f)|^2 df$$

一般にENBは3dB帯域幅と等しくありません。例えば、単極フィルタの場合:

$$B_n = \frac{\pi}{2} \times BW_{3\text{dB}}$$

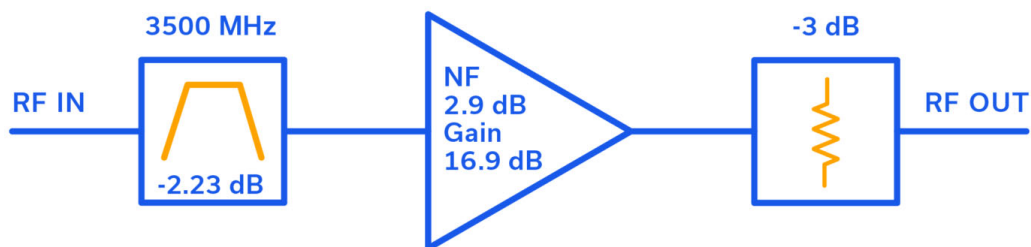
ただし、本稿で使用しているプリセレクタBFHK-2582+は急峻なスカート特性を持つLTCCバンドパスフィルタであり、その通過帯域形状はブ

リックウォール型に近いので、3dB帯域幅をENBの近似値として使用することは十分に妥当です。

入力信号レベルを、たとえば最も扱いやすいレベルとしての0dBmと定義すると、プリセクタ後の信号対ノイズ比(SNR)をdB単位で簡単に算出できます。

$$\begin{aligned}
 \text{SNR (dB)} &= 10 \log \left( \frac{\text{Signal (mW)}}{\text{Noise (mW)}} \right) \\
 &= 10 \log(\text{Signal (mW)}) - 10 \log(\text{Noise (mW)}) \\
 &= \text{Signal (dBm)} - \text{Noise (dBm)} \\
 &= -2.23 \text{ dBm} - (-78.56 \text{ dBm}) = 76.33 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

このSNRは、図2のプリセクタの後に示されています。



Gain	0 dB	-2.23 dB	14.67 dB	11.67 dB
NF	0 dB	2.23 dB	5.13 dB	5.18 dB
Noise	$P_{\text{Thermal}}$	-78.56 dBm	-58.76 dBm	-61.71 dBm
Signal	0 dBm	-2.23 dBm	14.67 dBm	11.67 dBm
SNR	NA	76.33 dB	73.43 dB	73.38 dB

図2 : Point-to-pointマイクロ波フロントエンドのステージごとのカスケード接続パラメータの計算結果

## カスケードゲインとノイズ指数

第1ステージのゲインとノイズ指数は単純で、まさにプリセクタBFHK-2582+の挿入損失となり、ゲイン(損失)は負の値、NFは正の値となります。

アンプAVA-0233LN-D+ と3dBアッテネータを挿入するとどうなるでしょうか？ 図2のアンプとアッテネータに続くパラメータを上から下に向かって調べると、アンプのゲインは、アッテネータの損失と同様に、単純に前ステージのゲインに追加されます。したがって、ゲインは次のようになります。

$$\text{Gain} = -2.23 \text{ dB} + 16.9 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 11.67 \text{ dB}$$

ノイズ指数は、ブロック図内で連続加算したゲインよりも少し難しく、dB単位のノイズ指数(NF)をノイズファクタ(F)に変換し、フリスのノイズ係数(F)の公式で計算する必要があります<sup>3</sup>。最初の2段（プリセレクタとアンプ）のノイズ指数（NF）は、図2のようにdB単位で単純に加算することができます。これは、基準温度 $T_0$ における受動素子の第1段に特有の性質です。 $T_0$ における受動素子の場合、ノイズファクタはそのゲインの逆数に等しくなります：

$$F_{\text{passive}} = \frac{1}{G_{\text{passive}}}$$

これをフリスの2段の公式に代入すると、

$$F_{\text{Total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} = \frac{1}{G_1} + \frac{F_2 - 1}{G_1} = \frac{F_2}{G_1} = F_2 \cdot F_1$$

となります。全ノイズファクタが個々のノイズファクタの積であるため、それぞれのノイズ指数(dB)は単純に加算されます。ゲインが導入され、そのゲインの後にカスケードで他の素子が接続されると、ノイズに対するゲインの影響を考慮する必要があり、これは以下に示すフリスの公式で表されます：

$$F_{\text{Total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

この公式を第3段（アッテネータ）に適用する際、プリセレクタとアンプの既にカスケードされた結果を単一の等価な第1段として扱います。以下の式では、 $F_1$ と $G_1$ は最初の2段を合わせたカスケードノイズファクタとゲインを表し、 $F_2$ はアッテネータ単体のノイズファクタを表します。

