

338-342

一种新型毫米波集成天线的研究*

叶春飞

(上海铁道大学电信工程系, 上海, 200333)

刘刚[√]

(复旦大学电子工程系, 上海, 200433)

TN822.4

章文勋

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏, 南京, 210096)

A **摘要** 介绍了一种基于费涅尔波带板原理设计的具有较高增益、结构简单的毫米波集成天线, 并对此作了理论研究和分析, 给出了场强公式和设计曲线, 提出了按激励场实际相位分布划分波带的方法。

关键词 毫米波天线, 集成天线, 谱域分析, 费涅尔波带板。

引言

④

将天线集成在介质基片上所构成的印刷天线, 是当前毫米波天线发展的趋势之一。微带贴片天线当频率增加到毫米波波段时, 由于基片表面波的影响, 使微带贴片天线以及印刷于不带接地板介质基片上的天线的效率降低^[1,2]。为减少基片对天线的影晌, 可在基片另一侧设置一准光器件^[3]。例如基片上的领带结天线, 可在基片另一侧设置半球介质透镜或介质填充的反射面等准光器件, 将能量耦合出介质基片^[4,5]。此外, 将天线悬置于介质基片上, 也可减少基片的表面波损耗^[6]。

费涅尔波带板兼有透镜和反射镜天线的性质, 因而可用费涅尔波带板代替上述准光器件, 在介质基片的一侧印刷偶极子, 另一侧为波带板, 构成集成偶极子一波带板结构。该结构可提高基片上单个偶极子的增益。为进一步提高其增益, 可在波带板后另置厚度为 $\lambda/4$ (λ 为介质波长), 一面敷有金属的介质薄片, 用作反射表面。这类天线具有平面结构等优点, 适用于毫米波波段的精确制导、监测、防撞雷达、定点通信以及生物医疗辐射等场合。国外业已开始此类研究^[7]。本文通过对基片上偶极子场采用不同于文献^[7]中的公式计算, 简化了集成偶极子-波带板结构辐射场计算的相应公式, 导出了结构增益的计算公式, 提出了波带板按实际相位分布划分的思想, 以提高系统性能。

1 集成偶极子一波带板结构的远场特性

对波带板结构辐射特性的研究由于其结构复杂和电大尺寸, 欲寻求严格的求解方法较

* 铁道部科学技术发展基金资助项目
本文 1995 年 7 月 3 日收到, 修改稿 1996 年 1 月 10 日收到

为困难,因而研究对象主要限于增益、主瓣宽度及副瓣电平等参数.我们曾采用矢量 Kirchhoff 绕射积分公式辅以物理光学电流分布,经理论和实验测试表明能基本预测上述各量^[8],本文采用上述方法,首先确定波带板上的激励场(偶极子场)分布.

1.1 波带板上的激励场分布

厚基片上小天线(阵)的辐射问题常近似处理成位于两无限大介质半空间分界面上天线的辐射问题^[4,5,7].实验表明,对厚度大于 3 倍波长的基片,将实际电偶极子辐射处理成两半无限大空间分界面上的辐射问题时,理论值与实验值的误差小于 10%^[9].本文采用 Engheta^[10]等的结果,计算分界面上偶极子的辐射场.设有水平电偶极子 $\vec{J} = \hat{x}I_0\delta(x)\delta(y)\delta(z)$ 位于介质与空气分界面上,坐标关系见图 1.由谱域法在大宗量近似下可得各区辐射场^[10]

1 区(介质): $\pi/2 < \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi < 2\pi$

$$\begin{cases} \vec{E}_1^d(r, \theta, \varphi) = Ag(r)[\hat{\theta}f_\theta(r)\cos\varphi\hat{r} + \hat{\varphi}f_\varphi(r)\sin\varphi], \\ \vec{H}_1^d(r, \theta, \varphi) = nY_0\hat{r} \times \vec{E}_1^d, \end{cases} \quad (1)$$

2 区(空气): $0 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \varphi < 2\pi$

$$\begin{cases} \vec{E}_2^d(r, \theta, \varphi) = \frac{A}{n}g_0(\hat{\theta}h_\theta\cos\varphi + \hat{\varphi}h_\varphi\sin\varphi), \\ \vec{H}_2^d(r, \theta, \varphi) = Y_0\hat{r} \times \vec{E}_2^d, \end{cases} \quad (2)$$

其中函数 $f_\theta(\theta), f_\varphi(\theta), h_\theta(\theta), h_\varphi(\varphi), g(r), g_0(r)$ 的定义见文献^[10],常数

$$A = \frac{-jnI_0k_0}{2\pi}\eta_0, n = \sqrt{\epsilon}, \eta_0 = \frac{1}{Y_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}.$$

为计算结构的增益,必须计算偶极子的输入功率.辐射到介质及空气中的功率分别为

$$P_1 = \frac{n|A|^2\pi}{2\eta_0}L_1, P_2 = \frac{|A|^2\pi}{2n^2\eta_0}L_2; \quad (3)$$

