

Antena Duplo-Refletora Omnidirecional ADE Modelada para Cobertura Uniforme

José R. Bergmann

CETUC, PUC-Rio - Av. Marquês de São Vicente 225 - Rio de Janeiro, RJ - CEP 22453-900

Fernando J. S. Moreira

Universidade Federal de Minas Gerais – Depto. Engenharia Eletrônica – Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Belo Horizonte, MG – CEP 31270-901

Resumo — Este trabalho apresenta um procedimento para a modelagem do refletor principal de uma antena duplo-refletora projetada para oferecer uma cobertura omnidirecional em diagrama de irradiação arbitrário no plano de elevação, em princípio. O subrefletor é gerado por uma elipse de eixo deslocado enquanto que o refletor principal é modelado segundo os princípios da Óptica Geométrica. Dois estudos de caso são apresentados, envolvendo cobertura uniforme no plano de elevação. Tais casos são validados através de análises baseadas no Método dos Momentos.

Palavras-chaves — Antenas refletoras, antenas omnidirecionais, modelagem de refletores, cobertura uniforme.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de acesso sem fio banda-larga vêm sendo considerados para oferecimento de conectividade a altas taxas de transmissão. Sistemas como, por exemplo, o WiMax baseiam-se no conceito móvel-celular, onde certa região (célula) é coberta por uma rádio-base. Isso pode ser realizado através de uma antena com cobertura omnidirecional ou de várias com cobertura setorizada. Em microondas e ondas milimétricas, antenas refletoras para cobertura omnidirecional vêm sendo consideradas em diversos estudos por apresentarem características banda larga, em princípio [1-8]. Tais antenas possuem superfícies refletoras circularmente simétricas (corpos-de-revolução) que podem ser geradas por cônicas ou geratrizes modeladas. Junto com as características de irradiação do alimentador, tais arranjos de refletores controlam o diagrama de irradiação (suposto omnidirecional) no plano de elevação da antena.

Vários trabalhos lidaram com a modelagem de refletores omnidirecionais no passado. Antenas omnidirecionais de único refletor foram investigadas, por exemplo, em [5]. Embora mais simples, elas trazem a desvantagem de possuírem refletores com diâmetros muito grandes, quando comparados aos das geometrias de duplo refletores. Em outros trabalhos, foram considerados arranjos de duplo refletores onde o subrefletor possui cáustica virtual no semi-plano azimutal [1-4]. Em princípio, tais arranjos propiciam perdas de retorno elevadas no alimentador [6]. Para reduzir esse problema, e também para aumentar as opções de síntese, em [6-8] são sugeridas geometrias de duplo refletoras

alternativas, entre as quais destaca-se a ADE (Axis-Displaced Ellipse). O presente trabalho complementa os anteriores, investigando a modelagem de configurações ADE para o oferecimento de cobertura uniforme no plano de elevação.

II. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DA ANTENA ADE

As principais características geométricas de antenas ADE são amplamente discutidas em [6-8] e não serão desnecessariamente repetidas aqui. Cabe apenas ressaltar que no presente trabalho apenas o refletor principal é modelado. O subrefletor é gerado por uma cônica (no caso da ADE, uma elipse) de eixo deslocado. Os parâmetros de tal cônica geratriz e , consequentemente, a superfície circularmente simétrica do subrefletor podem ser obtidos através das formulações apresentadas em [6-8].

O foco P da elipse geratriz do subrefletor, correspondente à sua cáustica anular e real, é localizado por

$$\begin{aligned}\rho_P &= 2c \sin \beta, \\ z_P &= 2c \cos \beta,\end{aligned}\tag{1}$$

onde β é o ângulo de inclinação do eixo e $2c$ é a distância inter-focal da elipse geratriz, como ilustrado na Fig. 1 (o outro parâmetro da elipse é sua excentricidade ϵ). Logo, a frente de onda (supostamente) esférica emanada do foco O (localizado na origem) do sistema duplo-refletor, após a reflexão sobre o subrefletor, irá atravessar a cáustica P antes de incidir como uma frente de onda astigmática sobre o refletor principal.

