

Active Cold Noise Source – Experimental Data アクティブ・コールド・ノイズ・ソース – 実験データ 武安義幸 / JA6XKQ

物理的に冷却することなく低温ノイズ・ソースを実現するアクティブ・コールド・ノイズ・ソース(Active Cold Noise Source、以下、ACNS と略する)の設計法について、文献 [1] を参照して要点をまとめた。[2] その原理と設計法から、LNA (Low Noise Amplifier) そのものを ACNS として使えると考え、LNA が入力ポートがから出力するノイズの等価雑音温度を実測する。

実験の結果、物理温度よりも低い等価雑音温度のノイズを LNA の入力ポートから出力していることが確認でき、LNA を ACNS として使用できることが解った。

実験の概要

実験の目的が ACNS の原理を確認することなので、ACNS あるいは LNA の製作自体が目的化しないように、あるいは製作したものの完成度が実験に影響を与えないように、既製品の Ku 帯(12.25 GHz ~ 12.75 GHz) LNC (Low Noise Converter) を実験の対象とする。

LNC は JRC 製の NJR2536S で、その仕様概略を以下に示す。[3]

入力周波数	: 12.25 GHz ~ 12.75 GHz
出力周波数	: 950 MHz ~ 1,450 MHz
NF	: 0.8 dB typ. 1.2 dB max. @Ta=+25°C
変換利得	: 55 dB min. 60 dB typ.
入力 VSWR	: 2.5:1 typ.
出力 VSWR	: 2.3:1 max. (75 Ω)

外観の写真を 図-1 に、開封した内部の写真を 図-2 に示す。図-2 に見えるデバイスのマーキングから、初段の FET が NE325S01 (NFmin=0.45dB @12GHz)、2段目と3段目が NE425S01 (NFmin=0.60dB @12GHz) と推定されるが、確証はない。

測定のセットアップを 図-3 に示す。図-4 に示すように二台の LNC の入力ポートを対向させ、片方を ACNS とした。測定は、常温のダミー・ロードをホット・ノイズ・ソースに、ACNS に見立てた LNC をコールド・ノイズ・ソースとした Y ファクタ法である。Y ファクタは、スペクトラム・アナライザのノイズ・マーカ機能を用いて読み取る。

使用した LNC には NF の実測値が表示されており、それを等価雑音温度の計算の基準として、ACNS が出力するノイズの等価雑音温度を逆算する。測定の確度を向上するために、4 台の LNC を総当りの組み合わせ(12 通り)で ACNS に見立てて Y ファクタを測定する。4 台の LNC は、3 台が NF=0.8 dB、1 台が NF=0.9 dB という特性である。

ホット・ノイズ・ソースとして用いたダミー・ロードの外観を 図-5 に示す。特性は不明であり、吸収体の形状から判断して VSWR に懸念がある。ホット・ノイズ・ソースの等価雑音温度は、ダミー・ロードのケース温度そのものとする。

ACNS、LNC およびダミー・ロードの物理的な温度が、ゲインや等価雑音温度と密接な関係にあるので、温度センサを各部に装着してデータ取得時の温度管理を行う。

図-6 に測定の様子を示す。



図-1 : ACNS として使用する LNC

Yファクタ法

測定値に対する Y ファクタ法での処理を以下に示す。[4]

ホット・ノイズ・ソースの等価雑音温度を T_h 、コールド・ノイズ・ソースの等価雑音温度を T_c 、LNC の等価雑音温度を T_{lnc} とすると、ホットとコールドのノイズ・ソースに対する LNC 出力の雑音電力の比 Y は次式となる。

$$Y = \frac{T_h + T_{lnc}}{T_c + T_{lnc}} \quad \dots(1)$$

通常の間心事は T_{lnc} を求めることであり、 T_h と T_c が既知で、 Y を測定して次式から T_{lnc} を算出する。式 (1) を T_{lnc} について変形する。

