

Receptor ADS-B Banda L para o Rastreamento de Aeronaves em Tempo Real

Rodrigo Facco & Lucas Compassi Severo

Projeto Clube do Rádio

Universidade Federal do Pampa - Unipampa

Alegrete, RS, Brasil

faccodm@gmail.com, lucassevero@unipampa.edu.br

Resumo—Este artigo apresenta o projeto de um conjunto de dispositivos para recepção de sinais que compõem um sistema de monitoramento de aeronaves em plataformas terrestres no padrão ADS-B. Um amplificador de baixo ruído, uma antena monopolo e um filtro SAW passa-faixa foram desenvolvidos para operarem com frequência central de 1,09 GHz. Além disso, as estruturas de RF foram simuladas através do software ANSYS HFSS de análise eletromagnética. Os procedimentos de projeto são descritos e os protótipos validados através de medições individuais de cada dispositivo.

Index Terms—Antena Monopolo, LNA, ADS-B, SAW filter.

I. INTRODUÇÃO

A sigla ADS-B vem do acrônimo de *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* ou Sistema Automático de Transmissão e Vigilância Auxiliar. Esse sistema tem o objetivo de operar no espaço aéreo com finalidade de monitoramento de aeronaves por meio de informações como identificação, posição, velocidade, origem e destino [1]. O principal benefício desse sistema é auxiliar no monitoramento de aeronaves com um tempo de resposta mais rápido que os radares secundários, possibilitando uma cobertura bastante ampla a baixos custos [2]. Portanto, para que o sistema funcione é preciso que as aeronaves estejam equipadas com um transmissor ADS-B, o qual enviará dados para os receptores, instalados em plataformas terrestres, ligados a um banco de dados que disponibiliza as informações na rede global de comunicação (*internet*) [3], [4].

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma antena monopolo, um amplificador de baixo ruído (LNA - *Low Noise Amplifier*) e implementação de um filtro passa-faixa do tipo SAW (*Surface Acoustic Wave*), os quais integram um sistema de recepção para o ADS-B operando na Banda L com frequência centrada em 1,09 GHz. A seção II apresenta a descrição dos procedimentos utilizados no desenvolvimento do trabalho e os requisitos do projeto. Na seção III são apresentados os projetos dos circuitos e os resultados de medidas. Na seção IV uma avaliação geral dos resultados obtidos é realizada com a apresentação do sistema completo formada pelos protótipos dos dispositivos desenvolvidos. Por fim, uma conclusão é apresentada na seção V.

II. METODOLOGIA

Os procedimentos realizados neste trabalho seguiram uma linha evolutiva de desenvolvimento, a qual parte-se

das especificações do projeto, proposta inicial de solução, simulações computacionais e prototipagem. Além disso, a validação do protótipo foi feita através de resultados medidos.

A. Requisitos de Projeto

Os dados no sistema ADS-B são transmitidos na frequência de 1,09 GHz (Banda L), usando a codificação Manchester com pulsos de duração de $0,5 \mu s$. Portanto, é necessário que o receptor possua uma largura de banda mínima de 1 MHz para uma taxa de amostragem de 2 Mbps, atendendo ao critério de Nyquist, o qual previne a interpretação dos dados contra o efeito *aliasing* [5].

No projeto do amplificador de baixo ruído alguns requisitos foram definidos em função das características dadas no *datasheet* do transistor utilizado. Os projetos desse tipo de amplificador exigem que o projetista lide com inúmeras variáveis que possibilitam a obtenção de uma operação ótima em um determinado parâmetro, mas com alguma perda em outros [6]. Dessa forma, é necessário que se busque um ponto intermediário, abrindo mão da melhor operação em algumas variáveis para atender de forma equalizada as necessidades do projeto em requisitos gerais. Portanto, a fim de obter uma boa margem para ajustes na operação, escolheu-se a figura de ruído máxima $F_k = 2$ dB, ganho $G = 11$ dB e máxima transferência de potência na entrada do amplificador. Além disso, para todos os circuitos projetados foi utilizada a impedância característica de $Z_0 = 50 \Omega$.

