

Active Cold Noise Source
アクティブ・コールド・ノイズ・ソース
武安義幸 / JA6XKQ

LNA (Low Noise Amplifier) のデバイスが低雑音化するほど、その評価、例えば Y ファクタ法を高精度に行なうには、ノイズ・ソース自体の低温化を必要とする。[1] そして、ノイズ・ソースの低温化は文字通り、ノイズ・ソースを物理的に冷却することが一般的である。概念としてはダミー・ロードを液体窒素で冷却するというのはシンプルであるが、その実現はアマチュアには容易ではない。アマチュアに実現可能な冷却コールド・ソースとしては、文献 [2] が参考となる。

ノイズ・ダイオードを用いたホット・ノイズ・ソースを製作して以来 [3]、電子的に常温以下に冷却したコールド・ノイズ・ソースが製作できないのかと検討を継続していた。電子的な冷却といえばペルチェ素子を用いる手法に直ぐに思い至るが、その冷却温度はコールド・ノイズ・ソースとしては不十分であろう。以前より、純粋に電子的なコールド・ノイズ・ソースの存在 [4] [5] は知っていたが、その内容は文献の性格上、理論的な議論が中心であり、文献を基にしたの実設計へは至らずにいた。

あらためて文献を調査すると、純粋に電子的なコールド・ノイズ・ソースに関して理論的な背景から実設計と、その評価までを論じた文献 [6] に到達できた。理論から実設計に至る部分で、数式の展開や解釈に更なる文献調査と検討を要したので、その経緯をここにまとめる。

ACNS (Active Cold Noise Source) の原理概要

理論的背景の詳細は文献 [6] を参照し、ここでは原理の概要を文献から書き出す。数式の番号は文献の番号をそのまま転載する。

Lossy noiseless two-port device で表現される ACNS の説明図を 図-1 に示す。Bns1 と Bns2 は、等価雑音温度が T1 の SYSTEM (評価対象) と T2 の LOAD から放射される (古典的な電圧と電流での表現ではなく、電力波として表現した) 雑音波 [7] [8] である。

図-1 において、ACNS が Plane-1 へ放射するノイズの等価雑音温度 Ts1 は式 (29) で示される。

$$T_{s1} = T_b + \left\{ \left[T_1 (1 - |\Gamma_1|^2) + T_a \right] G_{21,ti} |\Gamma_2|^2 + T_2 (1 - |\Gamma_2|^2) \right\} G_{12,ti} \dots (29)$$

ここで、

$$T_a = T_{e(\min)} + \frac{T_k |\Gamma_{opt}'|^2}{1 - |\Gamma_{opt}'|^2} \dots (30)$$

$$T_b = \frac{T_k}{1 - |\Gamma_{opt}'|^2} - T_{e(\min)} \dots (31)$$

である。さらに、

$$T_k = 4T_0 R_n G_{opt} \dots (4)$$

$$G_{12,ti} = \frac{|S_{12}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \dots (27)$$

$$G_{21,ti} = \frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{22}|^2} \dots (28)$$

$$\Gamma_{opt}' = \frac{\Gamma_{in}^* - \Gamma_{opt}}{\Gamma_{opt} \Gamma_{in} - 1} \dots (32)$$

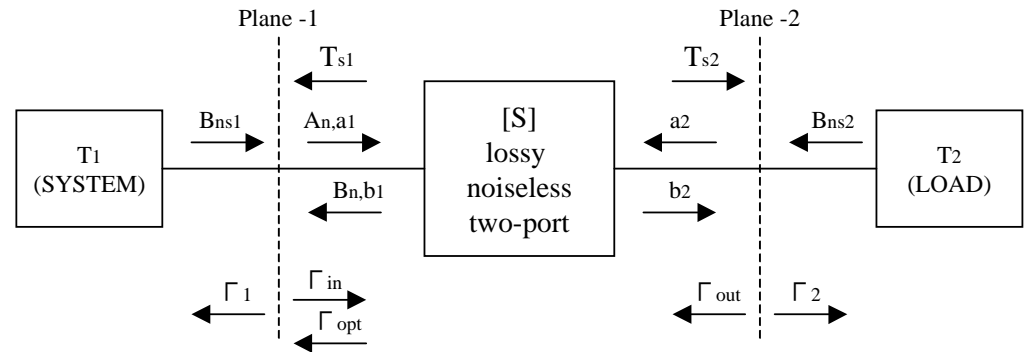


図-1 : ACNS のブロック図

である。

$T_e(\min)$ は、Minimum Noise Figure を等価雑音温度に換算したものである。 T_a と T_b は、線形二端子網 (Linear Two-port) におけるノイズの入射波と放射波の等価雑音温度である。詳細は文献 [7] [8] による。 $G_{12,ti}$ と $G_{21,ti}$ は、ACNS を線形二端子網で表したときの電力利得で、それぞれ $\Gamma_2 = 0$ 、 $\Gamma_1 = 0$ なる条件、すなわち入出力でのパワー・マッチを仮定している。

