

PROCEDIMENTOS PARA MEDIDA DE FIGURA DE RUÍDO NO DESENVOLVIMENTO DE UM LNA-100 K PARA RECEPÇÃO DE SINAIS DE SATÉLITE

EDSON I. YNOUE
D. CONSONI
E. CAMARGO
IME-EPUSP

RESUMO

O desenvolvimento do protótipo do amplificador de baixo ruído, para temperatura de 100 K, baseou-se na caracterização de um LNA de 120 K anteriormente realizado. A tecnologia adotada para o LNA-100 K foi a de microlinhas de transmissão sobre substrato isolante flexível ($\epsilon_r=2,5$, espessura=0,7 mm). Utilizaram-se transistores NE 13783 (NEC) e MGF-1412 (Mitsubishi) nos estágios de baixo ruído.

Dois sistemas de medidas encontravam-se disponíveis para o projeto:

a - sistema automático, com fonte de ruído solid-state, para medida direta da figura de ruído; e

b-sistema manual, com fonte quente/fria (N líquido) de ruído, para medida do fator Y.

Inicialmente procedeu-se a uma comparação de resultados

entre os dois sistemas.

CONCLUSÕES

Foram apresentados três métodos para caracterização de elementos concentrados que têm como vantagem comum, o fato de não necessitarem de calibração automática. A precisão com que são obtidos os valores dos componentes é adequada para a construção de circuitos como amplificadores, por exemplo.

Para uma caracterização mais completa dos elementos reativos incluindo seus parasitas é aconselhável o uso de um sistema automático. Com este fim, está em fase de conclusão um programa interligando um computador PDP11 a uma calculadora HP9825A que controla o Network Analyser.

REFERÊNCIAS

- [1] - ROBERT E. DE BRECHT - "Impedance Measurements of Microwave Lumped Elements from 1 to 12 GHz" - IEEE-MTT Jan. 1972.
- [2] - AITCHISON et al. "Lumped Circuit Elements at Microwave Frequencies" - IEEE-MTT - Dec. 1971
- [3] - GINZTON - "Microwave Measurements" - cap. 9 - McGraw Hill Book Company, Inc. 1957.
- [4] - GARY D. ALLEY - "Interdigital Capacitors and their Application to Lumped - Element Microwave Integrated Circuits" - IEEE-MTT - Dec. 1970.

dos, obtidos através dos dois sistemas, para o mesmo protótipo do LNA-120 K. Nota-se que o sistema a) de medidas fornece resultados absolutos pouco precisos, devido principalmente à incerteza associada ao valor do FNR da fonte de ruído solid-state. Em compensação, este método torna-se bastante prático quando se deseja verificar as variações relativas da figura de ruído. O sistema b), por sua vez, consiste em um método mais preciso de determinação da temperatura de ruído, embora exija mais tempo de cálculo e operação.

A partir destes dados de calibração entre um sistema e outro, adotou-se um procedimento iterativo de ajuste do circuito projetado para a entrada do 1º estágio do amplificador, utilizando-se o sistema a), para detecção da figura de ruído ótima, em toda faixa de operação. O segundo estágio, cuja influência é bastante significativa no comportamento em ruído do amplificador completo, só foi associado ao primeiro, e ajustado, após ter sido este completado, caracterizado em ganho e otimizado em ruído, comprovando-se um resultado abaixo de 100 K, através do sistema b) de medidas.

O protótipo completo, constituído do módulo de baixo ruído (transistor + dois estágios), ligado a três estações posteriores de ganho foi caracterizado pelo sistema b) no LME e no CPQD, Telebrás, também por um sistema utilizando fonte quente/fria (N-líquido), acoplado a uma calculadora.

Os fatores de imprecisão das medidas foram empregados na avaliação do erro envolvido na determinação da temperatura do amplificador.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um amplificador de baixo ruído (LNA), com temperatura de ruído inferior a 100 K, para a faixa de recepção de sinais de satélite (3,7 a 4,2 GHz), consistiu em uma das etapas de projeto do contrato USP/TELEBRÁS - JDPQD 002/81, em que já haviam sido desenvolvidos protótipos de 180 K, 150 K e 120 K, utilizando transistores GaAs MESFETs.

