

一维菲涅尔区相位修正平面反射器的聚焦特性研究*

杜惠平 阮颖锋

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

摘要 在平面上沿某一个方向进行 $1/P$ 波长的相位修正, 可以构成一维菲涅尔区相位修正平面。由此而得到的平面反射器可作为抛物柱面反射器的替代物来构成扇形波束天线。本文用物理光学法分析了平面波入射时该结构的聚焦特性, 并给出了一组焦散区场分布的数值计算结果。

关键词 反射面天线, 聚焦特性, 菲涅尔区相位修正平面, 扇形波束天线

1 引言

作为聚焦元件, 菲涅尔区相位修正平面在光及微波波段已有数十年的应用历史。与透镜相比, 它具有厚度薄、重量轻和加工简单等优点。近年来, 作为抛物反射面的替代物在毫米波及卫星电视接收等方面又有进一步应用^[1-3]。

反射面聚焦特性关系着其工作机理、对馈源的要求及天线效率等重要问题。本文用物理光学法分析了一维菲涅尔区相位修正平面(1-DFP)反射器的聚焦特性, 由数值计算给出其焦散区场分布。有关分析不仅适用于一维情形, 也能用于二维、三维^[4]情形。包含了正入射及斜入射各种情形, 同时, 通过对 xy 两个维度上聚焦特性的比较, 可加深对其聚焦特性的认识, 有助于其在扇形波束天线中的实际应用及进一步的推广。

2 1-DFP 反射器的设计

1-DFP 反射器的设计基于均匀无限长线源辐射场的菲涅尔区特性, 并可由多种途径

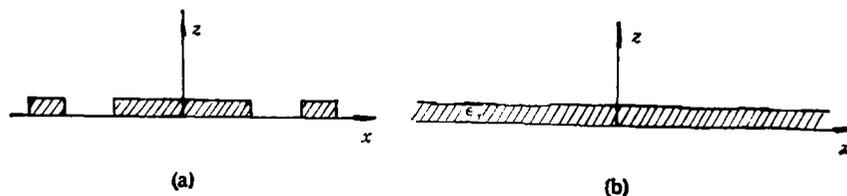


图1 1-DFP 半波相位修正的两个例子

1993-04-07 收到, 1993-09-03 定稿

* 国家自然科学基金及国家教委博士点基金资助项目

杜惠平 男, 1966年生, 博士生, 现从事电磁场与微波技术(天线与电波传播)方面的研究工作。

阮颖锋 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 现从事电磁场与微波技术(天线与电波传播)方面的教学和研究工作。

予以实现。当线源平行于 y 轴时,图 1 给出两种沿 x 方向进行半波相位修正的例子。

1-DFP 的设计包含以下内容:

2.1 各区域边界的确定 采用图 1 所示坐标,对馈源场在 x 方向沿平面做 $1/P$ 波长相位修正,则各区边界为

$$x_i = \pm \sqrt{2if\lambda_0/P + (i\lambda_0/P)^2}, \quad (1)$$

式中 f 为焦距, λ_0 为自由空间中工作波长, $i = 0, 1, 2, \dots$ 为区域序号。

2.2 各区域相位修正的实现 各区域修正相位通常是将该区域沿 z 向前移(或后移)来实现,如图 1 所示,且前移量与具体结构有关。前移量可表示为

$$d_i = [i/P - \text{Int}(i/P)] \cdot [\lambda_0/(4\sqrt{\epsilon_r})], \quad (2)$$

式中 $\text{Int}(x)$ 为取整函数, ϵ_r 为填充介质的介电系数, i, λ_0 定义同前。特别地,当采用半波修正时,有

$$d_i = \begin{cases} 0, & i = 0, 2, 4, \dots; \\ \lambda_0/(4\sqrt{\epsilon_r}), & i = 1, 3, 5, \dots. \end{cases} \quad (3)$$

3 单位平面波入射时的散射场

为简化分析,不妨将菲涅尔区相位修正结构视为 $z = 0$ 处的无限薄平面,并将各区域对相位的修正表示为相位增量 φ_i 。设单位入射平面波极化方向为 a_x , 波矢量 k 位于 xz 平面内且与 z 轴交成 θ 角。这时有

$$H^i = a_x \exp[j(kz \sin \theta + kx \sin \theta)]. \quad (4)$$

由 $J = 2(\hat{n} \times H^i)$ 可得感应电流密度分布

$$J = 2a_y \exp(jkx \sin \theta), \quad (5)$$

故区域 i (关于 y 轴对称的两条形域)上单位面元的面电流所产生的矢量位函数为

$$dA_i = a_y [\mu \exp(-jkx \sin \theta) \exp(j\varphi_i) \exp(-jkr)/(2\pi r)] dy' dx' \quad (6)$$

