

费涅耳区板天线焦区场特性研究¹

叶春飞 章文勋*

(上海铁道大学电信工程系 上海 200333)

*(东南大学无线电工程系 南京 210096)

摘 要 本文从接收天线的观点,研究费涅耳区板天线,并将对焦区场的研究作为区板近场散射问题处理。所得结果对区板工作机理的研究和设计高性能馈源均具意义。

关键词 天线,电磁散射,费涅耳区板

中图分类号 TN823

1 引言

费涅耳区板天线(Fresnel zone plate antenna)可用于卫星直播、小型数据工作站、微波移动通信和毫米波成像等方面,具有频带宽、馈电简单、成本低廉和平面结构易共形等优点,日益引起人们的兴趣^[1~4]。对其分析方法已逐渐从传统的标量场法发展到矢量场法^[5~8]。其结构已从光波段的波带板发展至毫米波段的单片集成^[7,8]。其使用频率也从原光波段发展到毫米波和微波波段,在微波波段进行卫星直播接收已有工程实例^[2]。然而现有发表的结果多基于物理光学的近似分析计算^[1,3,4,7],很少考虑各环区之间的互耦作用以及天馈之间的适配问题,因此对该天线从近似分析到精确分析,从工程设计公式的改进到天线性能的综合设计,还存在很多基础问题有待研究。

对费涅耳区板天线的研究,既可从发射天线的观点,也可从接收天线的观点进行。理论上,两者是等价的。当从接收天线的观点进行时,需研究天线的焦平面场分布、天线与馈源的耦合以及噪声温度等物理量。若采用数值方法如矩量法进行处理,将涉及到区板的电大尺寸散射问题。由于结构的圆对称性,可以采用傅氏变换结合数值技术解决这一问题^[9]。本文在前文^[9]的基础上,研究区板的焦区场特性,所得结果对区板的理论分析、设计高性能馈源和加深对区板工作机理的认识均具意义。

2 焦区场分布和能流密度分布

研究焦区场可以加深对区板工作机理的认识。这种场分布是近场散射过程的结果,即天线工作于接收状态时,对入射的线极化平面波发生散射的结果。

文献[9]中已经推得平面波入射于同心导体圆盘-圆环结构时感应面电流所满足的经降维处理后得到的积分方程。对于线极化平面波激励下区板感应面电流 J_s 的求解,可作为其特例。具体求解过程不另给出。

取区板极坐标 (r, α, z) ,求得区板上感应面电流分布

$$J_s = I_\rho(\rho) \cos \alpha \hat{\rho} + I_\alpha(\rho) \sin \alpha \hat{\alpha} \quad (1)$$

¹ 1995-02-06 收到, 1995-08-01 定稿

后, 可由矢量场辐射积分公式借助自由空间并矢格林函数 $\overline{G}_{eo}$ 直接计算焦区场分布

$$\mathbf{E}^{sc} = -j\omega\mu \int_S \overline{G}_{eo}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') dS', \quad (2)$$

其中 $\mathbf{r}'$ 为源点矢径, $\mathbf{r}$ 为场点矢径, 积分在区板感应面电流分布的区域 S 上进行.

可以将 (2) 式写成适合作实际计算的直角坐标系下分量形式. 对于近场散射, 该分量形式一般难以简化. 但在区板轴线上, 场是线极化的, 可以化成一维积分进行计算.

$$E_x = -j\omega\mu \int_C \rho \left[\left(1 - \frac{g_0(R)}{k^2 R^2} \right) (I_\rho - I_\alpha) + \frac{\rho^2 f_0(R)}{k^2 R^4} I_\rho \right] \frac{\exp(-jkR)}{R} d\rho, \quad (3a)$$

$$E_y = E_z = 0, \quad (3b)$$

其中

$$g_0(R) = jkR + 1,$$

$$f_0(R) = (jkR)^2 + 3jkR + 3,$$

而 $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, $k = \omega(\mu\epsilon)^{1/2}$ 为自由空间波数, 积分在区板波带对应的径向区域 C 上进行.

对于长焦距或波带数 n 不大的区板, 焦区可能会位于区板的远场区, 此时 (2) 式得到简化. 当用球坐标系 (r, θ, φ) 表示场点时, 远区场可写成直角坐标系下的分量形式

$$E_x = -\frac{j\omega\mu \exp(-jk r)}{4\pi r} [(1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi) L_x - \frac{1}{2} \sin^2 \theta \sin^2 \varphi] L_y, \quad (4a)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu \exp(-jk r)}{4\pi r} [-\frac{1}{2} \sin^2 \theta \sin 2\varphi L_x + (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)] L_y, \quad (4b)$$

$$E_z = -\frac{j\omega\mu \exp(-jk r)}{4\pi r} (-\frac{1}{2} \sin 2\theta \cos \varphi L_x - \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin \varphi) L_y. \quad (4c)$$

利用 Bessel 函数的积分公式可以得到

$$L_x = \pi \int_C \rho [J_0(k\rho \sin \theta)(I_\rho - I_\alpha) - J_2(k\rho \sin \theta)(I_\rho \cos 2\alpha - I_\alpha \sin 2\theta)] d\rho, \quad (5a)$$

$$L_y = \pi \int_C \rho (I_\rho + I_\alpha) [J_0(k\rho \sin \theta) - \sin 2\varphi J_2(k\rho \sin \theta)] d\rho. \quad (5b)$$

利用已得到的 (2)、(3) 和 (5) 式, 可计算在空间各点、轴线和 $z =$ 常数的各平面上场强和能流密度分布.

