

# 一种新型圆极化器的 FDTD 分析

唐维萍, 甄蜀春, 杨守国

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**采用时域有限差分法(FDTD 方法)对自行研制的吊舱式机载干扰机收发天线系统中的隔板式圆极化器进行了深入分析研究, 得出了这种新型极化器的性能参数和清晰的物理图象, 给出了圆极化器的一种更易于理解的新诠释。

**关键词:**隔板式圆极化器; 圆极化; FDTD 方法

**中图分类号:** TN 015 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)03-0059-05

吊舱式机载干扰机收发天线系统由发射天线、接收天线以及天线罩等组成。其收发天线均采用圆极化辐射方式, 而圆极化器是决定天线圆极化性能的主要部件, 因此对隔板式圆极化器的分析研究具有理论和实用价值。隔板式圆极化器(Septum Polarizer, 简称 SP)是新型的圆极化器, 他具有良好的圆极化性能和紧凑的结构, 而且便于直接和圆波导天线进行对接, 不需要另加过渡段, 从而简便地实现天线的圆极化辐射。

1995 年, J. Bornemann 和 V. A. Labay<sup>[1]</sup>用模式匹配法对 19GHz 以下隔板厚度呈阶梯递增的隔板式圆极化器进行过研究; 文献[2]用模式匹配法设计过一种 X 波段隔板式圆极化器; 文献[3]对隔板式圆极化器的物理特征作了定性解释; 但均未见到完整的分析综合资料。目前国内对隔板式圆极化器的报道还极为少见。只有文献[4]利用[S]参数法简单分析了隔板式圆极化器产生圆极化的机理。

## 1 隔板式圆极化器的 FDTD 分析

### 1.1 结构尺寸及网格划分

根据指标要求, 并且兼顾天线结构紧凑、重量轻、性能好、易于连接等特点, 经反复论证, 选择隔板式圆极化器作为产生圆极化波的装置。

如图 1 所示, 吊舱式机载干扰机收发天线由三部分组成:

- A——输出波导及反旋口的负载;
- B——隔板式圆极化器;
- C——双扼流环同轴多模喇叭。

其中 B 即为隔板式圆极化器。如图 2 所示, 隔板式圆极化器由共用一个宽壁的矩形波导连接在一起而成, 它们共用的宽壁即为隔板, 并且隔板的宽度阶梯式递减, 从而在矩形波导的另一端形成一个共用的方波导口。对隔板的阶梯进行适当设计, 便可得到具有等功率分配和线圆极化转化功能的隔板式圆极化器。本文应用 FDTD 方法分析隔板式圆极化器的稳态场分布, 并计算其圆极化参数。

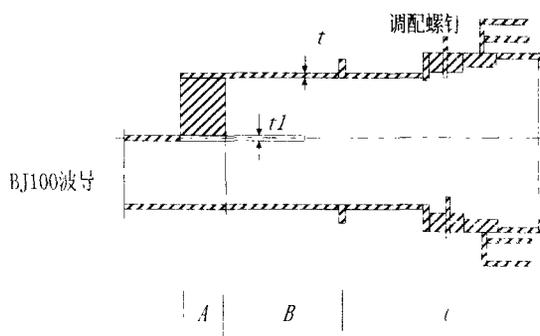


图1 吊舱式机载干扰机收发天线结构图

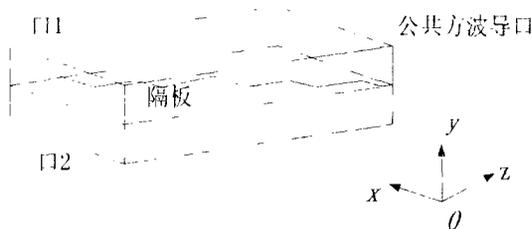


图2 隔板式圆极化器结构示意图

X波段隔板式圆极化器结构尺寸如图3(a)所示。

工作频段:X波段。隔板尺寸: $a=18.96\text{mm}$ ,  $b=70\text{mm}$ ,  $L=1\text{mm}$ ,  $L_1=3.1\text{mm}$ ,  $L_2=8\text{mm}$ ,  $L_3=8.5\text{mm}$ ,  $L_4=8.1\text{mm}$ ,  $L_5=10.7\text{mm}$ ,  $S_1=15.4\text{mm}$ ,  $S_2=10.3\text{mm}$ ,  $S_3=7.3\text{mm}$ ,  $S_4=4.3\text{mm}$ ,  $S_5=1.7\text{mm}$ 。

建立三维差分网格时,首先建立如图2所示的坐标系。网格的划分应根据隔板的尺寸分别选择三个方向的网格步长,要尽量使隔板边缘与网格边缘重合,便于编程计算。这样在整个计算区域中就只存在两种类型的网格单元,一种是自由空间的网格单元,一种是金属介质的网格单元。建立的差分网格如图3(b)所示。