式中 φ_i 表示 x' 所在区域 i 的相位修正量,而

$$\varphi_i = ik\lambda_0/P, \quad (7)$$

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}, \quad (8)$$

因而其矢量位函数可表示为

$$A_i = a_y [\mu e^{i\varphi_i}/(2\pi)] \int_{-b}^b \int_{x_i}^{x_i+1} \{ [\exp(-jkr) \exp(jkx' \sin \theta)]/r - [\exp(-jk r') \exp(-jkx' \sin \theta)]/r' \} dx' dy', \quad (9)$$

式中已假定反射器 y 向长度为 $2b$, 且

$$r' = \sqrt{(x + x')^2 + (y - y')^2 + z^2}. \quad (10)$$

由此可得散射场磁场

$$H_i = a_x H_{x_i} + a_y H_{y_i}, \quad (11)$$

其中

$$H_{x_i} = -[\exp(j\varphi_i)/(2\pi)] \int_{-b}^b \int_{x_i}^{x_i+1} (\partial j_i(x', y')/\partial z) dx' dy', \quad (11a)$$

$$H_{y,i} = [\exp(j\varphi_i)/(2\pi)] \int_{-b}^b \int_{x_i}^{x_{i+1}} (\partial f_i(x', y')/\partial x) dx' dy', \quad (11b)$$

且

$$f_i(x', y') = \exp(-jk r) \exp(jk x' \sin \theta)/r - \exp(-jk r') \exp(-jk x' \sin \theta)/r'.$$

散射场总场可由各区域散射场合成而得出, 即

$$H_x = \sum_{i=0}^N H_{xi}, \quad (12)$$

$$H_y = \sum_{i=0}^N H_{yi}, \quad (13)$$

式中 N 为区域总数。在焦点附近的场表现了该反射器的焦散区特性。

4 数值计算

利用前述公式可以数值求解散射场。一组焦散区附近场的求解结果如图 2—图 5 所示, 其内容包括:

3.1 正入射情形 图 2 给出了单位平面波正入射时沿 z 轴的场分布。图中曲线表明沿 z 轴在设计焦点 $f = 10\lambda$ 处场强有最大值, 即非涅尔区相位修正平面有聚焦作用。

对于 1-DFP 反射器, 由于只有一个维度上的聚焦作用, 因而其焦散区应为一条焦线, 该线平行于反射器且过 $(0, 0, f)$ 点。图 3 给出了沿焦线上场的分布。其形状呈驼峰状且中心处较最大场强低约 0.5dB。这一结果表明, 1-DFP 反射器在焦线上的聚焦场并非均匀分布。

焦线所在的平行于反射器的平面称为焦平面。图 4 给出焦平面上场分布的立体图。

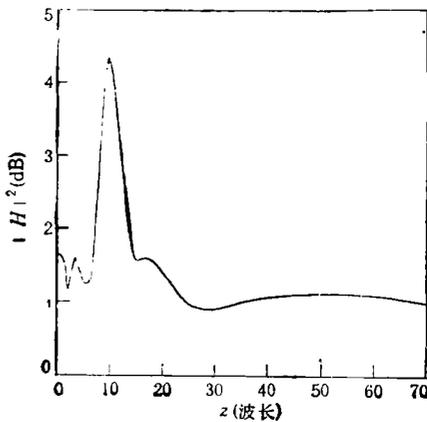


图 2 沿 z 轴聚焦场的分布

图中计算参数选择为: 焦距 $f = 10\lambda$, 沿 x 方向长度 $2a = 15\lambda$, 沿 y 方向长度 $2b = 20\lambda$, 采用半波修正 ($P = ?$)