ACNS としては T_{s1} を最小化することが設計の目的である。式 (29) ~ (31) から、 $\Gamma'_{opt} = 0$ であれば T_{s1} が最小となることが判る。この要件は、式 (32) において $\Gamma_{in} = \Gamma_{opt}^*$ なる要件、すなわちノイズ・マッチであることを導き出す。

Plane-1 ではパワー・マッチとノイズ・マッチを設計要件としており、この要件は Plane-2 での整合条件 Γ_2 について式 (34) を導き出す。

$$\Gamma_2 = \frac{\Gamma_{opt}^* - S_{11}}{S_{12}S_{21} + S_{22}(\Gamma_{opt}^* - S_{11})} \dots (34)$$

ここで着目すべき点は、能動素子の S パラメータとノイズ・パラメータ Γ_{opt} によっては、 Γ_2 が 1 より大きくなるという不合理を生じる可能性である。この不合理を回避して ACNS の実回路を設計する手順を次に示す。

ACNS の設計手順

図-1 に示した ACNS の原理的なブロック図を、実回路に即した模式的な回路図として図-2 に示す。

図-1 と 図-2 で注意すべき点は、図-1 の Plane-1 と Plane-2 が、図-2 の Plane-1' と Plane-2' にそれぞれ対応することである。Plane-1' と Plane-2' での反射係数 Γ は、FET DEVICE 単体での S パラメータから導出されるものではなく、ソースに直列に挿入したインダクタを用いてフィードバックを掛けた時の S パラメータから導出されるという点である。また、前項で示した数式を 図-2 に適用するにあたっては、数式中の S パラメータには同様の注意、すなわち変換後の S パラメータを使用する注意が必要。

フィードバックを掛けた場合の S パラメータとノイズ・パラメータの計算法は、文献 [9] にまとめたので参照のこと。ちなみに、文献 [6] では、本題ではないので省略されている。

文献 [6] では、図-3 の設計手順が示されている。ここで、 Γ_L は、上記の 図-1 と 図-2 の関係から式 (34) を適用することで、

$$\Gamma_L = \frac{\Gamma_{opt}^* - S_{11}}{S_{12}S_{21} + S_{22}(\Gamma_{opt}^* - S_{11})} \dots (35)$$

となる。

設計手順に従って、まず、ソースに直列にインダクタを挿入してフィードバックを掛けた場合の S パラメータとノイズ・パラメータの数値例を計算する。[9] 結果を、表-1 と 表-2 に示す。設計周波数は 14 GHz で、インダクタは 200 pH (ピコ・ヘンリ) とする。

表-2 から、 Γ_L の絶対値 (振幅) が、フィードバック無しでは 1 より大きくなるという不合理を生じていること、そして、フィードバックを掛けることで 1 より小さくなり、設計要件を満足していることが判る。

フィードバックのインダクタンスを決定した後、FET の入力側マッチング回路を Γ'_{opt} でのノイズ・マッチとパワー・マッチを両立させたマッチングで設計する。すなわち、