而

$$L_1 = \int_{\pi/2}^{\pi} [|f_\theta(\theta)|^2 + |f_\varphi(\theta)|^2] \sin\theta d\theta,$$

$$L_2 = \int_0^{\pi/2} [|h_\theta^2(\theta) + h_\varphi^2(\theta)] \sin\theta d\theta.$$

1.2 集成偶极子-波带板结构的辐射场

求得波带板上电偶极子辐射场(\vec{E}_1^d, \vec{H}_1^d)后,类似可得波带板上感应面电流密度 $\vec{J}_s = \vec{2n}$

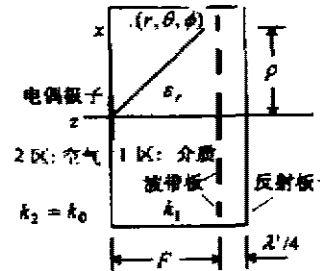


图 1 电偶极子-波带板结构和坐标关系
Fig. 1 Coordinates for the substrate dipole-zone structure

$\times \vec{H}_1^d$. 由谱域法可得处于分层介质中的面电流的辐射场^[9], 由此可求得波带板上感应面电流 \vec{J} , 在空气中的辐射场. 根据波带板的工作原理, 波带板后厚度为 $\lambda/4$ 带反射面的介质薄片起相位补偿功能, 其作用可用虚拟环上的面电流或镜像电流代替. 利用谱域法经复杂推导(推导略)后可得波带板在空气(2区)中的场为

$$\vec{E}_2^d(r, \theta, \varphi) = \frac{jk_2 A \exp(-jk_2 r)}{2r} \exp(-jk_2 F \sqrt{k_{12}^2 - \sin^2 \theta} |\cos \theta|) \cdot [-\theta(I_1 + I_2) \cos \varphi T_{//} + \dot{\varphi}(I_1 - I_2) \sin \varphi T_{\perp}]; \quad (4)$$

其中

$$T_{//} = \frac{2k_{12} \sqrt{k_{12}^2 - \sin^2 \theta}}{k_{12}^2 |\cos \theta| + \sqrt{k_{12}^2 - \sin^2 \theta}},$$

$$T_{\perp} = \frac{2 \sqrt{k_{12}^2 - \sin^2 \theta}}{|\cos \theta| + \sqrt{k_{12}^2 - \sin^2 \theta}},$$

$$k_{12} = k_1/k_2, \quad I_1 = \int_R \rho d\rho g(r) J_0(k_2 \rho \sin \theta) [f_{\varphi}(\theta) \cos \theta - f_{\theta}(\theta)],$$

$$I_2 = \int_R \rho d\rho g(r) J_2(k_2 \rho \sin \theta) [f_{\varphi}(\theta) \cos \theta - f_{\theta}(\theta)],$$

其中 J_0, J_2 为 0 阶和 2 阶 Bessel 函数. 积分中用的各量间关系为: $r = \sqrt{\rho^2 + F^2}$, $\theta = \tan(\rho/F)$, 积分在波带板对应的径向区域上进行. 所有开方取主值. 总场应为波带板在空气中的场式(4)与电偶极子在空气中的场式(2)的叠加.

$$\vec{E} = \vec{E}_2^d + \vec{E}_2^d. \quad (5)$$

而集成偶极子-波带板的增益 $G = \frac{|\vec{E}|_{\theta=0}^2 Y_0/2}{P_{in}/4\pi r}$, 由式(3)求得 $P_{in} = P_1 + P_2$, 并将 $\theta=0$ 代入式(4)得到 $|\vec{E}|_{\theta=0}$, 最后可得

$$G = \frac{4n^2 \left| \frac{1}{n(n+1)} - j \exp(-jk_1 F) \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} I_1 \right|^2}{n^3 L_1 + L_2}. \quad (6)$$

2 计算结果和讨论

2.1 增益和远场

由本文推得的公式(2)、(5)和(6), 计算了结构的增益和远区辐射场.

结构的增益主要由波带板上感应面电流 \vec{J} , 决定, 偶极子在空气中的辐射场对 G 的作用较小, 几乎可以忽略. 图 2 给出了增益的设计曲线. 由图 2 可见, 增大焦距 F 或增大波带板的直径(波带数)将使增益提高, 但其代价是使体积变大. 以 $\epsilon_r = 3.8, \lambda = 3\text{mm}$ 的情形为例, 欲达到 30dB 的系统增益, 基片的厚度约需 3cm, 波带板直径为 7.5cm.

增大基片介电常数使结构变薄, 但同时也将降低系统的增益, 这与偶极子辐射场在波带

板的分布形式有关.此外,频率增高,增益也将提高.

结构的远区方向性图如图 3 所示,主平面 $\varphi=0^\circ$ 和 90° 上对称性较差,3dB 宽度约为 6° ,对于这种形式的结构远区方向形图的最大副瓣电平一般在 -25dB 左右.