$$T_{lnc} = \frac{T_h - Y \cdot T_c}{Y - 1} \quad \dots(2)$$

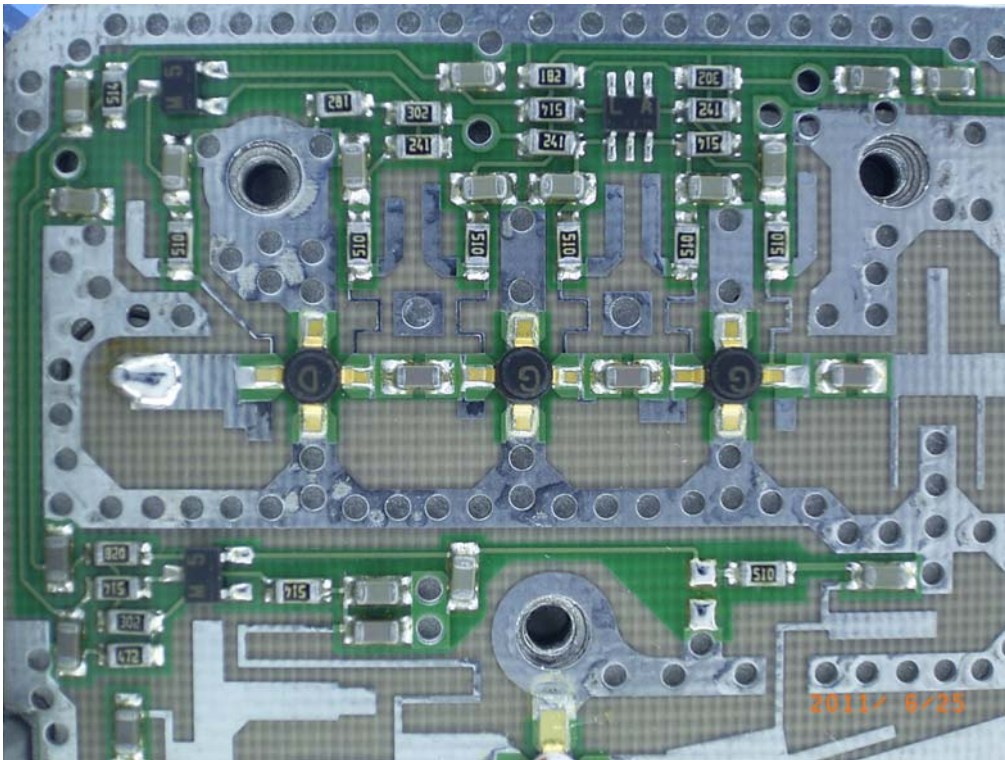


図-2 : LNC 内部の LNA 部

一方、本実験では T_h と T_{lnc} が既知で、 Y を測定して T_c を求める。式 (1) を T_c について変形すると、

$$T_c = \frac{T_h - T_{lnc}(Y - 1)}{Y} \quad \dots(3)$$

にて T_c を求めることができる。

Y ファクタ法で注意を要する点は、ホットとコールドのノイズ・ソースを接続した各時点で LNC のゲインが同じであると想定している点である。もし両方でゲインに変動があれば、それは Y ファクタの誤差となり、求める T_{lnc} や T_c の誤差となる。

なお、ゲイン変動の影響をなくすには、ゲイン変動が無視できるような短時間にホットとコールドのノイズ・ソースを切り替える手法が一般的に用いられる。例えば、ノイズ・ソース・ダイオードでは電子的なスイッチングが行われている。

測定データ

測定結果を表-1 にまとめる。表-1 は、4 台の LNC のうち 1 台を ACNS とし、残り 3 台の LNC で Y ファクタを測定した結果を示す。左側の欄が ACNS のシリアル番号を、上側の欄が LNC のシリアル番号を示し、12 通りの組み合わせとなっている。測定値は、ホット・ノイズ・ソースの温度 T_h 、Y ファクタ Y であり、太字の T_c はそれらの値から式 (3) を用いて計算したコールド・ノイズ・ソース ACNS の等価雑音温度である。