O sistema duplo-refletor é iluminado por um alimentador com centro de fase em O e diagrama de irradiação $G_F(\theta_F)$ circularmente simétrico, onde θ_F é a direção relativa ao eixo de simetria z do raio que parte de O . Após a passagem pelo sistema duplo-refletor, o campo torna-se uma onda esférica TEM na região de campo distante da antena ADE, com diagrama de irradiação circularmente simétrico representado por $G_A(\theta)$, onde θ é a direção de observação relativa ao eixo z . No presente trabalho, a transformação $G_F(\theta_F) \rightarrow G_A(\theta)$ será realizada através da modelagem do refletor principal, e para tal serão utilizados princípios de Óptica Geométrica (GO). A transformação pode ser obtida através de duas estruturas de raios distintas, como ilustrado na Fig. 2. Tais estruturas diferem entre si por apresentarem um refletor principal com cáustica virtual [Fig. 2(a)] ou real [Fig. 2(b)]. Estruturas de raios diferentes darão origem a refletores principais com formas diferentes.

José R. Bergmann, bergmann@cetuc.puc-rio.br, Fernando J. S. Moreira, fernandomoreira@ufmg.br

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, através dos Projetos 470699/2006-0 e 310945/2006-2; FAPEMIG, 4859-6.01/07; CAPES, PROCAD 0377058; e FAPERJ, E-26/171083/03.

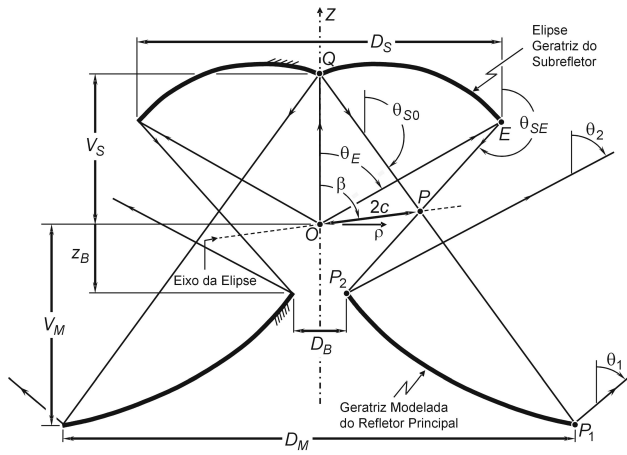


Fig. 1. Parâmetros básicos da antena ADE omnidirecional com refletor principal modelado.

III. MODELAGEM DO REFLETOR PRINCIPAL

Uma vez obtido o subrefletor a partir das formulações em [6-8] e definidos os diagramas $G_F(\theta_F)$ e $G_A(\theta)$, partimos para a modelagem do refletor principal que irá realizar a transformação $G_F(\theta_F) \rightarrow G_A(\theta)$ desejada, segundo os princípios da GO. O procedimento adotado é baseado em [9], originalmente desenvolvido para a modelagem de refletores *offset*, mas que é aqui adaptado para uma superfície de revolução.

Seguindo [9], seja o refletor principal (ou seja, sua geratriz) representado por uma função real $L(\eta_S)$, tal que um ponto em sua superfície é localizado pelo vetor posição

$$\vec{r}_M(\theta_S) = [\rho_P + 2\eta_S e^{L(\eta_S)}] \hat{\rho} + [z_P + (\eta_S^2 - 1)e^{L(\eta_S)}] \hat{z}, \quad (2)$$

onde as coordenadas ρ_P e z_P do foco P são dadas por (1) e

$$\eta_S = \cot\left(\frac{\theta_S}{2}\right) = \frac{d_2 + 2 - c_2\eta_F}{c_2 + d_2\eta_F}, \quad (3)$$

representa a direção θ_S do raio que parte do subrefletor para o refletor principal (passando antes por P), conforme ilustrado na Fig. 2. A relação (3) representa o mapeamento entre as direções θ_F e θ_S e pode ser obtida a partir da equação polar da elipse geratriz do subrefletor. Os parâmetros de (3) são [9]

$$c_2 = \varepsilon \sin \beta, \quad (4)$$

$$d_2 = \varepsilon \cos \beta - 1, \quad (5)$$

onde

$$\eta_F = \cot\left(\frac{\theta_F}{2}\right), \quad (6)$$

representa a direção θ_F do raio que parte do alimentador (ou seja, do foco O), como indicado na Fig. 2.

