

2

Estudo das Antenas Espirais

2.1. Introdução

Desde de a década de 1950, têm sido pesquisadas antenas, referenciadas como antenas independentes de frequência, cuja geometria é especificada por ângulos.

Caso uma antena tenha sua geometria especificada apenas por ângulos, as dimensões elétricas serão independentes da frequência, mantendo-se assim invariantes, características como impedância, diagrama de radiação e polarização..

Inicialmente as estruturas são consideradas infinitas, mas na análise do comportamento da corrente, verifica-se que ela decresce a medida em que se afasta dos terminais de entrada, passando a ser desprezível após atingir uma determinada distância em relação à origem. Então a partir desta determinada distância, o restante da estrutura, que tenderia ao infinito, pode ser retirado. As dimensões resultantes limitam para a frequência inferior de operação da antena. Antenas práticas podem ter banda passante na ordem de 40:1.

O desenvolvimento teórico das antenas independentes de frequência foi realizado inicialmente por Rumsey [2] que unificou conceitos e elaborou uma teoria de aplicação geral. Formas clássicas incluem as antenas espirais com geometria equiangular plana e cônica investigadas por Dyson[3] e a antena log-periódicas proposta e desenvolvida por DuHamel e Isbell [4]

2.2. Antenas Independentes da Freqüência

O tratamento analítico das antenas independentes da freqüência apresentado aqui foi introduzida por Rumsey[2] e simplificado por Elliot para configurações tridimensionais.

Considere-se uma antena cuja geometria é descrita por coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) , tendo dois terminais bem próximos a origem e cada um disposto simetricamente ao longo de $\theta = 0$, a 180° graus. Admita-se que a antena é um condutor perfeito, dentro de um meio homogêneo e isotrópico e sua superfície é descrita pela equação:

$$r = F(\theta, \phi) \quad (2.1)$$

Onde r representa a distância ao longo da superfície.

Essa antena, operando em uma certa freqüência, apresenta determinadas características de radiação. Para que essas características permaneçam as mesmas em uma freqüência K vezes menor, a superfície física da antena deverá ser K vezes maior, para manter as mesmas dimensões elétricas. Então a nova superfície deve ser descrita por:

$$r' = KF(\theta, \phi) \quad (2.2)$$

As superfícies devem ser idênticas; isto é, elas devem ser similares e também congruentes (se as duas superfícies forem infinitas). A congruência pode ser estabelecida somente por rotação em ϕ . A translação não é permitida porque os terminais das superfícies estão localizados na origem. A rotação em θ é proibitiva porque os terminais estarem dispostos simetricamente em $\theta = 0$, a 180° .

Para a segunda superfície ser congruente com a primeira, ela deve ser rodada por um ângulo C de modo que:

$$KF(\theta, \phi) = F(\theta, \phi + C) \quad (2.3)$$

O ângulo de rotação C depende de K , mas nenhum deles é dependente de θ ou ϕ . Fisicamente a congruência implica que eletricamente a antena original deve comporta-se do mesmo modo para frequências diferentes. o diagrama de radiação, contudo, será deslocado azimutalmente por um ângulo C .

Para a obtenção da representação funcional de $F(\theta, \phi)$, ambos os lados da equação 1.3 serão diferenciados com relação a C e ϕ , produzindo

$$\frac{d}{dC}[KF(\theta, \phi)] = \frac{dK}{dC}F(\theta, \phi) = \frac{\partial}{\partial C}[F(\theta, \phi + C)] = \frac{\partial}{\partial(\phi + C)}[F(\theta, \phi + C)] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi}[KF(\theta, \phi)] = K \frac{\partial F(\theta, \phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial}{\partial \phi}[F(\theta, \phi + C)] = \frac{\partial}{\partial(\phi + C)}[F(\theta, \phi + C)] \quad (2.5)$$

De (2.4) e (2.5) tem-se:

$$\frac{dK}{dC}F(\theta, \phi) = K \frac{\partial F(\theta, \phi)}{\partial \phi} \quad (2.6)$$

Usando (2.1), (2.6) será escrita na forma

$$\frac{1}{K} \frac{dK}{dC} = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \phi} \quad (2.7)$$

Desde que o lado esquerdo de (2.7) é independente de θ e ϕ , a solução geral para a superfície $r = F(\theta, \phi)$ da antena é :

$$r = F(\theta, \phi) = e^{a\phi} f(\theta) \quad (2.8)$$

$$\text{onde} \quad a = \frac{1}{K} \frac{dK}{dC} \quad (2.8 \text{ a})$$

e $f(\theta)$ é uma função completamente arbitrária.