表-1 では、後述する温度による LNC のゲイン変動を補正した Y ファクタとしている。

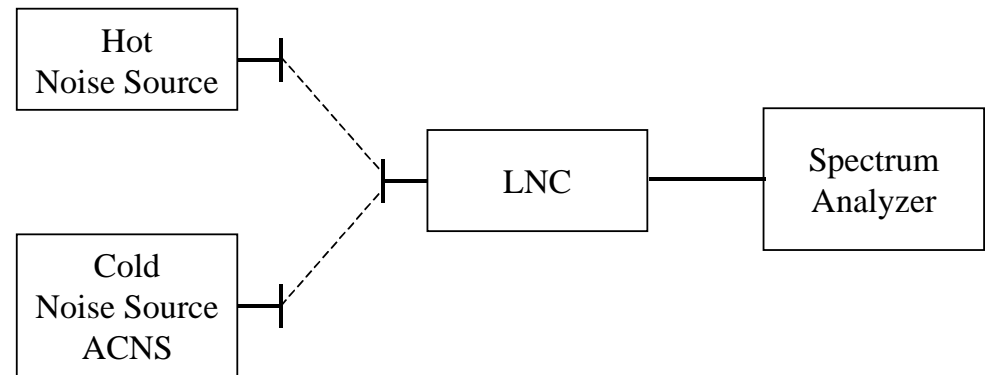


図-3 : 測定のセットアップ

考察

ホット・ノイズ・ソースの雑音電力を測定した時と、ACNS の雑音電力を測定した時では LNC の温度が異なるため、LNC のゲインが変動していると考えられる。Y ファクタ法では測定系全体でのゲイン変動はないものと仮定している(ゲインが同じなら、Y ファクタの比において相殺される)ため、LNC の温度に対するゲイン変化を生じた測定値について補正する必要がある。4 台の LNC の温度に対するゲインの変化の様子を 図-7 に示す。図-7 の結果から各 LNC のゲイン変化の温度係数を求め、 T_h と T_c を測定した時の LNC の温度差とその温度係数からゲイン変化を算出した。算出したゲイン変化で Y ファクタを補正した。本来であればゲインを直接測定すべきであるが、測定系の制約から間接的な計算による補正とした。表-1 にある Y ファクタは、この補正を含んでいる。補正值は LNC 毎に異なり、約 0.02 dB から 0.1 dB である。この補正による T_c の変化は、約 3 K である。

表-1 の結果から、ACNS が出力する雑音電力の等価温度が物理的な温度よりも低いこと、すなわちコールド・ノイズ・ソースとなっていることが解る。測定の確度を上げるために 1 台の ACNS に対して 3 台の LNC で T_c を求めた。しかし、3 台の測定結果はばらついており、その真値と確かさは不明である。表-1 の T_c を用いて他の LNA の NF を評価するノイズ・ソースとすることは早計である。



図-4 : 対向させた二台の LNC、片側が ACNS となる

(C) 2012, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

概略の T_c として 65 K 程度の値は正しいか?との疑問がある。測定結果の妥当性を検討するために、LNC の初段デバイスを NE325S01 と仮定して、文献 [1] にしたがって到達可能な等価雑音温度を計算してみる。

NE325S01 の S パラメータとノイズ・パラメータは以下のとおりである。[5]

Frequency	:	12.0 GHz
S11	:	0.453 \angle -160.32°
S21	:	3.545 \angle 25.99°
S12	:	0.099 \angle 1.78°
S22	:	0.214 \angle -116.89°
NFmin	:	0.45 dB
Γ_{opt}	:	0.24 \angle 139°
Rn	:	4 Ω

FET のソースに如何なるフィードバックが掛かっているかは 図-2 からは判断できないが、デバイス・パッケージのリードおよびプリント基板のトラック・パターンとスルーホールがインダクタンスを形成してフィードバックが掛かっていると推定できる。そのインダクタンスが不明なので、10pH から 500pH のインダクタンスを仮定して、等価雑音温度の変化具合を確

