

一种寻求卡塞格伦天线最佳口径分布的方法

林岩

(桂林空军学院, 广西 桂林 541003)

摘要: 寻求到一种确定卡塞格伦天线最佳口径分布的方法。通过卡塞格伦天线的旁瓣电平与相同口径分布的抛物面天线的旁瓣电平的对比说明了寻求卡塞格伦天线最佳口径分布的必要性;用含有旁瓣电平和口径利用效率约束条件的方程组确定卡塞格伦天线最佳口径分布;列举了求卡式天线最佳口径场分布法的可能的其它应用。研究表明,与一般口径场分布相比,该最佳口径场分布有较佳的旁瓣电平和口径利用效率,也就是说,相同旁瓣电平时口径利用效率高或相同口径利用效率时旁瓣电平低。

关键词: 雷达工程; 口径分布; 低旁瓣电平; 高口径利用效率; 卡塞格伦天线

中图分类号: TN8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2010)01-0023-04

A Method of Seeking Optimum Aperture Distribution of Cassegrain Reflector Antennas

LIN Yan

(Guilin Air Force Academy, Guilin 541003, Guangxi, China)

Abstract: A method of determining optimum aperture distributions of Cassegrain reflector antennas was presented. The necessity of seeking optimum aperture distribution of Cassegrain reflector antennas was illustrated by comparison of the sidelobe levels between Cassegrain reflector antennas and parabolic reflector antennas of the same aperture distributions as that of the former; optimum aperture distributions of Cassegrain reflector antennas is determined by means of simultaneous equations of constraint conditions of sidelobe level and aperture efficiency; other possible applications of the method of determining optimum aperture distributions of Cassegrain reflector antennas were enumerated. The investigated result demonstrates that compared with common aperture distribution, the optimum aperture distribution has better sidelobe level and aperture efficiency, i. e. the optimum aperture distribution has higher aperture efficiency at the same sidelobe level or lower sidelobe level at the same aperture efficiency.

Key words: radar engineering; aperture distribution; low sidelobe level; high aperture efficiency; Cassegrain reflector antenna

0 引言

最流行的双反射面天线是轴对称的卡塞格伦反射器天线,由于它的副反射面的遮挡,卡塞格伦天线的旁瓣电平比相同口径分布(对应被副反射面遮挡的部分除外)的抛物面天线的旁瓣电平高出很多。然而,在包括军事用途的很多用途当中天线的旁瓣

电平受到严格限制。降低旁瓣电平将导致口径利用效率的下降。因此,在保证旁瓣电平不高于某设计值的前提下,尽量提高口径利用效率是卡塞格伦天线的一个有实际意义的课题。

文献[1](用在反射面上涂覆一薄层吸波材料的方法)和文献[2](用对反射面进行修正赋形的方法)提出了改变卡塞格伦天线的主反射面口径场分

布的2种方法,条件是要先求出所需的口径场分布。因此,用文献[1-2]中的方法可解决上述那个“有实际意义的课题”。当然,条件是要先求出所需的口径场分布。以下就解决这一问题:寻求一种确定卡塞格伦天线最佳口径场分布的方法,使得该口径场分布有最佳的旁瓣电平和口径利用效率(即与一般口径场分布相比,相同旁瓣电平时口径利用效率最高或相同口径利用效率时旁瓣电平最低)。以下把该方法简称为“求卡式天线最佳口径场分布法”。

1 理论

在本文中,空间中或口径面上的点按需要有时用柱坐标表示,有时用球坐标表示。如图1,在柱坐标系中表示成 $S(\rho, \phi, Z)$,在球坐标系中表示成 $F(r, \Phi, \Theta)$.