Um dos problemas básicos associados a este projeto refere-se à precisão nas medidas de baixa figura de ruído. Conforme demonstra o gráfico da Figura 1, este é um fator que influi direta e significativamente no custo de amplificadores de baixo ruído comerciais.

Partindo-se da análise dos equipamentos de medidas disponíveis para o projeto, o objetivo deste trabalho consiste em descrever o procedimento adotado na realização do protótipo LNA-100 K.

MÉTODOS DE MEDIDA

Dois métodos de medidas são normalmente utilizados na determinação da temperatura equivalente de ruído de amplificador: o método manual e o método automático.

O diagrama de blocos de um sistema manual de medidas, empregando como fonte fria uma carga casada imersa em nitrogênio líquido, e como fonte quente, um atenuador em guia de onda, en-

contra-se esquematizado na figura 2.

Determina-se a temperatura de ruído do INA, e sua correspondente figura de ruído, pelas seguintes expressões:

$$T_e = \frac{T_2 - Y T_1}{Y - 1}$$

$$F \text{ (dB)} = 10 \log \left[1 + \frac{T_e}{290} \right]$$

onde:

T_e = temperatura efetiva de ruído

T_1 = temperatura da fonte de ruído na condição de carga fria = 81 K (dado do fabricante)

T_2 = temperatura da fonte de ruído na condição de carga quente = T_{ambiente}

$$Y = \frac{N_{02}}{N_{01}} = \frac{\text{potência de ruído no ponto A com carga quente}}{\text{potência de ruído no ponto A com a carga fria}}$$

$F \text{ (dB)}$ = figura de ruído

O método manual caracteriza-se pela medida do fator Y (em dB), através do atenuador de FI calibrado, quando a fonte de ruído é comutada da condição de carga fria para a de carga quente. O medidor de ruído, neste caso, serve unicamente como um detector de referência.

O diagrama de blocos do sistema automático de medidas, utilizando uma fonte de ruído Solid-State, está esquematizado na Figura 3.

Através deste método, obtém-se a leitura direta da figura de ruído $F \text{ (dB)}$, calculada internamente no medidor, que também comuta automaticamente a fonte de ruído da condição OFF para a condição ON. A expressão processada analogicamente pelo equipamento é:

$$F \text{ (dB)} = \text{ENR} - 10 \log (Y - 1)$$

onde:

$$\text{ENR} = 10 \log \left(\frac{T_3 - T_0}{T_0} \right), \text{ é}$$

uma característica da fonte de ruído

T_0 = temperatura de referência = 290 K

T_3 = temperatura da fonte de ruído na condição ON.

Algumas precauções devem ser tomadas na utilização de ambos os métodos, a fim de se garantir a confiabilidade das medidas efetuadas. Dentre os cuidados necessários, deve-se ajustar o nível de potência do oscilador local para a condição ótima de operação do misturador, e garantir-se a operação linear do pré-amplificador de FI, comprometido pelo alto ganho do INA projetado (-50 dB). Para se evitar que a potência de ruído amplifi-

$\pm 5,1$ K no pior caso, e a precisão do sistema automático é de ± 45 K (pior caso).

Conclui-se, desta análise, que o sistema automático apresenta uma alta imprecisão, devido basicamente ao grau de incerteza especificado para o valor de ENR. Este método seria inconveniente para medidas de baixa figura de ruído, não fosse a possibilidade de se efetuar uma calibração das leituras, baseada nos resultados obtidos para um mesmo amplificador, através do método manual, cujo grau de precisão é superior.

Em compensação, pelo método manual, são efetuadas medidas lentas e que exigem cálculos extras para determinação da figura de ruído.

DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE 100 K

O LNA projetado consistiu de cinco estágios realizados sobre substrato isolante flexível ($\epsilon_r=2,5$ - espessura=0,7 mm), utilizando-se microlinhas de transmissão e transistores GaAs - MESFETs. Denominou-se módulo de baixo ruído, o conjunto formado pelos dois primeiros estágios, precedidos por um transisolador (transição guia/microlinha + isolador).

Pela observação da fórmula de Friis

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

deve-se destacar que a figura de ruído do 2º estágio deve ser

cada sature o pré-amplificador de FI, o que provocaria erros na determinação do fator Y, deve-se introduzir o atenuador de RF variável, após o LNA. É possível ajustar-se o valor da atenuação de modo a atender à condição de linearidade e, ao mesmo tempo, de manter desprezível a contribuição do fator $\left(\frac{F_2 - 1}{G_1}\right)$ no valor da figura de ruído medida (F).

Dentre as fontes de erro nas medidas efetuadas, através dos dois métodos descritos, podem ser destacadas:

- a incerteza nos valores de T_1 , T_2 , ENR e Y
- os descasamentos entre as fontes de ruído e o LNA, que provocam múltiplas reflexões do sinal, causando incertezas adicionais nos valores das temperaturas T_1 , T_2 e T_3 .
- as perdas de conexão entre a fonte de ruído e o LNA, adicionadas diretamente no valor da figura de ruído.
- a influência do segundo estágio (F_2).

Desprezando-se os erros por perdas de conexão e descasamentos e também a influência do segundo estágio, foram avaliadas as precisões dos métodos manual e automático, considerando-se as seguintes incertezas nos valores de T_1 , T_2 , Y e ENR:

$$\Delta T_1 = \pm 1 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = \pm 0,5 \text{ K}$$

$$\Delta Y = \pm 0,365 \text{ dB}$$

$$\Delta \text{ENR} = \pm 0,3 \text{ dB}$$

Para $T_e = 100$ K, correspondente a $F = 1,29$ dB, tem-se que a precisão do sistema manual utilizado é de $\pm 3,5$ K (RMS), ou

comprovando-se resultados abaixo de 100 K em toda faixa de operação.

Através da análise dos equipamentos de medidas de figura de ruído disponíveis, foi proposto um procedimento para o desenvolvimento de um amplificador com temperatura de ruído equivalente inferior a 100 K, na faixa de recepção de sinais de satélite (3,7 a 4,2 GHz).

Pretende-se utilizar este mesmo procedimento, bem como o protótipo desenvolvido, na etapa seguinte do projeto, que prevê a realização de um LNA-80K.

BIBLIOGRAFIA

- a) Accurate and automatic noise figure measurements - application note HP 64-3
- b) Measurements of amplifier noise - D.F. Kait - Microwave Journal - Jan. 73
- c) Instruction manual for Alitech 136 precision test receiver
- d) Noise measurements for low noise GaAs FET amplifiers - part I, part II, Eric Strid - MSN - Nov. 81 - Dec. 81
- e) Direct - reading measurements of receiver noise parameters W. E. Pastori - Microwave Journal - April 73
- f) IRE standards on methods of measuring noise in linear two ports, 1959 - representation of noise in linear two ports. Proceedings - IRE - Jan. 1960.
- g) Image and second stage corrections resolve noise figure

baixa, para se garantir que a temperatura de ruído do LNA completo seja inferior a 100 K. O seguinte exemplo numérico ilustra esta afirmação:

Para $F = 1,29$ dB ($T_c = 100$ K), $F_1 = 1,20$ dB e $G_1 = 12,0$ dB, tem-se que $F_2 = 1,58$ dB ($T_{e2} = 127$ K).

O diagrama de blocos da Figura 4 ilustra o procedimento adotado para a realização do módulo de baixo ruído.

O sistema automático de medidas é utilizado na fase de ajustes dos circuitos para otimização da impedância de ruído, pois este método permite observar rapidamente variações relativas no valor da figura de ruído.