Da lei de Snell para a reflexão (ou seja, do princípio de Fermat), a relação entre a direção θ_S do raio incidente sobre o refletor principal e a direção θ do raio que parte em direção à região de campo distante da antena é dada por [9]:

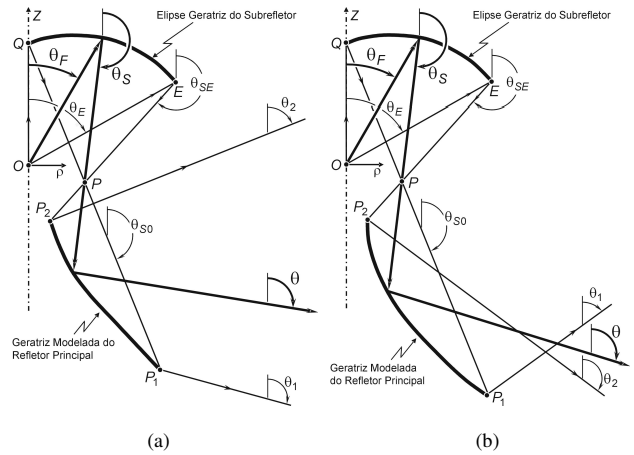


Fig. 2. Estrutura de raios da antena ADE omnidirecional com refletor principal modelado com cáustica (a) virtual e (b) real.

$$\frac{\partial L(\eta_S)}{\partial \eta_S} = \frac{2}{\eta - \eta_S}, \quad (7)$$

onde

$$\eta = \cot\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (8)$$

Ao comparar (7) com a formulação em [9] o leitor observará uma diferença por um fator 2. Isto se deve ao fato da presente geometria ser um corpo-de-revolução e, consequentemente, não variar com a coordenada cilíndrica ϕ .

A síntese do refletor principal consiste na solução numérica de (7) para a determinação de $L(\eta_S)$ e, consequentemente, da superfície refletora através de (2). Neste trabalho, a integração de (7) é realizada através da técnica de Runge-Kutta de quarta ordem [10], em função de $\theta_F \in [0, \theta_E]$ e com o auxílio de (3). Para tal, em (7) falta relacionar a direção θ (representada por η) com θ_F . Isto é feito através do conceito de conservação de energia.

De acordo com os princípios da GO, a relação entre θ e θ_F pode ser obtida impondo-se a conservação da energia ao longo do tubo de raios que parte de O e, após as duas reflexões, parte em direção à região de campo distante da antena. Tal fenômeno pode ser equacionado como:

$$\int_0^{\theta_F} G_F(\theta'_F) \sin \theta'_F d\theta'_F = N \int_{\theta_1}^{\theta} G_A(\theta') \sin \theta' d\theta', \quad (9)$$

onde o fator de normalização N é dado por

$$N = \int_0^{\theta_E} G_F(\theta'_F) \sin \theta'_F d\theta'_F / \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_A(\theta') \sin \theta' d\theta', \quad (10)$$

$G_F(\theta_F)$ é o diagrama de irradiação circularmente simétrico do alimentador, $G_A(\theta)$ é o diagrama de irradiação circularmente simétrico desejado para a antena ADE, e $\theta = \theta_1$ e θ_2 são as direções na região de campo distante correspondentes a $\theta_F = 0$ e θ_E , respectivamente. Para as estruturas de raios ilustradas nas Figs. 2(a) e (b), $\theta_1 > \theta_2$ e $\theta_1 < \theta_2$, respectivamente.

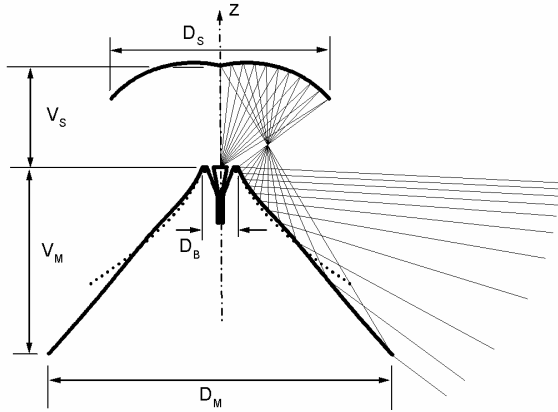


Fig. 3. Geratrizes do subrefletor e do refletor principal da antena ADE do Caso I. Em linha tracejada a geratriz do refletor principal clássico.