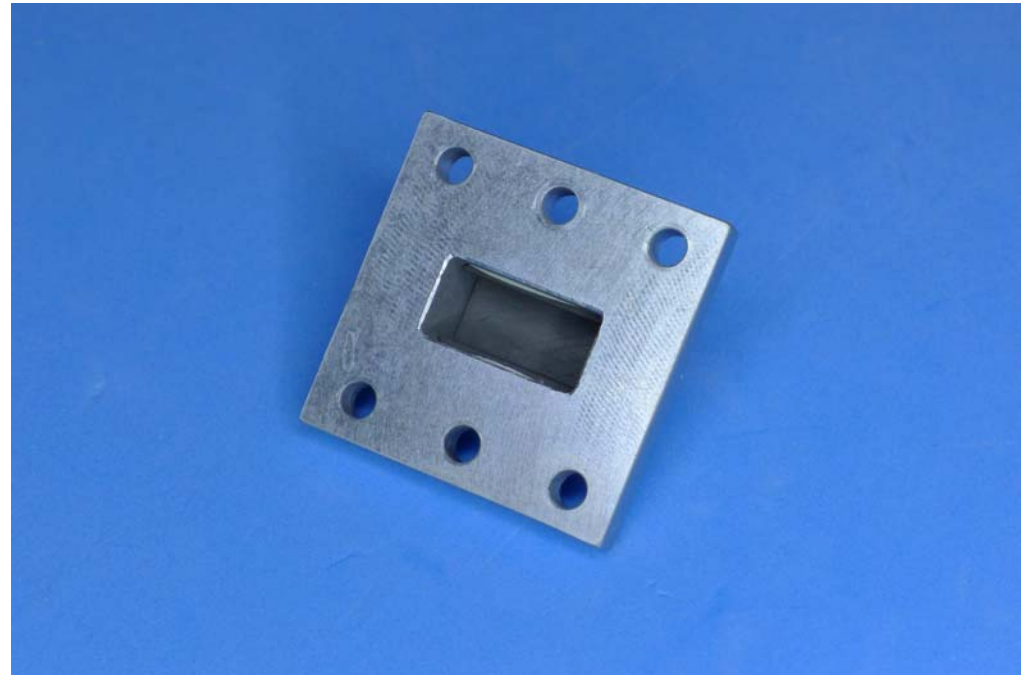


図-5 : ホット・ノイズ・ソースとして用いたダミー・ロード

(C) 2012, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

かめる。ここで、FET の出力側ロードの温度は、実測時の LNC ケース温度を考慮して、45 °C (318 K) と仮定して計算する。

途中の計算 [1] [2] は省略して、計算結果を 図-8 に示す。到達可能な最小雑音温度は 104 K と算出された。この値は 表-1 の測定結果とは大きく異なる。相違の理由は何であるのか？ いずれが正しいのか？ まず、理論値での計算モデルと現実の LNC との違いを明らかにすべきであろう。

計算モデルは FET 一段であるが、LNC は FET 三段の構成である。FET の出力側負荷の雑音温度が FET の S12 を通じて入力側へ出てくる。計算モデルでは T2 と称している雑音等価温度である。三段の構成では、一段の ACNS をカスケードに接続していると見なせるので、初段の T2 は次段 ACNS の等価雑音温度に相当すると見なせる。故に、T2 を 318 K として計算した前述の仮定は、T2 が凡そ 100 K 程度で計算すべきであろう。ただし、文献 [1] [2] の T_{s1} の計算式から解るように、T2 の寄与分は小さく、仮に T2=318 K を 100 K としても、104 K が 65 K となることはない。

計算モデルと LNC との相違点として、入力ポートのマッチングがある。計算モデルでは、入力ポートはパワーマッチとしている。一方、LNC の入力ポートのマッチングは、前述の仕様値に示すように VSWR=2.5:1 typ. と、パワーマッチとはなっていない。文献 [1] では、ミ

