



Carlos Eduardo Orihuela Vargas

**Projeto e Implementação de Antena para a
Sondagem do Canal de Propagação Rádio
Móvel em Onda Milimétrica**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Gláucio Lima Siqueira

Co-Orientadora: Prof. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri

Rio de Janeiro

Abril 2015



Carlos Eduardo Orihuela Vargas

**Projeto e Implementação de Antena para a
Sondagem do Canal de Propagação Rádio
Móvel em Onda Milimétrica**

Dissertação de Mestrado 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. Gláucio Lima Siqueira
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri
Co-Orientadora
UFF

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Marbey Manhães Mosso
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Leni Joaquim de Matos
UFF

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2015

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

Carlos Eduardo Orihuela Vargas

Gradou-se em Engenharia de Telecomunicações na UCB (Universidad Católica Boliviana “San Pablo”), La Paz – Bolívia em 2010

Ficha Catalográfica

Vargas, Carlos Eduardo Orihuela

Projeto e implementação de antena para sondagem do canal de propagação rádio móvel em onda milimétrica / Carlos Eduardo Orihuela Vargas ; orientador: Gláucio Lima Siqueira ; co-orientadora: Vanessa Magri. – 2015.
104 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.
Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Ondas milimétricas. 3. 60 GHz. 4. Largura de feixe. 5. Antenas corrugadas. 6. Conjunto de antenas. 7. Alta frequência. 8. HFSS. I. Siqueira, Gláucio Lima. II. Magri, Vanessa. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD:621.3

Para meus queridos pais, Irma e Eduardo,
meu irmão Roberto e todos meus tios,
primos e sobrinhos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me acompanhar e guiar ao longo da minha vida toda, por ter sido a minha força em tempos de fraqueza e por me brindar uma vida cheia de aprendizagem, experiências e acima de tudo de felicidade.

Ao meus professores, Gláucio Lima Siqueira e Vanessa Magri por todo o suporte oferecido, pela confiança em mim depositada, pelas valiosas sugestões e críticas que me deram durante o período de elaboração desta dissertação.

À Professora Leni Matos, pela confiança, apoio, dedicação e por compartilhar comigo seu conhecimento e, especialmente, sua amizade

Agradeço aos meus pais, Irma e Eduardo, por me apoiarem em todos os momentos, pelos valores que me transmitiram e por me darem a oportunidade de ter a melhor educação possível no curso da minha vida. Especialmente, por ser um grande exemplo de vida a ser seguido.

Para meu irmão, Roberto, por fazer parte da minha vida, por ser um exemplo de desenvolvimento profissional a seguir, e por ser meu conselheiro em cada etapa nova da minha vida.

A Fabiano, estudante de doutorado, por ser um grande companheiro e amigo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, Ariel, Teddy, Marcelo, Mauricio, Daniel e todo o CETUC, por serem parte importante da minha vida, e por fazer o papel de uma família em todo momento, obrigado pelo apoio, compreensão e, acima de tudo, amizade.

À CAPES e a FAPERJ pelo apoio financeiro oferecido durante toda esta etapa.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou outra me estimularam ou ajudaram.

Resumo

Orihuela Vargas, Carlos Eduardo; Lima Siqueira, Gláucio. **Projeto e Implementação de Antena para a Sondagem do Canal de Propagação Rádio Móvel em Onda Milimétrica**. Rio de Janeiro, 2015. 104p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O termo de ondas milimétricas refere-se à porção do espectro eletromagnético com frequências entre 30 e 300 GHz, correspondente a comprimentos de onda de 10 até 1 mm, respectivamente. As características das ondas milimétricas diferem das micro-ondas e das infravermelhas, e são estas diferenças que fazem com que um sistema de ondas milimétricas seja o candidato ideal para algumas aplicações. Nos anos passados, a falta e o alto custo de fontes, dispositivos, componentes e instrumentação adequada, para esta faixa de frequências, levaram a um progresso muito devagar nesta área, no entanto, as limitações dos sistemas infravermelhos e ópticos e a superlotação da região do micro-ondas do espectro ocasionaram um maior interesse em frequências milimétricas nos últimos anos. A quinta geração dos sistemas móveis deve estar pronta nos próximos anos, e muitas pesquisas estão se desenvolvendo nas faixas de 28 GHz, 38 GHz e 60 GHz. A faixa de 60 GHz, na qual as ondas têm uma maior atenuação comparada com as outras duas, oferece um maior espectro eletromagnético. Nesta faixa de frequência, as ondas se refletem muito e pode se aproveitar estas reflexões para uma melhor recepção sendo, por tanto, uma ótima opção para comunicação móvel de curta distância com altas taxas de transferência de dados. Para poder aproveitar a maior quantidade de multipercursos, a antena receptora deve ter uma largura de feixe grande. Assim, neste trabalho, duas antenas foram projetadas, construídas e, de alguma forma, testadas para uma frequência de 60 GHz, onde as larguras de feixe simuladas obtidas foram de 112 graus e 115 graus.

