

⑤ 267-270

毫米波扩展半球透镜/物镜天线 系统辐射特性分析*

窦文斌 曾刚^V孙忠良

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏, 南京, 210096)

TN822.4

摘要 采用射线追踪和场积分的方法分析了扩展半球透镜/物镜天线系统的辐射特性, 给出了计算结果, 表明该系统具有良好的辐射特性, 通过改变扩展半球透镜的扩展长度, 可以实现集成电路与各种准光系统的耦合, 具有很强的实用价值。

关键词 毫米波, 集成天线, 扩展半球透镜.

辐射特性

引言

集成电路天线成像阵与传统的波导结构相比, 具有体积小、重量轻、成本低、容易批量制作的优点, 因此受到人们的关注。然而, 位于厚介质基片上的集成电路天线往往遇到基片模功率损耗的问题^[1]。其解决方法一种是将天线集成在很薄的介质基片上, 但是, 在毫米波段, 这会使基片非常薄而且易碎, 不易实现; 另一种是基片透镜法^[1], 即将天线集成在介质透镜上, 它可以消除表面波, 并具有良好的机械强度和热稳定性, 引起了人们的广泛兴趣。

基片透镜可以是半球, 超半球或椭球。从天线角度来说, 超半球形状的透镜可使集成天线辐射的主瓣变得尖锐, 有效地提高集成天线的增益。椭球透镜能将平行入射的光线汇聚于它的远焦点, 故置于椭球透镜远焦点上的天线, 通过椭球透镜的口径面后, 会在远区产生一个衍射受限的主瓣波束。从应用的观点看, 扩展半球透镜是一个更为实际可行的方案, 因为仅通过改变其扩展长度, 就可以近似合成椭球透镜和超半球透镜, 既可作为独立天线, 也可和各种准光系统相耦合, 具有很大的应用潜力。将扩展半球透镜与物镜组合可以构成高增益天线, 用于雷达系统, 也可用于成像。用于成像已有实验研究^[2,3], 因此, 本文对其辐射特性进行分析, 以对实际系统的研制建立理论基础。

1 分析

用接地导体板上的双缝天线作为馈源, 双缝位于 $x-z$ 平面, 缝的轴线沿着 z 方向, 双缝之间的距离为 d , 缝的长度为 $2l$ 。

缝隙天线一边设为空气, 另一边为介质, 设等效介电常数为 ϵ_m , 等效波长为 λ_m ^[4,5]。设缝中的磁流密度为正弦分布, 可以得出相应的归一化辐射电场为:

* 国防预研基金(编号 95J1A. 3. 1. JW0601)资助项目
稿件收到日期 1997-05-09, 修改稿收到日期 1997-12-19

$$\vec{E}_\varphi = \frac{\sin\theta[\cos(k_e L \cos\theta) - \cos k_m L]}{k_m^2 - k_e^2 \cos^2\theta} \cdot \cos\left(k_e \frac{d}{2} \sin\theta \cos\varphi\right), \quad (1)$$

式(1)中, $k_m = 2\pi/\lambda_m$ 为等效波数, k_e 是空气或介质中的波数, 在空气一边, 有 $k_e = 2\pi/\lambda_m$, 在介质一边, 有 $k_e = 2\pi/\lambda_{me}$; $\eta_e = k_e/\omega\epsilon_e$ 为空气或者介质中的波阻抗; θ 和 φ 是观察点的仰角和方位角. 半无限大介质用介电常数相同的扩展半球透镜模拟.

用射线追踪法^[6]计算双缝天线通过扩展半球后的辐射场. 双缝天线的辐射场用来计算扩展半球透镜的透镜/空气界面上的等效电流和磁流. 此等效电流和磁流用来计算远区辐射场. 该分析不仅适用于缝隙天线, 也可用于其它类似的平面天线, 如双偶极子天线, 螺旋/对数周期天线等.

坐标系的选取如图1所示, 双缝位于 $x-z$ 平面, 缝的指向为 z 方向, 双缝的中心位于 xyz 坐标系的原点, 坐标系的球坐标表示为 (r, θ, φ) , 由于双缝天线的尺寸与扩展半球透镜相比极小, 在分析中将其按点源处理, 坐标系 $x_1 y_1 z_1$ 是由坐标系 xyz 向 y 方向平移扩展长度 L 而得, 其原点位于半球的球心, 球坐标表示为 $(r_1, \theta_1, \varphi_1)$, 半球的半径为 a , 扩展长度为 L , 透镜的折射系数为 n_1 ,

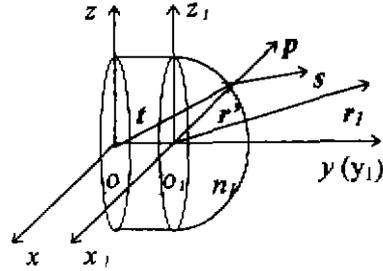


图1 扩展半球透镜示意
Fig. 1 Configuration of the extended hemispherical lens

馈源发出的射线在介质/空气的分界面上发生反射和折射, 这与极化方向有关, 因此将入射到分界面上的波分解为垂直极化波和平行极化波. 射线方向和场的相位之间有一定的关系, 知道射线方向即可定出相位.