Então para qualquer antena manter características de independência da frequência, a sua superfície deve ser descrita por (2.8). Isto pode ser executado por uma função específica para $f(\theta)$ ou suas derivadas. A formulação acima apresentada, será utilizada para descrever as superfícies das antenas que serão introduzidas a seguir.

2.3.

Antenas Espirais Equiangulares

Uma espiral equiangular é uma configuração geométrica na qual a superfície é definida por ângulos. Isto satisfaz a condição para que este formato seja utilizado em projetos de antenas independente de frequência.

A mais baixa frequência de operação ocorre quando o comprimento total do braço da espiral é comparável ao comprimento de onda[3]. Para as frequências acima desta o diagrama de radiação e a impedância são independentes da frequência. A equação de uma espiral equiangular plana pode ser deduzida pela derivada de $f(\theta)$ em (2.8) como:

$$\frac{df}{d\theta} = f'(\theta) = A\delta\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (2.9)$$

onde A é uma constante e δ é a função delta de Dirac. Usando (2.9) , (2.8) reduz-se para:

$$r|_{\theta=\pi/2} = \rho = \begin{cases} Ae^{a\phi} = \rho_0 e^{a(\phi-\phi_0)} & \text{em } \theta = \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{em outro ponto} \end{cases} \quad (2.10)$$

Onde

$$A = \rho_0 e^{-a(\phi-\phi_0)} \quad (2.10 a)$$

Em relação ao comprimento de onda, (2.10) pode ser escrita na forma:

$$\rho_\lambda = \frac{\rho}{\lambda} = \frac{A}{\lambda} e^{a\phi} = A e^{a[\phi - \ln(\lambda/a)]} = A e^{a(\phi - \phi_1)} \quad (2.11)$$

Onde
$$\phi_1 = \frac{1}{a} \ln(\lambda) \quad (2.11 a)$$

Outra forma de (2.10) ser escrita é :

$$\phi = \frac{1}{a} \ln\left(\frac{\rho}{a}\right) = \tan \psi \ln(\ln \rho - \ln A) \quad (2-12)$$

onde $1/a$ é a razão de expansão da espiral e ψ é o ângulo entre a distância radial ρ e a tangente para a espiral, como mostrado na figura 2.1(a).