Palabras-chave

Antenas; 60 GHz; Ondas Milimétricas; HFSS; 5G; Comunicações Móveis

Abstract

Orihuela Vargas, Carlos Eduardo; Lima Siqueira, Gláucio (Advisor). **Antenna Project and Implementation for Characterization of Mobile Radio Channel in Millimeter Waves**. Rio de Janeiro, 2015. 104p. Msc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The millimeter wave term refers to that portion of the electromagnetic spectrum with frequencies between 30 and 300 GHz corresponding to wavelengths of 1 to 10 mm. The characteristics of the millimeter wave differ from microwave and infrared, and these differences make a millimeter wave system, an ideal candidate for some applications. In the past the lack and the high cost of supplies, devices, components and instrumentation suitable for this frequency band caused very rambling progress in this area. However, the limitations of infrared optical systems and overcrowding of the microwave spectrum region led to a greater interest in the millimeter frequency in recent years and it is expected an increase in this interest. The fifth generation of mobile systems should be ready in the coming years, and many studies are developing in the 28 GHz, 38GHz and 60GHz bands. In the 60 GHz band, waves has a higher attenuation compared to the other two, but also offers greater electromagnetic spectrum, in this band, waves has a lot of reflection, then, scattering can be taken for better reception. So, this band is a great choice for short distance mobile communication with high data rates. To get the greatest amount of multipath, the receiving antenna must have a wide beam width. In this work, two antennas were designed, built and somewhat tested for a frequency of 60 GHz for mobile environment, where the beam widths obtained are 112 degrees and 115 degrees.

Keywords

Antennas; Millimeter Waves; HFSS; 60 GHz; 5G; Cellular Communications

Sumário

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução | 14 |
| 2 | Comunicações Móveis e Ondas Milimétricas | 19 |
| 2.1 | Evolução das Tecnologias Móveis | 19 |
| 2.2 | Primeira Geração | 20 |
| 2.3 | Segunda Geração | 22 |
| 2.4 | Geração 2.5 | 23 |
| 2.5 | Terceira Geração | 24 |
| 2.6 | Quarta Geração | 25 |
| 2.7 | Quinta Geração? | 26 |
| 2.8 | Ondas Milimétricas | 28 |
| 2.9 | Vantagens e Desvantagens das Ondas Milimétricas | 30 |
| 2.10 | Aplicações das Ondas Milimétricas | 31 |
| 2.11 | Propagação móvel a 60 GHz em áreas urbanas | 32 |
| 2.12 | A escolha da frequência de 60 GHz | 34 |
| 3 | Antenas em 60 GHz | 35 |
| 3.1 | Introdução | 35 |
| 3.2 | Parâmetros Fundamentais de Antenas | 36 |
| 3.2.1 | Diagrama de irradiação | 36 |
| 3.2.2 | Diretividade | 39 |
| 3.2.3 | Polarização | 43 |
| 3.2.4 | Ganho | 44 |
| 3.2.5 | Largura de Banda | 46 |
| 3.3 | Conjunto de Antenas | 47 |
| 3.3.1 | Conjunto de Antenas para 60 GHz. | 48 |
| 3.4 | Antena Corneta Corrugada | 53 |
| 3.4.1 | Antena cônica corruga para 60 GHz. | 54 |
| 3.5 | Projeto da Antena Corneta Cônica 90° | 56 |
| 3.5.1 | Análise da antena com uma fenda | 59 |
| 3.5.2 | Análise da antena com duas fendas | 67 |
| 3.5.3 | Análise da antena com três fendas | 73 |
| 3.5.4 | Análise da antena com quatro fendas | 81 |
| 4 | Equipamento Experimental e Medições | 89 |
| 4.1 | Transceptor em 60 GHz | 89 |
| 4.1.1 | Caracterização dos transceptores | 90 |