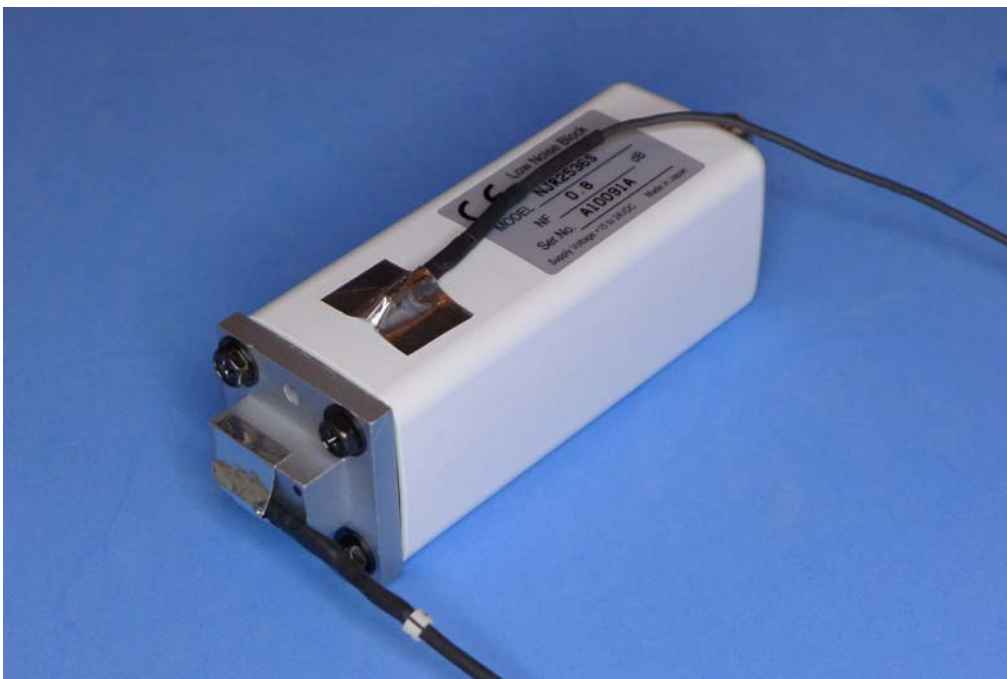


図-6 : ホット・ノイズ・ソース(ダミー・ロード)と温度センサを装着した LNC

スマッチのケースについても論じられている。ミスマッチで計算しても、104 K の等価雑音温度が 65 K となることはない。

それでは、LNC は ACNS として 100 K 程度の雑音電力を出力しているが、その雑音電力を正しく測定できているのか疑問になってくる。Y ファクタ法の測定における不確かさの要因を、文献 [4] に従ってチェックする。

文献 [4] では次の要因が不確かさとして挙げられている。

1. ノイズ・ソースの ENR (Excess Noise Ratio)
2. ノイズ・ソースの物理温度
3. DUT (Device Under Test)とノイズ・ソース間のロス
4. ノイズ・ソースと DUT 間のマッチング
5. DUT のゲイン
6. DUT のリニアリティ
7. DUT と測定器(NFメータ、電力計)間のマッチング
8. 測定器のNF

		LNC			
		S/N: A10085A NF = 0.9 dB	S/N: A10088A NF = 0.8 dB	S/N: A10089A NF = 0.8 dB	S/N: A10091A NF = 0.8 dB
ACNS	S/N: A10085A	-	Th = 314 K Y = 4.79 dB Tc = 65 K	Th = 317 K Y = 4.82 dB Tc = 65 K	Th = 317 K Y = 4.92 dB Tc = 63 K
	S/N: A10088A	Th = 317 K Y = 4.82 dB Tc = 60 K	-	Th = 318 K Y = 4.81 dB Tc = 66 K	Th = 317 K Y = 4.99 dB Tc = 61 K
	S/N: A10089A	Th = 316 K Y = 4.74 dB Tc = 62 K	Th = 317 K Y = 4.74 dB Tc = 67 K	-	Th = 316 K Y = 4.85 dB Tc = 64 K
	S/N: A10091A	Th = 316 K Y = 4.81 dB Tc = 60 K	Th = 316 K Y = 4.82 dB Tc = 65 K	Th = 315 K Y = 4.83 dB Tc = 64 K	-

表-1 : 測定結果

この考察では、1. は正しいという前提で他の要因を検討する。2. は、ホット・ノイズ・ソースとして用いたダミー・ロードの温度が該当する。ダミー・ロードの温度と求める T_c の関係は一次の関係にあるので、100 K と 65 K の差が出るには約 1.5 倍の比となり、ダミー・ロードの温度である約 315 K が 1.5 倍も変化する、あるいは温度の測定を誤ることはない。