B. Ferramentas Computacionais

Algumas ferramentas computacionais foram utilizadas para otimização dos cálculos e procedimentos do projeto. Foi implementado no *software* MATLAB equações para realizar cálculos, estudos das condições de operação por meio da carta de Smith e plotagem de resultados gerais. O *software* HFSS foi utilizado para realizar simulações eletromagnéticas e ajustes no design dos dispositivos que operam em frequência de micro-ondas. Além disso, foi utilizado o programa Smith V4 para realizar o casamento de impedância das linhas de transmissão e o TXLine para cálculo da dimensão das linhas de RF utilizadas.

III. PROJETO DOS DISPOSITIVOS

A solução proposta nesse artigo é o desenvolvimento parcial de um sistema de recepção composto por uma antena, um

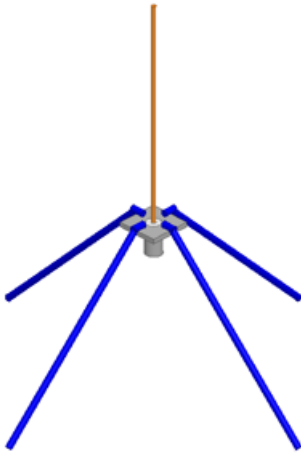


Figura 1. Antena Monopolo.

amplificador de baixo ruído e a implementação de um filtro passa-faixa.

A. Projeto da Antena

Existem inúmeras topologias de antenas que podem ser adotadas para receptores ADS-B [7], [8]. Neste trabalho uma antena monopolo foi escolhida em função da sua simplicidade. As antenas monopolos apresentam comportamento similar às antenas dipolo de meia onda, porém com geometria estrutural mais compacta. Além disso, essa estrutura monopolar considera o uso de um refletor na base do elemento irradiante de modo a simular a continuidade da haste principal resultando em um dispositivo com dimensão de $\lambda/4$, tanto o seu elemento irradiante quanto o seu refletor [9]. Além disso, a inclinação dos refletores em 45° garantem um bom casamento de impedância. A Figura 1 apresenta o projeto simulado dessa antena para a frequência de 1,09 GHz.

A extração das medidas do protótipo construído apresentam uma largura de banda de aproximadamente 150 MHz, e um coeficiente de reflexão extremamente baixo na frequência de interesse, conforme mostra a Figura 2.

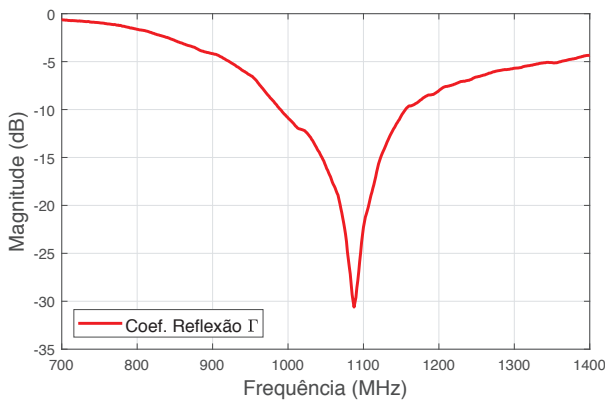


Figura 2. Coeficiente de reflexão da antena monopolo.

B. Filtro Passa-Faixa

Para limitar os dispositivos exclusivamente à aplicação de interesse, um sistema de filtragem de sinais, por meio de um filtro passa-faixa, foi implementado. Esse dispositivo opera permitindo a passagem de sinais apenas na banda de frequências para a qual foi projetado, atenuando todo o restante fora dela. Um *SAW Filter* é um filtro que opera com a conversão do sinal na forma elétrico-eletromecânico-elétrico através de um cristal piezoelétrico.

Neste projeto, foi escolhido o *SAW Filter* TA1090EC, para o qual foi projetada uma placa de circuito impresso com linhas de transmissão de impedância característica de 50Ω . A Figura 3 mostra uma imagem do filtro implementado. Os resultados medidos, Figura 4, apresentam uma largura de banda de 30 MHz com frequência central em 1,09 GHz, com atenuação inferior a 0,2 dB na faixa de passagem e superior a 30 dB na faixa de rejeição.