Durante a otimização do primeiro estágio, foi utilizado o protótipo do LNA 120K, a fim de se diminuir a influência do segundo estágio nas leituras.

O segundo transistor só foi associado ao circuito, após ter sido comprovado um resultado abaixo de 100 K, através de uma medida com o sistema manual.

Um processo iterativo garante a otimização do módulo de baixo ruído completo, antes de ser integrado ao módulo de ganho composto pelos três estágios restantes.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

O gráfico da Figura 5 mostra a temperatura de ruído obtida através do método de medida manual, para o LNA completo,

measurement confusion - W.E. Pastori - Microwave Journal - May 83.

h) A review of noise figure instrumentation . W.E. Pastori - Microwave Journal - April 83

i) Instruction manual for Alltech 75 precision automatic noise figure indicator

j) Relatórios de medidas - CPQD-TELEBRÁS - Aluizio Prata Jr.

k) Caracterização dos protótipos 100 K do LNA-FET/Faixa 3,7 - 4,2 GHz. Denise Consoni, Edison I. Ynoue e Edmar Camargo - Relatório Interno - LME-USP.

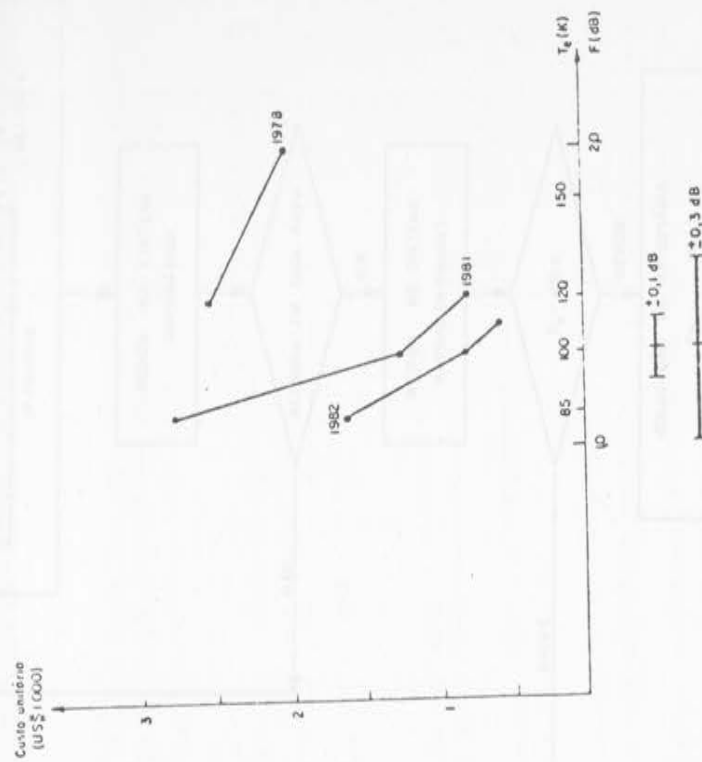


Figura 1 - Custo do LNA comercial x Temperatura de ruído

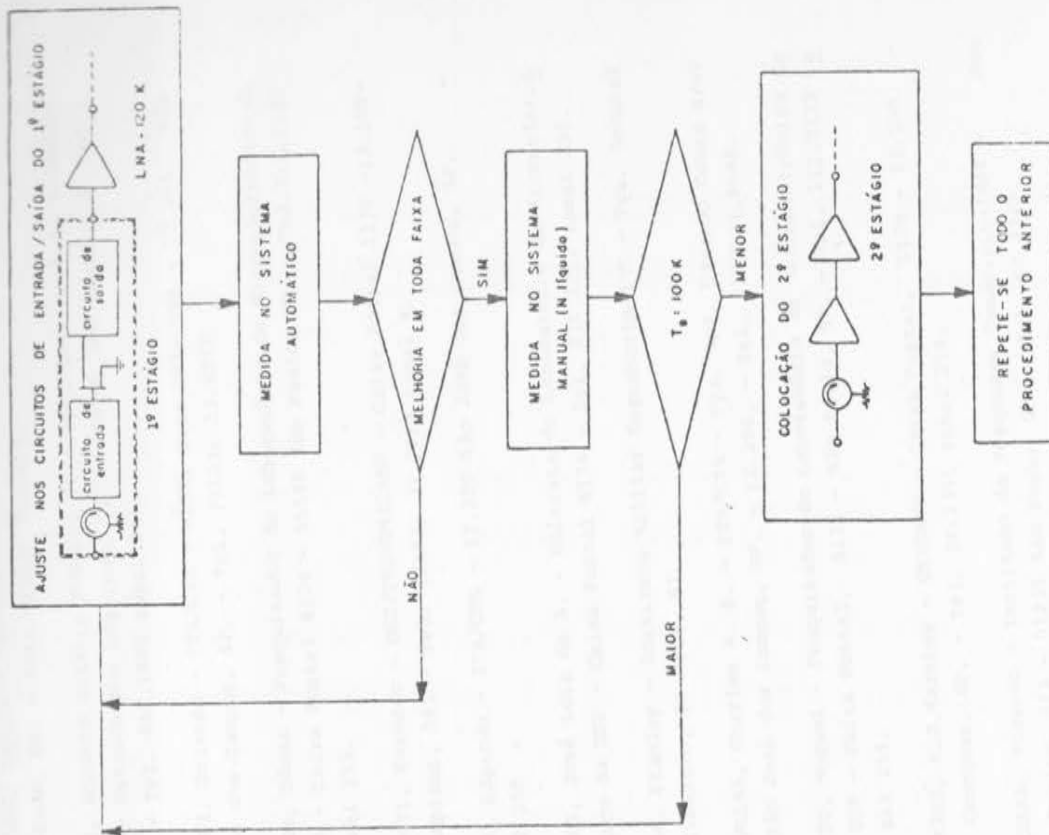


Figura 4 - Fluxograma do procedimento adotado no desenvolvimento do módulo de baixo ruído

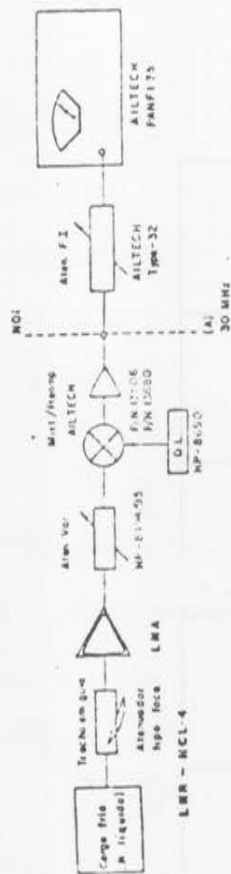


Figura 2 - Diagrama de blocos do sistema manual de medida de figura de ruído utilizado

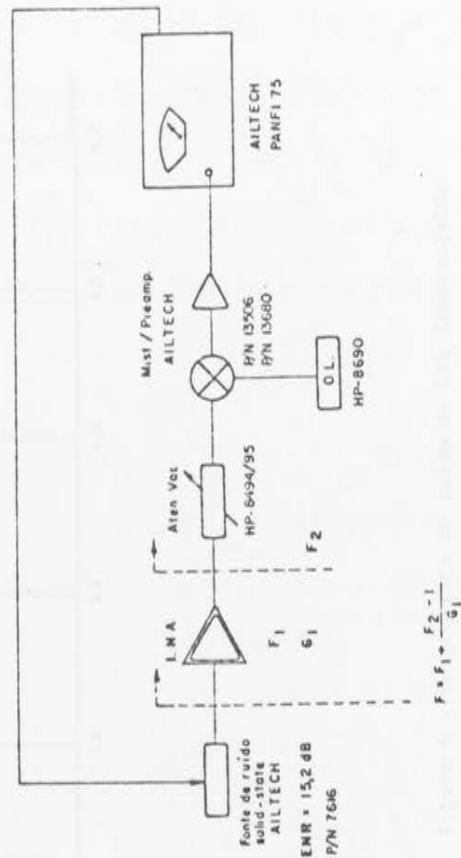


Figura 3 - Diagrama de blocos do sistema automático de medida de figura de ruído utilizado