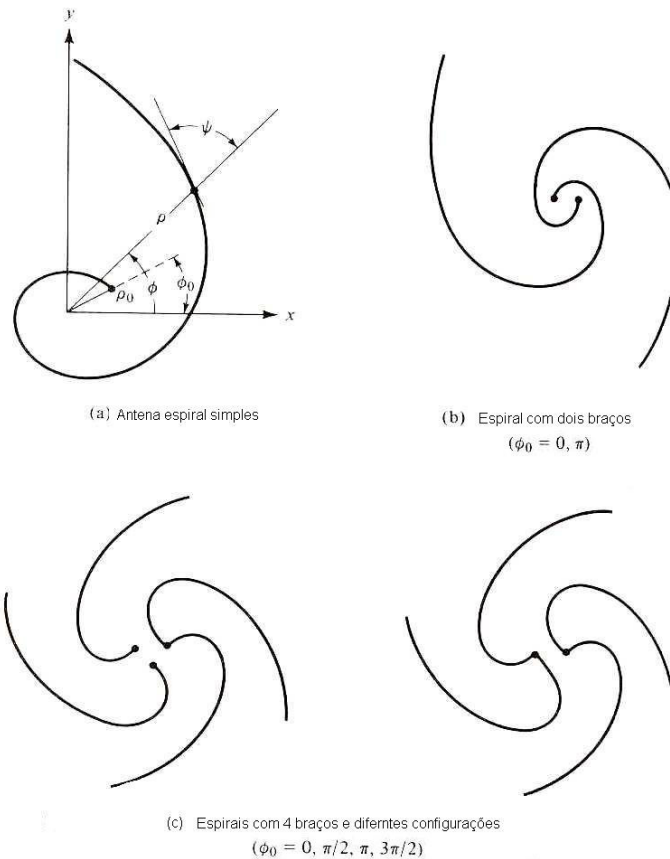


Figura 2.1 - Antenas espirais equiangulares filamentosas, com uma espiral e múltiplas espirais

Está evidente através da equação (2.11) que a troca do comprimento de onda é equivalente a variação de ϕ_0 cujo resultado não é mas que a rotação de uma estrutura de forma infinita. Dentro das limitações impostas pelo comprimento do braço da espiral, características semelhantes tem sido observadas para estruturas finitas. Os mesmos resultados podem ser concluídos pelo exame de o (2.12), isto é, o incremento do logaritmo da frequência ($\ln f$) por C_0 é equivalente a rotação da estrutura por $C_0 \tan \psi$. Como resultado, o diagrama é meramente rodado, mas permanece inalterado, sendo portanto uma antena independente da frequência.

O comprimento da espiral é dado por:

$$L = \int_{\rho_0}^{\rho_1} \left[\rho^2 \left(\frac{d\phi}{d\rho} \right)^2 + 1 \right] d\rho \quad (2.13)$$

onde ρ_0 e ρ_1 representam os raios internos e externos da espiral.

utilizando(2-10), pode-se reduzir a equação anterior para

$$L = (\rho_1 - \rho_0) \sqrt{1 + \frac{1}{a^2}} \quad (2.14)$$

Várias formas geométricas de espirais têm sido usadas para formarem diferentes tipos de antena. Uma antena espiral filamentar com dois braços, como a mostrada na Fig. 2.1b, é obtida fazendo-se, em (2.10), $\phi_0 = 0$ para o primeiro braço e $\phi_0 = \pi$ para o segundo. Antenas filamentosas com quatro braços, correspondendo a $\phi_0 = 0, \pi/2, \pi$ e $3\pi/2$ são mostradas na Fig. 2.1c. Várias outras combinações são possíveis.

Uma antena espiral equiangular, confeccionada em uma superfície metálica, como mostrada na fig. 2.2, pode ser criada pela definição das curvas das suas bordas, utilizando-se a equação (2.10).

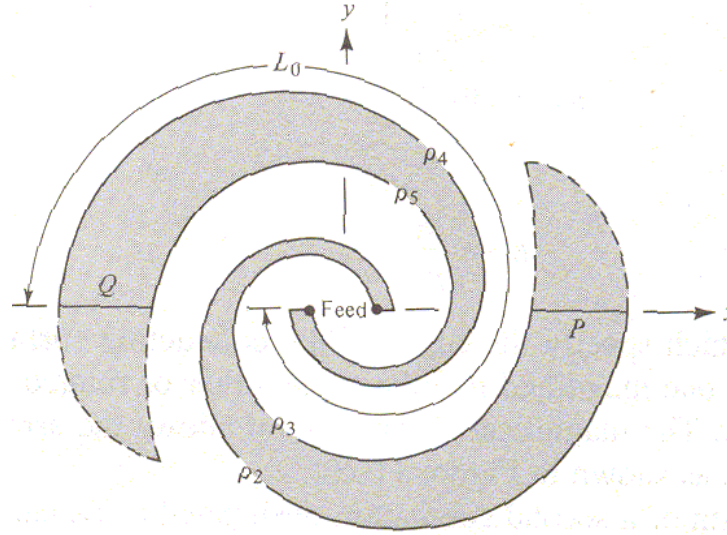


Figura 2.2 - Espiral equiangular confeccionada em placa metálica

Então teremos :

$$\rho_2 = \rho'_2 e^{a\phi} \quad (2.15a)$$

$$\rho_3 = \rho'_3 e^{a\phi} = \rho'_2 e^{a(\phi-\delta)} \quad (2.15b)$$

Onde

ρ'_2, ρ_2, ρ'_3 e ρ_3 são os raios iniciais e finais das curvas externa e interna, respectivamente.

