

ADC のノイズ指数が RF レシーバの設計に及ぼす影響

Thomas Neu
System Engineer

はじめに

より小型のデジタル受信機を製作するための取り組みとして、航空宇宙と防衛の各業界は最新の RF (無線周波数) 直接サンプリング A/D コンバータ (ADC) の採用を進めています。これらの ADC を採用すると RF ミキシング段が不要になり、アンテナとの距離がいつそう近付き、デジタル受信機をシンプルにできます。同時に、コスト削減と、プリント基板 (PCB) の面積節減も実現できます。

1 つの重要な (ただし、見過ごされることの多い) パラメータは、ADC のノイズ指数です。このパラメータに基づいて、非常に微弱な信号を検出する RF ゲインの大きさが決まります。この記事では、RF サンプリング ADC のノイズ指数を計算する方法と、ADC のノイズ指数が RF シグナル チェーン的设计にどのような影響を及ぼすかを説明します。

デジタル レシーバ設計でノイズ フィギュアが重要な理由

デジタル レシーバは、[図 1](#) に図示したとおり 2 つの異なるシナリオのいずれかで動作します。ブロッキング状態では、干渉またはジャマーが存在するため、レシーバは ADC を飽和させないように RF ゲインを低くして動作する必要があります。この構成では、干渉源により ADC がフルスケールに近い値で駆動されるため、大きな信号での ADC の信号対雑音比 (SNR) によりどの程度弱い信号を検出できるかが決まります。位相ノイズやスプリアス フリー ダイナミックレンジなど、他にも劣化メカニズムがあります。

2 番目のシナリオでは、干渉源が存在しません。最も弱い信号の検出は、レシーバ固有のノイズフロアだけに依存します。この状態は通常、レシーバの感度として測定されます。ノイズ指数は、レシーバの信号チェーン内の部品が原因となる SNR の劣化の指標となります。

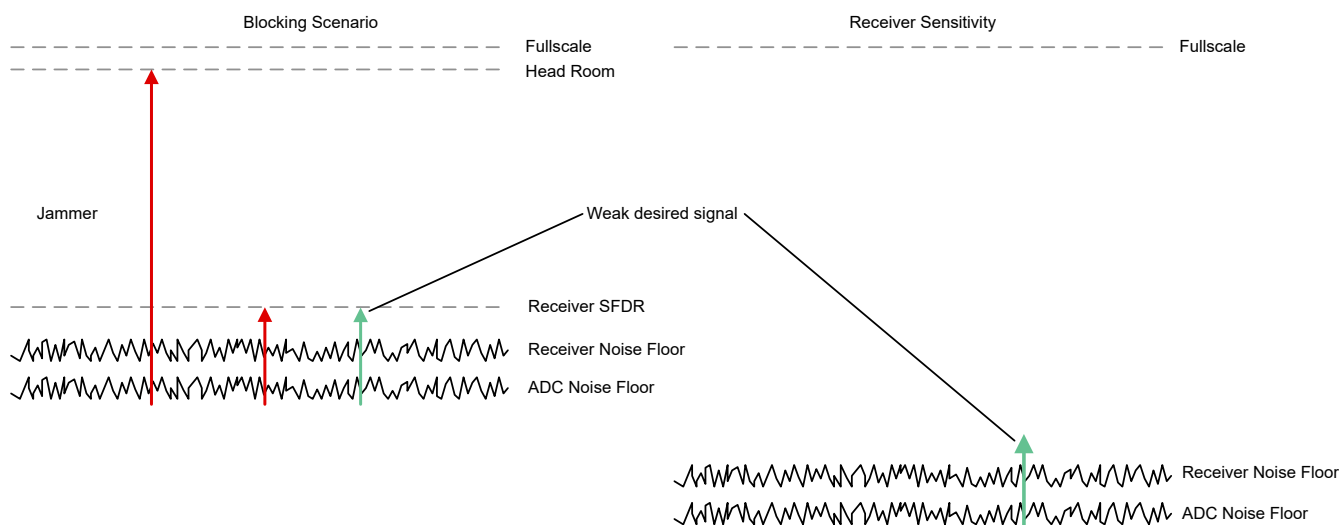


図 1. ブロッキングまたはジャミングのシナリオと、レシーバの感度シナリオの比較。

ADC のノイズ指数は通常、レシーバの最も弱いリンク (約 25 ~ 30dB) であり、低ノイズ アンプ (LNA) のノイズ指数は 1dB 未満です。ただし LNA を使用してアナログ RF フロント エンド (アンテナ付近) にゲインを追加することで、ADC のノイズ指数を改善することは可能です。レシーバシステムのノイズ指数 1dB と 2dB の差は約 20% に相当します。これは 1dB のノイズ指数を持つレシーバは、振幅が約 20% 弱い信号を検出できることを意味します。ソフトウェア無線 (SDR) では、出力電力が小さい無線を意味し、バッテリー寿命が節約できます。また、レーダーの場合は、長距離に対応できるようになります。