Observe que, segundo a GO, infinitas superfícies similares podem ser soluções de (7). Para especificar uma dentre as infinitas possibilidades, um dos pontos da superfície (ou melhor, de sua geratriz) tem que ser especificado. Neste trabalho optou-se por especificar *a priori* as coordenadas do ponto P_2 (ver Figs. 1 e 2).

IV. CASOS DE ESTUDO

Para ilustrar o processo de síntese apresentado na Seção III, dois casos de estudo serão investigados, abrangendo as duas estruturas de raios ilustradas na Fig. 2. Tais investigações visam também explorar o potencial destas configurações ADE como antenas para operação em rádio-bases. Para tal, os refletores principais nos dois casos serão modelados para a realização de um diagrama de irradiação com perfil cossecante ao quadrado, visando cobertura uniforme [11]. Nestes casos:

$$G_A(\theta) = G_O \csc^2(\theta - \pi/2), \quad \text{para } \theta \in [\theta_1, \theta_2], \quad (11)$$

onde G_O é um fator de normalização e os ângulos θ_1 e θ_2 devem ser especificados conforme as restrições de interferência eletromagnética e dimensões desejadas para as antenas. Neste trabalho, $\theta_1 = 135^\circ$ e $\theta_2 = 95^\circ$ para o Caso I (ou seja, refletor principal com cáustica virtual) e $\theta_1 = 91^\circ$ e $\theta_2 = 135^\circ$ para o Caso II (cáustica real).

Nos dois casos, o processo de síntese é iniciado através da escolha de uma configuração ADE omnidirecional clássica (ou seja, com todos os refletores gerados por cônicas). Tal antena é obtida da formulação apresentada em [8] com os seguintes parâmetros: $\gamma = 102^\circ$, $D_M = 17,56\lambda$, $D_S = 14,71\lambda$, $V_S = 7,636\lambda$, $D_B = 2,4\lambda$, $z_B = 0$, $\theta_E = 55^\circ$ e $W_A = 7\lambda$, onde λ é o comprimento de onda. Tais parâmetros são amplamente discutidos em [8] e alguns estão ilustrados nas Figs. 3 e 5. A antena resultante, que inicia a síntese de ambos os casos de estudo, é ilustrada nas Figs. 3 e 5 (com refletor principal desenhado em linha tracejada).

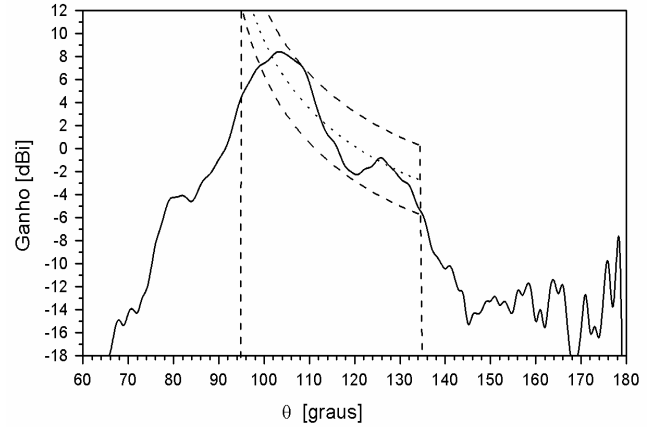


Fig. 4. Diagrama de irradiação da antena ADE modelada do Caso I. Em linhas tracejadas, o perfil cossecante ao quadrado e seus limites de ± 3 dB.

O alimentador, que é o mesmo nos dois casos, é uma corneta coaxial TEM cuja geometria e características de irradiação são amplamente discutidas em [5]. No processo de síntese, especificamente em (9) e (10), seu diagrama de irradiação é modelado como:

$$G_F(\theta_F) = G_{FO} \left[\frac{J_0(kr_i \sin \theta_F) - J_0(kr_e \sin \theta_F)}{\sin \theta_F} \right]^2, \quad \theta_F \leq \pi/2, \quad (12)$$

onde G_{FO} é um fator de normalização e $k = 2\pi/\lambda$. A equação (12) representa a radiação por uma abertura coaxial, com raios interno e externo r_i e r_e , respectivamente, montada sobre um plano condutor elétrico perfeito. Neste trabalho, $r_i = 0,45\lambda$ e $r_e = 0,9\lambda$. Como as dimensões elétricas da abertura da corneta são muito pequenas, seu centro de fase (que deve coincidir com o foco O) encontra-se praticamente sobre o plano da abertura.