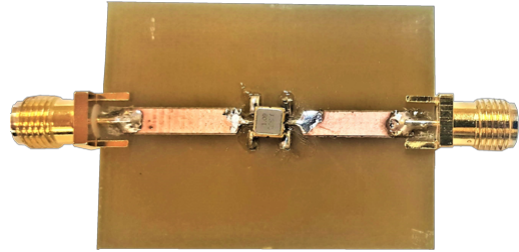


Figura 3. Protótipo do filtro SAW.

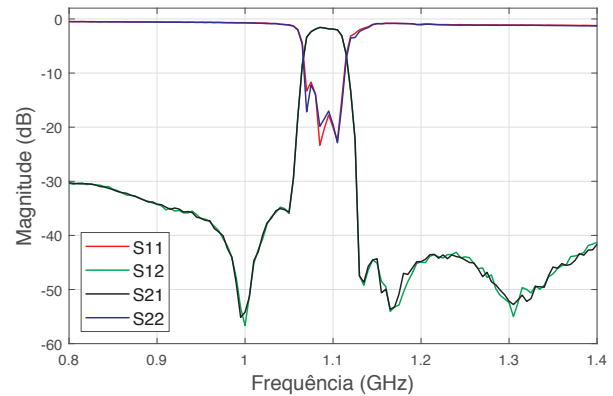


Figura 4. Parâmetros S extraídos do protótipo do filtro SAW.

C. Amplificador de Baixo Ruído

O sistema de amplificação é composto por um transistor BRF181W, dois capacitores de desacoplamento de 100 nF, dois capacitores para o bloqueio CC de 1 nF e indutores *choke* para o acoplamento da polarização CC. Além disso, foi utilizado o substrato FR4 para confecção das placas de circuito impresso, com $\tan\delta = 0,002$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,2$ e espessura $h = 1,5$ mm.

Inicialmente, projetou-se uma placa de circuito com finalidade de extrair os parâmetros S do transistor na polarização

de interesse, considerando uma tensão de 5 V e corrente de 12 mA, mantendo a operação do transistor em regime incondicionalmente estável. A Figura 5 apresenta o protótipo do dispositivo.

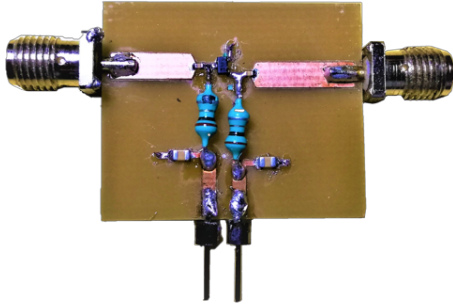


Figura 5. Protótipo para extração dos parâmetros S e caracterização do sistema.

Após a extração dos parâmetros, utilizando como base os procedimentos propostos em [6], foi plotado na carta de Smith, Figura 6, as curvas de ganho, em azul, e figura de ruído, em vermelho, em função dos requisitos estabelecidos. Através das curvas obtidas, escolheu-se o coeficiente de reflexão da carga (Γ_L) sobre o círculo de ganho de 11 dB, o mais próximo possível do centro do círculo da figura de ruído, resultando em $\Gamma_L = -0.252923 - 0.126683i$, com valor de impedância $Z_L = 29.0056 - 7.98826i \Omega$, dado pela Eq. (1).

$$Z = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) Z_0 \quad (1)$$

Com o coeficiente da carga, obteve-se o coeficiente de reflexão de entrada (Γ_{in}) e de fonte (Γ_S), dados pelas Eqs. (2) e (3), respectivamente. Portanto, a impedância de fonte (Z_S) para o casamento de entrada do projeto, é encontrada por meio da Eq. (1), resultando em $Z_S = 38.1529 - 12.9909i \Omega$.

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (2)$$

$$\Gamma_S = \Gamma_{in}^* \quad (3)$$

Utilizando o software Smith V4, calculou-se a dimensão de tocos em série e em paralelo para sintetizar as impedâncias de Z_S e Z_L , descasando as linhas de entrada. A Figura 7 mostra um diagrama ilustrativo com a dimensão dos tocos em função do comprimento de onda.

Por fim, uma placa foi projetada considerando os ajustes do casamento de impedância. O protótipo é mostrado na Figura 8. Para avaliar a operação do circuito, foram plotados os parâmetros S, mostrados na Figura 9, onde é possível observar que o ganho do dispositivo resultante foi de 9,97 dB, e as reflexões nas portas de entrada e saída, todas abaixo de -10 dB. Cabe ressaltar que para fazer com que o amplificador apresente baixo ruído, o casamento ótimo para a máxima transferência de potência foi considerado apenas na entrada.

