



Bruno Palhares dos Santos

**Otimização do Ruído de Fase
de Osciladores na Faixa
de Microondas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Marbey Manhães Mosso

Rio de Janeiro
junho de 2005



Bruno Palhares dos Santos

**Otimização do Ruído de Fase
de Osciladores na Faixa
de Microondas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marbey Manhães Mosso
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Luiz Alberto de Andrade
Instituto de Aeronáutica e Espaço / CTA

Prof. Odylio Denys de Aguiar
INPE

Prof. Abelardo Podcameni
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Gláucio Lima Siqueira
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de junho de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno Palhares dos Santos

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-RJ em 2002 na área de Telecomunicações. Realizou trabalhos nas áreas de desenvolvimentos de cavidades ressonantes e osciladores apresentando ruído de fase otimizado. Interesse de pesquisas: Sistemas de comunicações Ópticas, Dispositivos de Microondas e Técnicas de Propagação.

Ficha Catalográfica

Santos, Bruno Palhares dos

Otimização do ruído de fase de osciladores na faixa de microondas / Bruno Palhares dos Santos ; orientador: Marbey Manhães Mosso. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

86 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Ruído de Fase. 3. Método do Detector de Fase. 4. Ruído de Cintilação. I. Mosso, Marbey Manhães. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Dedico esta dissertação a meus pais
que tanto amo e admiro.

Meus pais são os principais
responsáveis pelo meu sucesso, sendo
esta dissertação um prêmio pelo
esforço de uma vida inteira para
viabilizar meus estudos.

Agradecimentos

Ao meu orientador Marbey pela oportunidade, apoio, incentivo e suporte nos momentos mais difíceis da realização deste trabalho.

A CAPES e a PUC-RJ, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

Agradeço ao professor Rodolfo Lima pela disponibilidade sempre demonstrada em todos os momentos que foi solicitado.

Aos pesquisadores Drs. Luiz Alberto de Andrade (IAE / CTA) e Odylio Denys de Aguiar (INPE) que foram parte integrante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus companheiros de mestrado pelo aprendizado diário. Certamente esta rede de relacionamento não mais será rompida.

A meus pais pelo incentivo nos momentos difíceis durante a realização deste trabalho e pela viabilização de meus estudos.

A minha noiva, futura esposa, pelo amor, compreensão, incentivo e pelo equilíbrio emocional proporcionado. Estes fatores foram de extrema importância para o meu desenvolvimento neste período.

Ao técnico Brás da oficina mecânica do CETUC, pelo pronto apoio durante o desenvolvimento experimental do projeto.

Resumo

Santos, Bruno Palhares dos. **OTIMIZAÇÃO DO RUÍDO DE FASE DE OSCILADORES NA FAIXA DE MICROONDAS**. PUC/RJ, 2005. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação foram projetados e desenvolvidos osciladores apresentando ruído de fase otimizado. Em virtude das limitações dos equipamentos analisadores de espectro na precisa medição do ruído de fase dos osciladores desenvolvidos nos laboratórios do CETUC, foi implementada a técnica de medição “Método do Detector de Fase”. Esta técnica consiste no desenvolvimento de um segundo oscilador com as mesmas características do existente, e com auxílio de misturadores, realizar o batimento dos mesmos para frequências próximas a DC, onde nesta região a medição do ruído de fase torna-se viável. Entretanto, em aplicações dedicadas, verificou-se que o batimento entre dois osciladores operando em torno de 10 GHz produz uma frequência intermediária instável, variando de 10 kHz à 50 kHz. Para evitar a realização de uma medição extremamente instável, utilizou-se o método de sincronização de frequências (*Injection Locking*) entre os osciladores. Foi também destacada a influência do ruído de cintilação (*Flicker Noise*) na medida final do ruído de fase. A melhor medida aferida foi em torno de -100 dBc/Hz @ 3,25 kHz. Foi verificado através de diversas simulações que a frequência de cintilação f_{cint} , situada em 10 MHz, apresenta grande influência sobre as medições do ruído de fase realizadas à 3,25 kHz da portadora, degradando-o em cerca de 30dB.