Como já mencionado, o primeiro caso de estudo (Caso I) possui refletor principal com cáustica virtual, como aquele ilustrado na Fig. 2(a). Para tal, uma vez definido o subrefletor da geometria clássica inicial, o processo da síntese baseada na GO foi conduzido com $\theta_2 = 95^\circ$ e $\theta_1 = 135^\circ$. A geometria resultante é ilustrada na Fig. 3, com o refletor principal modelado desenhado com linha sólida, junto com alguns raios para a visualização da estrutura de raios divergentes, correspondentes à cáustica virtual. O diagrama de irradiação da antena, calculado através do Método dos Momentos (MoM) é apresentado na Fig. 4, junto com o perfil cossecante ao quadrado (11). É importante ressaltar que a análise baseada no MoM considerou a estrutura completa da corneta e, consequentemente, todos os mecanismos de acoplamento eletromagnético entre corneta e refletores. As principais dimensões da antena são listadas na Tabela I junto com aquelas da geometria clássica inicial. Em relação a geometria clássica, pode-se observar o aumento considerável das dimensões do refletor principal modelado (Fig. 3), o que aparentemente é a principal desvantagem desta estrutura.

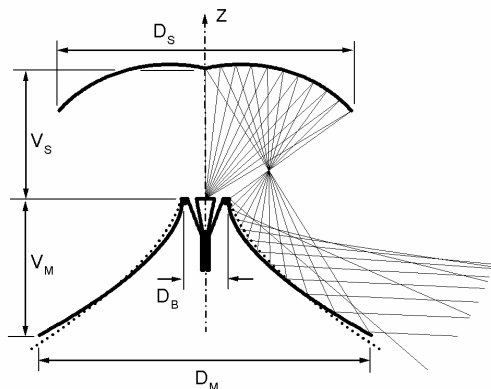


Fig. 5. Geratrizes do subrefletor e do refletor principal da antena ADE do Caso II. Em linha tracejada a geratriz do refletor principal clássico.

O segundo caso de estudo (Caso II) partiu da mesma geometria clássica que iniciou o Caso I; ou seja, o subrefletor é o mesmo do Caso I (o alimentador também). A diferença é que no Caso II o refletor principal foi modelado para apresentar uma estrutura de raios com cáustica real, semelhante àquela ilustrada na Fig. 2(b). Para tal, o processo de síntese óptica foi conduzido com $\theta_1 = 91^\circ$ e $\theta_2 = 135^\circ$. A geometria do sistema duplo-refletor do Caso II é apresentada na Fig. 5, e o diagrama de irradiação correspondente, obtido de análise baseada no MoM, é mostrado na Fig. 6. As principais dimensões da antena são listadas na Tabela I. Em relação ao Caso I (Fig. 3), observe como o refletor principal do Caso II (Fig. 5) apresenta dimensões consideravelmente reduzidas.

TABELA I. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS ANTENAS

Parâmetros	Clássica	Caso I	Caso II
$D_S(\lambda)$	14,71	14,71	14,71
$V_S(\lambda)$	7,636	7,636	7,636
θ_E	55°	55°	55°
$z_B(\lambda)$	0	0	0
$D_M(\lambda)$	17,56	33,08	14,02
$V_M(\lambda)$	8,39	11,81	6,71

V. CONCLUSÕES

Um processo de síntese baseado nos princípios da Óptica Geométrica foi apresentado para a modelagem do refletor principal de antenas com dois refletores do tipo ADE. A configuração duplo-refletora circularmente simétrica é constituída por um subrefletor, gerado por uma elipse de eixo deslocado, e por um refletor principal, cuja geratriz é modelada para a realização de um diagrama de irradiação com perfil arbitrário no plano de elevação da antena. O desempenho do processo de modelagem do refletor principal foi demonstrado através da investigação de dois casos de estudo.