$$\rho'_3 = \rho'_2 e^{-a\delta} \quad (2.15 c)$$

Desde que

$$K = \frac{\rho_2}{\rho_2} = e^{-a\delta} < 1 \quad (2.16)$$

As duas curvas, da qual se especificou as bordas da superfície condutora, são de formas relativamente parecidas mas apresentam um relativo aumento uma em relação a outra, ou seja, sofrem uma rotação por um ângulo δ entre elas.

Para construção de um segundo braço, denominado como Q, as bordas serão definidas pelas equações:

$$\rho_4 = \rho_4' e^{a\phi} = \rho_2' e^{a(\phi-\pi)} \quad (2.17)$$

Onde

$$\rho_4' = \rho_2' e^{-a\pi} \quad (2.17a)$$

$$\rho_5 = \rho_5' e^{a\phi} = \rho_4' e^{a(\phi-\delta)} = \rho_2' e^{a(\phi-\pi-\delta)} \quad (2.18)$$

e

$$\rho_5' = \rho_4' e^{-a\delta} = \rho_2' e^{-a(\pi+\delta)} \quad (2.18a)$$

Os sistemas compostos por dois braços condutores, P e Q, constituem um sistema balanceado, como mostra a figura 2.2. A estrutura de tamanho finito e o comprimento da espiral, medido pela linha central ao longo da curva é dado por L_0 . O conjunto de estruturas pode ser completamente especificado pela rotação do ângulo δ , pelo comprimento do braço L_0 , a razão de espiral $1/a$, e a dimensão do terminal ρ_2' . Contudo, pode ser constatado que a maioria das características podem ser descritas por três parâmetros: L_0 , ρ_2' , e $K = e^{-a\delta}$ como dado por (2.16). Em complemento cada braço é impresso até o seu final, como mostrado pela linha tracejada na figura 2.2, para que haja melhor casamento na terminação. Uma implementação de antena espiral equiangular impressa é mostrada na Fig. 2.3



Figura 2.3 - Antena espiral equiangular impressa (Projeto ARGUS, The OSU Radio Observatory)

2.4. Espiral de Arquimedes

As antenas na forma de espiral de Arquimedes, são um dos tipos mais comuns de antena independente de frequência. Elas tipicamente são utilizadas sobre cavidades com perdas.

A Fig. 2.4, mostra uma antena espiral constituída por dois braços simétricos. A coordenada ρ de um ponto sobre cada uma dos braços é dada por:

- Para o primeiro braço:

$$\rho = a\phi + \rho_1 \quad (2.19)$$

- Para o segundo braço

$$\rho = a(\phi - \pi) + \rho_1 \quad (2.20)$$

onde ρ_1 e ρ_2 são os raios inicial e final da espiral, respectivamente, e a é a constante de proporcionalidade da espira.

A constante de proporcionalidade pode ser obtida pela seguinte relação :

$$a = \frac{s + w}{\pi} \quad (2.21)$$

onde w é a espessura do braço da espiral e s é igual a distância entre as espiras.

Uma espiral pode ser dita auto-complementar quando a $a = w$, ou seja a espessura do braço é igual a distância entre as espiras, e a constante de proporcionalidade será :

$$a = \frac{2.w}{\pi} \quad (2.22)$$

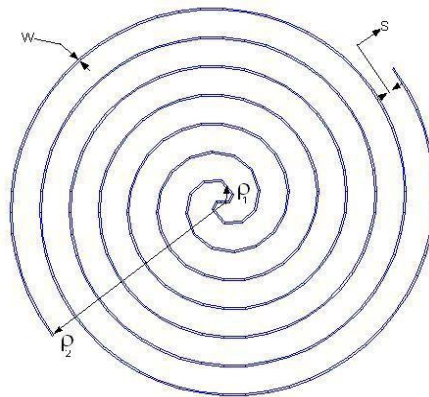


Figura 2.4 - Espiral de Arquimedes com os raios inicial ρ_1 e final ρ_2 , a espessura da espira w e a distância entre as espiras s

