

**SeMicro-PR 2018**

# Estudo do descasamento de vias em quadratura e técnicas de compensação para arquitetura em dupla quadratura de sub-amostragem

Bruno Henrique Paschoal Quirino<sup>1</sup>, Luis Henrique Assumpção Lolis<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil  
brunohpq@gmail.com

*Resumo—O desempenho de um receptor RF pode ser avaliado em termos de consumo energético, custo de fabricação e capacidade de recepção, que são características atreladas a blocos analógicos de amplificação, filtragem e deslocamento em frequência. O objetivo desse trabalho é investigar a teoria na qual se baseia o estado-da-arte dos receptores RF, para em seguida implementar técnicas de compensação de descasamento das vias IQ na arquitetura de sub-amostragem. O descasamento possui um ajuste matemático preciso, mas de difícil execução prática. O trabalho foi desenvolvido nas ferramentas ADS, Cadence Virtuoso e MATLAB, onde é simulada a arquitetura proposta e é feita a medição e análise de SNR (Signal-to-Noise Ratio), EVM (Error Vector Magnitude) e rejeição de imagem do receptor. Inicialmente, a arquitetura apresentou ótima rejeição de imagem na ausência de descasamento. O circuito foi então modificado para que o amostrador introduza diferenças de fase e amplitude entre as vias, para melhor averiguar os efeitos da compensação sobre o sinal.*

## I. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos ocorridos no último século deram luz a uma infinidade de meios de comunicação nunca antes explorados. O uso da radiofrequência para comunicação sem fio serviu de trampolim para o fenômeno da globalização e permanece sendo um tópico de pesquisa em diversas áreas da engenharia elétrica. Ainda hoje, o contínuo aumento da necessidade de troca de informações requer que sistemas de radiotransmissão sejam não apenas velozes, mas também baratos e confiáveis. De forma a atender a rígidos requisitos de taxa de transmissão, canais utilizáveis de telecomunicação, consumo de energia e BER (Bit Error Rate), existe sempre um compromisso entre baixa complexidade e desempenho dos sistemas RF.

A recepção de um sinal modulado em quadratura passa por diversas etapas que exigem planejamento minucioso e atento. No que concerne as arquiteturas modernas de recepção RF destaca-se o problema de rejeição de imagem, que torna necessária uma filtragem altamente específica - e consequentemente cara - do sinal. A arquitetura Low-IF consegue circunvir esse problema demodulando o sinal RF

em dois estágios, mas ainda sofre com o alto consumo de um oscilador variável em frequência.

Como alternativa, é proposta por G. SIONEK uma arquitetura de dupla quadratura com amostragem em banda passante [2], em que diversos estágios da recepção são entrelaçados de forma vantajosa – tais como a amostragem, a demodulação e a separação de vias em dupla quadratura.

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivos

Fatores no processo de fabricação do circuito podem resultar em descasamento de amplitude e fase das vias I e Q. Aqui é proposta a avaliação do impacto do descasamento no processo de demodulação, em comparação com os valores levantados na literatura.

O emprego de técnicas matemáticas de compensação surge como uma solução promissora para esse problema [4] e também é alvo de estudo e análise deste trabalho.

### B. Objetivos Específicos

Primeiramente foi avaliado o desempenho da arquitetura de dupla quadratura com amostragem em banda passante para recepção ideal, como parâmetro comparativo.

Em seguida, o detrimento da informação recebida foi avaliado para diferentes níveis de descasamento de fase e amplitude, de modo a comparar os valores obtidos com o que existe na literatura.

O método de compensação selecionado foi então implementado na arquitetura e simulado para casos semelhantes aos da recepção não compensada. Isso permitiria avaliar a capacidade do método em reconstituir a integridade do sinal descasado.