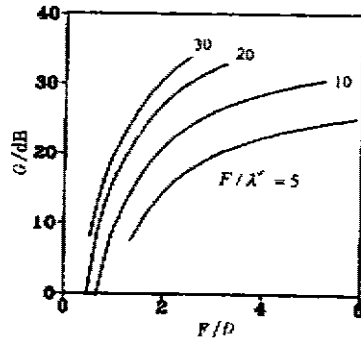


图 2 增益分布曲线
Fig. 2 Gain vs. diameter/focus ratio

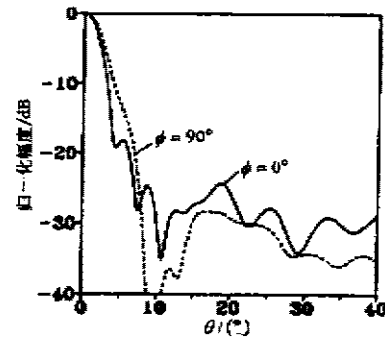


图 3 远区辐射场分布
Fig. 3 Radiation patterns

2.2 波带按基片偶极子相位分布划分

对自由空间中的电偶极子辐射,波带板上相位分布为 $\exp(jk_0 r)$,服从波带按几何光学划分的要求.由于基片介电常数 ϵ_r 的影响,当波带板上源点方位角 $\pi - \sin^{-1}(1/n) < \theta < \pi$ 时,由 $f_p(\theta)$ 及 $f_o(\theta)$ 的表达式可以看出,因基片将产生附加相位,这对波带划分带来一定影响.此外,由式(6)可知,增益主要由 I_1 决定,而 I_1 积分中的相位项来自 $\exp(-jk_0 nr)$ 和 $[f_p(\theta) \cos\theta - f_o(\theta)]$,前者为费涅尔波带板上的典型相位分布,后者的相位为附加相位,因此需按它们乘积的相位分布重新划分波带,以提高波带板增益、降低副瓣电平.基片的介电常数越大,附加相位影响也越大,因而对大 ϵ_r 基片,费涅尔波带板波带的重新划分意义更大.图 4 给出了 $\epsilon_r=16, F/\lambda_c=8$ 的介质基片上,波带按实际相位分布划分的结果.对相同 F/D 的波带板,重新划分后的增益提高 $0.6 \sim 1.1\text{dB}$.这种波带按实际相位分布划分的方法,可推广到其它种类的馈源-波带板结构中.

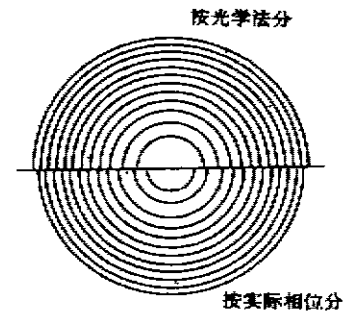


图 4 波带按相位分布
Fig. 4 Zoning according to the phase distribution

3 结语

本文介绍了一种基于费涅尔波带板原理设计的集成毫米波天线,采用物理光学法求得波带板上电流分布,结合谱域技术给出了天线的远场和增益等公式,并进行了计算和讨论.根据增益计算公式,需考虑由介质基片引起的附加相位分布,修正光学波带划分,以提高系统增益.本文仅从理论上作了初步探讨.

参考文献

- 1 Pozar D M. *IEEE Trans. on AP*, 1983; 31(9): 740~749
- 2 Alexopoulos N G. *et al. IEEE Trans. on MTT*, 1983; 31(7): 550~557
- 3 Rutledge D B. *et al. Infrared and Millimeter Waves*, 1983; 10: 1~91
- 4 Rutledge D B. Muha M S. *IEEE Trans. on AP*, 1982; 30(4): 530~540
- 5 Siegel P H. Dengler R J. *IEEE Trans. on AP*, 1991; 39(1): 40~47
- 6 Reibeuz G M. *et al. IEEE TRANS. on AP*, 1990; 38(9): 1473~1482
- 7 Gouker M A. Smith G S. *IEEE Trans. on MTT*, 1992; 40(5): 968~977
- 8 叶春飞, 章文勋. *电波科学学报*, 1995; 10(1,2): 57~64
- 9 Smith G S. *IEEE Trans. on AP*, 1984; 32(2): 232~246
- 10 Engheta N. Papas C H. *Radio Science*, 1983; 18(5): 664~674

STUDIES ON A NEW TYPE OF MILLIMETER WAVE INTEGRATED ANTENNA

Ye Chunfei

(Department of Telecommunications, Shanghai Tiedao University, Shanghai 200333, China)

Liu Gang

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Zhang Wenxun

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract A new type of millimeter wave integrated circuit antenna with high gain and simple structure designed based on the Fresnel zone plate was introduced. With the spectrum domain analysis, the formulae for radiation field and curves for antenna gain were discussed. Zoning of the plate considering the extra phase change from substrate was given hereafter.

Key words millimeter wave antenna, integrated circuit antenna, spectrum domain analysis, Fresnel zone plate