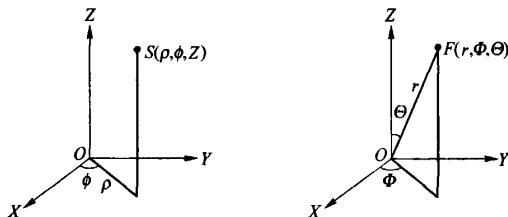


图1 柱坐标和球坐标参数关系图

Fig. 1 Relation of the parameters between cylinder coordinate and spherical coordinate

1.1 卡塞格伦天线的旁瓣电平与相同口径分布(对应被副反射面遮挡的部分除外)的抛物面天线的旁瓣电平的对比

卡塞格伦天线和抛物面天线的抛物面口径场都是同相场。如果它们的圆形口径(口径半径为 R ,口径面在 $z=0$ 平面)的同相口径场主极化分量 $E_r(\rho)$ 沿径向 ρ 的分布可表示为

$$E_r(\rho) = \begin{cases} C + (1 - C) \left[1 - \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \right]^P, & R_1 \leq \rho \leq R; \\ 0, & 0 \leq \rho < R_1, \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_1 表示抛物面口径场被副反射面遮挡部分的半径,对抛物面天线而言, $R_1 = 0$;表1列出了当 $R_1 = 0, 0.1R$,边缘照射值 $C = 0.316, 0.100$;渐削参数 $P = 1, 2$ 时的半功率束宽HP、旁瓣电平SLL、口径利用效率 η 。表1的特性来源于文献[2]的(7-55)式(口径场绕射公式)、(7-71)式(口径利用效率公式),并得到文献[3]的表7-1的验证。

从表1可看出:口径遮挡使得半功率束宽HP变窄、口径利用效率 η 降低、旁瓣电平SLL上升,其中旁瓣电平SLL上升幅度较大。所以,优化卡塞格伦天线的抛物面口径场,使其在保证必要的口径利用效率的前提下,尽量降低其旁瓣电平,是很有必要的。

表1 无遮挡与有遮挡的渐削圆形口径分布的特性比较

Tab. 1 Comparison of the characteristics of tapered distribution of circular aperture between no-offset and offset illumination at different ρ and C

C_{dB}	C	$\rho = 1$						$\rho = 2$					
		HP/rad		SLL/dB		口径效率 η		HP/rad		SLL/dB		口径效率 η	
		$R_1 = 0$	$R_1 = 0.1R$	$R_1 = 0$	$R_1 = 0.1R$	$R_1 = 0$	$R_1 = 0.1R$	$R_1 = 0$	$R_1 = 0.1R$	$R_1 = 0$	$R_1 = 0.1R$	$R_1 = 0$	$R_1 = 0.1R$
-10	0.316	1.14 $\lambda/2R$	1.13 $\lambda/2R$	-22.3	-20.5	0.917	0.909	1.17 $\lambda/2R$	1.15 $\lambda/2R$	-27.0	-23.8	0.877	0.871
		1.21 $\lambda/2R$	1.20 $\lambda/2R$	-24.3	-21.6	0.817	0.810	1.32 $\lambda/2R$	1.30 $\lambda/2R$	-34.7	-27.2	0.690	0.685

1.2 求卡式天线最佳口径场分布法

首先设定圆形口径,口径半径为 R ,口径面在 $z=0$ 平面,的同相口径场主极化分量(y 方向) $E(\rho)$ 沿径向 ρ 的分布可表示为

$$E(\rho, A_1, A_2, A_3, A_4) = \begin{cases} A_4 \left(\frac{\rho}{R} \right)^4 + A_3 \left(\frac{\rho}{R} \right)^3 + A_2 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 + A_1 \frac{\rho}{R} + 1, & R_1 \leq \rho \leq R; \\ 0, & 0 \leq \rho < R_1, \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_1 表示抛物面口径场被副反射面遮挡部分的