Palavras-chave

Ruído de Fase; Método do Detector de Fase; Ruído de Cintilação

Abstract

Santos, Bruno Palhares dos. **PHASE NOISE OPTIMIZATION OF MICROWAVE OSCILLATORS**. PUC/RJ, 2005. 86p. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation, oscillators presenting optimized phase noise had been projected and developed. Because of the limitation of the specter analyzer devices in the accurate measurements of the oscillators phase noise developed in the CETUC laboratories, it was implemented the measurement technique called Phase Detector Method. This technique consists on the development of a second oscillator with the same characteristics of the already existent one and, with aid of mixers, multiplies these signals together and provides the difference of the two signals next to DC, where, in this region, the measurement of the phase noise becomes viable. However, in dedicated applications, it was verified that the beating between two oscillators operating around 10GHz produces instable intermediate frequency, varying between 10kHz to 50kHz. To prevent the accomplishment of an extremely unstable measurement, the method of synchronization of frequency (Injection Locking) between the oscillators was used. Also the influence of the Flicker Noise in the final measure of the phase noise was detached. The best measure was around $-100\text{dBc/Hz}@3,25\text{kHz}$. It was verified through lots of simulations that the flicker corner frequency $f_{c\text{int}}$, situated in 10MHz, presents great influence on the measures of the phase noise carried through to the 3,25kHz of the carrier, degrading it in about 30dB.

Keywords

Phase Noise; Injection Locking; Flicker Noise

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1.	Objetivos	15
2	Ruído de Fase em Osciladores	16
2.1.	Introdução	16
2.2.	Considerações Gerais	16
2.3.	Ruído de Fase de um Oscilador	18
2.3.1.	Simulação 1: $F_{\text{cint}} = 1 \text{ kHz}$	22
2.3.2.	Simulação 2: $F_{\text{cint}} = 2 \text{ kHz}$	23
2.3.3.	Simulação 3: $F_{\text{cint}} = 3 \text{ kHz}$	24
2.3.4.	Simulação 4: $F_{\text{cint}} = 5 \text{ kHz}$	25
2.3.5.	Simulação 5: $F_{\text{cint}} = 10 \text{ kHz}$	26
2.3.6.	Simulação 6: $F_{\text{cint}} = 100 \text{ kHz}$	27
2.3.7.	Simulação 7: $F_{\text{cint}} = 200 \text{ kHz}$	28
2.3.8.	Simulação 8: $F_{\text{cint}} = 500 \text{ kHz}$	29
2.3.9.	Simulação 9: $F_{\text{cint}} = 1 \text{ MHz}$	30
2.3.10.	Simulação 9: $F_{\text{cint}} = 10 \text{ MHz}$	31
2.4.	Comentários Finais e Conclusões	32
3	Osciladores em Realimentação	33
3.1.	Introdução	33
3.2.	Critério de Oscilação	33
3.3.	Fator de Qualidade - Q	35
3.4.	Q de “ <i>Feedback</i> ” – Q’	38
3.5.	Comentários e Conclusões Finais	40
4	Projeto de Osciladores de Baixo Ruído	41
4.1.	Introdução	41
4.2.	Dimensionamento de Cavidades Ressonantes Cilíndrica	41
4.2.1.	Modo $TE_{01\delta}$	43
4.3.	Dimensionamento dos Elementos da Malha de Realimentação	44