## III. ARQUITETURAS DE RECEPÇÃO

### A. Receptor RF Zero-IF e Super-Heteródino

A arquitetura de receptor RF mais simples consiste na conversão direta ou Zero-IF, que separa as vias IQ do sinal

de interesse ao mesmo tempo que as desloca para a banda base. Essa arquitetura sofre de problemas de DC Offset, distorções de segunda ordem, *LO Leakage Emission* (Emissão de Vazamento do Oscilador Local) e *flicker noise*. Assim, é preferível trabalhar com o sinal recebido em uma frequência intermediária fixa, aumentando a precisão do receptor em troca de maior complexidade do sistema. Surge como solução a arquitetura superheteródina, que realiza o deslocamento de sinal para banda base em duas etapas. Primeiramente, o sinal é deslocado para a *IF* (Frequência Intermediária), onde é amplificado e filtrado. Em seguida, o sinal é ao mesmo tempo deslocado para a banda base e demodulado.

Essa arquitetura ainda sofre, no entanto, do problema de interferência da imagem. “Imagem” refere-se a sinais que encontram-se fora da banda alvo do receptor, mas que devido à natureza bilateral dos demoduladores, somam-se ao sinal desejado durante conversão para a frequência intermediária. Isso pode ser observado pela transformada de Fourier do cosseno (equação 1).

$$\mathcal{F}\{\cos(\omega_1 t)\} = \frac{1}{2} [\delta(\omega - \omega_1) + \delta(\omega + \omega_1)] \quad (1)$$

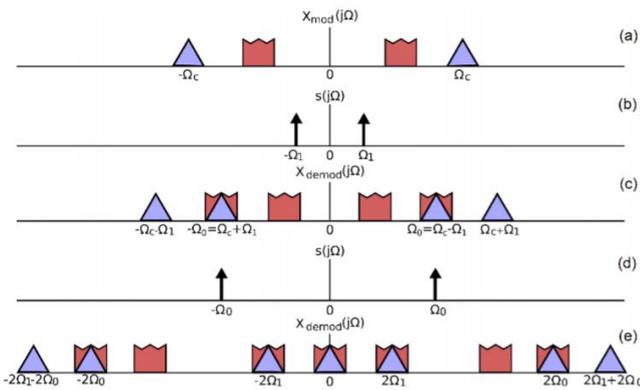


Fig. 1. Espectro do sinal imagem (em vermelho) e sinal útil (em azul) ao longo da demodulação na arquitetura superheteródina. [1]

Por isso, é necessário um filtro de cristal ou do tipo *SAW* (*Surface Acoustic Wave*) de alto fator de qualidade de forma a eliminar a imagem antes que se misture ao sinal útil - o que encarece o receptor [3].

### B. Low-IF

É possível, no entanto, deslocar os sinais recebidos em apenas uma direção, de forma a evitar que a imagem interfira na recepção do sinal útil, através da arquitetura *Low-IF* (figura 2). Isto é feito multiplicando-se o sinal por uma exponencial complexa, cuja transformada de Fourier é um único delta de Dirac situado na frequência da exponencial (equação 2). Como é desejável manter a frequência intermediária da arquitetura, utiliza-se duas multiplicações do sinal. Nesse caso, o sinal banda base complexo se torna o produto de duas exponenciais (equação 3).

$$\mathcal{F}\{e^{-j\omega_1 t}\} = \delta(\omega - \omega_1) \quad (2)$$

$$x_{BB}(t) = x_{mod}(t)e^{-j\omega_{OL}t}e^{-j\omega_{IF1}t} \quad (3)$$

Onde  $x_{BB}(t)$  é o sinal em banda base,  $x_{mod}(t)$  o sinal modulado,  $\omega_{OL}$  a frequência do primeiro oscilador local e  $\omega_{IF1}$  a frequência do segundo oscilador. No circuito de recepção, as exponenciais complexas são decompostas em senos e cossenos para que sejam implementadas na forma de misturadores.