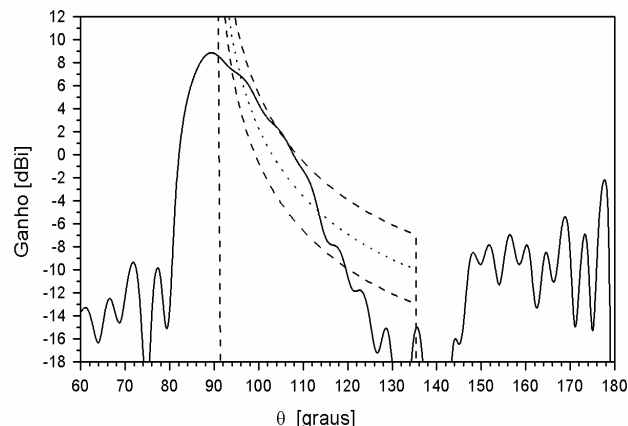


Fig. 6. Diagrama de irradiação da antena ADE modelada do Caso II. Em linhas tracejadas, o perfil cossecante ao quadrado e seus limites de ± 3 dB.

Cada estudo de caso correspondeu a uma estrutura de raios distinta: uma onde o refletor principal modelado possuía cáustica virtual (Caso I) e outro onde a cáustica do refletor era real (Caso II). Ambos os casos foram sintetizados para o oferecimento de cobertura uniforme com diagrama do tipo cossecante ao quadrado no plano de elevação da antena. Os dois casos foram analisados pela técnica do Método dos Momentos, de forma a verificar o desempenho da síntese baseada nas aproximações da Óptica Geométrica. Verificou-se que a síntese do Caso II gerou uma configuração duplo-refletora mais compacta que a do Caso I. Em ambos os casos, a cobertura oferecida pelo diagrama foi satisfatória.

REFERÊNCIAS

- [1] A. P. Norris and W. D. Waddoup, "A millimetric wave omnidirectional antenna with prescribed elevation shaping," in Proc. ICAP—4th Int. Conf. Antennas and Propagation, 1985, pp. 141–145.
- [2] M. Orefice and P. Pirinoli, "Dual reflector antenna with narrow broadside beam for omnidirectional coverage," Electron. Lett., vol. 29, no. 25, pp. 2158–2159, Dec. 9, 1993.
- [3] P. Besso, R. Bills, P. Brachet, and R. Vallauri, "A millimetric wave omnidirectional antenna with cosecant squared elevation pattern," in Proc. ICAP—10th Int. Conf. Antennas Propagat., pp. 448–451, 1997.
- [4] A. G. Pino, A. M. A. Acuña, and J. O. R. Lopez, "An omnidirectional dual-shaped reflector antenna," Microw. Opt. Tech. Lett., vol. 27, no. 5, pp. 371–374, Dec. 5, 2000.
- [5] J. R. Bergmann, F. J. V. Hasselmann, and M. G. C. Branco, "A single-reflector design for omnidirectional coverage," Microwave Opt. Tech. Lett., vol. 24, no. 6, pp. 426–429, March 20, 2000.
- [6] J. R. Bergmann and F. J. S. Moreira, "An omnidirectional ADE reflector antenna," Microwave Opt. Tech. Lett., vol. 40, no. 3, pp. 250–254, Feb. 5, 2004.
- [7] F. J. S. Moreira and J. R. Bergmann, "Classical axis-displaced dual-reflector antennas for omnidirectional coverage," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 53, no. 9, pp. 2799–2808, Sep. 2005.
- [8] F. J. S. Moreira and J. R. Bergmann, "Axis-Displaced Dual-Reflector Antennas for Omnidirectional Coverage with Arbitrary Main-Beam Direction in the Elevation Plane," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 54, no. 10, pp. 2854–2861, Oct. 2006.
- [9] B. S. Westcott, F. A. Stevens, F. Brickell, "GO synthesis of offset dual reflectors," IEE Proc., Vol. 128, Pt. H, no. 1, pp. 11–18, Feb. 1981.
- [10] F. B. Hildebrand, *Introduction to Numerical Analysis*, 2nd ed. NY: Dover Pub., Inc., 1987.
- [11] S. Silver (ed.), *Microwave Antenna Theory and Design*, McGraw-Hill, NY, 1949.