由图1, 将透镜的介质/空气分界面上入射波电场分成垂直分量 \vec{E}_\perp 和平行分量 \vec{E}_\parallel ,

$$\vec{E}_\perp = (\vec{E}_\varphi \cdot \vec{n}_\perp) \vec{n}_\perp = E_\perp \vec{n}_\perp, \quad \vec{E}_\parallel = (\vec{E}_\varphi \cdot \vec{n}_\parallel) \vec{n}_\parallel = E_\parallel \vec{n}_\parallel, \quad (2)$$

式(2)中 \vec{n}_\perp 与 \vec{n}_\parallel 分别为垂直于入射平面和平行于入射平面的单位矢量.

根据 Fresnel 定律, 它们的透射系数 T_\perp 和 T_\parallel 分别为:

$$T_\perp = \frac{2n_1 \cos\alpha}{n_1 \cos\alpha + \sqrt{1 - n_1^2 \sin^2\alpha}}, \quad T_\parallel = \frac{2n_1 \cos\alpha}{\cos\alpha + n_1 \sqrt{1 - n_1^2 \sin^2\alpha}}, \quad (3)$$

式(3)中 α 为入射角. 经过透镜/空气界面的折射后, 在半球表面上的场分布为:

$$\vec{E}_t = T_\perp E_\perp \vec{n}_\perp + T_\parallel E_\parallel (\hat{k}_t \times \vec{n}_\perp), \quad \vec{H}_t = \frac{1}{\eta_e} (\hat{k}_t \times \vec{E}_t); \quad (4)$$

式(4)中, $\hat{k}_t = \vec{i}$ 是透射波传播方向单位矢量, 由射线追踪法确定.

继续用射线追踪法来得到物镜表面的场分布. 物镜的光轴与 y_1 轴相重合, 折射率为 n , 半径为 R , 焦距为 f . 设馈源发出的射线矢量 \vec{i} 与扩展半球透镜表面交于 A 点, 折射后的射线矢量 \vec{s} 与物镜后表面交于 B 点, 折射波矢量为 \vec{b} , 该矢量与物镜前表面相交于 C 点, 出射的波射线为 \vec{c} . 在透镜/空气界面处, 同样需将场分为垂直入射平面分量和平行入射平面分

量.通过类似的计算,可以得出透射波在物镜口径面上的场分布为

$$\bar{E}_C = \hat{x}E_{Cx} + \hat{y}E_{Cy} + \hat{z}E_{Cz}, \quad (5)$$

在物镜口径面上点 C 的透射线矢量为

$$\bar{c} = \hat{x}c_x + \hat{y}c_y + \hat{z}c_z, \quad (6)$$

于是得到物镜表面上场的振幅分布和相位分布.根据辐射场和口径场的 Fourier 变换关系^[6],即可求得远区辐射场.

在分析中,我们设物镜周围为吸收材料,因此,从扩展半球透镜射出但未被物镜截获的射线对辐射图的影响被忽略.另外,我们主要考虑系统在远区的辐射特性,没有考虑透镜/空气界面的反射对功率损耗的影响.在计算中都使用相对功率值.实际系统中,在透镜表面覆盖 1/4 波长匹配层将大大降低反射损耗.

2 数值结果

先计算 Rutledge^[3]等人提出的成像阵中心馈源给出的辐射场,并将其馈源由 bow-tie 天线换成了双缝天线,结果如图 2 所示.在其系统中,物镜用 Teflon 材料制成,介电常数为 2.08,直径为 35cm,焦距为 53cm;基片透镜由 Stycast 材料制成,介电常数为 4,扩展长度为 3cm,半径为 7cm,工作的中心频率为 10GHz.

图 2 显示了旋转对称的辐射场,第一零点位于 6°左右,第一副瓣比主瓣低 20dB.

