

2

Antenas Independentes da Freqüência e do Tipo Fenda

2.1.

Considerações Gerais

As antenas independentes da freqüência são assim denominadas, pois, teoricamente, não possuem limitação na sua largura de banda de operação. Na prática, entretanto, o desempenho dessas antenas não pode ser aproximadamente constante para todas as freqüências, pois há barreiras físicas que limitam a banda passante.

As antenas independentes da freqüência são primordialmente utilizadas na faixa de cerca de 10 MHz a dezenas de GHz, em diversas aplicações como TV, comunicação ponto-a-ponto, campos para refletores e lentes, etc.

Na modelagem destas antenas, características como impedância, diagrama e polarização são invariantes a uma mudança no tamanho físico da antena, caso mudança semelhante seja realizada na freqüência de operação ou comprimento de onda. Por exemplo, se todas as dimensões físicas são reduzidas por um fator 2, a atuação da antena permanecerá inalterada se a freqüência de operação for aumentada pelo mesmo fator 2. Em outras palavras, o desempenho é invariante se as dimensões elétricas permanecerem inalteradas.

Experiências realizadas mostraram que se a forma de uma antena for completamente determinada por ângulos, seu comportamento terá de ser independente da freqüência.

Assim, baseado em observações experimentais, V. H. Rumsey [1] propôs em 1957, que uma antena que pudesse ser definida apenas em termos de dimensões geométricas angulares, teria seu comportamento eletromagnético independente da freqüência; isto é, uma antena definida apenas em termos de dimensões angulares é aquela que se aplicado um fator de escala à forma geométrica de sua estrutura condutora, esta é transformada em uma estrutura igual à original.

Na prática, existem formas de antenas que satisfazem a equação geral da forma, proposta por Rumsey [1], a fim de se obter características independentes da frequência no diagrama, impedância e polarização.

Formas clássicas de antenas independentes de frequência incluem geometrias equiangulares de espirais planares e cônicas, estudadas por *Dyron* [2],[3] e estruturas log-periódicas desenvolvidas por *DuHamel* e *Isbell* [4],[5].

Na figura 2.1 [25], encontram-se ilustrados dois exemplos de geometrias de antenas independentes de frequência:



Figura 2.1 - Exemplo de antena log-periódica e antena equiangular.

As antenas log-periódicas não são verdadeiramente independentes da frequência, pois não podem ser unicamente determinadas pelo ângulo.

A equação geral de Rumsey [1] é utilizada como conceito unificador, a fim de ligar as principais formas deste tipo antena e será detalhado a seguir.

2.2.

Teoria das Antenas Independentes da Frequência

O tratamento analítico de antenas independentes da frequência apresentado aqui, é equivalente àquele introduzido por Rumsey [1], e simplificado por Elliot [6] para configurações em três dimensões.

Para facilitar o estudo destas antenas, a análise será realizada em coordenadas esféricas: r , θ , ϕ .

Admite-se que a antena tem seus terminais infinitamente próximos à origem e cada um é simetricamente disposto ao longo de $\theta = 0$.

A antena é também formada por um condutor perfeito, e está presente em um meio infinito, isotrópico e homogêneo. Sua superfície ou borda pode então ser descrita por:

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

onde r representa a distância ao longo da superfície ou borda e $F(\theta, \phi)$ é uma função arbitrária de θ e ϕ .

A fim de manter as mesmas dimensões elétricas, se a frequência atual da antena for diminuída por um fator K , sua superfície física deverá ser aumentada pelo mesmo fator K . Assim, a nova superfície é determinada por:

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

onde r' representa a nova superfície e K é um fator de escalonamento.

A congruência entre as duas superfícies pode ser estabelecida através de uma rotação em ϕ . Uma translação não é permitida porque os terminais encontrados nas duas superfícies estão localizados na origem. Uma rotação em θ também é proibida, já que ambos os terminais estão simetricamente dispostos ao longo do eixo $\theta = 0$.

Para a segunda superfície ser congruente à primeira, ela deve então ser modificada por um ângulo C , de maneira que:

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

Este ângulo de rotação C depende do fator K , porém nem o ângulo de rotação C , nem o fator K dependem de θ ou ϕ . A congruência física implica que a primeira superfície possua um comportamento elétrico igual para ambas frequências.