Uma importante característica de um amplificador é a sua faixa de linearidade, a qual apresenta os limites de potência

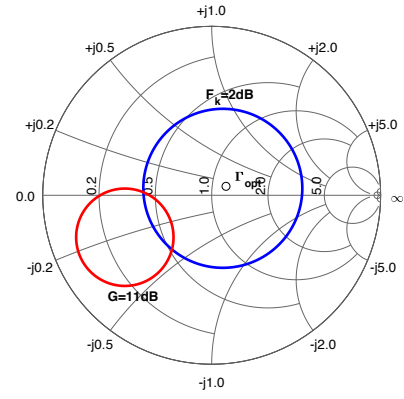


Figura 6. Carta de Smith para $F_k = 2$ dB (curva em azul) e $G = 11$ dB (curva em vermelho).



Figura 7. Diagrama ilustrativo do casamento necessário para atender aos requisitos na entrada e saída do amplificador.

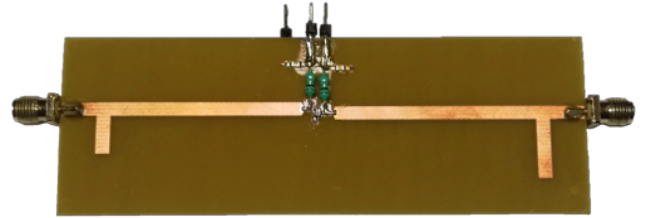


Figura 8. Protótipo do amplificador de baixo ruído com casamento de impedância realizado.

que o dispositivo consegue operar de forma linear. O ponto de compressão de 1 dB é o instante em que o transistor perde capacidade de operar linearmente para um dado sinal de entrada, onde 1 dB quantifica a perda no ganho, reduzindo sua eficiência de saída [6].

Um estudo realizado para encontrar o ponto de compressão de 1 dB no amplificador desenvolvido utilizou uma faixa de sinal com potência de -20 dBm até 4 dBm na entrada do dispositivo. A Figura 10 mostra os resultados da potência de saída em função da de entrada. É possível perceber que a partir de -2 dBm a operação começa a perder sua linearidade e o ponto de compressão de 1 dB acontece quando se tem uma potência de entrada de 1 dBm.

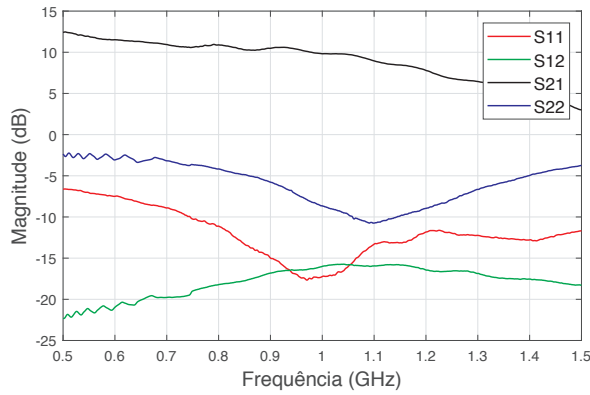


Figura 9. Parâmetros S extraídos do circuito final.

Durante as medidas observou-se que a relação entre o piso de ruído e a máxima potência de saída é de 74,46 dB, conhecido como faixa dinâmica de operação. A figura de ruído do amplificador não pôde ser medida devido a limitações ferramentais na universidade em que foi desenvolvido este projeto.

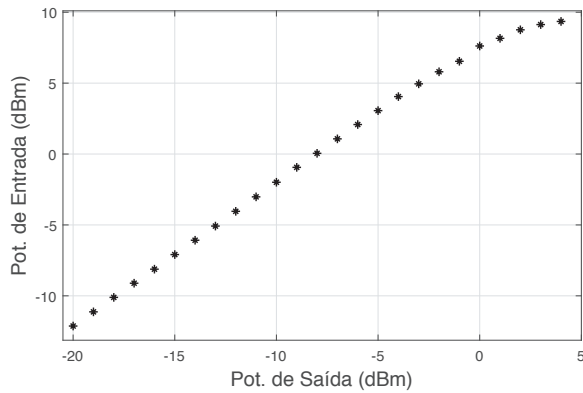


Figura 10. Linearidade do amplificador de baixo ruído para o ponto de compressão de 1 dB.