| | | |
|-----|----------------------------------|-----|
| 4.2 | Antena Transmissora | 92 |
| 4.3 | Antena Receptora | 94 |
| 4.4 | Testes das Antenas | 94 |
| 5 | Conclusões | 99 |
| 5.1 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 101 |
| | Referências bibliográficas | 102 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Evolução das Tecnologias Celulares | 20 |
| Figura 2.2: Estatísticas das confecções móveis (a) e do tráfego de dados (b) | 27 |
| Figura 3.1: Diagrama de radiação de uma antena isotrópica | 37 |
| Figura 3.2: Diagrama de irradiação, antena genérica, gráfico polar | 38 |
| Figura 3.3: Diagrama de irradiação, gráfico retangular, antena genérica | 39 |
| Figura 3.4: Radiano (a) e Esferorradiano (b) | 40 |
| Figura 3.5: Padrão de ângulo sólido | 41 |
| Figura 3.6: Padrão de ângulo sólido em dois diagramas de radiação | 42 |
| Figura 3.7: Onda Polarizada verticalmente | 43 |
| Figura 3.8: Polarizações linear, circular e elíptica | 44 |
| Figura 3.9: Configurações típicas de conjuntos de antenas [2] | 48 |
| Figura 3.10: Vista do desenho final da antena 16x16 em HFSS | 49 |
| Figura 3.11: a) Placa de alimentação b) Placa de acoplamento c) Placa de cavidades d) Placa de ranhuras de radiação | 50 |
| Figura 3.12: Largura de feixe do arranjo de 4x4 ranhuras, com 18,95 dB de ganho | 51 |
| Figura 3.13: Largura de feixe do arranjo de 4x8 ranhuras, com 21,67 dB de ganho | 51 |
| Figura 3.14: Largura de feixe do arranjo de 4x16 ranhuras, com 23,79 dB de ganho | 51 |
| Figura 3.15: Largura de feixe do arranjo de 8x8 ranhuras, com 24,10 dB de ganho | 52 |
| Figura 3.16: Largura de feixe do arranjo de 8x16 ranhuras, com 25,53 dB de ganho | 52 |
| Figura 3.17: Largura de feixe do arranjo de 16x16 ranhuras, com 25,99 dB de ganho | 52 |
| Figura 3.18: Interior de uma guia corrugada | 53 |
| Figura 3.19: Campo elétrico na abertura de uma corneta corrugada. | 54 |
| Figura 3.20: Antena cônica corrugada | 55 |
| Figura 3.21: Antena cônica corrugada com abertura de 90° | 56 |
| Figura 3.22: Desenho inicial da antena receptora, HFSS | 57 |
| Figura 3.23: Vista superior dos desenhos da antena com diferentes números de fendas | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.24: Largura de Feixe da antena em relação ao número de fendas | 58 |
| Figura 3.25: Ganho da antena em relação ao número de fendas | 59 |
| Figura 3.26: Diagrama de irradiação polar da antena com 1 fenda | 66 |
| Figura 3.27: Largura de feixe da antena com 1 fenda. | 66 |
| Figura 3.28: Ganho da antena com 1 fenda. | 67 |
| Figura 3.29: Diagrama de irradiação polar da antena com 2 fendas | 72 |
| Figura 3.30: Largura de feixe polar da antena com 2 fendas. | 72 |
| Figura 3.31: Ganho da antena com 2 fendas. | 73 |
| Figura 3.32: Diagrama de irradiação polar da antena com 3 fendas | 80 |
| Figura 3.33: Largura de feixe da antena com 3 fendas. | 80 |
| Figura 3.34: Ganho da antena com 3 fendas. | 81 |
| Figura 3.35: Diagrama de irradiação polar da antena com 4 fendas | 86 |
| Figura 3.36: Largura de feixe da antena com 4 fendas. | 87 |
| Figura 3.37: Ganho da antena com 4 fendas. | 87 |
| Figura 3.38: Fotografia das antenas construídas. | 88 |
| Figura 4.1: Transceptor de 60 GHz. | 89 |
| Figura 4.2: Verificação do funcionamento dos transceptores. | 90 |
| Figura 4.3: Componentes de RF | 92 |
| Figura 4.4: Antena Transmissora. | 93 |
| Figura 4.5: Diagrama tridimensional da antena transmissora | 93 |
| Figura 4.6: Diagrama tridimensional da antena com uma fenda (esquerda) e com 3 fendas (direita) | 94 |
| Figura 4.7: Montagem dos transceptores. | 95 |
| Figura 4.8: Analisador de Espectro. | 95 |
| Figura 4.9: Gerador de Sinais. | 96 |
| Figura 4.10: Plataforma com os diferentes ângulos de medições | 96 |
| Figura 4.11: Potência recebida vs Ângulo de medição, para antena de uma fenda. | 97 |
| Figura 4.12: Potência recebida vs Ângulo de medição, para antena de três fendas. | 97 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1: Características técnicas da primeira geração de sistemas celulares. | 21 |
| Tabela 2.2: Características técnicas da segunda geração de sistemas celulares | 23 |
| Tabela 3.1: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com profundidade de fenda e largura de fenda fixos para antena com uma fenda | 60 |
| Tabela 3.2: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos para antena com uma fenda | 61 |
| Tabela 3.3: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos. Antena com uma fenda | 62 |
| Tabela 3.4: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com uma fenda, na segunda rodada de simulações | 63 |
| Tabela 3.5: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com uma fenda, na segunda rodada de simulações | 64 |
| Tabela 3.6: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos para antena com uma fenda, na segunda rodada de simulações. | 65 |
| Tabela 3.7: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com duas fendas. | 67 |
| Tabela 3.8: Largura de feixe em relação à profundidade, com espaçamento e largura de fenda fixos, para antena com duas fendas. | 68 |
| Tabela 3.9: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com espaçamento e profundidade fixos, para antena com duas fendas. | 69 |
| Tabela 3.10: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com espaçamento e profundidade fixos, para antena com duas fendas na segunda rodada. | 69 |
| Tabela 3.11: Largura de feixe em relação à profundidade, com espaçamento e largura de fenda fixos, para antena com duas fendas na segunda rodada. | 70 |
| Tabela 3.12: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com duas fendas na segunda rodada. | 71 |
| Tabela 3.13: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com três fendas. | 73 |