半径; A_1, A_2, A_3, A_4 为待定系数。然后,由口径场绕射公式推导出远区辐射场表达式(3)以及旁瓣电平表达式(4),由口径利用效率公式推导出口径利用效率表达式(5):

$$E_F(\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) = j e^{-\frac{1+\cos(\Theta)}{2\lambda}} \int_0^{2\pi} \int_0^R E(\rho, A_1, A_2, A_3, A_4) \cdot e^{jk\rho \sin(\Theta) \cos(\Phi-\phi)} \rho d\rho d\phi, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} SLL(\Theta_1, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) &= 20 \lg |E_F(\Theta_1, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4)| / \\ &E_F(0, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\eta(A_1, A_2, A_3, A_4) = \frac{\left(\int_0^{2\pi} \int_0^R E(\rho, A_1, A_2, A_3, A_4) \rho d\rho d\phi \right)^2}{\pi R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^R (|E(\rho, A_1, A_2, A_3, A_4)|)^2 \rho d\rho d\phi}, \quad (5)$$

式中: λ 表示波长; F 表示远区场点; (r, Φ, Θ) 表示远区场点 F 的球坐标; (ρ, ϕ, σ) 表示口径面上的点的柱坐标; Θ_1 表示第一旁瓣峰值对应点的 Θ 值。

接着, 按照对口径利用效率和旁瓣电平的要求, 列出可求出口径场 $E(\rho)$ 中的系数 A_1, A_2, A_3, A_4 的方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(A_1, A_2, A_3, A_4) \geq \eta_0, \\ \Theta_{01} < \Theta_1 < \Theta_2 < \Theta_3 < \Theta_{02}, \\ SLL(\Theta_1, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) \leq SLL_0, \\ SLL(\Theta_2, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) \leq SLL_0, \\ SLL(\Theta_3, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) \leq SLL_0, \\ SLL(\Theta_1 - \Delta\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) < \\ \quad SLL(\Theta_1, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) > \\ \quad SLL(\Theta_1 + \Delta\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4), \\ SLL(\Theta_2 - \Delta\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) < \\ \quad SLL(\Theta_2, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) > \\ \quad SLL(\Theta_2 + \Delta\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4), \\ SLL(\Theta_3 - \Delta\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) < \\ \quad SLL(\Theta_3, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4) > \\ \quad SLL(\Theta_3 + \Delta\Theta, \Phi, A_1, A_2, A_3, A_4), \\ 0 \leq \frac{E(R, A_1, A_2, A_3, A_4)}{E(R_1, A_1, A_2, A_3, A_4)} \leq E_0, \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ 分别表示第 1, 2, 3 旁瓣峰值对应点的 Θ 值, 3 个含有 $\Delta\Theta$ 的式子是为了确定 $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$, 分别为第 1, 2, 3 旁瓣峰值对应点, $\Delta\Theta$ 可取 $0.058 \frac{\lambda}{2R}$ 或更小一些, Θ_{01}, Θ_{02} 用于限定 $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ 的取值范围; η_0, SLL_0, E_0 分别表示口径利用效率的下限、旁瓣电平的上限、边缘照射的上限; $\eta_0, SLL_0, E_0, \Theta_{01}, \Theta_{02}$ 的取值由设计指标和经验确定(参见 1.3), 它们的取值往往还需根据方程组(6)的求解结果作适当调整, 起初 η_0 值可取偏高而 SLL_0 值可取偏低, 这时方程组(6)会无解, 然后对 η_0, SLL_0 的要求渐渐降低(η_0 渐渐变小、 SLL_0 渐渐变高), 直到方程组(6)有解(最佳解)为止。

最后, 取定合适的 $A_1, A_2, A_3, A_4, \Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ 初始值, E_0, η_0 和 SLL_0 之值(参见 1.3), 并以此作为起点进行智能搜索、试探, 求解方程组(6). 目前, 有许多优秀的数学计算工具软件可进行这样的计算, 数

学计算工具软件“Mathcad2001”的“Given/Find”就可进行这样的计算。

方程组(6)对其它旁瓣的旁瓣电平并无限制, 在实际运用方程组(6)寻求最佳口径场分布时, 可根据实际情况增加对其它旁瓣的旁瓣电平的限制。

反复计算的经验表明, $A_1, A_2, A_3, A_4, \Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ 初始值取得是否合适, 直接关系到方程组(6)会不会收敛于一个有实际意义的解, 这个可参见 1.3.