3. のロスと 5. のゲインにおいて、約 1.5 倍、すなわち約 1.8 dB の変化は生じていない。6. のリアリティについては、LNC の P1dB は 0dBm であり、測定のレベルでは問題を生じる領域ではない。8. の測定器の NF については、LNC のゲインが 55 dB もあるので無視できる。

一方、問題となりそうな要因は、4. と 7. のマッチングである。LNC の入力ポートの VSWR は 2.5:1 であり、ノイズ・ソースである ACNS の出力ポートも同じ VSWR となる。文献 [4] に倣って計算すると、このミスマッチによる不確かさは最大で 1.77dB に及ぶ。また、LNC の出力ポートの VSWR は 2.3:1 (インピーダンスは 75 Ω) であり、雑音電力の読み取りに用いたスペクトラム・アナライザの入力ポート(50 Ω)とミスマッチを生じている。また、ホット・ノイズ・ソースとして用いたダミー・ロードと LNC とのマッチング具合も不明である。

以上の考察から、ACNS が凡そ 100 K の雑音電力を出力していても、測定系でのミスマッチの問題から、65 K と低く読み取る可能性が判明した。

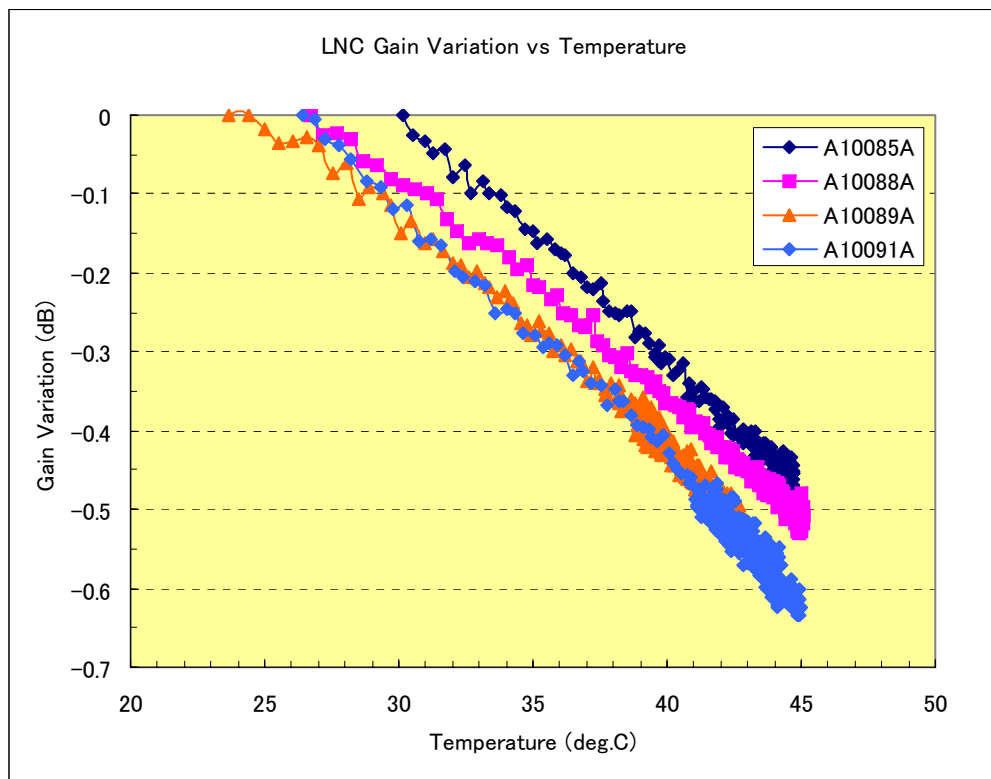


図-7 : 温度に対する LNC のゲイン変化

(C) 2012, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

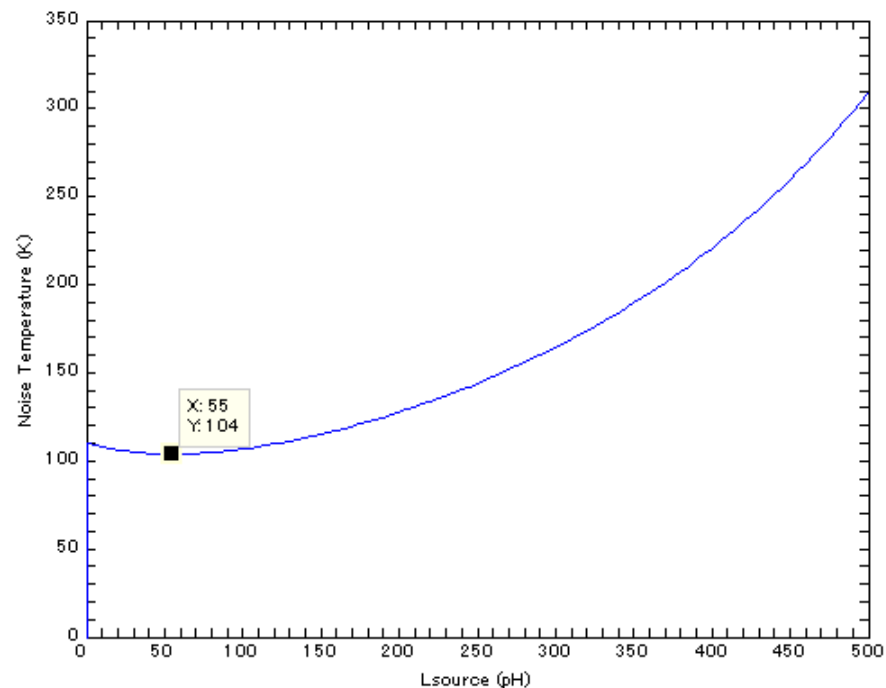


図-8 : NE325S01 を用いた ACNS の T_c 計算値

(C) 2012, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

課題

LNC(あるいはLNA)を ACNS として使用すれば、非冷却で常温以下(理論的には 100 K 程度)の等価雑音温度を実現できることが実験で確かめることができた。しかし、ノイズ・ソースとするには次のような課題がある。

- ポートのマッチング
- 温度に対する安定度/変化量の評価
- フィードバックを用いたものなので、周波数特性が広帯域とはなり得ない(か?)
- 等価雑音温度の絶対値の校正