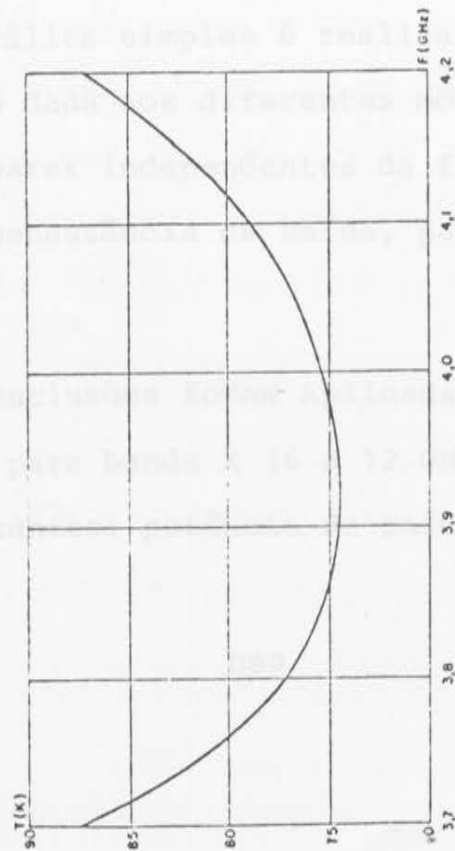


Figura 5 - Temperatura de ruído do LNA desenvolvido
obtida no sistema manual de medidas
(Ponte fria: N líquido)

LISTA DOS CONFERENCISTAS

- ABUO FILHO, Emílio - Telebrás-CPqD - Caixa Postal 1579 - 13.100-Campinas, SP. - Tel. (0192) 39.4211.
- ANDRADE, Antonio Octávio Martins de - Instituto Mauá de Tecnologia - Estrada das Lágrimas, 2035 - 09500 São Caetano do Sul, SP. - Tel. 442.1900 ramal 241.
- BAIOCCHI, Orlando - ITA/CTA - H27E, Casa 101- CTA - 12.200 São José dos Campos, SP. - Tel. (0123) 23.4277.
- CAMARGO, Edmar - Pesquisador do Laboratório de Microeletrônica da USP - Caixa Postal 8174 - 05508 São Paulo, SP. - Tel. 211.2122 ramal 255.
- CONFORTI, Evandro - DEE/FEC/UNICAMP - Caixa Postal 1170 - 13.100-Campinas, SP. - Tel. (0192) 39.2428 ramal 4.
- GERCK, Edgardo - ITA/CTA - 12.200 São José dos Campos, SP. - 12.200 -
- NDRAES, José Luiz de A. - Bolsista do Laboratório de Microeletrônica da USP - Caixa Postal 8174 - Tel. 211.2122 ramal 255.
- NOVAK, Stanley - Instituto Militar Engenharia-IME - Pça. General Tibúrcio, 80 Urca, RJ.
- OLIVEIRA, Charles A. S. - ITA/CTA - Pça. Mal. Eduardo Gomes s/nº São José dos Campos, SP. - 12.200. - Tel. (123) 22.9088.
- SAITO, Wágner - Pesquisador do Laboratório de Microeletrônica da USP - Caixa Postal, 8174 - São Paulo, SP. - Tel. 211.2122 ramal 255.
- SOARES, A.J. Martins - UNICAMP - Caixa Postal, 1170 - 13.100-Campinas, SP. - Tel. 39.1301 ramal 214.
- SCHALL, Ricardo - Instituto de Pesquisas Espaciais-IME - Rua Traipu, 423 - 01235 São Paulo, SP. - Tel. 67.2747.