4.4. Oscilador em 1,96 GHz	46
4.5. Osciladores em 10,21 GHz	53
4.5.1. Projeto das Cavidades Ressonantes	53
4.5.2. Ressorador Dielétrico	55
4.5.3. Caracterização dos Amplificadores	56
4.5.4. Caracterização das Cavidades	57
4.5.5. Caracterização dos Filtros Passa-Faixa	60
4.5.6. Caracterização dos Isoladores	61
4.5.7. Caracterização dos defasadores	62
4.5.8. Caracterização das Malhas de Oscilação	63
4.6. Comentários e Conclusões Finais	68
5 Medições e Resultados Obtidos	69
5.1. Introdução	69
5.2. Utilização de Misturadores	69
5.3. Descrição do Método de Medição	71
5.4. Resultados obtidos	74
5.5. Comentários e Conclusões Finais	75
6 Comentários Finais	76
7 Referências Bibliográficas	80
8 Apêndice A Relação entre a Componente de Ruído de Cintilação “ b ” e a Freqüência Máxima de Cintilação “ f_{cint} ”	82
9 Apêndice B Sobreposição dos Valores Simulados com os Valores Medidos do Ruído de Fase	83
9.1. $F_{cint} = 1$ kHz	83
9.2. $F_{cint} = 10$ kHz	84
9.3. $F_{cint} = 100$ kHz	84
9.4. $F_{cint} = 500$ kHz	85
9.5. $F_{cint} = 1$ MHz	85
9.6. $F_{cint} = 10$ MHz	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Circuito RLC.....	16
Figura 2.2. Representação do ruído de fase do oscilador – Fonte: VENDELIN, GEORGE D. Design of Amplifiers and Oscillators by S-Parameter Method, John Wiley e Sons, Inc, 1982, p. 162.	20
Figura 2.3. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 1$ kHz.	22
Figura 2.4. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 2$ kHz.	23
Figura 2.5. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 3$ kHz.	24
Figura 2.6. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 5$ kHz.	25
Figura 2.7. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 10$ kHz.	26
Figura 2.8. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 100$ kHz.	27
Figura 2.9. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 200$ kHz.	28
Figura 2.10. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 500$ kHz.	29
Figura 2.11. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 1$ MHz.	30
Figura 2.12. Gráfico comparativo com $f_{cint} = 10$ MHz.	31
Figura 3.1. Diagrama de blocos de um oscilador.	33
Figura 3.2. Dependência da estabilidade da frequência do oscilador com a inclinação da resposta em fase.	35
Figura 3.3. Curva de seletividade ou ressonância.	37
Figura 4.1. Configuração dos campos eletromagnéticos no interior da cavidade para o modo $TE_{01\delta}$	42
Figura 4.2. Modelo de ressoador dielétrico entre placas paralelas metálicas.	43
Figura 4.3. Malha de oscilador em realimentação.	45
Figura 4.4. Acoplador direcional.	45
Figura 4.5. Tampa de altura variável da cavidade ressonante.	47
Figura 4.6. Cilindro central da cavidade ressonante.	47
Figura 4.7. Vista frontal da cavidade ressonante.	47
Figura 4.8. Ressoador dielétrico em $f_0 = 1,977$ GHz.	48
Figura 4.9. Medida da frequência de ressonância da cavidade ressonante.	48
Figura 4.10. Medida da banda passante de 3 dB da frequência de ressonância.	49

