

全ブロックをカバー：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)

2022年9月2日

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)、 P_{1dB} 、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¹。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のものであり、すべてのRFフロントエンドを含む」と定義しています。²

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、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20mm²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: 24,000 - 27,500 MHz (2.23 dB 挿入損失)
- LNA: 16.9 dB ゲイン、2.9 dB NF
- アッテネータ: 3 dB

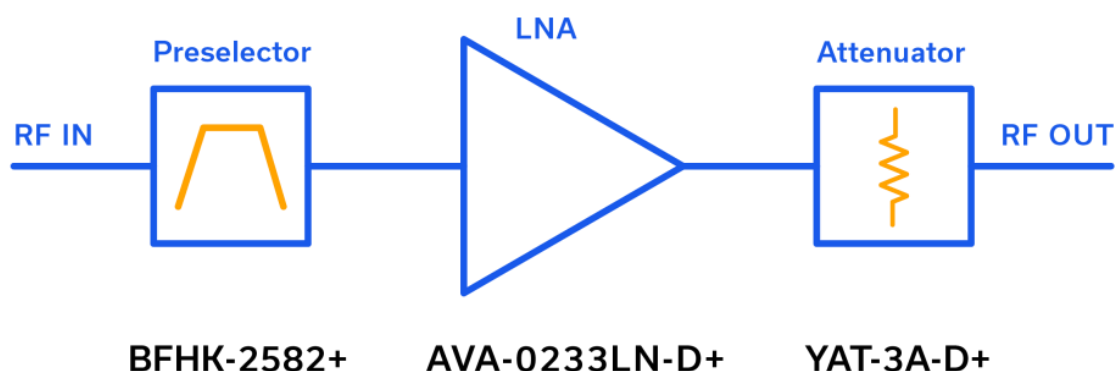


図 1: point-to-point マイクロ波フロントエンドのブロック図

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_{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 = Boltzmann's constant (1.38×10^{-23} J/K), $T_0 = 290\text{K}$ per IEEE³ and B = Bandwidth (1 Hz)

$$P_{\text{Thermal}} = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(290\text{K})(1 \text{ Hz}) = (4 \times 10^{-21} \text{ JW})(1 \text{ Hz}) = 4 \times 10^{-18} \text{ mW}$$

$$\Rightarrow 10\log(4 \times 10^{-18} \text{ mW}) = -174 \text{ dBm in a 1 Hz BW, or -174 dBm/Hz}$$

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。

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

$$= -78.56 \text{ dBm.}$$

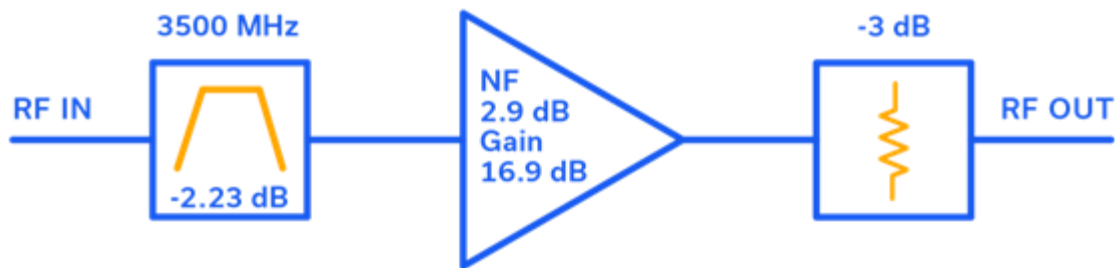
これはなにか？ 正確には、室温での地球のサーマルノイズフロア(P_{Thermal})を取得し、対象システムの 3dB 帯域幅の対数の 10 倍を加算すると、システムのノイズフロアになります。

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、例外としてプリセクタ BFHK-2582+の 2.23dB の挿入損失は、サーマルノイズフロア P_{Thermal} を 174dBm/Hz 以下に減衰させることはできません。

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。

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

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_{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、まさにプリセレクタ 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)⁴の公式で計算する必要があります。最初の2段階目(プリセレクタとアンプ)までのノイズ指数(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。ゲインが加算され、後ろ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ます。

$$F_{\text{Total}} = F_1 + (F_2 - 1)/G_1 + (F_3 - 1)/G_1G_2 + (F_4 - 1)/G_1G_2G_3 + \dots F_{n-1}/(G_1G_2\dots G_{n-1})$$

ノイズ係数は次のように算出します。

$$F = 10(\text{NF}/10) \text{ の場合、} F_1 = 10^{(5.13 \text{ dB}/10)} = 3.26 \text{ and } F_2 = 10^{(3 \text{ dB}/10)} = 2. \text{ となります。}$$

ゲイン(G₁)は、素子 F₂ 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、G₁ = 10^(14.67 dB/10) = 29.31 です。

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。

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

最終的に NF (dB) = 10log(F_{Total}) = 10log(3.294) = 5.18 dB

信号レベル、ノイズレベルと SNR

プリセレ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。

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

及び SNR = 14.67 dBm - (-58.76 dBm) = 73.43 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。

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

及び SNR = 11.67 dBm - (-61.71 dBm) = 73.38 dB

まとめ

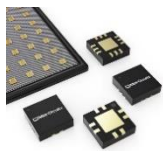
このアプリケーションノートでは、3 ステージ構成の RF フロントエンドに沿った各ステージのサーマルノイズフロア、所定の 3dB 帯域幅でのノイズフロア、および信号対ノイズ比(SNR)の計算を示す簡単な説明をしました。フリスの公式をカスケード NF に必要な範囲で使用しました。信号レベルは 0dBm から開始することで簡素化され、ノイズレベルと SNR はカスケードゲインと NF 値を使用して計算しました。

今後のアプリケーションノートでは、NF のつづき、P1dB および IP3 の導入など、追加のカスケードパラメータについて解説します。

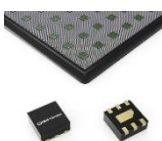
このアプリケーションノートで使用している製品



高除去比 LTCC フィルタ



広帯域 MMIC LNA



MMIC 固定アッテネータ

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. [レシーバ感度/ノイズ](#)
4. [ノイズのフリスの公式](#)-ウィキペディア