Entretanto, o diagrama de radiação será modificado azimutalmente pelo mesmo ângulo C . Para valores quaisquer de K ($0 \leq K \leq \infty$), o diagrama será modificado de C em ϕ , pois C depende de K , mas sua forma não será alterada, mostrando então, que a impedância e o diagrama serão independentes da frequência.

De maneira a obter uma representação de $F(\theta, \phi)$, ambos os lados de (2.3) são diferenciados com relação à C e à ϕ :

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

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

Como devem ser iguais:

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

Utilizando (2.1), pode-se reescrever a equação (2.6) como:

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

Como o lado esquerdo da equação acima é independente de θ e ϕ , uma solução geral para a superfície $r = F(\theta, \phi)$ pode ser encontrada:

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

onde $a = \frac{1}{K} \frac{dK}{dC}$ (2.8 a) e $f(\theta)$ é uma função arbitrária.

Logo, para uma antena possuir características independentes da frequência, sua superfície deve ser descrita pela equação (2.8), o que pode ser alcançado especificando-se a função $f(\theta)$ ou alguma de suas derivadas.

Alguns exemplos de antenas cujas superfícies são descritas por esta equação serão mostrados nos próximos itens.

2.3.

Antenas Espirais

As antenas espirais do tipo fenda foram originalmente estudadas por E.M.Turner em 1958 [7]; ao mesmo tempo em que ele patenteou a antena espiral filamentar. Entretanto, somente a versão filamentar da antena espiral foi exaustivamente empregada. Com o passar dos anos, diversos artigos sobre antenas espirais foram publicados na literatura.

Das possíveis configurações de espirais, apenas três delas mereceram destaque: a antena espiral logarítmica ou equiangular, a espiral arquimediana ou aritmética, e a antena arquimediana complementar.

O elemento radiador pode consistir de um ou dois condutores para formar uma espiral simples ou dupla. A espiral de dois braços apresenta melhores características que aquelas de um braço apenas, e é geralmente utilizada em frequências altas, na faixa de dezenas de GHz.

Quando excitadas por uma linha de transmissão balanceada, estas configurações exibem características de banda larga em relação à impedância, diagrama de radiação e polarização do campo radiado.

Antenas espirais são conhecidas por sua habilidade em manter uma polarização quase circular (diagramas de radiação com baixa relação axial), além de ganhos e impedâncias de entrada razoavelmente constantes ao longo de uma larga banda.

A polarização da onda radiada é controlada pelo comprimento dos braços. Para frequências muito baixas, de maneira que o comprimento total dos braços seja pequeno com relação ao comprimento de onda, o campo radiado é linearmente polarizado. Com o aumento gradativo da frequência, a onda torna-se elipticamente polarizada e eventualmente atinge a polarização circular.

Não é então surpresa, que exista uma gama enorme de aplicações. Seu uso engloba desde a área militar à utilizações comerciais, incluindo antenas de comunicação de baixo ganho em veículos móveis.

A indústria automobilística também pesquisa no momento este tipo de antena, pois no futuro há o desejo dos carros possuírem antenas que possam operar tanto no modo terrestre como em satélite, já que devido à sua geometria, possibilitam a integração da antena com superfícies já existentes, como a carcaça de um carro, para fins de aerodinâmica, estabilidade e estética, como mostrado na figura 2.2 [26]:



Figura 2.2 – Emprego de antena espiral na indústria automobilística.

Em particular, há um interesse comercial e militar muito grande nas antenas de banda larga que podem ser montadas em veículos de terra, ar ou água.

Existem dois tipos básicos de espirais em uso atualmente. De longe a mais comum é a espiral impressa, formada por duas longas faixas de mesma largura que são envolvidas ao redor de cada uma para formar uma espiral.

O outro tipo de antena é a antena complementar, na qual a largura dos condutores e a largura dos espaçamentos são iguais, e são também funções do ângulo, crescendo com a distância dos terminais. Espirais complementares possuem geralmente uma geometria cônica, e são utilizadas somente em aplicações especializadas, devido a sua forma, tamanho e complexidade.