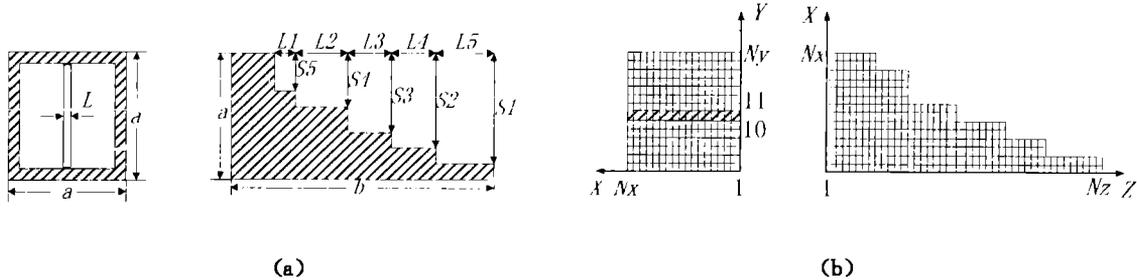


图3 隔板式圆极化器隔板尺寸及差分网格划分示意图

## 1.2 激励源的选择

在标准的单频激励函数中加入汉明窗函数,即得到新的激励源:

$$E_y = \begin{cases} \sin(\pi x l a) \sin(2\pi f t) u(t) & t \geq T \\ \sin(\pi x l a) \sin(2\pi f t) \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(\pi t / T) \right] u(t) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $T$  为时间窗大小,可取谐振频率的 10 倍周期,汉明加权可以大大缩短达到稳态的迭代时间。采用汉明加权的激励函数(1),激励源设置在  $z=0$  平面上。

## 1.3 吸收边界条件

根据实际情况,采用 Mur's 二阶吸收边界条件。由于边界上为电场,只考虑对边界网格点上电场的切向分量使用吸收边界条件。其差分关系式如下:

$z=0$  处:

$$\begin{aligned} E_y^{n+1}(i, j, 0) = & -E_y^{n-1}(i, j, 1) + \frac{v\Delta t - \Delta z}{v\Delta t + \Delta z} [E_y^{n+1}(i, j, 1) + E_y^{n-1}(i, j, 0)] + \\ & \frac{2\Delta z}{v\Delta t + \Delta z} [E_y^n(i, j, 0) + E_y^n(i, j, 1)] + \\ & \frac{(v\Delta t)^2 \Delta z}{2(\Delta y)^2 v\Delta t + \Delta z} [E_y^n(i, j+1, 0) - 2E_y^n(i, j, 0) + E_y^n(i, j-1, 0) + \\ & E_y^n(i, j+1, 1) - 2E_y^n(i, j, 1) + E_y^n(i, j-1, 1)] + \\ & \frac{(v\Delta t)^2 \Delta z}{2(\Delta x)^2 v\Delta t + \Delta z} [E_y^n(i+1, j, 0) - 2E_y^n(i, j, 0) + E_y^n(i-1, j, 0) + \\ & E_y^n(i+1, j, 1) - 2E_y^n(i, j, 1) + E_y^n(i-1, j, 1)] \end{aligned} \quad (2)$$

$z=z_m$  处:

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i, j, z_m) = & -E_x^{n-1}(i, j, z_m - 1) + \frac{v\Delta t - \Delta z}{v\Delta t + \Delta z} [E_x^{n+1}(i, j, z_m - 1) + E_x^{n-1}(i, j, z_m)] + \\ & \frac{2\Delta z}{v\Delta t + \Delta z} [E_x^n(i, j, z_m) + E_x^n(i, j, z_m - 1)] + \\ & \frac{(v\Delta t)^2 \Delta z}{2(\Delta y)^2 v\Delta t + \Delta z} [E_x^n(i, j+1, z_m) - 2E_x^n(i, j, z_m) + E_x^n(i, j-1, z_m) + \\ & E_x^n(i, j+1, z_m - 1) - 2E_x^n(i, j, z_m - 1) + E_x^n(i, j-1, z_m - 1)] + \\ & \frac{(v\Delta t)^2 \Delta z}{2(\Delta x)^2 v\Delta t + \Delta z} [E_x^n(i+1, j, z_m) - 2E_x^n(i, j, z_m) + E_x^n(i-1, j, z_m) + \\ & E_x^n(i+1, j, z_m - 1) - 2E_x^n(i, j, z_m - 1) + E_x^n(i-1, j, z_m - 1)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 E_y^{n+1}(i, j, z_m) = & -E_y^{n-1}(i, j, z_m - 1) + \frac{v\Delta t - \Delta z}{v\Delta t + \Delta z} [E_y^{n+1}(i, j, z_m - 1) + E_y^{n-1}(i, j, z_m)] + \\
 & \frac{2\Delta z}{v\Delta t + \Delta z} [E_y^n(i, j, z_m) + E_y^n(i, j, z_m - 1)] + \\
 & \frac{(v\Delta t)^2 \Delta z}{2(\Delta y)^2 v\Delta t + \Delta z} [E_y^n(i, j + 1, z_m) - 2E_y^n(i, j, z_m) + E_y^n(i, j - 1, z_m) + \\
 & E_y^n(i, j + 1, z_m - 1) - 2E_y^n(i, j, z_m - 1) + E_y^n(i, j - 1, z_m - 1)] + \\
 & \frac{(v\Delta t)^2 \Delta z}{2(\Delta x)^2 v\Delta t + \Delta z} [E_y^n(i + 1, j, z_m) - 2E_y^n(i, j, z_m) + E_y^n(i - 1, j, z_m) + \\
 & E_y^n(i + 1, j, z_m - 1) - 2E_y^n(i, j, z_m - 1) + E_y^n(i - 1, j, z_m - 1)] \quad (4)
 \end{aligned}$$