ポートのマッチングに関しては、考察で述べた測定の観点もさることながら、ノイズ・ソースとしての本来の目的である LNA の評価において重要な要素である。LNA の NF 特性は入力マッチングに依存するので、ノイズ・ソースのポートがミスマッチでは、ノイズ・ソースを相手に NF 特性を最適化することはできない。これは ACNS に限ったことではなく、ノイズ・ダイオードを使用したノイズ・ソースでも同様の課題である。

まとめ

LNC を ACNS として使えるか?という当初の疑問は、実測の結果、使えそうだと解った。しかし、実用に供するには、ポートのマッチングや等価雑音温度の絶対値の校正などの課題が明らかになった。課題の解決へと進みたい。

//
☆

参考文献

- [1] Experimental Validation of Generalized Equations for FET Cold Noise Source Design
Mark H. Weatherspoon and Lawrence P. Dunleavy
IEEE Trans. on MTT, Vol. 54, No. 2, February 2006
- [2] Active Cold Noise Source
アクティブ・コールド・ノイズ・ソース
武安義幸 / JA6XKQ
http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/ActiveColdSource_2.pdf
- [3] Ku band PLL LNB, Specifications
Rev.03M February 18, 2003
New Japan Radio Co., Ltd.
http://www.snxp.com/pdfs/lbn_ku003.pdf
- [4] Noise Figure Measurement Accuracy – The Y-Factor Method
Application Note 57-2
Agilent Technologies
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-3706E.pdf>
- [5] C to KU BAND SUPER LOW NOISE AMPLIFIER N-CHANNEL HJ-FET NE325S01
Datasheet
<http://www.cel.com/pdf/datasheets/ne325s01.pdf>