Para aquela mais típica, as vantagens mencionadas vêm ao preço de tamanho e complexidade. Antenas desse tipo podem ter larguras de banda superiores a 20:1. Entretanto, enquanto os elementos radiadores podem ser planares, a rede de alimentação e as estruturas de balun geralmente não o são; acrescentando peso, profundidade e significativa complexidade ao sistema.

Além disso, porque a antena espiral possui simetria frente-costas e radia bidirecionalmente, uma cavidade absorvente de banda larga é tipicamente utilizada para radiação em apenas uma direção, com um único feixe. Isto acrescenta ainda mais peso e profundidade à antena e ainda reduz o ganho em pelo menos 3dBs.

Enquanto alguns projetos incorporam a alimentação e o balun na cavidade, reduzindo assim a complexidade, a profundidade da cavidade absorvente deve ser da ordem de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda na menor frequência de operação, adicionando peso, custo e profundidade à antena.

Outro artifício bastante utilizado a fim de melhorar a atuação da antena é a adição da perda de condutividade ou carga de condutividade no final do braço de cada espiral, que é usada para reduzir as reflexões no final de cada braço. A pergunta é quanto de perda ou resistência deve ser adicionada, e o que melhor representa a antena prática.

Recentemente o uso de antenas espirais com planos de terra condutores tornou-se popular. Esses tipos de espirais tem maior ganho, mas a relação axial e o diagrama de largura de banda são drasticamente reduzidos se comparadas às espirais alojadas em cavidades resistivas.

2.3.1. Antena Espiral Logarítmica

A forma de uma antena espiral logarítmica, ou antena planar log-espiral, como a mostrada na figura 2.3, é baseada pela curva logarítmica espiral definida por:

$$\rho = \exp(b\phi) \quad (2.9)$$

onde ρ é a distância radial da origem na direção dada pelo ângulo ϕ , e b é a taxa de crescimento da espiral dada por:

$$b = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\phi} = \cot \alpha \quad (2.10)$$

onde α é o ângulo entre a tangente a curva em qualquer ponto, e a reta da origem àquele ponto.

Já que α é constante para uma dada espiral logarítmica, um nome alternativo para este tipo de antena é espiral equiangular.

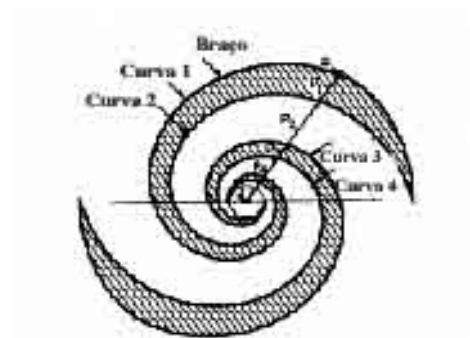


Figura 2.3 – Espiral Equiangular.

A espiral equiangular tem uma configuração geométrica cuja superfície é descrita por ângulos (figura 2.3), o que preenche todos os requisitos para formas que possam ser utilizadas no projeto de antenas independentes de frequência.

Duas curvas log-espirais, uma delas modificada por um ângulo γ , formam as bordas de um dos braços da antena.

Uma estrutura balanceada é encontrada quando um outro braço, idêntico ao primeiro, é colocado por rotação do primeiro de 180° . Como uma curva espiral se estende ao infinito, é necessário truncá-la em um ponto, estabelecendo-se assim um tamanho finito da antena e determinando-se a menor frequência de operação.

Logo, para uma determinada gama de parâmetros, a antena pode ser truncada de forma que $d < \rho < D$, e ainda assim manter sobre uma grande banda as propriedades de estruturas infinitas.

Se a antena é construída de maneira que d seja pequeno em comprimentos de onda, e for excitada por uma linha de transmissão, uma onda de corrente viaja do ponto de alimentação ao longo dos braços. À medida que a energia é radiada, a amplitude da corrente diminui. Depois de um certo ponto, a

presença ou ausência de um condutor faz pouca diferença. Já que o ponto de corrente desprezível ocorre em aproximadamente em um comprimento de onda da fonte, o resultado é uma antena com uma região ativa constante quando medida em comprimentos de onda.

Já que a região ativa varia a uma taxa que depende dos parâmetros da espiral, à medida que a frequência muda, o diagrama de radiação também varia na mesma taxa. As características de radiação são então independentes da frequência desde que os limites de D sejam impostos.