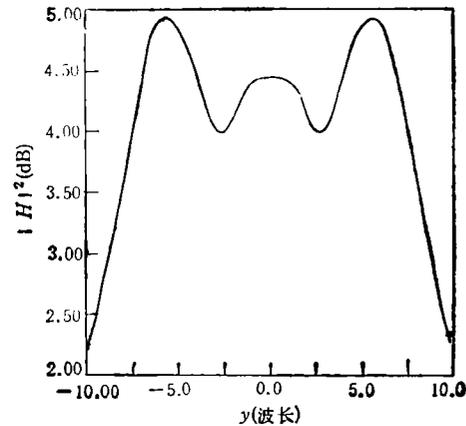


图 3 沿焦线聚焦场的分布

图中计算参数同图 2

3.2 斜入射情形 任一倾斜波束可分别投影到 xz 及 yz 平面内。当入射波在 yz 平面内倾斜时, 由于 y 向上没有聚焦作用, 因而焦线上的场分布只是图 3 中曲线的平

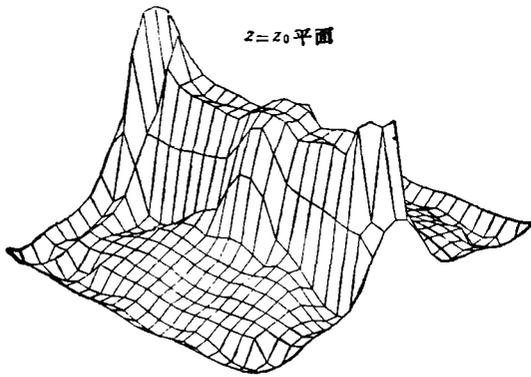


图 4 焦平面上聚焦场分布立体图
图中计算参数同图 2

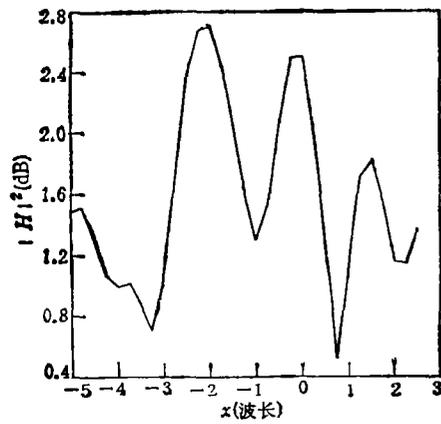


图 5 入射波倾斜时焦平面上垂直于焦线
方向 ($y = 0$) 的场分布

图中入射角取为 $\theta = 5^\circ$, 其他参数同图 2

移。这里对此不做更多的讨论。当入射波在 xz 平面内倾斜时, 焦平面上沿垂直于焦线方向上场的分布如图 5 所示。在 $x = 0$ 处原聚焦场依然存在, 但在关于 z 轴与人射波对称的另一侧 $x = -2\lambda$ 处出现新的聚焦场, 且后者高出前者约 0.3dB

4 结束语

在前面的讨论中, 我们提出了 1-DFP 反射器及其设计方法, 并使用物理光学法给出了单位平面波入射时该反射器所形成的聚焦场表达式。通过数值计算, 证实了该反射器具有类似于抛物柱面反射器的聚焦作用, 由此可以得到一种新型廉价的扇形波束天线。

基于同一原理可以在此基础上进而得到针状波束天线, 这里不赘述。

参 考 文 献

- [1] Garrett J E, Wiltse J C. Int. J. Infrared & MM Waves, 1991, 12(3):195—220.
- [2] Buder B, Menzel W. Electronics Lett., 1988, 24(6):318—319.
- [3] Guo Y J, Barton S K, Wright T M B. Design of High Efficiency Fresnel Zone Plate Antennas, IEEE AP-S'91, USA: Vol. 1, 1991, 182—185.
- [4] Delmas J J. TDF Antenna for Multisatellite Reception Using Fresnel Principle in Three Dimensions, Proc. ISAP'92, Japan: 1992, 321—324.

RESEARCH ON THE CAUSTIC CHARACTERISTICS OF ONE DIMENSIONAL FRESNEL ZONE PHASE CORRECTED PLATE REFLECTOR

Du Huiping Ruan Yingzheng

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract One dimensional Fresnel zone phase corrected plate (1-DFP) can be made by a $1/P$ wavelength phase correcting along one dimension upon the plate. When it is used as a reflector, it gives an alternative to parabolic cylinder reflector in application on fan-beam antenna. In this paper, Physical Optics (PO) is used in analyzing the caustic characteristics of 1-DFP reflector with plane wave illumination. Numerical results of a series of fields in caustic are also presented.

Key words Reflector antenna, Caustic characteristics, Fresnel zone phase corrected plate, Fan-beam antenna