$$\Gamma_{in} = \Gamma_{opt}^*$$

のもとに式 (32) は、

$$\Gamma'_{opt} = 0$$

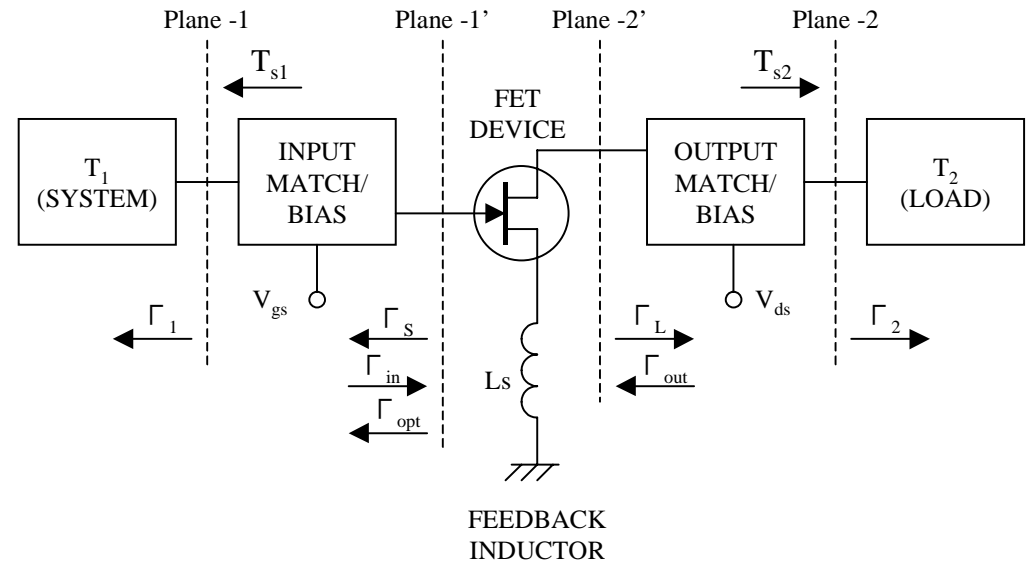


図-2 : ACNS の模式的回路図

図-3 : ACNS の設計手順

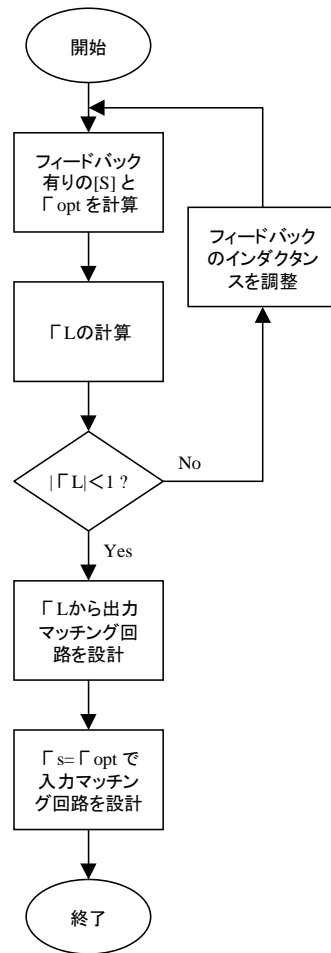


表-1 : フィードバック有無による S パラメータ

Lsource (pH)	S11	S12	S21	S22
0	0.789 ∠ -142.2°	0.171 ∠ -9.2°	1.442 ∠ 53.3°	0.488 ∠ -99.4°
200	0.533 ∠ -149.3°	0.197 ∠ 81.7°	1.442 ∠ 50.1°	0.413 ∠ -86.2°

表-2 : フィードバック有無によるノイズ・パラメータ

Lsource (pH)	Fmin (dB)	Rn (Ω)	Γopt	ΓL
0	1.2	14	0.675 ∠ 113.8°	4.649 ∠ -34.7°
200	1.249	5.411	0.587 ∠ 139.2°	0.362 ∠ 137.8°