A menor frequência de operação ocorre quando o comprimento total do braço é comparável ao comprimento de onda. Para todas as frequências maiores que esta, o diagrama de radiação, e a impedância, são características independentes da frequência.

Bons diagramas de radiação podem geralmente ser obtidos com apenas uma ou duas voltas de espiral.

2.3.2. Antena Espiral Equiangular Plana Tipo Fenda

A antena tipo fenda é a antena mais prática, pois pode ser alimentada por uma combinação balanceada coaxial, mantendo o equilíbrio do sistema.

Seus diagramas são bidirecionais, com um único lóbulo, cujo máximo encontra-se normal ao plano ao da abertura.

Na figura 2.4 [25] encontra-se um exemplo de um diagrama de radiação para este tipo de antena:

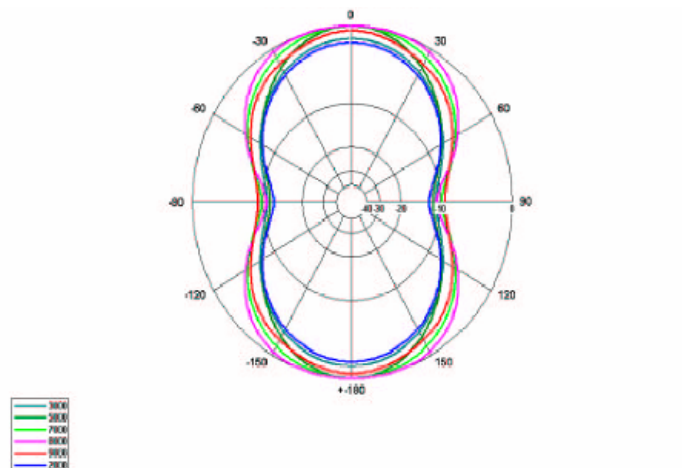


Figura 2.4 – Diagrama de radiação de uma antena espiral.

A onda é polarizada circularmente, perto dos eixos do lóbulo principal, sobre a parte útil da largura de banda.

Em geral, antenas tipo fenda com braços mais largos e/ou aquelas que são mais curvas, exibem diagramas mais uniformes e suaves, com menores

variações na largura do lóbulo. Para estruturas simétricas, o diagrama também é simétrico.

Para manter as características simétricas, a antena deve ser alimentada por uma linha balanceada elétrica e geometricamente. Um método para obter o balanceamento geométrico é conectar o cabo coaxial em um dos braços da espiral, o outro braço é conectado então a um cabo fictício. Não há fluxo de corrente nos cabos de alimentação devido à rápida atenuação dos campos ao longo da espiral. Caso a linha esteja eletricamente desbalanceada, um balun faz-se necessário, o que limitará a largura de banda do sistema.

Para antenas tipo fenda radiando no espaço livre, sem material dielétrico ou cavidade, medidas de eficiência mostraram aproveitamento de 98% para aquelas cujo comprimento do braço era igual ou maior que um comprimento de onda.

2.3.3.

Espiral de Arquimedes

Outro tipo de espiral que também é bastante usado é a espiral de Arquimedes. A espiral de Arquimedes é tipicamente alojada por uma cavidade resistiva a fim de obter larguras de banda maiores ou iguais a 9:1.

A curva que descreve cada braço da espiral é proporcional ao ângulo ϕ , e é descrita pelas seguintes relações:

$$\rho = \rho_0 \phi + \rho_1 \quad (2.11)$$

$$\rho = \rho_0 (\phi - \pi) + \rho_1 \quad (2.11 \text{ a})$$

onde ρ_1 é o raio interno da espiral, como pode ser visualizado pela figura 2.5:

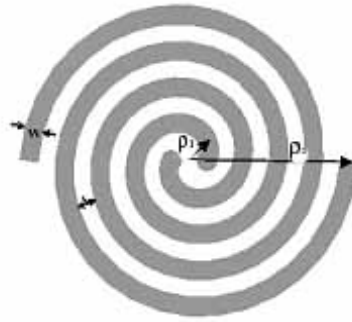


Figura 2.5 – Espiral de Arquimedes.

