

THERMAL NOISE CANCELLATION IN A TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER FOR OPTICAL COMMUNICATIONS

Kaue F. Morcelles, Volney C. Vincence

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Departamento de Engenharia Elétrica, Campus universitário – Joinville - SC

kauefelipems@gmail.com, volney.vincence@udesc.br

Abstract. In optical communications, transimpedance amplifiers constitute the first stage of light receptors, converting the current produced by the photodiode to an amplified voltage signal. This stage is mainly responsible for the noise and frequency performance of the receptor, so the optimization of its design is greatly important. The classic trade-off between bandwidth and thermal noise creates difficulties in designing wide-band circuits to high frequency applications without limiting the sensibility, increasing the bit error rate in digital communications. In order to reduce this issues, the thermal noise cancellation, technique consisting of combining two specific signal samples of the amplifier, was capable of reducing 10.9 % of the thermal noise generated by a CMOS transimpedance amplifier (0.35 μm channel length) in a shunt-feedback inverter topology, with 64.2 dB of overall gain, operating between 1 MHz and 900 MHz, consuming 3.84 mW for a 3.3 V supply voltage.

Palavras-chave: Transimpedance, Noise, Optoelectronics

1. INTRODUÇÃO

Em comunicações ópticas de alta frequência, um dos principais gargalos dos amplificadores de transimpedância (TIA, do inglês *Transimpedance Amplifier*) é a capacitância do fotodiodo. Utilizar um fotodiodo largo aumenta a eficiência de acoplamento luminoso, aumentando a sensibilidade do sistema (Atef *et al.* [4]), porém a largura do fotodiodo também aumenta sua capacitância parasita (Razavi [1]), podendo esta dominar a resposta em frequência do TIA. Portanto, nestes casos, costuma-se escolher topologias de baixa

resistência de entrada, como Porta Comum e Cascode Regulado. Contudo, segundo Ref.[1], seu baixo desempenho de ruído degrada a sensibilidade.

Este trabalho tem como objetivo analisar a técnica de cancelamento de ruído, geralmente aplicada em LNA's (do inglês *Low Noise Amplifier*) (Bruccoleri *et al.* [2]), como alternativa para aumento de sensibilidade em TIA's aplicados em circuitos ópticos de altas frequências, como já abordado por Groeneveld [3] e a Ref. [4]. Para isto projetou-se um TIA utilizando um inversor CMOS realimentado atuando na faixa de 1 MHz à 1 GHz, com um fotodiodo de capacitância parasita de 0,6 pF na entrada, e aplicou-se cancelamento de ruído para analisar desempenho e limitações.

2. GENERALIZAÇÃO DO SISTEMA

Segundo a Ref. [2], um circuito com cancelamento de ruído é composto pelo amplificador de entrada, um amplificador de tensão e um terceiro estágio que realiza a combinação dos sinais. Neste trabalho os dois últimos serão tratados como um circuito único chamado apenas de “cancelador”.

2.1 Baixas frequências

Supondo-se que no TIA há um nó (com uma tensão V_c), além da saída, com ruído fortemente correlacionado ao que se deseja cancelar:

$$V_{\text{out}} = R_t I_s + V_n \quad (1)$$

$$V_c = \alpha I_s + \beta V_n \quad (2)$$

Onde R_t é a transresistência do TIA, I_s a corrente de sinal, V_n a tensão de ruído gerada pelo amplificador na saída e α e β constantes. Se a tensão V_c satisfizer uma das seguintes condições é possível cancelar o ruído produzido por este estágio.

$$\begin{cases} R_t = C \propto, \text{ caso } \beta < 0 \\ R_t = -C \propto, \text{ caso } \beta > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Nas equações (3), C é uma constante positiva. O cancelador é um circuito de duas entradas (V_o e V_c) e uma saída ($V_{out,c}$). A equação que descreve o funcionamento do cancelador é dada pela Eq.(4), onde A_o e A_c são ganhos de cada entrada do circuito:

$$V_{out,c} = A_o V_{out} + A_c V_c \quad (4)$$

$$V_{n,c} = (A_o + A_c \beta) V_n \quad (5)$$

A equação (5) descreve o ruído resultante na saída do sistema. O cancelamento total de ruído do primeiro estágio ocorre se $A_c = -\frac{A_o}{\beta}$. Neste caso:

$$V_{out,c} = A_o R_t \left(1 + \frac{1}{C|\beta|}\right) I_s \quad (6)$$

Logo, pode-se concluir que o cancelamento de ruído aumenta o ganho do sistema por um fator $A_o \left(1 + \frac{1}{C|\beta|}\right)$.

2.2 Altas frequências

Alterações de módulo e fase entre os sinais V_{out} e V_c podem causar degradação do cancelamento e até mesmo aumento no ruído na saída (Ref. [3]). Para redução de ruído total, a relação $\frac{A_o}{A_c}(s) = -\beta(s)$ deve ser mantida por toda a banda utilizada. Em um TIA aplicado em receptores ópticos esta degradação é causada majoritariamente pela capacitância de entrada, dominada pela capacitância parasita do fotodiodo, como será mostrado na Seção 3.