A região chamada ativa da antena, é aquela na qual a circunferência da espiral é igual a 1 comprimento de onda. A frequência de operação mais baixa pode ser determinada teoricamente pelo raio final da espiral e é dada por:

$$f_2 = \frac{c}{2\pi\rho} \quad (2.23)$$

onde c é a velocidade da luz. De forma similar a mais alta frequência de operação é dada por :

$$f_1 = \frac{c}{2\pi\rho_1} \quad (2.24)$$

Na prática a frequência mais baixa será maior que a prevista por (2.23), devido aos efeitos das reflexões no final do braço da espiral, essas reflexões podem ser minimizadas pela colocação de cargas resistivas no final de cada braço. Também a frequência mais alta será menor que a prevista por (2.24) devido aos efeitos da região de alimentação[8].

A figura 2.5 mostra uma aplicação prática para este tipo de antena. Neste caso foi utilizada uma antena espiral de Arquimedes com quatro braços, pois ela permite que sejam irradiados múltiplos modos, que permitem diferentes características de radiação. Ela é alimentada com uma linha de transmissão coplanar conectada no centro da espiral. A radiação é apenas unidirecional pela colocação da antena sobreposta a uma cavidade metálica. A banda passante da antena está entre 800 MHz e 2.2 GHz, na qual se pretende cobrir os serviços de rádio GSM900, GSM 1800, GSM1900, DAB, GPS, DECT e UMTS.[9]

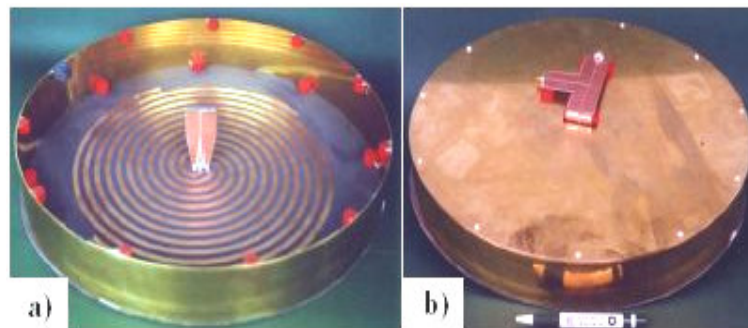


Figura 2.5 - Antena na forma de espiral de Arquimedes montada sobre uma cavidade metálica

2.5.

Antena espiral em fenda

Inicialmente será considerada uma espiral construída por uma fenda, como um complemento de uma espiral construída com condutor ou impressa. Isto é, em uma placa metalizada é feita uma abertura no formato de espiral, idêntica a espiral impressa. Nessas antenas o elemento radiante consiste de fendas no formato de uma espiral, iniciando no centro e fazendo seu caminho no sentido do aumento do raio.

Outra característica semelhante com a espiral impressa é a colocação, em uma porção do braço da espiral, de terminações resistivas, do mesmo tipo das impressas, com a finalidade de minimizar as reflexões e obter uma boa relação Axial[10].

Antenas espirais em fenda, com boas características de radiação podem ser construídas com uma à três voltas. Entretanto, tem-se encontrado bons projetos com espirais de 1.25 à 1.5 volta, com o comprimento total do conjunto igual ou maior que 1 comprimento de onda. A razão de expansão não deve exceder a 10 por volta. Os diagramas de radiação são bidirecionais, com lóbulo simples e laterais(máximo normal ao plano), e deve desvanecer na direção ocupada pela estrutura infinita. As ondas são circularmente polarizadas próximas ao eixo do lóbulo principal sobre a parte da banda utilizada[11].