IV. ANÁLISE DE RESULTADOS

O projeto do amplificador de baixo ruído apresentou quase todos os resultados compatíveis com os requisitos propostos, dentre os quais pode-se observar que houve um bom casamento de impedância nas portas de entrada e saída, o que implica em baixas reflexões de sinais. Entretanto, o ganho obtido foi de aproximadamente 1 dB abaixo do esperado.

A antena monopolo projetada apresentou resultados práticos com um ótimo casamento de impedância na frequência de interesse. É possível observar na Figura 2 uma grande largura da banda de operação, o que implica no atendimento ao requisito mínimo definido para a banda na subseção II-A. Os resultados do filtro SAW projetado mostraram uma capacidade de atenuação bastante acentuada nas regiões fora da banda de passagem e um ótimo casamento de impedância na região de interesse.

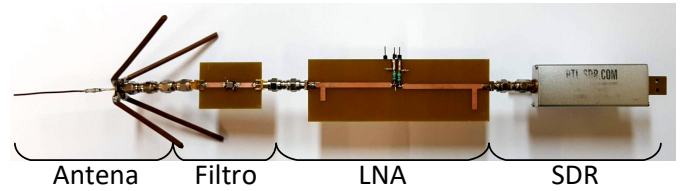


Figura 11. Protótipo Completo do Receptor ADS-B.

A Figura 11 apresenta uma imagem do sistema completo desenvolvido. As ligações entre os dispositivos foram realizadas utilizando conectores e adaptadores SMA. O sistema foi conectado a um rádio definido por software (SDR), o qual possibilita realizar a demodulação dos sinais recebidos na banda L para o rastreamento efetivo. Em alguns testes realizados foi possível captar sinais e obter as informações de voo de aeronaves que sobrevoavam a região nas proximidades da universidade.

V. CONCLUSÃO

Nesse artigo foi apresentado o desenvolvimento de um receptor ADS-B composto por um amplificador de baixo ruído, uma antena monopolo e um filtro SAW. Os resultados obtidos garantem uma boa operação do conjunto na recepção dos sinais, com um bom casamento de impedância, banda estreita de filtragem e ganho de aproximadamente 10 dB. Além disso, um estudo da linearidade de operação do amplificador mostrou uma grande faixa dinâmica de operação.

Como trabalhos futuros espera-se implementar o circuito de polarização do amplificador integrado à placa principal e implementar um circuito misturador para reduzir a frequência do sinal entregue ao SDR e facilitar o processo de transmissão com cabo coaxial.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Kim, J. Y. Jo, and S. Lee, "ADS-B vulnerabilities and a security solution with a timestamp," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 32, no. 11, pp. 52–61, 2017.
- [2] M. Arpaio, "An innovative perspective on ADS-B," *2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow, RTSI 2016*, no. Mi, pp. 1–4, 2016.
- [3] E. G. Piracci, G. Galati, and M. Pagnini, "ADS-B signals reception: A Software Defined Radio approach," *2014 IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace, MetroAeroSpace 2014 - Proceedings*, pp. 543–548, 2014.
- [4] D. Shen, L. Jin, L. L. Zhou, and Z. F. Dan, "A L-band transceiver front-end for ADS-B system," *Proceedings of 2012 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology, MMWCST 2012*, pp. 313–315, 2012.
- [5] B. Lathi, *Sinais e Sistemas Lineares - 2.ed.* Bookman, 2007.
- [6] R. Ludwig and G. Bogdanov, *RF Circuit Design: Theory & Applications*, 2nd ed. Pearson, 2008.
- [7] W. Wang, R. Wu, and J. Liang, "ADS-B Signal Separation Based On Blind Adaptive Beamforming," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 7, pp. 6547–6556, 2019.
- [8] S. Babani, N. H. H. Khamis, B. D. Bala, and T. A. Ahmed Mohammed, "A compact microstrip patch antenna for ADS-B operation," *2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, APACE 2014 - Proceeding*, pp. 250–252, 2015.
- [9] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2012.