となる。入力回路のパワー・マッチの条件から、

$$\Gamma_1 = 0$$

となる。また、出力回路は求めた「Lとマッチングをとるので、

$$\Gamma_2 = \Gamma_L$$

である。式 (30) と (31) は、

$$T_a = T_{e(\min)} = 96.642 \text{ (K)}$$

$$T_b = T_k - T_{e(\min)}$$

これらの結果と、T1=T2=295(K) なる環境温度を想定すると、式 (29) を用いて、

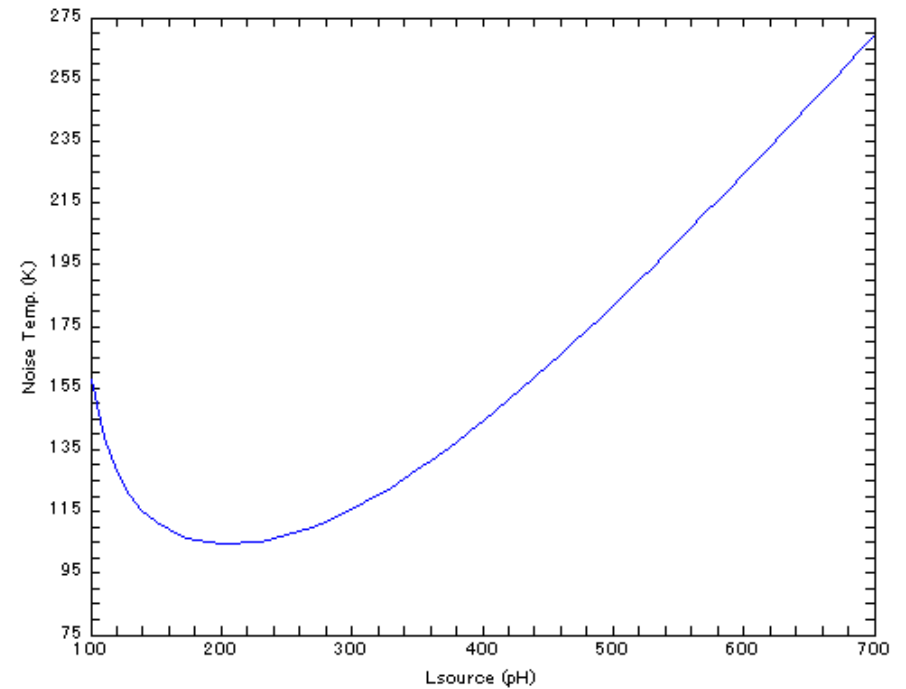


図-4 : ACNS から出力される等価雑音温度 Ts1

$T_{s1}=104.638(K)$ という等価雑音温度が求められる。

一連の手順を、フィードバックのインダクタンスを 100pH から 700pH まで変化させて T_{s1} を求めたものを 図-4 に示す。 $L_{source}=200pH$ で T_{s1} が最小となっていることが判る。上記の数値例では、この最小点を例示した。フィードバックの最適化により、ACNS として最小の T_{s1} を実現できる。

製作例

例示された設計手法を手元の FET に適用すれば、物理的に冷却することなく、常温において $T_{s1}=104(K)$ なる等価雑音温度のコールド・ノイズ・ソースが実現可能である。104(K) といえば $-169^{\circ}C$ であり、アマチュアには実現し難い領域である。

図-2 を眺めつつ設計手順をおさらいすると、既視感にとらわれた。文献 [9] を、「LNA の設計では、NF マッチングとパワーマッチングの両立のために、デバイスにフィードバックを掛ける手法が一般的」と書き始めた。ここで書いているのは LNA の設計法と類似ではないか！？

ACNS とは、LNA の入力から出るノイズではないか！？ LNA の入力ポートを ACNS として他方の LNA に接続すれば良い、、、

新たに ACNS を製作する前に、手元の LNA 同士を接続して測定することにした。如何なる雑音温度を示すのか？

まとめ

物理的に冷却することなく、低温の等価雑音温度を有するアクティブ・コールド・ノイズ・ソースの設計手法を、文献 [6] から参照した。低雑音デバイスを用いると、デバイスの NF_{min} に近い等価雑音温度のノイズ・ソースが実現可能であることが理解できた。その設計手法と回路は、LNA と等価であると理解されるので、まずは既存の LNA をそのまま流用して、ACNS の動作を確認する。実測編へと続く、、、

／／
☆

参考文献

- [1] 1296 MHz Small EME Station with Good Capability (Part 3)
Sergey Zhutyaev, RW3BP
http://www.vhfdx.ru/apparatura/accurate_noise_figure_measurements_1296_mhz
- [2] 受信システムを生かすためのローノイズ プリアンプ・テクノウ
隈本堯、JA6DR
Ham Journal No.37、1984、CQ 出版社
- [3] Poor man's Noise Source
武安義幸、JA6XKQ
http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/NoiseSource_2.pdf
- [4] An Active "Cold" Noise Source
ROBERT H. FRATHER and DAVID R. WILLIAMS
IEEE Trans. on MTT, Vol. 29, No. 4, April 1981
- [5] Electrically Cold Microwave Artificial Resistors
ROBERT L. FORWARD and TERRY C. CISCO
IEEE Trans. on MTT, Vol. 31, No. 1, January 1983
- [6] 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
- [7] Wave Representation of Amplifier Noise
PAUL PENFIELD JR.
IRE Trans. on Circuit Theory, Vol. 9, No. 3, March 1962
- [8] A Wave Approach to the Noise Properties of Linear Microwave Devices
R. P. MEYS
IEEE Trans. on MTT, Vol. 26, No. 1, January 1978
- [9] Changes of S-Parameters and Noise Parameters due to Feedback
フィードバックによる S パラメータと雑音パラメータの変化
武安義幸、JA6XKQ
http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/NoiseParameterWithFeedback_2.pdf