Geralmente antenas com largura da fenda maiores, exibem diagramas mais planos e uniformes com pequenas variações na largura do feixe com a frequência. Para estruturas simétricas, o diagrama é também simétrico sem variações na estrutura do lóbulo[10].

Para que sejam mantidas as características de simetria, a antena deve ser alimentada por uma linha eletricamente e geometricamente balanceada. Um método para realização de uma linha geometricamente balanceada, é que uma linha coaxial seja fixada em um dos braços da espiral. Para manter a simetria um cabo fictício é colocado em outro braço. Pequenas correntes fluem no cabo de alimentação devido a rápida atenuação dos campos ao longo da espiral.[3]

Se uma linha balanceada não é colocada para alimentar a antena, deve-se utilizar um circuito de acoplamento ou balun, mas isto reduz a banda passante do sistema.

A polarização da onda radiada é controlada pelo comprimento do braço. Para frequências mais baixas, isto é, nas quais o comprimento do braço é pequeno em relação ao seu comprimento de onda, o campo radiado é linearmente polarizado. Com incremento da frequência, as ondas tendem a assumir uma polarização elíptica e eventualmente se tornam circular. Desde que o diagrama seja mantido inalterado dentro da banda de frequência, a troca de polarização pode ser usada como um critério de seleção da frequência de corte inferior. Em alguns casos práticos, esta escolha deve ser no ponto aonde a razão axial seja igual ou menor que 2 para 1, e isto ocorre tipicamente quando o comprimento total do braço atinge 1 comprimento de onda. A figura mostra as variações típicas de razão axial. O campo irradiado fora do eixo tem a polarização circular aproximada sobre uma da banda passante. Além do comprimento do braço da espiral, as características elétricas do alimentador limitam a banda passante[11].

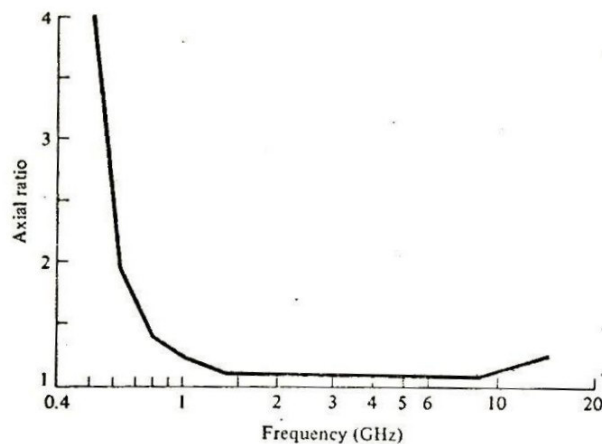


Figura 2.6 - Gráfico da relação axial /frequência de uma antena espiral tipo fenda[3]

A impedância de entrada de uma antena equiangular em fenda balanceada converge rapidamente com o incremento da frequência e tende se estabilizar quando o comprimento do braço for maior que um comprimento de onda.[3]

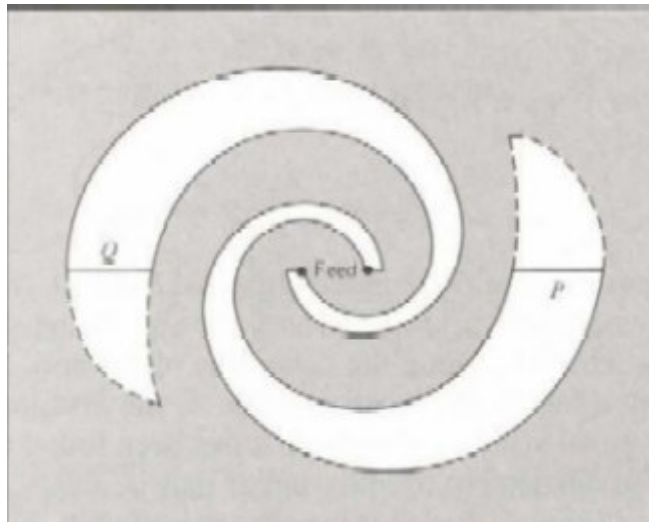


Figura 2.7 - Antena Equiangular em fenda

2.6. Antenas Espirais em Cavidade

As antenas Espirais sobrepostas a uma cavidade com dielétricos, são as mais comumente construídas. A cavidade com perdas é uma boa solução para antenas que precisam de características de banda larga e uma boa relação axial. O dielétrico causa absorção da radiação, reduzindo as reflexões na cavidade. O volume de uma cavidade com perdas e a redução de ganho têm sido as duas maiores desvantagens do uso deste tipo de cavidade.