1.3 “求卡式天线最佳口径场分布法”的求解实例

例 假设在 2.2 的(6)式中的设计指标 $\eta_0 = 0.685, R = 1 \text{ m}, R_1 = 0.1R, \lambda = 0.03 \text{ m}$, 求在此条件下具有最低 SLL_0 的解。

步骤 1 确定 $A_1, A_2, A_3, A_4, \Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ 初始值和 Θ_{01}, Θ_{02} 之值此与表 1((1)式的特性)中 $\rho = 2, C = 0.100, R_1 = 0.1R$ 时的值相同, 这时就取定 $A_n (n = 1, 2, 3, 4)$ 的初始值为(1)式中 $\rho = 2, C = 0.100, R_1 = 0.1R$ 时的 $\rho_n (n = 1, 2, 3, 4)$ 的系数:

$$A_1 = 0, A_2 = -1.8, A_3 = 0, A_4 = 0.9. \quad (7)$$

当 $R = 1 \text{ m}, \lambda = 0.03 \text{ m}, \rho = 2, C = 0.100, R_1 = 0.1R$ 时, (1) 式对应的远区辐射场方向图如图 2 所示。

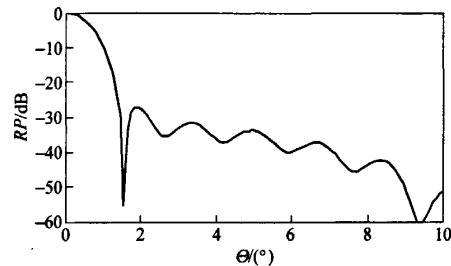


图 2 当 $R = 1 \text{ m}, \lambda = 0.03 \text{ m}, \rho = 2, C = 0.100, R_1 = 0.1R$ 时(1)式对应的远区

Fig. 2 Calculated radiation pattern corresponding to Eq. (1)
at $R = 1 \text{ m}, \lambda = 0.03 \text{ m}, \rho = 2, C = 0.100, R_1 = 0.1R$

图 2 中, 横坐标表示场点偏离口径面垂直方向的角度, 单位: ($^\circ$); 纵坐标 RP 表示场点的相对功率, 单位: dB.

参照图 2, $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ 初始值取值为图 2 的第 1, 2, 3 旁瓣峰值对应点的 Θ 值, Θ_{01}, Θ_{02} 取值为图 2 的第 1, 2, 3 旁瓣峰值对应点的 Θ 值的取值范围, 这样取值

$$\Theta_1 = 1.860, \Theta_2 = 3.270, \Theta_3 = 4.890, \\ \Theta_{01} = \Theta_1 - 0.5^\circ, \Theta_{02} = \Theta_3 + 0.5^\circ. \quad (8)$$

步骤 2 确定 SLL_0, E_0 之值, 并试探求解方程组(6), 最后验证计算所得的解相应的的口径场分布的口径利用效率和旁瓣电平。

由表 1, 当口径场分布(2)式中的系数取为(7)

式时,口径场分布(2)式的旁瓣电平为-27.2 dB,口径边缘照射为0.100。参照此2值,SLL₀比此旁瓣电平-27.2 dB稍低一些,E₀比此0.100稍高一些。当SLL₀=20lg0.023=-32.765 dB,E₀=0.15时,求解方程组(6),无解;当SLL₀=20lg0.025=-32.041 dB,E₀=0.15时,求解方程组(6),得解:

$$A_1 = -2.651, A_2 = 4.675, A_3 = -4.997, A_4 = 2.03. \quad (9)$$

横坐标表示口径面上的点离口径中心的距离,单位:m;纵坐标RE(ρ)表示口径面上的点的相对场强,RE(ρ) = $\frac{E(\rho, A_1, A_2, A_3, A_4)}{E(R_1, A_1, A_2, A_3, A_4)}$ 。