| | |
|---|----|
| Tabela 3.14: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com três fendas. | 74 |
| Tabela 3.15: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos para antena com três fendas. | 75 |
| Tabela 3.16: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com três fendas na segunda rodada. | 75 |
| Tabela 3.17: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos para antena com três fendas, na segunda rodada. | 76 |
| Tabela 3.18: Largura de feixe em relação ao espaçamento, com profundidade e largura de fenda fixos, para antena com três fendas na segunda rodada. | 77 |
| Tabela 3.19: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com três fendas na terceira rodada. | 77 |
| Tabela 3.20: Largura de feixe em relação à profundidade com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com três fendas na terceira rodada. | 78 |
| Tabela 3.21: Largura de feixe em relação ao espaçamento com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com três fendas na terceira rodada. | 79 |
| Tabela 3.22: Largura de feixe em relação ao espaçamento com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com quatro fendas. | 81 |
| Tabela 3.23: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas. | 82 |
| Tabela 3.24: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas. | 83 |
| Tabela 3.25: Largura de feixe em relação ao espaçamento com largura de fenda e profundidade fixos, para antena com quatro fendas na segunda rodada. | 83 |
| Tabela 3.26: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas, na segunda rodada. | 84 |
| Tabela 3.27: Largura de feixe em relação à largura de fenda, com profundidade e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas, na segunda rodada. | 85 |
| Tabela 3.28: Largura de feixe em relação à profundidade, com largura de fenda e espaçamento fixos, para antena com quatro fendas, na terceira rodada. | 86 |