ノイズ係数は次のように算出します。

$$F = 10^{(\text{NF}/10)}$$

の場合、次のようになります。

$$F_1 = 10^{(5.13 \text{ dB}/10)} = 3.26, \quad F_2 = 10^{(3 \text{ dB}/10)} = 2$$

ゲイン( $G_1$ )は、素子 $F_2$ が回路に接続されるポイントまでのカスケードゲインです。増幅率は線形である必要があります、

$$G_1 = 10^{(14.67 \text{ dB}/10)} = 29.31$$

これらの値をフリスの公式に当てはめるとすると、次のようになります。

$$F_{\text{Total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} = 3.26 + \frac{2 - 1}{29.31} = 3.26 + 0.034 = 3.294$$

最終的に、

$$\text{NF (dB)} = 10 \log(F_{\text{Total}}) = 10 \log(3.294) = 5.18 \text{ dB}$$

## 信号レベル、ノイズレベルとSNR

プリセクタ後のノイズレベルとSNRはすでに計算されているので、これらのパラメータに対するアンプの影響に注目します。アンプのゲインは16.9dBですが、アンプ以降のノイズレベルは-78.56dBmから-58.76dBmに20dB近く増加しています。これは、アンプのNFがノイズ(dB単位)を付加するため、ノイズフロアレベルも上昇するのです。ノイズとSNRを計算する際には、カスケードゲインとNFパラメータを利用することが重要です。アンプ以降のカスケードゲインは14.67dB、NFは5.13dBで、ノイズフロアに対する正味の合計は(14.67dB + 5.13dB) = 19.8dBとなります。したがって、新しいノイズフロアレベルとSNRは次のように計算されます。

$$P_{\text{Floor}(2)} = P_{\text{Floor}(1)} + G + \text{NF} = -78.56 \text{ dBm} + 19.8 \text{ dB} = -58.76 \text{ dBm}$$

$$\text{及び SNR} = 14.67 \text{ dBm} - (-58.76 \text{ dBm}) = 73.43 \text{ dB}$$

最後の部品である3dBアッテネータを含めるのは簡単に思えるかもしれませんが、ここから純粋なカスケード解析を掘り下げます。この第3ステージを含めて、NFを一度計算するために、フリスの公式を使用する必要があったことを思い出してください。以前計算されたNFを使用すると、次のようになります。

$$P_{\text{Floor}(3)} = P_{\text{Floor}(1)} + G + \text{NF} = -78.56 \text{ dBm} + 11.67 \text{ dB} + 5.18 \text{ dB} = -61.71 \text{ dBm}$$

$$\text{及び SNR} = 11.67 \text{ dBm} - (-61.71 \text{ dBm}) = 73.38 \text{ dB}$$

## まとめ

このアプリケーションノートでは、3ステージ構成のRFフロントエンドに沿った各ステージのサーマルノイズフロア、所定の3dB帯域幅でのノイズフロア、および信号対ノイズ比(SNR)の計算を示す簡単な説明をしました。フリスの公式をカスケードNFに必要な範囲で使用しました。信号レベルは0dBmから開始することで簡素化され、ノイズレベルとSNRはカスケードゲインとNF値を使用して計算しました。

本シリーズのパート2「26GHz 5Gフロントエンドのノイズと信号対ノイズ比SNRの計算」では、ミキサ、IFフィルタ、IFアンプを追加した6ステージ構成のより実践的なRFフロントエンド(24.25~25.1GHzの5G n258帯域向け)を取り上げ、周波数変換段を含む場合のカスケード解析や、IFフィルタによるシステム帯域幅の変化が

ノイズフロアに与える影響について、より詳しく解説します。

## 参照

1. [RFフロントエンド](#)、ウィキペディア
2. 「[RFフロントエンドには何が含まれていますか？](#)」EEタイムズ、2008年2月4日、Christopher Bowick氏著書「RF Circuit Design」2eの新版の第8章から抜粋。
3. H.T. Friis, “Noise Figures of Radio Receivers,” *Proc. IRE*, vol. 32, no. 7, pp. 419–422, July 1944.

# Mini-Circuits Japan株式会社

〒222-0033

横浜市港北区新横浜3-6-12 SD12ビル6階

TEL: 045-548-5058

[sales@minicircuits.co.jp](mailto:sales@minicircuits.co.jp)

[support@minicircuits.co.jp](mailto:support@minicircuits.co.jp)