

文章编号: 1001-4322(2005)08-1256-03

改进型 COBRA 透镜天线的设计*

徐福锴, 周海京, 丁 武

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 设计了 X 波段 COBRA 透镜型天线, 利用电磁波在不同介质传播速度的差异, 通过放置于圆锥喇叭口径处不同厚度的介质透镜改变 TM_{01} 模不同扇区的相位, 从而改变 TM_{01} 模在普通喇叭口径处的轴对称分布, 将轴对称的口径场分布转换为线对称, 进而实现线极化或圆极化的轴向辐射。通过添加匹配介质, 减小介质对微波的反射和驻波特性的影响; 延伸喇叭到透镜边缘, 使移相过程在波导内完成, 有效地控制了电磁场模式。天线增益在中心工作频率为 9.3 GHz 时为 19 dB, 口径效率 25%, 辐射效率大于 90%, 反射系数小于 1.3, 轴比小于 2 dB, 3 dB 相对带宽大于 30%, 几乎可以覆盖整个 X 波段。

关键词: TM_{01} 模; COBRA 透镜天线; 圆极化轴向辐射

中图分类号: TN015

文献标识码: A

对于输出模式为 TM_{01} 模式的高功率微波源, 由于输出端口的口径场分布具有轴对称性, 这些模如果直接辐射, 将导致弧线出现轴向为零的环状远场方向图。针对这一问题已有三种解决方案: (1) 模式转换器^[1] + 普通喇叭, (2) 同轴波束旋转天线^[2] (COBRA 天线), (3) VLASOV 天线^[3]。作为一种反射面天线, COBRA 天线^[4]的设计思路是: 把由 TEM 或 TM_{01} 模辐射得到的环状方向图作为初级馈源方向图, 将反射面分割成多片, 各片做适当的轴向位移, 从而将轴对称的口径场分布转换为线对称, 可以实现线极化或圆极化的轴向辐射, 衡量圆极化天线的主要指标是轴比, 轴比是极化椭圆最大响应与最小响应之比。这种方案的优点是不需要模式转换器, 可以最大限度地简化馈源的设计, 缺点是系统复杂, 体积大, 口径效率很低。COBRA 透镜型天线具有制造比较方便, 公差精度要求低的优点, 但由于透镜表面的反射和介质本身的损耗, 透镜天线的增益通常比反射面天线的增益低。本文提出了外加圆波导把喇叭延伸到透镜边缘, 添加匹配介质层进行相位补偿的改进型 COBRA 透镜天线, 在远场方向图和口径效率上都有很大的改善。

1 COBRA 透镜天线的工作原理

COBRA 天线利用电磁波在不同厚度介质中传播的不同相移实现对圆对称模式的修正, 其设计原理是: 将由 TM_{01} 模式激励的圆锥喇叭的平板透镜均匀分割成多片, 通过调整各片透镜的厚度改变口径场的相位分布, 实现轴向辐射, 其结构如图 1 所示。不难看出, 为了将 TM_{01} 模的圆对称场分布转换成线对称场分布以实现轴向辐射, 只需将各扇形介质区的相位取为

$$\phi_n = 2(n-1)/N \quad (1)$$

其中 $n=1, 2, 3, \dots, N$ 。因此相邻介质扇区的相差为

$$\phi = \frac{2}{N} = 2d(\sqrt{\epsilon_r} - 1) \quad (2)$$

式中: ϵ_r 为介质相对介电常数, $d = \lambda/N(\sqrt{\epsilon_r} - 1)$, 为相邻介质的厚度差, λ 为导波波长。

当 COBRA 透镜结构分成 2 个扇区, 其厚度造成的相位差依次为 0 和 180 时, 可以实现线极化的轴向辐射; 当 COBRA 透镜结构分成多个扇区, 其厚度造成的相位差依次为 $360^\circ/N$ (其中 N 为扇区总个数), 可以实现圆极化的轴向辐射。式 (1), 式 (2) 的前提条件是电磁波看作平面波, 但由于圆锥喇叭的渐变, 电磁波在喇叭

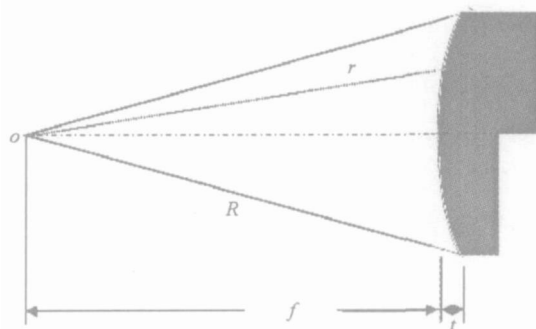


Fig. 1 Structure of microwave lens

图 1 微波透镜结构图

* 收稿日期: 2005-01-21; 修订日期: 2005-05-19

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 徐福锴(1969—), 男, 山东胶南人, 博士, 主要从事高功率微波器件与天线研究; 北京 8009 信箱。