Nas antenas montadas sobre cavidades condutoras, como a da fig. 2.5, os efeitos da cavidade ressonante estarão presentes, havendo redução da banda de frequências.

A antena da Figura 2.8 é um exemplo prático de uma antena com cavidade. Trata-se de espiral de Arquimedes, e foi projetada para ser utilizada na Banda H/J. Este modelo chamado de 53410, com 1" de diâmetro, é fabricado pela RADTRON. Sua faixa de operação é de 6 à 18 GHz, e a polarização circular pode ser esquerda ou direita. A antena é alimentada através de um balun do tipo Marchand.

Este modelo possui robustez que permite várias utilizações, inclusive aeronáuticas. Foi projetado inicialmente para aplicações em "RWR direction finder", mas devido as dimensões reduzidas de sua cavidade pode ser usado como elemento de um interferômetro ou outras aplicações que utilizem esta faixa de frequência.

O seu VSWR é geralmente melhor que 2:1, e a potência máxima permitida é de 2 watts em média ou 20 watts de pico. A Figura 2.9 mostra a relação axial e a fig. 2.10 mostra os diagramas de radiação desta antena.



Figura 2.8 - Antena espiral, modelo 53410 da RADTROM

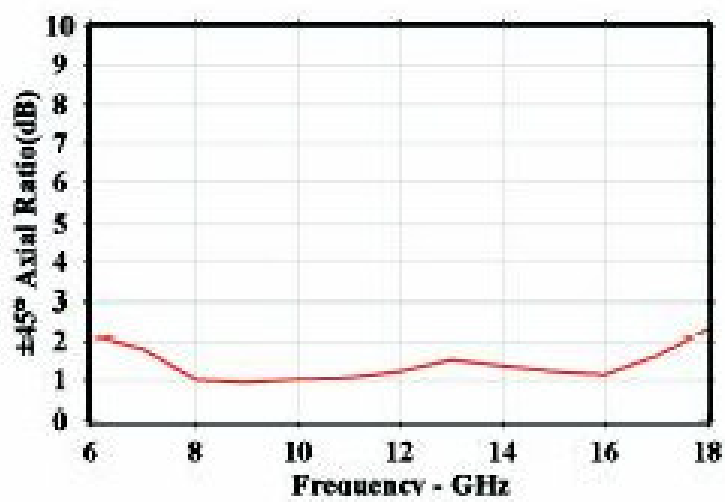


Figura 2.9 – Relação axial da Antena, modelo 53410

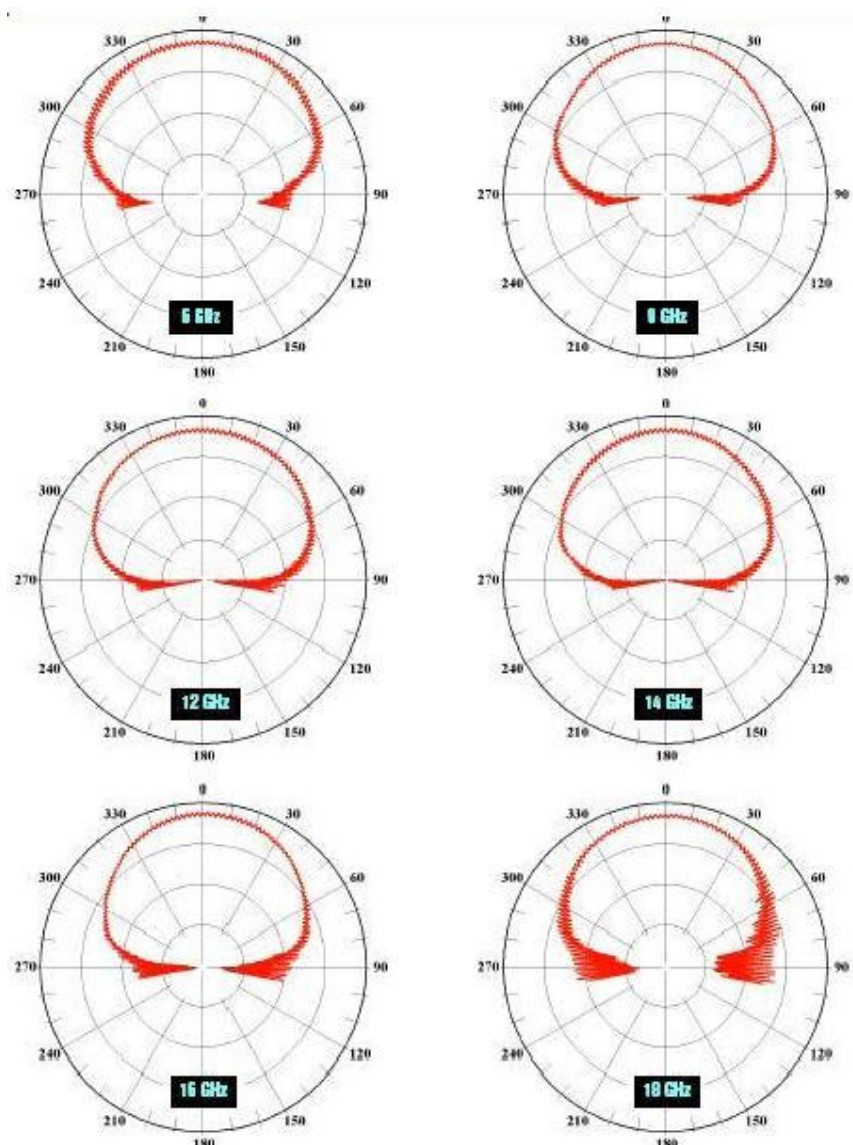


Figura 2.10 - Diagramas de radiação da ANTENA, MODELO 53410