2.3 Ruído do Cancelador

Via teoria básica de ruído (Ref. [1]), caso o cancelamento seja total, o ruído referenciado na entrada é dado pela Eq.(7).

$$I_{NC} = \frac{V_{NC}}{A_o R_t \left(1 + \frac{1}{C|\beta|}\right)} \quad (7)$$

V_{NC} é o ruído introduzido pelo cancelador referenciado na saída. Para que o cancelamento seja vantajoso, I_{NC} deve ser menor que o ruído introduzido pelo TIA referenciado na entrada.

3. APLICAÇÃO DA TÉCNICA

Foi projetado um pré-amplificador de transimpedância para operar em altas frequências consistindo em um inversor com realimentação negativa, uma configuração comum para TIA's, onde o ganho é definido pela resistência de realimentação. A topologia é menos restritiva que a porta-comum ou cascode regulado em termos de ganho e ruído (Ref. [1]). Para redução da capacitância de Miller, o inversor consiste em um seguidor de fonte em cascata com um fonte-comum cascode.

Os transistores utilizados nas simulações em PSPICE são MOSFETS do modelo BSIM3V3 baseados em tecnologia CMOS 0,35 μ m de comprimento de canal. A tensão quiescente na saída do circuito projetado é de aproximadamente 1,5 V, com consumo de 2,1 mW. Considerando um inversor ideal, a transimpedância é igual à R_f , contudo, utilizando a análise realizada na Ref. [3], verificou-se que a transimpedância é igual à $-(R_f - 1/g_m)$, sendo g_m a transcondutância do estágio fonte-comum e $1/g_m$ a resistência de entrada do TIA. A Figura (1) apresenta o TIA com o circuito de polarização e dimensionamento para um ganho de 64 dB e banda de 1 GHz.

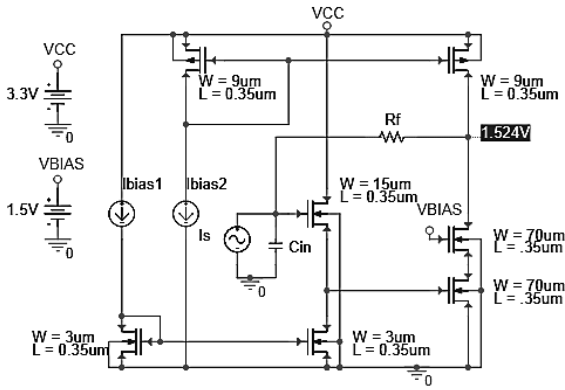


Figura 1: Inversor com realimentação negativa com fonte de sinal na entrada. V_c e V_o são os pontos de cancelamento.

O ruído térmico gerado pelos transistores pode ser modelado como fontes de corrente em paralelo com cada MOSFET, enquanto que o de R_f pode ser modelado como uma fonte de tensão em série. Considerando C_{in} como capacitância principal, as tensões nos pontos de cancelamento são dadas pela Eq.(8) e Eq.(9):

$$V_o = \frac{-(R_f - \frac{1}{g_m})}{\frac{C_{in} s + 1}{g_m}} I_s + (sR_f C_{in} + 1)V_n \quad (8)$$

$$V_c = \frac{1}{g_m(\frac{C_{in} s + 1}{g_m})} I_s + V_n \quad (9)$$

Onde V_n é a tensão de ruído referenciada na saída em comum aos dois pontos. O ruído produzido pelo resistor R_f não foi colocado porque não é possível eliminá-lo através desta técnica (Ref.[3]). Nota-se que a diferença de fase entre o sinal e ruído na saída permite a utilização da técnica de cancelamento com um simples subtrator, porém a redução é degradada por C_{in} , que torna β dependente da frequência. A Fig.(2) mostra o desvio do cancelamento analisado. O ruído total foi simulado como uma fonte de corrente I_n na saída do TIA e os valores da curva são das funções de transferência V_{on}/I_n e V_{cn}/I_n (V_{on} é a tensão de ruído na saída do TIA e V_{cn} é a tensão de ruído no ponto de cancelamento. V_{on} apresenta crescimento de 20dB/déc). Baseando-se nestes resultados, foi projetado um subtrator NMOS simples como cancelador, mostrado na Fig.(3).

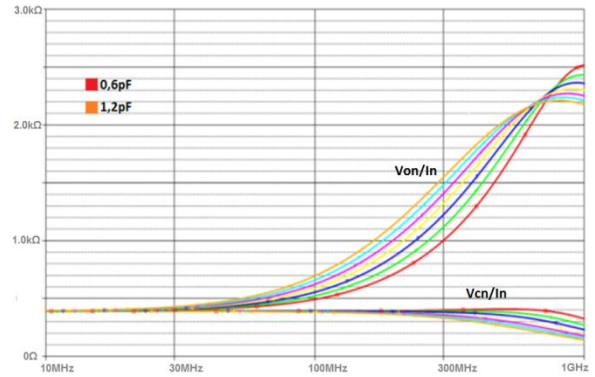


Figura 2: Dependência do desvio de ruído em relação à C_{in} (variada de 0,6pF à 1,2pF).