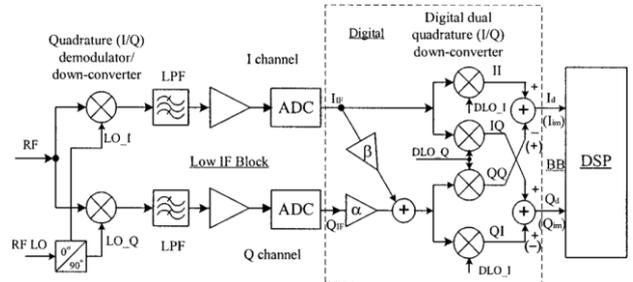


Fig. 2. Diagrama de blocos da arquitetura *Low-IF*. [4]

O principal obstáculo da arquitetura de receptor *Low-IF* é o problema de imagem, pois a frequência intermediária é baixa demais para separar a imagem do sinal de interesse por meio de um filtro passa-faixa. Assim, a rejeição de imagem é largamente dependente da precisão da dupla quadratura. Qualquer descasamento entre as vias I e Q tornará o sinal imagem visível ao receptor e ofuscará a informação útil. Em prática, todo componente analógico pode contribuir para o desequilíbrio entre as vias I e Q. No entanto, considera-se que o descasamento introduzido na primeira etapa da demodulação é muito maior que no resto do circuito.

Conceitualmente, define-se rejeição de imagem como a razão entre a amplitude do sinal desejado e a amplitude do sinal imagem (geralmente representada em dB). A figura 3 apresenta a rejeição de imagem possível para os valores de descasamento de fase (em graus) e de amplitude (em dB).

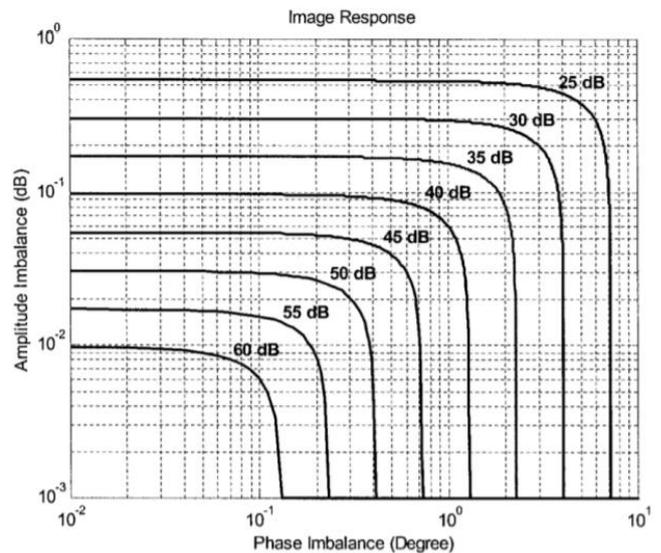


Fig. 3. Respostas de imagem versus descasamento de fase e amplitude. [4]

### C. Arquitetura Proposta

Nesse trabalho, foi utilizada uma arquitetura de receptor em amostragem de tensão na banda passante (sub-amostragem) – representada na figura 4. Ela é baseada na dupla conversão em quadratura com baixa frequência intermediária (*Low-IF*), mas no tempo discreto. Além disso, a amostragem é feita ao nível RF juntamente com o deslocamento em frequência para a IF.

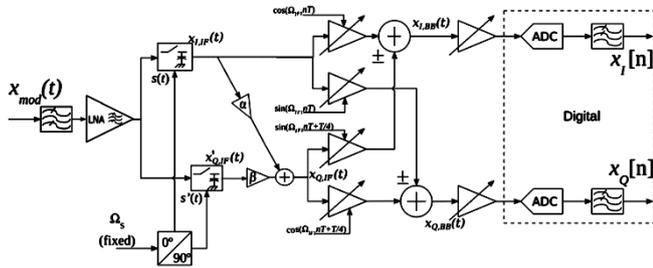


Fig. 4. Diagrama de blocos da arquitetura de recepção em dupla quadratura de sub-amostragem. [2]

## IV. COMPENSAÇÃO MATEMÁTICA

### A. Fatores $\alpha$ e $\beta$

O método de compensação estudado foi inicialmente sugerido por Q. GU [4] para a arquitetura *Low-IF* e consiste na aplicação de dois multiplicadores e um somador entre os dois níveis de misturadores.