Figura 4.11. Acoplador Direcional.....	49
Figura 4.12. Filtro passa-baixa NLP2400.....	50
Figura 4.13. Características do circulador.....	50
Figura 4.14. Medida do amplificador ZSL2500.....	51
Figura 4.15. Curto móvel e configuração de um defasador.....	51
Figura 4.16. Visão superior da malha do oscilador.....	52
Figura 4.17. Visão frontal do oscilador.....	52
Figura 4.18. Perda de inserção da malha de oscilação.....	53
Figura 4.19. Vista superior da tampa da cavidade ressonante.....	54
Figura 4.20. Vista frontal do conjunto tampas e cilindro.....	54
Figura 4.21. Cavidade ressonante cilíndrica utilizada no protótipo 1 dos osciladores.....	54
Figura 4.22. Cavidade ressonante cilíndrica utilizada no protótipo 2 dos osciladores.....	55
Figura 4.23. Ressorador dielétrico em $f_0 = 10,21$ GHz.....	55
Figura 4.24. Curva da caracterização do amplificador utilizado no oscilador 1... ..	56
Figura 4.25. Curva da caracterização do amplificador utilizado no oscilador 2... ..	56
Figura 4.26. Caracterização da perda de inserção da cavidade ressonante cilíndrica.....	57
Figura 4.27. Caracterização da largura de banda da cavidade ressonante cilíndrica.....	58
Figura 4.28. Caracterização da perda de inserção em faixa larga.....	58
Figura 4.29. Perda de inserção da cavidade ressonante utilizada no oscilador número 2.....	59
Figura 4.30. Largura de banda da cavidade número 2.....	59
Figura 4.31. Perda de inserção visualizada em banda larga.....	60
Figura 4.32. Curva da caracterização do filtro passa-faixa 1.....	61
Figura 4.33. Curva da caracterização do filtro passa-faixa 2.....	61
Figura 4.34. Perda de inserção vista numa faixa larga.....	63
Figura 4.35. Perda de inserção vista em faixa estreita.....	64
Figura 4.36. Caracterização do ganho da malha visto numa faixa larga.....	64
Figura 4.37. Caracterização do ganho da malha visto em faixa estreita.....	65
Figura 4.38. Perda de inserção da malha do oscilador vista numa faixa larga.....	66

Figura 4.39. Perda de inserção da malha vista numa faixa estreita.....	66
Figura 4.40. Ganho da malha visto em faixa larga.....	67
Figura 4.41. Ganho da malha visto em faixa estreita.....	67
Figura 5.1. Diagrama esquemático do misturador.....	71
Figura 5.2. Configuração sugerida para sincronização entre osciladores em torno de 10 GHz com $\Delta f \approx 15$ kHz, segundo os níveis de potência indicados.(C=Fator de acoplamento).....	72
Figura 5.3. Diagrama esquemático do método de detector de fase utilizado na primeira tentativa de medição do ruído de fase dos osciladores.	73
Figura 5.4. Diagrama esquemático do método de detector de fase utilizado na medição do ruído de fase dos osciladores sincronizados em 10 GHz.....	74
Figura 6.1. Curva de ruído de fase residual dos amplificadores – Fonte: Miteq...	77
Figura 9.1. Sobreposição utilizando $f_{c\text{int}} = 1$ kHz.....	83
Figura 9.2. Sobreposição utilizando $f_{c\text{int}} = 10$ kHz.....	84
Figura 9.3. Sobreposição utilizando $f_{c\text{int}} = 100$ kHz.....	84
Figura 9.4. Sobreposição utilizando $f_{c\text{int}} = 500$ kHz.....	85
Figura 9.5. Sobreposição utilizando $f_{c\text{int}} = 1$ MHz.	85
Figura 9.6. Sobreposição utilizando $f_{c\text{int}} = 10$ MHz.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Componentes invariáveis utilizados para simulação.	21
Tabela 2.2. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 1$ kHz.	22
Tabela 2.3. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 2$ kHz.	23
Tabela 2.4. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 3$ kHz.	24
Tabela 2.5. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 5$ kHz.	25
Tabela 2.6. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 10$ kHz.	26
Tabela 2.7. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 100$ kHz.	27
Tabela 2.8. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 200$ kHz.	28
Tabela 2.9. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 500$ kHz.	29
Tabela 2.10. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 1$ MHz.	30
Tabela 2.11. Valores do ruído de fase calculados com $f_{c\text{int}} = 10$ MHz.	31
Tabela 4.1. Perda de inserção entre as portas do circulador.	50
Tabela 4.2. Especificação dos amplificadores.	57
Tabela 4.3. Característica dos isoladores utilizados nos osciladores.	62
Tabela 4.4. Caracterização dos circuladores utilizados como defasadores.	62
Tabela 5.1. Especificações do misturador.	71