喇叭中传播到达透镜口径面必然会产生相移，考虑这一影响，当透镜焦距 f 大于喇叭口径半径时，可以把电磁波看作从喇叭顶点发出的球面波，介质透镜的照明面作成曲面，通过调整厚度，消除由于喇叭半径渐变带来的相移，如图 1 所示。

为使 o 点出发的球面电磁波到达喇叭口径面时同相，必须有 $f + nt = r + n[t - (r \cos \theta - f)]$ ，其中 θ 为入射线与 z 轴的夹角。于是，可以得到

$$r = \frac{(n - 1)f}{n \cos \theta - 1} \tag{3}$$

这是一个双曲线方程，就是说，透镜照明面的剖面为双曲线。这是圆锥喇叭张角比较大时必须考虑光程补偿的原因。

2 COBRA 透镜天线的设计

2.1 理论设计

在 COBRA 透镜式天线设计中，需考虑喇叭尺寸、增益和介质透镜对喇叭内场分布的影响以及天线的驻波特性等因素的影响：(a) 喇叭尺寸的选取，这里主要考虑喇叭自身的电特性，按照喇叭天线的最佳尺寸曲线，可以选取不同的尺寸，得到不同的增益和场分布；(b) 将喇叭延伸到透镜边缘使相移过程在波导内完成，这样可以提高 2~4 dB 的增益，但由于相移过程发生在波导内，带宽会相应减小；(c) 透镜介质材料厚度根据式 (1) 和式 (2) 进行选择，并根据式 (3) 进行相位补偿；(d) 添加匹配介质，减小介质反射对喇叭内场分布的影响。

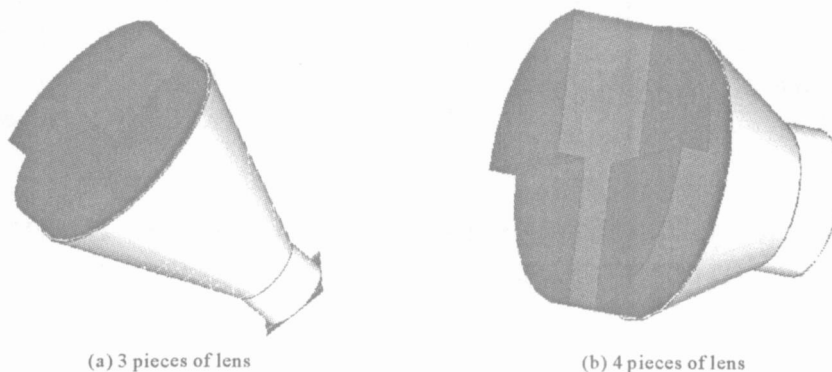


Fig. 2 Structure of COBRA lens antenna

图 2 3 片(a)和 4 片(b)透镜型 COBRA 天线结构

2.2 数值模拟结果

COBRA 透镜型天线是基于几何光学原理设计的，其电特性需要通过数值模拟或实验才能得到进一步的验证。我们选择 X 波段进行研究，介质材料选用常用的微波介质材料，选取合适的参数，并以轴向增益为目标函数进行优化设计。

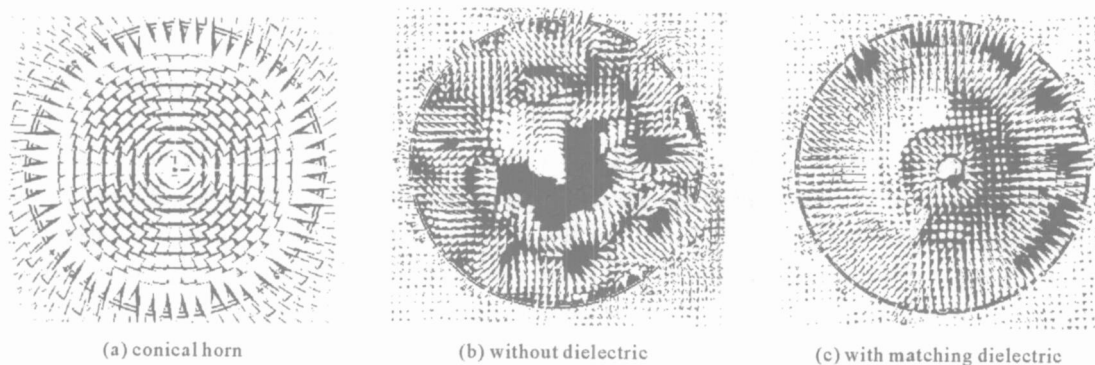


Fig. 3 Field on aperture of conical horn without and with matching dielectric

图 3 普通圆锥喇叭、未添加匹配介质和添加匹配介质的口径场

比较图 3(a) 和 3(b) 可以看到，在喇叭口径处添加介质透镜对喇叭口径场的分布影响很大，这是因为，添加的介质透镜对电磁波的反射造成了喇叭内部电磁场的扰动，从而使口径场分布变的杂乱，驻波系数变坏。为了