A resolução matemática da compensação se dá por:

$$\alpha = \frac{1}{(1+\delta) \cos \varepsilon} \quad (4)$$

$$\beta = \tan \varepsilon \quad (5)$$

$$x'_{Q,IF} = \beta \cdot x_{Q,IF} + \alpha \cdot x_{I,IF} \quad (6)$$

Onde  $\delta$  é o descasamento de amplitude,  $\varepsilon$  o descasamento de fase entre as vias da quadratura,  $x_{Q,IF}$  é o sinal IF da via Q e  $x_{I,IF}$  da via I.

## V. METODOLOGIA E RESULTADOS

### A. Simulações

Foram realizados 4 dos bancos de simulações planejados, obtendo-se valores de rejeição de imagem, EVM e SNR.

Primeiramente, a arquitetura proposta foi esquematizada em ADS e simulada para diferentes níveis de descasamento. Como métrica padrão, adotou-se a comunicação 16QAM, com frequência de portadora em 1,91 GHz, frequência de amostragem de 61,44 MHz (31ª harmônica) e frequência intermediária de 7,68 MHz.

A primeira simulação foi realizada para uma recepção ideal, sem descasamento entre as vias I e Q, para averiguar o funcionamento normal do circuito. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos, com e sem um filtro *butterworth* na saída dos misturadores. Esta filtragem pode ser necessária

antes dos ADCs (*Conversores Analógico-Digitais*) para atenuação de ruído e harmônicas originárias na demodulação.

TABELA 1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO IDEAL, COM E SEM FILTRO BUTTERWORTH

Simulação	EVM	SNR (dB)
Sem filtragem	2,57%	53,32
Com filtragem	7,81%	42,87

O nível de SNR alcançado pela arquitetura (até 53,32 dB) é ótimo, permitindo uma boa leitura da informação recebida. A rejeição de imagem é visível no espectro de frequências da figura 5.

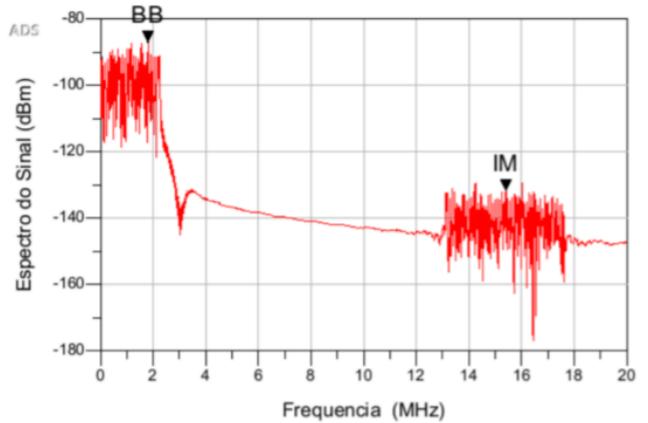


Fig. 5. Espectro frequencial do sinal demodulado na recepção ideal.

O segundo bloco de simulações foi realizado para diferentes descasamentos de fase entre as vias I e Q (tabela 2). O descasamento foi introduzido na forma de um atraso temporal no chaveamento dos capacitores amostradores.

TABELA 2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM DESCASAMENTO DE FASE

$\varepsilon$	Sinal BB (dBm)	Autoimagem (dBm)	$\Delta Im$ (dB)
0°	-86,86	-131,59	44,70
45°	-88,35	-95,77	7,42
180°	-135,82	-92,79	-43,02

Na tabela,  $\Delta Im$  representa a rejeição da auto-imagem do receptor. Foi possível observar que a fase dos amostradores pode influenciar drasticamente na rejeição de imagem, conforme previsto na literatura.

O terceiro bloco de simulações foi realizado para diferentes descasamentos de amplitude, introduzidos através de um ganho na via Q.

TABELA 3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM DESCASAMENTO DE AMPLITUDE

$\delta$	Sinal BB (dBm)	Autoimagem (dBm)	$\Delta I_m$ (dB)
0,00	-91,68	-117,76	44,70
0,02	-92,79	-113,87	41,08
0,10	-95,33	-112,38	36,05

Os resultados dessas simulações, dispostos na tabela 3, correspondem aos valores teorizados segundo o gráfico de Q. GU da figura 3.

Por fim, o método de compensação proposto foi implementado em MATLAB. Foi necessária a simulação da recepção no *software* Cadence Virtuoso para a obtenção do sinal demodulado no domínio do tempo.

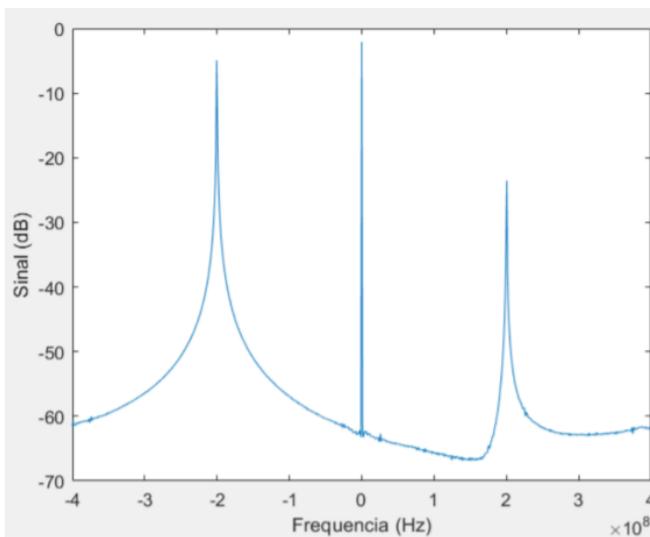


Fig. 6. Espectro de frequência do sinal demodulado, em caso de recepção compensada, porém sem nenhum descasamento entre as vias em quadratura.

O método foi, até o momento, testado para o caso de recepção ideal, para a identificação de possíveis problemas que possam surgir devido à sua simples implementação.

A figura 6 apresenta o sinal após compensação e deslocamento em frequência, e é notável que a demodulação não é prejudicada pelo método de compensação escolhido.

## VI. CONCLUSÃO

As simulações permitem concluir que o funcionamento previsto na literatura da arquitetura *Low-IF* é aplicável também à arquitetura de dupla quadratura com amostragem em banda passante, e que o descasamento de fase e amplitude das vias I e Q provocam significativas alterações na qualidade de recepção.

Como perspectivas futuras, espera-se concluir as simulações compensando o sinal pelo método escolhido. Poderá também ser desenvolvido um layout de circuito que seja capaz de obter os fatores  $\alpha$  e  $\beta$  da compensação.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. P. C. CUNHA. Amostrador CMOS para Receptor de Radiofrequência Baseado em Subamostragem com Dupla Quadratura. 2017. 103f. Dissertação de Mestrado – UFPR, Curitiba, 2017.
- [2] G. SIONEK. Arquitetura de Tempo Discreto para receptor de Radiofrequência Baseada em Subamostragem com Baixa Frequência Intermediária e Dupla Quadratura. 2017. 76f. Dissertação de Mestrado – UFPR, Curitiba, 2017.
- [3] S. HAYKIN. Communication Systems. 4. ed. New York: John Wiley & Sons. 2001.
- [4] Q. GU. RF System Design of Transceivers for Wireless Communications. 1. ed. New York: Springer. 2005.