2.7. Outros tipos de Antenas Espirais

A NASA através de seus centros de tecnologia tem desenvolvido estudos para construção de antenas espirais. Será mostrada, a seguir, uma antena em espiral desenvolvida pela NASA Langley Research Center, com objetivo de construir antenas em parcerias com outras empresas. Este é um exemplo de antena desenvolvida por este centro, para fins comerciais.

Trata-se de uma espiral em microstrip, que foi construída usando uma placa dielétrica que possui na sua parte inferior uma placa condutora, formando um plano terra. Uma espiral de forma quadrada com dois ou quatro braços é colocada sobre a placa dielétrica. Cada braço da espiral possui elementos resistivos, que dissipam o excesso de energia não radiado. Os elementos resistivos estão localizados de tal forma que reduzem perdas resistivas em alta frequência mas também servem para impedir reflexões no fim do braço da espiral. Um desenho da antena é mostrado na Fig. 2.11.

Segundo o fabricante esta antena possui alto ganho e uma banda passante larga, é de baixo custo, e pode ser montada em diversas superfícies, inclusive sobre cavidades, podendo ser utilizada em diversas aplicações que exijam grande largura espectral, como detectores de sinais de radar.

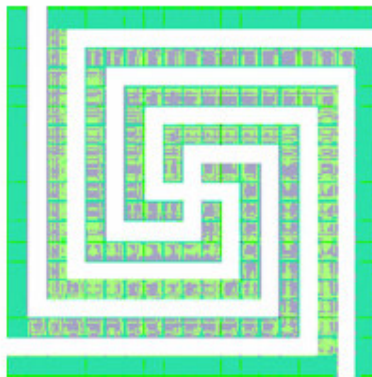


Figura 2.11 - Desenho da antena em espiral quadrada desenvolvida pela NASA