克服这一问题,可以在喇叭口径和透镜介质之间添加匹配介质层来减小介质对电磁波的反射,从而改善口径场分布,进而改善驻波特性(减小设计带宽内的反射系数/S-参数),如图 3(c)所示。模拟结果表明,透镜会对圆锥喇叭原有的驻波特性造成影响,但添加匹配介质层后,驻波系数有所改善,能满足足够带宽的驻波要求,如图 4 所示。

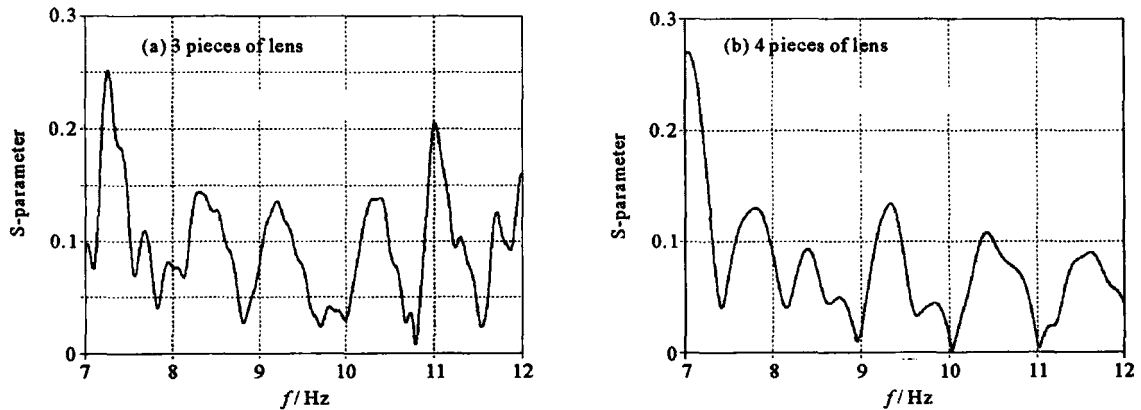


Fig. 4 S-parameter of COBRA lens antenna with 3 and 4 pieces of lens

图 4 3 片和 4 片 COBRA 透镜天线的驻波特性

从模拟结果看,COBRA 透镜天线可以实现圆极化轴向辐射,透镜对圆锥喇叭原驻波特性造成影响,但通过添加匹配介质层,结构就能满足足够带宽的驻波要求。比较两个模型的模拟结果,3 片透镜型天线的轴比好于 4 片,但 3 片比 4 片透镜天线容易出现偏轴现象。天线增益在中心工作频率为 9.3 GHz 时为 19 dB,口径效率 25%,辐射效率大于 90%,反射系数小于 1.3,3 dB 相对带宽大于 30%,几乎可以覆盖整个 X 波段。

3 结 论

本方案实现了对 TEM 模或 TM_{01} 模的圆极化轴向辐射,具有高增益、频率特性比较好、结构紧凑、公差精度要求低便于加工等优点,可以作为高功率微波的辐射天线或其它高增益天线的馈源。

参考文献:

- [1] Koslover R A. Compact, broadband high power circular TM_{01} to TE_{11} mode converter[P]. U. S. Patent, No. 4999591.
- [2] Courtney C C, Baum C E. The coaxial beam-rotating antenna (COBRA): theory of operation and measured performance[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2000, **48**(2):299—309.
- [3] Haworth M, Allen K, Baca G, et al. Recent progress in the hard-tube MILO experiment[A]. *Proc of SPIE[C]*. 1997, **3158**:28—39.
- [4] Lo Y T, Lee S W. *Antenna handbook: theory, applications and design*[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1998.

Design of improved COBRA lens antenna

XU Fu-kai, ZHOU Hai-jing, DING Wu

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

Abstract: An improved COBRA lens antenna in X-band for TM_{01} mode is designed. The dielectric lens consisting of three or four sectors is located on the aperture plane of a conical horn. The antenna can radiate circular polarized patterns, with a boresight peak and a high gain. The results of simulation demonstrate that at the operating frequency, the gain, the aperture efficiency and the radial efficiency are 19 dB, 25%, and more than 90% respectively. The axial ratio is less than 2 dB and the relative bandwidth of 3 dB is more than 30%, which covers almost the whole X-band.

Key words: TM_{01} mode; COBRA lens antenna; Circular polarized pattern