图 3 给出了 3mm 波段透镜天线的 E 平面和 H 平面辐射图,辐射图与它类似.扩展半球透镜的半径为 17.9mm,介质材料是硅,介电常数为 11.7;物镜用聚苯乙烯材料制成,介电常数为 2.54.物镜焦距为 26cm,直径为 20cm,物镜距半球球心为 198.8mm.扩展长度 L 分别为 4.2mm,4.4mm,4.6mm,4.8mm,5.0mm,5.2mm,5.4mm,5.6mm.

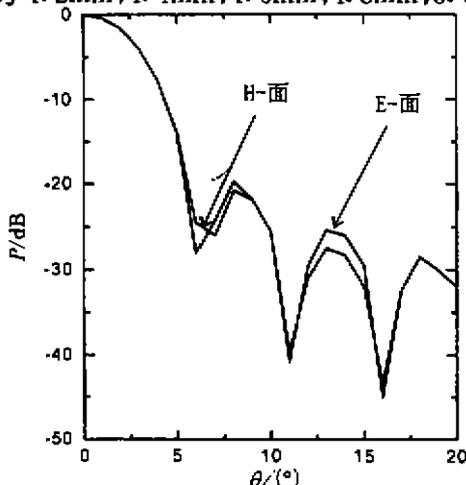


图 2 扩展半球透镜/物镜天线辐射图计算结果

Fig. 2 Calculated results of the radiation pattern for the extended hemispherical lens/objective lens antenna

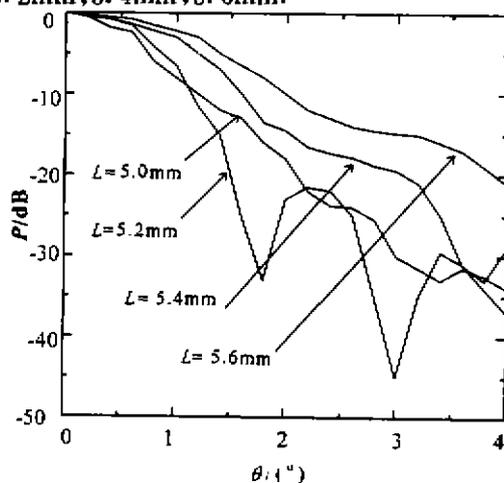


图 3 94GHz 扩展半球透镜/物镜天线的辐射场

Fig. 3 Radiation pattern of 94 GHz extended hemispherical lens/objective lens antenna

当 L 等于 5.2mm 时,扩展半球透镜近似超半球透镜,由于它是消球差的,其透镜表面的出射方向与在物镜焦点处的点源发出的射线方向一致,故在物镜前表面形成平行射线,即物镜的口径场为等相分布,因此能产生良好的辐射图.辐射主瓣半功率宽度为 1.4° ,第一副瓣比主瓣低 21dB,显示出尖锐的主瓣和很低的副瓣电平.

3 结语

利用扩展半球透镜可以很好地模拟超半球透镜,用于消除集成电路天线的表面波,并提高天线的增益,它与物镜组合成的扩展半球透镜/物镜天线系统具有良好的辐射特性和较高的效率,通过改变其扩展长度,可以与各种准光系统相耦合,具有很大的实用价值.

REFERENCES

- 1 Rutledge D B, Neikirk D P, Dsilangam D P. *Infrared and Millimeter Waves*, K. J. Button, Ed. New York, Academic Press, 1983, **10**: 1~90
- 2 Neikirk D P, Rutledge D B, Muha M S. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **2**: 203~205
- 3 Rutledge D B, Muha M. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1982, **30**: 535~540
- 4 Filipovic D F, Gearhart S S, Rebeiz G M. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1993, **41**: 1738~1749
- 5 Kominami M, Pozar D M, Schaubert D H. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1985, **33**: 600~607
- 6 Collin R E. *Antennas and Radiowave Propagation*. New York: McGraw-Hill, Chap. 4, 1985

ANALYSIS OF THE FAR - FIELD PATTERN OF AN EXTENDED HEMISPHERICAL LENS/OBJECTIVE LENS MMW ANTENNA SYSTEM*

DOU Wen-Bin ZENG Gang SUN Zhong-Liang

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

Abstract The ray tracing and field integration methods were used to analyze the far-field pattern of an extended hemispherical lens/objective lens antenna system. Calculation results were given. It was shown that this antenna system has good radiation property. By changing the extension length of the extended hemispherical lens, the coupling between integrated circuits and various quasi-optical systems may be realized.

Key words millimeter waves, integrated antenna, extended hemispherical lens.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defence
Received 1997-05-09, revised 1997-12-19