横坐标表示场点偏离口径面垂直方向的角度,单位:(°);纵坐标RP表示场点的相对功率,单位:dB。

解(9)式对应的口径场分布(画于图3)的口径利用效率为0.685、旁瓣电平为-32.0 dB,与表1中 $\rho=2, C=0.100, R_1=0.1R$ 时的口径特性相比, η 相同,SLL低4.8 dB,分别满足 η_0 和SLL₀的约束。(9)式对应的口径场分布的远区辐射场方向图如图4所示。

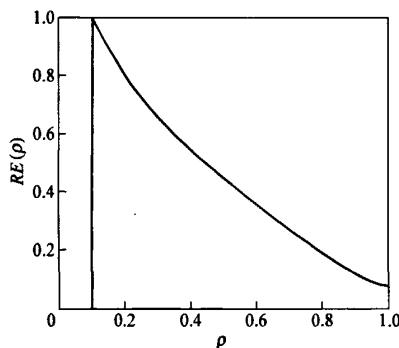


图3 (9)式对应的口径场分布

Fig. 3 Aperture distribution corresponding to eq. (9)

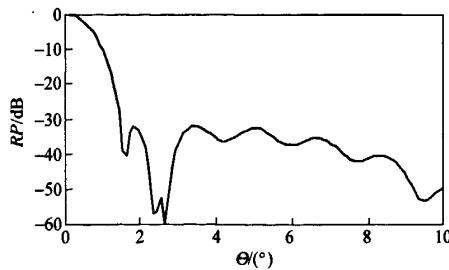


图4 (9)式对应的口径场分布的远区辐射场方向图(计算值)

Fig. 4 Calculated radiation pattern of the aperture distribution corresponding to eq. (9)

1.4 “求卡式天线最佳口径场分布法”可能的其它应用

“求卡式天线最佳口径场分布法”可能的其它应用有2个方面:1)在(2)式中令 $R_1=0$,此时的方程组(6)就可求解无遮挡的最佳同相口径场分布;2)改变(2)式的口径场分布表达式(比如,变为对称相位偏移的口径分布),此时的方程组(6)就可求解特殊分布的最佳口径场分布。

2 结论

本文的“求卡式天线最佳口径场分布法”可优化(最佳化)各种指标的卡式天线口径场分布,还可优化(最佳化)许多种其它形式的口径场分布,具有一定的实用价值。

当然,要在实际应用中实现卡式天线口径场分布的优化结果(以 $E_{\infty}(\rho)$ 表示之)有一定难度,可首先按文献[2]中方法的对卡式天线反射面进行赋形(修正),由于设计和加工误差,只能得到接近 $E_{\infty}(\rho)$ 的口径分布(以 $E_{\text{sl}}(\rho)$ 表示之), $E_{\text{sl}}(\rho)$ 可用专用仪器测量得到,然后由文献[1]中的方法(在反射面上涂覆一薄层吸波材料以改变口径场分布的方法)对 $E_{\text{sl}}(\rho)$ 进行修正,使修正后口径场分布(以 $E_{\text{c}}(\rho)$ 表示之)在 $E_{\infty}(\rho)$ 上下小幅度波动,这样 $E_{\text{c}}(\rho)$ 的旁瓣电平和口径效率可分别极接近 $E_{\infty}(\rho)$ 的相应值^[4]。

参考文献(References)

- [1] David C J, Willard V T R. Low-sidelobe reflector synthesis and design using resistive surface []. IEEE Transaction on Antennas and Propag., 1991, 39(9): 1372-1375.
- [2] 刘克成,宋学成. 天线原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1989:178.
- LIU Ke-cheng, SONG Xue-cheng. Principles of Antennas [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1989: 178. (in Chinese)
- [3] Stutzman W L, Thiele G A. 天线理论与设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006:298.
- Stutzman W L, Thiele G A. Antenna theory and design [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 298. (in Chinese)
- [4] 林岩. 用有一定电阻的双曲面设计低旁瓣卡塞格伦天线[J]. 微波学报, 2002, 18(3): 78-82.
- LIN Yan. The design of low-sidelobe cassegrain antenna using resistive hyperboloid [J]. Journal of Microwaves, 2002, 18(3): 78-82. (in Chinese)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>