SDR またはデジタル レーダーにおける最新のレシーバ設計では、サイズ、重量、消費電力を低減するために、ダイレクト RF サンプリング ADC を使用しています。このアーキテクチャにより、RF ダウンコンバージョン ミキシング段が不要になり、レシーバの設計が簡素化されます。ADC のノイズ指数が良好であるほど、必要なゲインは小さくなり、結果としてさらなる節約が可能になります。さらに、より小さな追加の RF ゲインを使用することは、ジャマーが存在する場合、低減するゲインも少なくなり、レシーバのダイナミックレンジが広く維持されることを意味します。

システムのノイズ指数の計算

フリスの式を使用して、レシーバシステムのノイズ指数を計算できます。図 2 に示した 2 つのアンプと 1 つの ADC を備えた簡略化された理想的なレシーバを仮定すると、カスケード接続されたシステムのノイズ係数は次の式 1 によって計算されます。

$$F_{System} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \dots \cdot G_{n-1}} \quad (1)$$

ここで F_x はノイズ係数、 G_x は電力ゲインです。

システム ノイズ指数 (デシベル単位) は次のとおりです。

$$NF_{System} = 10 \log(F_{System}) \quad (2)$$

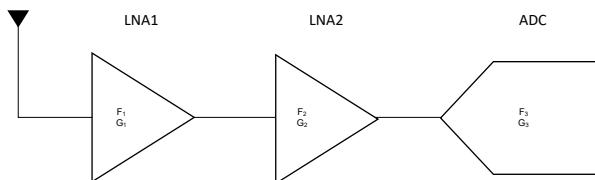


図 2. 標準的な受信信号チェーン

注目すべき 2 つの重要な事項があります。ADC のノイズ指数 F_3 が無視できるほどゲイン G_1 と G_2 が十分大きい場合に限り、システムのノイズ指数は主に最初の素子のノイズ指数 F_1 によって支配されます。

2 つのカスケード接続 LNA を持つシステムで、20dB と 25dB のノイズ指数を 2 つの異なる ADC で比較すると、システムのノイズ指数に大きな違いがあることがわかります (表 1 を参照)。

	LNA1	LNA2	ADC1	ADC2
ノイズ指数	1dB	3dB	20dB	25dB
ゲイン	12dB	15dB	0dB	0dB
結果として発生するシステム ノイズ指数			1.8dB	2.9dB

表 1. 2 つの LNA 段によるシステム ノイズ指数。

ADC2 列 (ノイズ指数が 5dB 悪い) に示したシステムのノイズ指数を 2dB 未満にするには、表 2 に示すように 3 番目の LNA (ノイズ指数 = 3dB) を使用して 10dB のゲインを追加する必要があります。

表 2 に、ADC のノイズ指数がシステム全体のノイズ指数に及ぼす影響を示します。3 番目の LNA を追加すると、コスト、ボード面積 (マッチング部品、配線、電源)、システムの消費電力が増加し、フルスケールのヘッドルームがさらに減少します。

	LNA1	LNA2	LNA3	ADC2
ノイズ指数	1dB	3dB	3dB	25dB
ゲイン	12dB	15dB	10dB	0dB
結果として発生するシステム ノイズ指数				1.4dB

表 2. 3 つの LNA 段を持つ ADC2 を使用したシステム ノイズ指数。

ターゲット レシーバの感度が -172dBm、または絶対ノイズフロアをわずかに 2dB 上回る非常に弱い信号 (-174dBm + 2dB = -172dBm) を仮定すると、このレシーバには 2dB より良好なノイズ指数が必要です。上に示した例、ADC1 (表 1 に示すようにノイズ指数が 20dB) と 1.8dB のカスケード接続されたシステムのノイズ指数を考えてみましょう。

図 3 および表 3 に示すように、ゲインが 12dB の LNA1 では、入力信号とノイズの両方が 12dB 上昇し、一方でノイズ指数は 1dB 低下します (LNA1 のノイズ指数は 1dB)。LNA2

は、信号とノイズの両方を 15dB 上昇させます。LNA2 固有のノイズフィギュアは 3 dB と高いにもかかわらず、LNA1 のゲインが 12dB であるため、影響はわずか 0.2dB に低減されます。