O subtrator é precedido de um seguidor de fonte para redução da tensão DC permitindo acoplagem direta no TIA, não sendo necessário uso de grandes resistores e capacitores de acoplamento, e possibilitando também sua utilização em TIA's de baixa frequência para redução do ruído *flicker*.

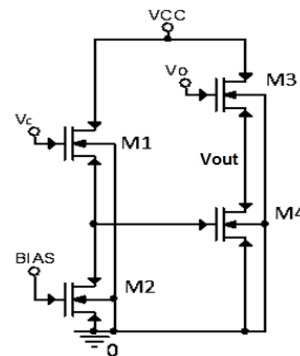


Figura 3: Cancelador com as entradas de V_o e V_c destacadas. M2 está polarizado na fonte de corrente do TIA.

O efeito de corpo no transistor M1 e M3 degrada o comportamento dos seguidores de fonte, gerando uma atenuação de 20% na saída. Os ganhos A_o e A_c são aproximadamente 0,8 e $-0,8g_{m4}/g_{m3}$. Portanto o cancelamento total ocorre quando $g_{m4}/g_{m3}=1$, gerando uma transimpedância total de $R_t=-0,8R_f$. O cancelador alcançou estas condições com $M1=20/0.35$, $M2=1/0.35$, $M3=40/0.35$ e $M4=63/0.35$, obtendo um ponto DC na saída de 630 mV consumindo 1,74 mW.

A Figura (4) compara o ganho do TIA sem e com o uso do cancelador. Houve

redução de banda para 906 MHz e aumento de ganho para 64,2 dB. A resposta fasorial se manteve praticamente inalterada.



Figura (4): Ganho em dB e fase do TIA sem e com o cancelador.

Realizou-se uma simulação para verificar o nível total de ruído do sistema TIA/Cancelador.

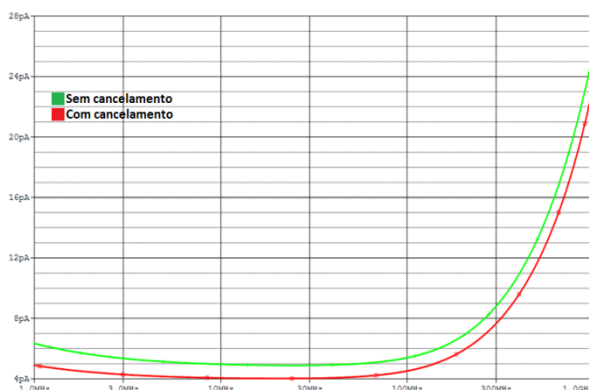


Figura (5): Ruído referenciado na entrada sem e com cancelamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Das curvas vistas na Fig.(5) é possível perceber que na região de cancelamento efetivo o ruído mínimo foi reduzido em aproximadamente 10%, e que mesmo na região de cancelamento degradado (acima de 100 MHz, houve redução do ruído. Comparando o ruído total integrado numa banda de 1 MHz à 900 MHz o TIA sem cancelador apresentou 415,4 nA_(rms), enquanto o uso de cancelador reduziu este ruído para 370,25 nA_(rms), representando uma redução de aproximadamente 10,9%.

Na faixa sem degradação (1 MHz à 100 MHz) a redução foi de 17,3%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Demonstrou-se que as condições apresentadas na Seção 2 foram suficientes para obter redução de ruído significativa, e a maior limitação foi a degradação gerada pelo capacitor do fotodiodo. A redução foi de 10,9% de ruído térmico no TIA projetado pode significar uma alternativa para aumento de sensibilidade em TIA's, desde que estes atendam as condições da técnica. Entretanto, a redução de 10% na banda e o aumento de 1,74 mW no consumo de potência sugere que, embora promissora, a aplicação da técnica necessita de melhorias. Em trabalhos futuros pretende-se reduzir a degradação no cancelamento gerado por C_{in}, realizar um estudo sobre o compromisso entre banda e redução de ruído e melhorar o nível de ruído introduzido pelo cancelador, além de estudar seu uso para redução de ruído *flicker* em baixas frequências.

6. REFERÊNCIAS

- [1] B. Razavi, "Design of Integrated Circuits for Optical Communications", New York, NJ: 2003, pp. 62-118.
- [2] F. Brucoleri, E.A.M. Klumperink and B. Nauta, "Wide-Band CMOS Low-Noise Amplifier Exploiting Thermal Noise Canceling", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 39, no.2, Feb. 2004.
- [3] F. G. Groeneveld, "Bandwidth extension and noise cancelling for TIAs". Thesis. Faculty of Electrical Engineering, Mathematics & Computer Science University of Twente. Netherlands, 2010.
- [4] M. Atef and H. Zimmermann, "Optical Receiver Using Noise Cancelling With an Integrated Photodiode in 40 nm CMOS Technology", IEEE Trans. on Circuits and System, vol. 60, no.7, Jul. 2013.