3 计算结果和讨论

图 1 给出了对不同焦距的费涅耳区板焦点附近轴线上的电场分布. 为反映区板不同焦距对场分布的影响, 固定区板的波带数为 4, 即一个圆盘和三个圆环, 焦距分别为 0.2, 0.4 和 0.6m. 对上述三种不同设计焦距的区板, 其口径也相应改变. 入射平面波幅度归一化为 1. 在这三种区板中, 实际焦点均偏离设计的几何焦点, 且偏移位移 (向区板) 约为 0.2~0.3 个波长. 在实际焦点附近, 场分布随焦距的增大而趋平缓. 对 $F = 0.6\text{m}$ 的区板, 3dB 的左右轴向距离分别为 3.2λ 和 4.2λ , 而 $F = 0.2\text{m}$ 时则分别为 1.5λ 和 2.1λ . 向区板一侧, 场值起伏甚于向外一侧.

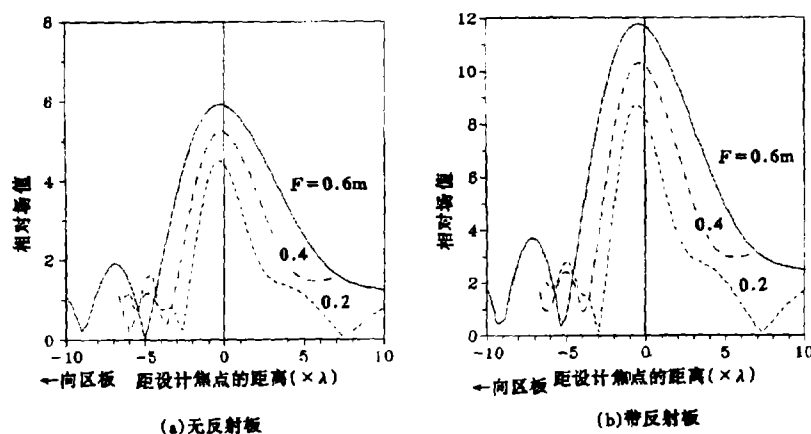


图 1 轴线场分布

反射板使通过透明区的电磁能量经两次相位补偿后与反射焦点处的场“同相”叠加, 当有反射板时, 区板成为一种介质与导体的电大尺寸散射物, 未见有方便易行的处理方法. 本文用镜象法作近似处理.

反射板的存在使焦点处的场值提高到不带发射板时的约 1.8 倍, 而场型基本保持不变 (图 1(b)), 且向区板略有平移, 结果使得设计焦点与实际焦点偏移距离增大. 在本节给出的例子中, 位移由不带反射板时的 $0.2 \sim 0.3\lambda$ 增至 $0.4 \sim 0.5\lambda$, 相当于视在口径移至区板与反射板之间的适当位置. 这种实际焦点偏离设计焦点的情形在区板标量场法分析中是观察不到的. 增大区板焦距的直接结果是使焦点处场值有所提高, 但区板的面积也将相应增大.

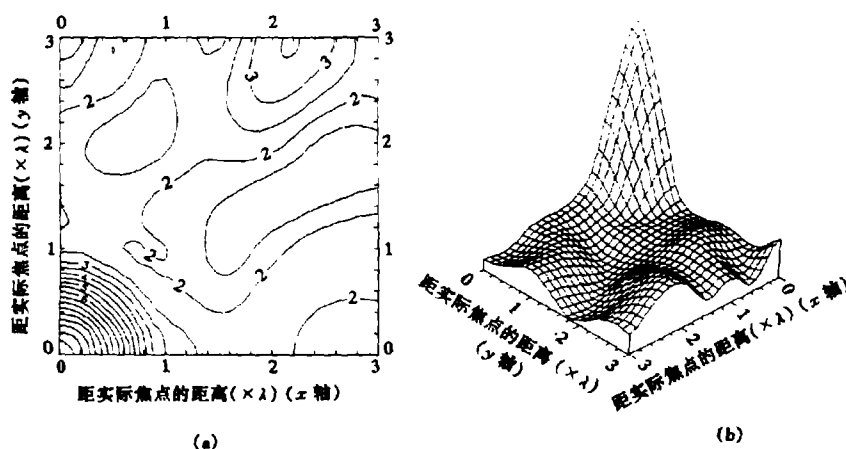


图 2 实际焦平面上电场幅度分布 (a) 等值分布, (b) 幅度分布
(带反射板. $f = 12\text{GHz}$, 设计焦点 $F = 0.4m$, 实际焦点 $0.39m$.)