最後に、ADC1 (ノイズ指数 = 20dB) のノイズの寄与は、両方の LNA のゲイン 27dB 分小さくなるため、わずか 0.6dB に

減少します。その結果システム ノイズ指数は 1.8dB になり、弱い入力信号を検出するためのヘッドルームは約 0.2dB になります

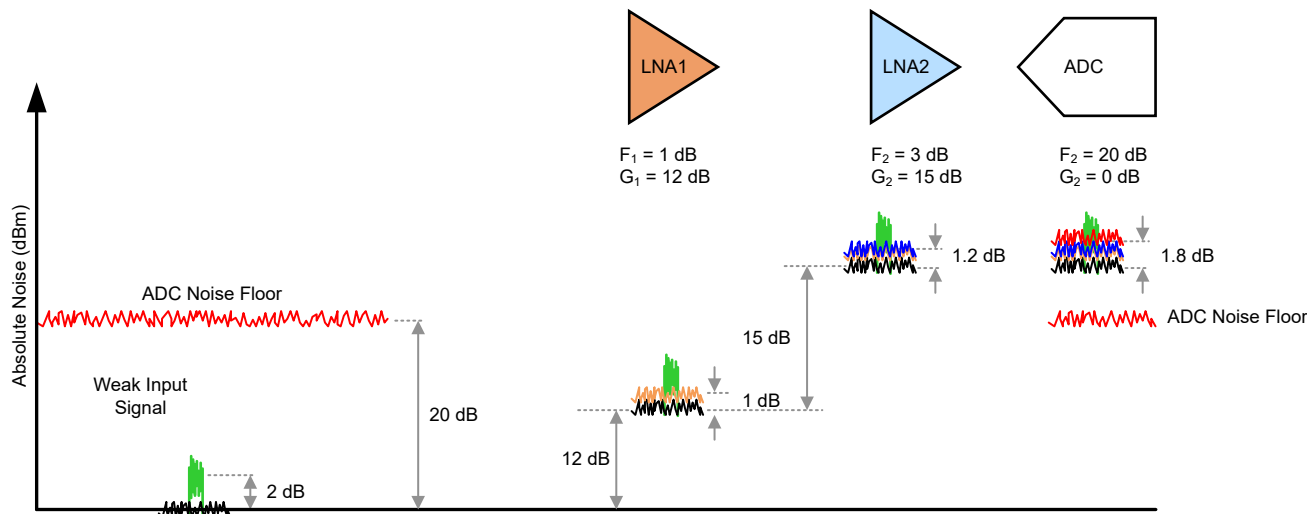


図 3. 受信信号チェーンの個別のノイズ指数の寄与を示す図解。

	LNA1	LNA2	ADC
ノイズ指数 (dB)	1	3	20
ゲイン (dB)	12	15	0
ノイズ電力 (リニア)	$1.26 \cdot 10^{1/10}$	$2 \cdot 10^{3/10}$	$100 \cdot 10^{100/10}$
10^(ノイズ指数 / 10)			
パワー ゲイン (リニア)	$15.85 \cdot 10^{12/10}$	$31.62 \cdot 10^{15/10}$	$1 \cdot 10^{0/10}$
10^(ゲイン / 10)			
LNA1 のみのノイズ指数 (dB)	1	-	-
LNA1 + LNA2 のみのノイズ指数 (dB)	1.2 $10 \log[1.26 + (2-1)/15.85]$		-
LNA1 + LNA2 + ADC のノイズ指数 (dB)	1.8 $10 \log[1.26 + (2-1)/15.85 + (100-1)/15.85/31.62]$		
システムのノイズ指数 (dB) に対するその他の影響	1	0.2	0.6

表 3. 個別のノイズ指数寄与の計算。

高速データコンバータでは、デバイス固有のデータシートにノイズ指数が記載されることはほとんどありません。ADC のノ

イズ指数は、ADC32RF54 RF サンプルング ADC の共通データシートパラメータ (表 4 を参照) を使用して式 3 により計算できます。

パラメータ	説明	ADC32RF54 (1 x AVG)	ADC32RF54 (2 x AVG)
V	入力フルスケール電圧ピークツーピーク (V_{pp})	1.1	1.35
R_{IN}	入力終端インピーダンス (Ω)	100 Ω	
FS	ADC サンプルングレート	2.6GSPS	
SNR	小入力信号 (dBFS) の ADC SNR (標準値 -20dBFS)	64.4	67.1

表 4. ADC32RF54 のデータシートパラメータ。

$$\text{ADC Noise figure (dB)} = P_{SIG, dBm} + 174 \text{ dBm} - \text{SNR (dBFS)} - \text{bandwidth (Hz)}$$

$$NF_{ADC} \text{ (dB)} = 10\log\left(\frac{\left(\frac{V}{2 \times \sqrt{2}}\right)^2}{R_{IN}} \times 1000\right) + 174 - SNR \quad (3)$$

$$- 10\log\left(\frac{FS}{2}\right)$$

ADC32RF54 のノイズ指数は次のように計算されます。

Noise figure (1x AVG) = 20.3dB

$$10\log\left[\frac{(1.1/2/\sqrt{2})^2}{100} \times 1000\right] + 174 - 64.4 - 10\log[2.6e9/2]$$

Noise figure (2x AVG) = 19.3dB

$$10\log\left[\frac{(1.35/2/\sqrt{2})^2}{100} \times 1000\right] + 174 - 67.1 - 10\log[2.6e9/2]$$

まとめ

レシーバのノイズ指数により検出可能な最も弱い信号が決まるため、レシーバのノイズ指数はシステム設計の重要なパラメータです。**ADC32RF54** は本質的にノイズ指数が非常に低いことに加えて SNR が高いため、入力電力信号が大きい場合でもシステムのノイズ指数を維持できます。ADC のノイズ指数が同じで SNR が低い場合、飽和を防止するために入力ゲインを小さくする必要があります。この場合、ADC のノイズ指数は全体のノイズの増加をもたらすようになります。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated