

# Circulador Construído com Loops Acoplados de Ressonadores Parametricamente Modulados Operando a 915 MHz

Eduardo Gonçalves Sousa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Brasília/DF - Brasil

**Resumo**— O circulador é um dispositivo não recíproco muito utilizado em sistemas de comunicação *full-duplex*. O seu funcionamento baseia-se na precessão dos momentos de dipolo magnético associados ao spin de elétrons não emparelhados que giram em torno do eixo de um campo magnético externamente aplicado. Por consequência, torna-se necessário o uso de ferrita de grande dimensão, tornando o seu *footprint* muito grande comparado aos padrões atuais de componentes *SMT*, i. e., *Surface-Mount Technology*. Uma alternativa é construir um circulador ativo utilizando transistores, que também possui limitações, e. g., largura de banda estreita, alto nível de ruído e alta complexidade da topologia. Como alternativa a esses dois modelos de circulador, este artigo apresenta o projeto de um circulador com topologia II com o uso de indutores, capacitores e diodos de capacitância variável, para a banda UHF de 33 cm e frequência central de 915 MHz.

**Palavras-Chave**— circulador, radiofrequência, ressoadores.

## I. INTRODUÇÃO

Um circulador é um dispositivo de três terminais, não-recíproco, que permite que um sinal RF flua entre duas portas em uma só direção. Esse dispositivo deve prover baixas perdas de inserção e alta isolação reversa e entre portas.

Para fins práticos, o circulador deve ser capaz de operar em *full-duplex*, típicos de transmissores e receptores de comunicações. Alcançar esses objetivos de projeto é extremamente complicado em um dispositivo real, uma vez que, este é uma função de iterações complexas que incluem, dentre outras, os seguintes parâmetros: a qualidade de transmissão RF depende da temperatura do material ferrimagnético [1], a linha de transmissão deve ter uma geometria adequada [2], causando severas limitações de aplicação ou dificuldade de construção, intensidade do campo magnético, função de uma magnetização inicial e da temperatura do material ferrimagnético [3].

Alcançar estabilidade na operação do circulador requer inteligência na escolha dos materiais, na desenho de sua geometria, na iteração mecânica de construção e no ajustes de parâmetros, a fim de obter a melhor relação entre tamanho, custo, eficiência para a faixa de operação do projeto. Por essas dificuldades, poucos são os fabricantes de circuladores e seus processos de fabricação tendem a se manter os mesmos, apesar do dispositivo ter sido desenvolvido há décadas.

A fim de evitar essas dificuldades de projeto e suas limitações práticas, vários estudos [4] [5] estão sendo realizados para que se mude o processo de fabricação para uma tecnologia barata e extremamente desenvolvida. Para isso, é necessário

conhecer os fundamentos que regem o funcionamento do circulador de ferrita para então propor uma solução equivalente.

Neste artigo, apresentam-se formas de construir um circulador com circuitos eletrônicos, com topologia II. Como consequência dessa construção, tem-se um dispositivo que não necessita da aplicação de um campo magnético uniforme externo, ou seja, o efeito de giro que em circuladores tradicionais é consequência de um fenômeno físico - principalmente da precessão de *Larmor* - é então realizado por modulações paramétricas [6] em *loops* de ressoadores acoplados. Os resultados são obtidos por meio de simulações no software ADS.

## II. EMULANDO A PRECESSÃO DE LARMOR EM UM ANEL RESSONANTE

O primeiro passo para o projeto do circulador sem ferrita é entender o fenômeno que rege o seu funcionamento. Dessa forma, podemos propor uma topologia baseada em uma solução com circuitos elétricos.

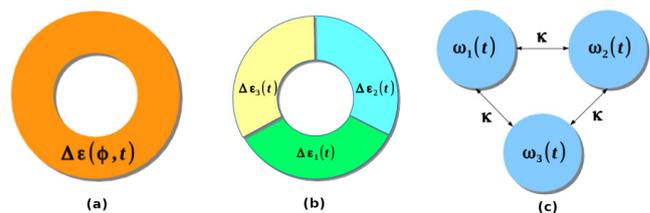


Fig. 1: (a) Modulação espaço-temporal gerada por uma onda eletromagnética  $\Delta\epsilon(\varphi, t)$  resulta em um momento angular (b) Discretização do anel em três regiões ressonantes não recíprocas (c) Loop de três ressoadores acoplados por  $\kappa$ .

A Fig. 1(a) apresenta a solução baseada na polarização do momento angular no anel ressonante. Neste caso, a modulação espaço-temporal de uma permissividade  $\Delta\epsilon(\varphi, t)$  produz um spin eletrônico efetivo no anel, que remove a degenerescência dos estados ressonantes contrapropagantes e induz não reciprocidade. Este anel tem uma variável dielétrica que é função do tempo e do espaço e gira com velocidade angular  $\Omega_m$ . Outra forma de obter o momento angular é girando mecanicamente o anel, a um custo de severas limitações de frequência que não são discutidos neste artigo.

Com relação ao sinal de modulação, é possível realizar a discretização de  $\Delta\epsilon(\varphi, t)$  em três regiões como apresentado na Fig. 1(b). Semelhantemente, em Fig. 1(c) temos a discretização

do anel em três ressoadores acoplados por  $\kappa$ , igualmente espaçados, com uma fase deslocada de  $2\pi/3$  rad entre cada ressoador, como apresentado em (1), (2) e (3).

$$\omega_1(t) = \omega_0 + \delta\omega_m \cos(\omega_m t) \quad (1)$$

$$\omega_2(t) = \omega_0 + \delta\omega_m \cos(\omega_m t + 2\pi/3) \quad (2)$$

$$\omega_3(t) = \omega_0 + \delta\omega_m \cos(\omega_m t + 4\pi/3) \quad (3)$$

A Fig. 2 apresenta o diagrama do dispositivo a ser projetado.

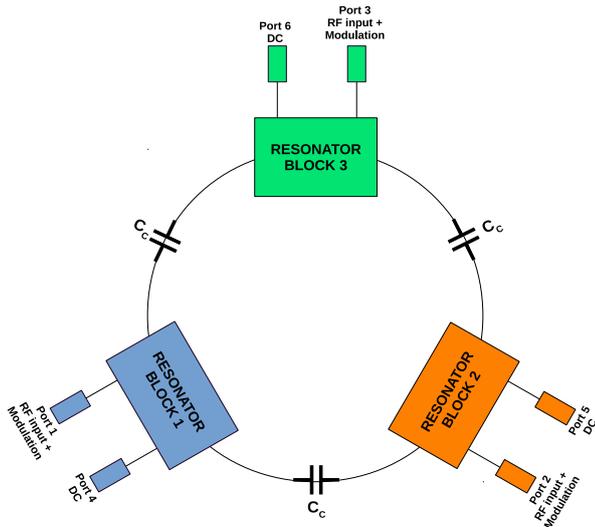


Fig. 2: Diagrama do circulator sem ímã e sem transistor baseado na solução do anel ressonante.

### III. ANÁLISE DA TOPOLOGIA PI BASEADA NO ANEL RESSONANTE

O circuito da Fig. 3 mostra um circulator eletrônico construído com ressoadores acoplados. Este circuito possui todas as proteções contra vazamento de sinal entre as fontes, além de possuir um acoplador mais robusto, que tende a estabilizar o sistema com um baixo fator de qualidade, ou seja, tornando as mudanças de comportamento menos abruptas com maior largura de banda ( $BW$ ).

Analisando a Fig. 3 percebe-se três *loops* de ressoadores acoplados, o primeiro com as portas 1 e 4, o segundo com as portas 2 e 5 e o terceiro com as portas 3 e 6.

Em seguida tem-se dois ressoadores LC em série. Um sintoniza a frequência RF, com os componentes  $L_2$  e  $C_2$ . O outro sintoniza a frequência de modulação, com os componentes  $L_1$  e  $C_1$ .

As portas 4, 5 e 6 são entradas de sinal DC, que polarizam os diodos de capacitância variável, chamados de diodo *varicap*. Esse sinal não pode ir para os ressoadores, por isso o capacitor  $C_{dcb}$  é colocado antes de  $L_1$ . Para bloquear o sinal DC no ressoador sintonizado da frequência RF, o circuito alterna na colocação dos ressoadores RF e modulação, afim de que o próprio  $C_1$  bloqueie o sinal DC no ressoador RF. Há

também, na entrada das portas 4, 5 e 6, o indutor  $L_{rfc}$ , que serve para bloquear o sinal RF, protegendo a fonte DC.

Como ponto de partida do projeto, deve-se escolher valores de capacitor e indutor para o ressoador série de modulação, levando em consideração a impedância dos componentes para os sinais de modulação e RF. Dada a disposição dos componentes, percebe-se que o capacitor  $C_1$  deve permitir a passagem dos dois sinais. Como a frequência de modulação é menor que a frequência RF, a impedância RF será menor, idealmente  $0\Omega$ . O indutor  $L_1$  deve ter impedância pequena, para o sinal de modulação, e alta para o sinal RF. Em termos práticos, entre  $1\text{ k}\Omega$  e  $2\text{ k}\Omega$ , é o que se considera como alta impedância em circuitos RF[7]. Para realizar a sintonia do ressoador, usa-se a seguinte fórmula:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

O capacitor  $C_{dcb}$  e o indutor  $L_{rfc}$  devem ter alta impedância para os sinais DC e RF, respectivamente. Esses dois componentes podem ter seus valores alterados, levando em consideração a premissa da alta impedância, afim de ajustar a impedância de  $S_{11}$  em  $50\Omega$  no final do projeto.

Por fim é feito a sintonia na faixa de operação RF desejada. Essa parte do projeto exige a análise da capacitância  $C_2$  a cada modificação do sistema, pois ela vai variar de acordo com a tensão que chega no diodo *varicap*. Então inicialmente, deve-se verificar qual a capacitância para uma determinada tensão aplicada. Em seguida faz-se a sintonia para uma frequência desejada, calculando o valor do indutor  $L_2$ . Neste caso, deve-se escolher um valor de capacitor para que tenha impedância baixa (menor que  $1\text{ k}\Omega$ ) tanto para RF, quanto para modulação, pois é justamente o sinal modulado variando a capacitância que irá emular a precessão de *Larmor*. Caso seja inserido um capacitor de valor fixo ou um diodo *varicap* com alta impedância para o sinal de modulação, o circuito se comportará como um divisor de potência.

**Passos para sintonia da frequência de operação:** Escolhido o modelo de *varicap*, verifique a capacitância no *datasheet* [8] para um certo valor  $V_{DC}$  de polarização e utilizando a fórmula  $f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , escolha um valor adequando para L. Execute a simulação e verifique em qual frequência o circulator está sintonizado, levando em consideração o ponto ótimo dos parâmetros  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  e  $S_{31}$ . Utilize a mesma fórmula para verificar o valor de C, dado que L é fixo. Com o novo valor de C, calcule L para  $f_{res}$  sendo a frequência desejada para o projeto.

**Passos para melhorar  $S_{21}$  e  $S_{11}$ :** Após a simulação, se o circulator já estiver na frequência desejada, modifique os valores dos componentes, tal que a frequência de ressonância não seja alterada, ou seja, deseja-se que apenas a impedância mude. O valor desejada deve ser observado na carta de *Smith*, onde a parte real da impedância de entrada  $Z_{11}$  deve ser idealmente  $50\Omega$ . Inicie modificando  $C_{dcb}$  e  $L_{rfc}$ , pois eles não modificam a sintonia do circulator. Em seguida, o ressoador do sinal de modulação  $C_1$  e  $L_1$ .

**Passos para melhorar  $S_{31}$ :** Após a simulação, se o circulator já estiver na frequência desejada, modifique os valores dos componentes, tal que a frequência de ressonância não seja

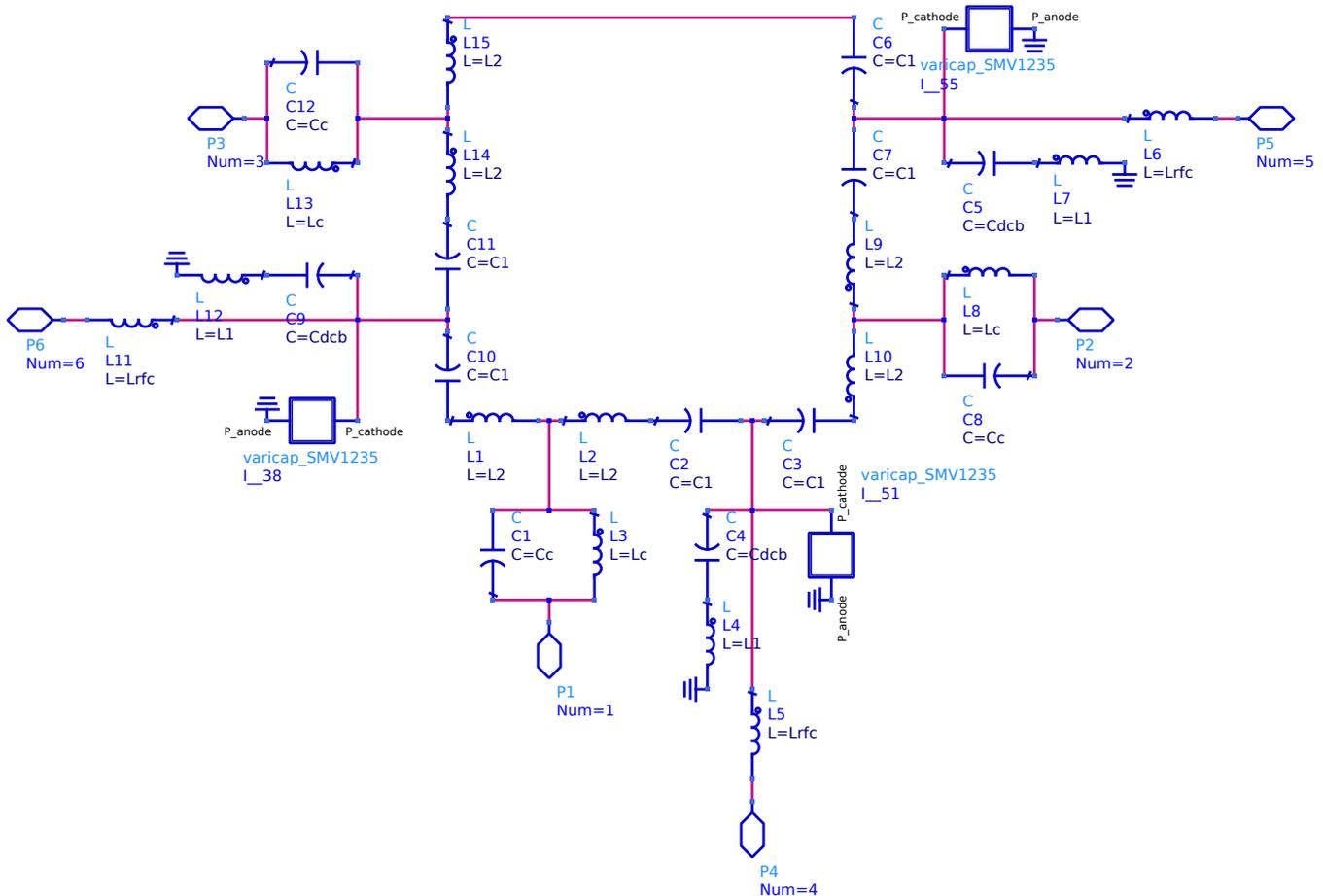


Fig. 3: Circulador com topologia II.

alterada, ou seja, deseja-se que apenas a impedância mude. O valor desejada deve ser observado na carta de *Smith*, onde a parte imaginária da impedância de entrada  $Z_{11}$  deve ser idealmente uma reatância capacitiva entre  $-j1$  à  $-j10$ , de acordo com os resultados experimentais obtidos. O casamento em  $j0$  resulta na anulação do efeito de modulação, ou seja, o dispositivo passa a se comportar como um divisor de potência. Inicie verificando se a isolamento em função de  $v_{mod}$  está no seu ponto ótimo. Em seguida modificando  $C_{dcb}$  e  $L_{rfc}$ , pois eles não modificam a sintonia do circulador. E por fim, o ressoador do sinal de modulação  $C_1$  e  $L_1$ .

#### IV. ESTUDO DE CASO: CIRCULADOR 915 MHz

Seguindo as regras de projeto de circuitaria RF [9] [10], a Tab. I apresenta os componentes e seus respectivos parâmetros, utilizados no projeto.

Além dos valores dos componentes estarem devidamente ajustados para impor a ressonância na faixa correta de operação, a frequência de modulação deve ser aproximadamente dez vezes menor que a frequência RF [6] e neste caso foi utilizado  $f_m = 90 \text{ MHz}$ .

Por fim, as tensões utilizadas para polarização dos *varicaps* e na fonte de modulação foram respectivamente  $V_{DC} = 3.0 \text{ V}$  e  $V_{mod} = 1.4 \text{ V}$ .

TABELA I: PARÂMETROS DOS COMPONENTES PARA O CIRCULADOR DE 915 MHz

| Componente | Valor  | $ Z  [\Omega] (91.5 \text{ MHz})$ | $ Z  [\Omega] (915 \text{ MHz})$ |
|------------|--------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $C_1$      | 7 pF   | 248                               | 24.8                             |
| $C_2$      | 3 pF   | 580                               | 58                               |
| $L_1$      | 430 nH | 247                               | 2470                             |
| $L_2$      | 10 nH  | 6                                 | 60                               |
| $C_C$      | 4 pF   | 435                               | 43.5                             |
| $L_C$      | 90 nH  | 52                                | 520                              |
| $C_{dcb}$  | 10 uF  | 0.000174                          | 0.000017                         |
| $L_{rfc}$  | 10 uH  | 5750                              | 57500                            |

#### V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Seguindo os parâmetros da Tab. I, o circuito foi simulado utilizando a simulação LSSP (*Large Signal S-Parameters*) no software ADS [11]. Todos os componentes foram considerados ideais e sem perdas. Por se tratar de uma simulação ideal, as fontes foram conectadas diretamente nas portas do circulador.

Diferente da maioria dos circuitos RF, no qual é comum utilizar circuitos de casamento de impedância, no caso do circulador, quando o circuito de casamento foi utilizado o circulador perdeu o efeito da modulação e passou a operar como um divisor de potência. O mesmo resultado foi encontrado no caso de desligar a fonte de polarização, como apresentado na Fig. 5. Comparando com o circulador de ferrita, este processo é equivalente ao caso da remoção da ferrita.

Para o circulator em condições normais de uso, os resultados de perda de inserção  $S_{21}$ , perda de retorno  $S_{31}$  e isolamento  $S_{11}$  são apresentados na Fig. 4.

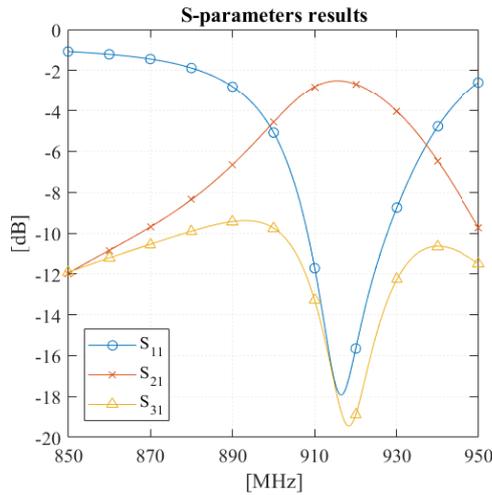


Fig. 4: Resultados de simulação. A perda de inserção é aproximadamente 2.5 dB. As isolações entre portas estão em aproximadamente 18 dB.

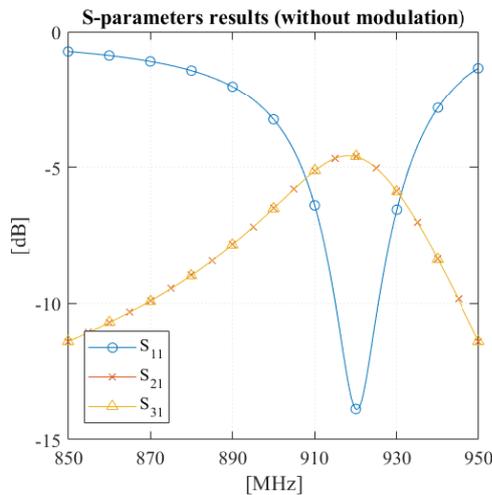


Fig. 5: Circulator simulado com  $V_{mod} = 0$ . Neste caso, o circulator passa a funcionar como um divisor de potência.

Outra importante característica deste circuito é a sua sintonização em faixas de frequência distintas. Embora a largura de banda apresentada no circuito em pleno uso, na Fig. 4, seja de aproximadamente 20 MHz, se necessário operar em outra faixa, basta ajustar a tensão de polarização  $V_{DC}$  que o circulator passa a trabalhar em outra faixa, como apresentado na Fig. 6. Isso se deve ao fato de estarmos alterando a capacitância e consequentemente alterando a zona de ressonância do dispositivo.

## VI. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados mostram que o circuito desenvolvido atua como um circulator. Ele tem a habilidade de ser pequeno e pode ser desenvolvido com tecnologia *SMT*.

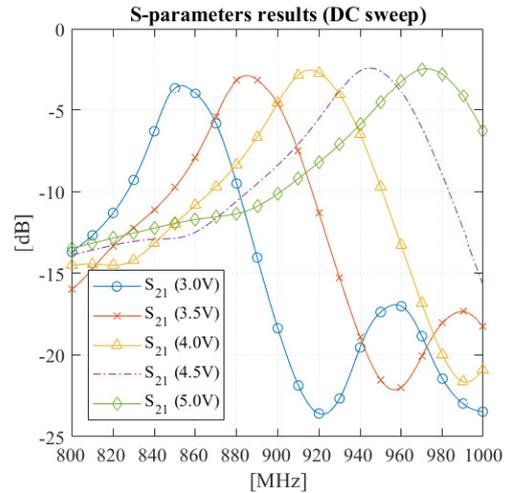


Fig. 6: Uma varredura de  $V_{DC}$  entre 3.0 V até 5.0 V mostra que o circuito tem um ajuste de frequência de banda larga.

Em condições de pleno uso, o circulator funcionou bem, tendo como ponto forte a sintonização de faixa de operação modificando a tensão de polarização dos diodos *varicaps*.

Para uso industrial ainda é necessário um refinamento na topologia, nas questões de casamento de impedância e filtragem dos sinal para os harmônicos de operação.

O circuito tem um grande potencial de uso e aplicabilidade em equipamentos de comunicação diversos, inclusive militares, tendo a vantagem no tamanho em relação ao circulator de ferrita e em questões de custo de projeto e fabricação em relação aos circutores em transistores.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Lee, Y.-K. Hong, C. Yun, J. Park, W. Lee, and B.-C. Choi, "Magnetic parameters for ultra-high frequency (UHF) ferrite circulator design," *Journal of Magnetics*, vol. 19, pp. 399–403, Dec. 2014.
- [2] T.-H. Chang, *Ferrite Circulator for HFSS Simulation*, Department of Physics. National Tsing Hua University, 2015. [Online]. Available: <http://www.phys.nthu.edu.tw/~thschang/notes/MWPA9.pdf>
- [3] D. K. Linkhart, *Microwave Circulator Design*, 2nd ed. Artech House, 2014.
- [4] N. Reiskarimian and H. Krishnaswamy, "Magnetic-free non-reciprocity based on staggered commutation," *Nature Communications*, vol. 7, no. 11217, Apr. 2016.
- [5] N. A. Estep, D. L. Sounas, and A. Alú, "On-chip non-reciprocal components based on angular-momentum biasing," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015.
- [6] N. A. Estep, D. L. Sounas, J. Soric, and A. Alú, "Magnetic-free non-reciprocity and isolation based on parametrically modulated coupled-resonator loops," *Nature Physics*, vol. 10, p. 923–927, Dec. 2014.
- [7] T. H. Lee, *The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits*. Cambridge University Press, 2004.
- [8] Skyworks, *SMV123x Series: Hyperabrupt Junction Tuning Varactors*, Skyworks, 2012. [Online]. Available: <http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/200058Q.pdf>
- [9] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 4th ed. USA: Wiley, 2011.
- [10] R. Ludwig and G. Bogdanov, *RF Circuit Design: Theory and Applications*, 2nd ed. Pearson, 2009.
- [11] I. C. F. Ipsen and C. D. Meyer, *The Idea Behind Krylov Methods*, North Carolina State University, 2014. [Online]. Available: [http://meyer.math.ncsu.edu/Meyer/PS\\_Files/Krylov.pdf](http://meyer.math.ncsu.edu/Meyer/PS_Files/Krylov.pdf)