利用本文已推得的公式, 可计算在 $z = \text{常数}$ 各平面上的场分布. 而对实际焦平面上场的研究, 有利于设计高性能的馈源. 在焦平面上焦点附近几个波长的范围内, 电磁能流以主极化分量 (电场 E_x , 磁场 H_y) 占优. 在偏离焦点较远处, 极化状况发生较大变化, 特别是当焦距

过短时情况更为复杂. 图 2 给出了焦距 $F = 0.4\text{m}$ 无反射板的区板在实际焦平面上场分布的示意图和等值线分布图. 在主峰周围, 场的起伏较小. 主峰宽度约为 $1\lambda \times 1.2\lambda$, 3dB 宽度约为 $0.7\lambda \times 0.7\lambda$, 在 x 与 y 方向上对称较好.

在焦平面上, 能流密度矢量以 z 分量为主, 尤其是在主峰及其周围. 对不带反射板的区板, 图 3 给出了 Ponoyting 矢量 z 分量 P_z 在焦平面上的分布. 计算表明, 带反射板区板在实际焦平面上的场分布与不带反射板时的情形差别不大, 主峰和 3dB 宽度都比电场相应的宽度要小, 且除主峰之外其它区域, 幅度起伏很小.

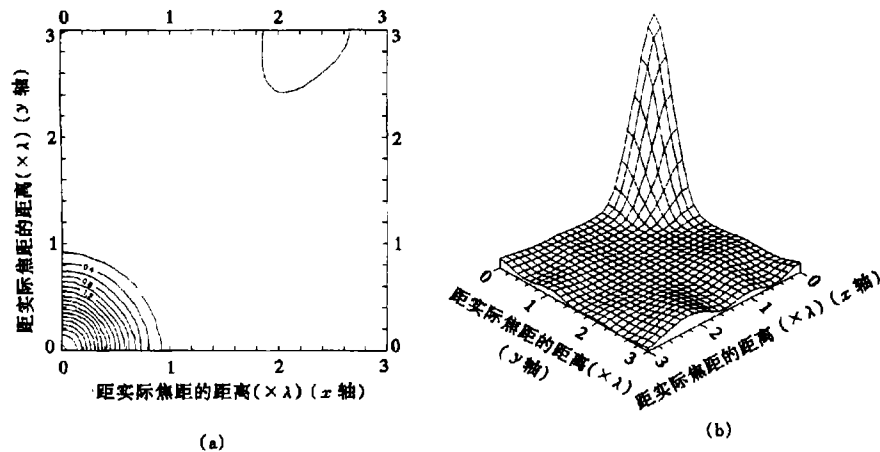


图 3 实际焦平面上能流密度分布 (a) 等值分布, (b) 幅度分布
(无反射板, $f = 12\text{GHz}$, 设计焦点 $F = 0.4\text{m}$, 实际焦点 0.39m .)

4 结束语

如何更精致地实现相位补偿、建立更为精确实用的分析模型、提高天馈系统的效率和提高工程设计水平仍是费涅耳区板天线研究中的主要课题.

对焦区场的研究传统地采用物理光学-标量场法^[3,4], 不尽适合于具有矢量场特性的微波和毫米波波段. 本文利用电磁散射理论从接收天线的观点研究了区板的焦区场特性, 进而可展开馈源与区板耦合等问题的研究.

参 考 文 献

- [1] Wiltse J C, Garrett J E. Microwave J., 1991, 34(1): 101-104.
- [2] Black N, Wiltse J C. IEEE Trans. on MTT, 1987, MTT-35(12): 1112-1128.
- [3] Gao Y J, Barton S K. Int. J. of Satellite Communication, 1993, 1(2): 75-80.
- [4] 杜惠平, 阮颖铮. 电子科学学刊, 1994, 16(5): 529-532.
- [5] 叶春飞, 章文勋. 电波科学学报, 1995, 10(1,2): 57-64.
- [6] Leyten L, Herben M H A J. Micromave and Optical Technology Lett., 1992, 5(2): 49-55.
- [7] Gouker M A, Smith G S. IEEE Trans. on MTT, 1992, MTT-40(5): 968-977.
- [8] 叶春飞, 刘 刚, 章文勋. 红外与毫米波学报, 1996, 15(5).

[9] 叶春飞, 章文勋. 电子科学学刊, 1994, 16(5): 497-505.

SCATTERING ANALYSIS OF FOCAL FIELD DISTRIBUTIONS FOR FRESNEL ZONE PLATE ANTENNA

Ye Chunfei

(Dept. of Telecommunications, Shanghai Tiedao University, Shanghai 200333)

Zhang Wenxun

(Dept. of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract By analyzing the scattered fields from zone plate reflectors, the focal field distributions of Fresnel zone plate antenna are investigated in the view of receiving antenna analysis.

Key words Antenna, Electromagnetic scattering, Fresnel zone plate

叶春飞: 男, 1962 年生, 博士, 副教授, 现从事无线通信科研与教学工作.

章文勋: 男, 1937 年生, 教授, IEE 会士, IEEE 高级会员, 主要研究方向包括天线、散射和导波等.