A antena espiral arquimediana radia de uma região onde a circunferência da espiral equivale a um comprimento de onda. Essa é a chamada região ativa da espiral.

A menor frequência de operação da espiral é determinada teoricamente pelo raio externo e é dada por:

$$f_{\text{inf}} = \frac{c}{2\pi \rho_2} \quad (2.12)$$

onde c é a velocidade da luz. Analogamente, a maior frequência de operação é dada pelo raio interno:

$$f_{\text{sup}} = \frac{c}{2\pi \rho_1} \quad (2.13)$$

Na prática a menor frequência de operação da espiral pode ser maior que aquela dada pela equação (2.12) devido às reflexões que ocorrem ao final da espiral. Estas reflexões podem ser minimizadas com o uso de cargas resistivas ao final de cada braço ou ao se adicionar perda condutora em alguma parte da volta externa de cada braço. Também, o limite de frequência superior pode ser menor que aquele dado pela equação (2.13) devido aos efeitos da região de alimentação.

2.4.

Antenas Tipo Fenda Retangular

A antena tipo fenda retangular consiste num radiador formado por um corte de uma fenda estreita numa superfície metálica, como pode ser mostrado pela figura 2.6:

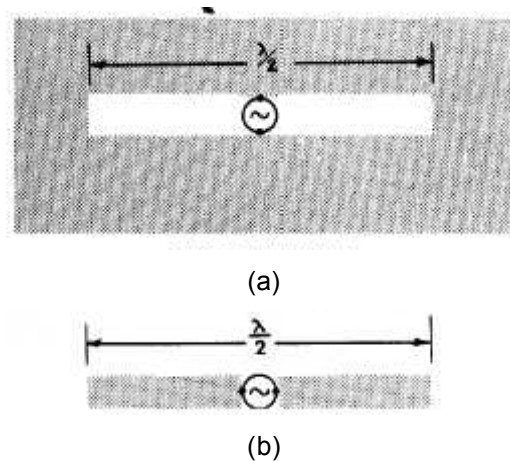


Figura 2.6 - (a) Antena tipo fenda retangular. (b) Dipolo complementar.

Com uma montagem apropriada, uma antena tipo fenda retangular pode ser utilizada em microondas móveis. Dependendo das dimensões da fenda, pode-se conseguir de 10 a 12 dBi de ganho.

Antenas tipo fenda retangular podem ser construídas através de seções de guias de onda, resultando num diagrama omnidirecional com uma polarização horizontal.

A antena é freqüentemente comparada ao dipolo convencional formado por duas faixas planas de metal. As dimensões físicas das faixas são tais que poderiam se ajustar à fenda cortada na superfície metálica. Este tipo de antena é chamado dipolo complementar.

A antena tipo fenda retangular é comparada ao seu dipolo complementar para ilustrar que os diagramas de radiação são os mesmos. Porém, diversas importantes diferenças existem entre a antena tipo fenda e sua antena complementar. Primeiramente, os campos magnéticos e elétricos são trocados. No caso da antena mostrada na figura 2.6 (b), as linhas elétricas são horizontais, enquanto que as linhas magnéticas formam loops no plano vertical.

Com uma antena tipo fenda, figura 2.6 (a), o contrário ocorre, as linhas magnéticas são horizontais e as linhas elétricas são verticais. As linhas elétricas encontram-se através das pequenas dimensões da fenda. Como resultado, a polarização da radiação produzida por uma fenda horizontal é vertical.

Se ao contrário, uma fenda vertical é utilizada, a polarização é horizontal.

Outra diferença entre a antena tipo fenda e o dipolo complementar é que a direção das linhas elétricas e magnéticas varia abruptamente de um lado do metal ao outro; já no caso do dipolo, as linhas elétricas têm a mesma direção enquanto as linhas magnéticas formam loops fechados contínuos.

Quando a energia é aplicada a uma antena tipo fenda, a corrente corre no plano metálico. Esta corrente não se encontra confinada nas bordas da fenda,

mas sim, espalhada no plano, fazendo com que a radiação ocorra nos dois lados do plano. No caso do dipolo complementar, entretanto, a corrente está mais confinada, então uma quantidade maior de corrente é necessária para produzir a mesma potência de saída.