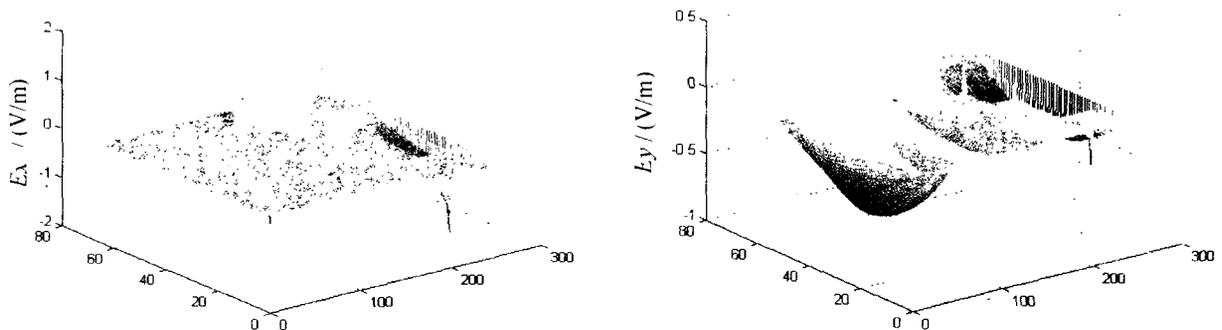
由于在  $z=0$  面上馈入的是  $TE_{10}$  模, 只有三个分量 ( $E_y, H_x, H_z$ ), 在隔板的第一个阶梯处由于不连续性, 将出现其它模式, 这时才会出现电场和磁场的其它分量 (如  $E_x, H_y, E_z$ )。所以, 在  $z=0$  处设置吸收边界条件时, 只考虑  $E_y$  即可。而在  $z=z_m$  处, 则必须考虑  $E_x, E_y$  两个分量。

## 2 数值计算结果与讨论

### 2.1 隔板式圆极化器内部场分布

给定隔板式圆极化器的尺寸和工作频率后, 进行编程计算, 同时合理选择运算的总时间  $N_t$ , 以便使场分布呈现稳定状态。

$t=N_t$  时刻, 选取  $N_y=10$  (即隔板处) 面上的场分布, 其场分布如图 4 所示, (取  $N_t=1\ 300\Delta t$ )。这里只列出我们感兴趣的  $E_x, E_y$  的场分布波形图。



(a) 隔板式圆极化器电场分量  $E_x$  的分布图 (b) 隔板式圆极化器电场分量  $E_y$  的分布图

图 4 隔板式圆极化器电场分量分布图

从图中可以看出, 隔板式圆极化器输入的是  $TE_{10}$  模, 只有  $E_y$  分量, 由于隔板的不连续性, 在阶梯处出现了其它模式, 因而在输出端有  $E_x$  分量输出, 这也是产生圆极化波的必要条件。

### 2.2 隔板式圆极化器圆极化性能的分析

衡量圆极化器性能的主要有轴比  $A_R$ 、驻波系数  $\rho$  两个指标, 而相移  $\Phi$  和插入损耗  $L$  等参数均反映在圆极化器轴比  $A_R$  指标上。通常希望轴比、驻波系数越小越好。

#### 2.2.1 隔板式圆极化器驻波系数的计算

驻波系数是衡量隔板式圆极化器是否良好匹配的一个重要参量, 所以下面重点对驻波系数  $\rho$  进行计算。一个周期内隔板式圆极化器的输入功率:

$$P_{in} = \sum_t^{t+T} \frac{ab}{480\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} E_0^2(t) \quad (5)$$

一个周期内隔板式圆极化器的输出功率:

$$P_{\text{out}} = \sum_t^{t+T} \sum_{\substack{i=1, j=1 \\ k=N_x-1}}^{N_x, N_y} [E_x(i, j, k) * H_y(i, j, k) - E_y(i, j, k) * H_x(i, j, k)] \Delta x \Delta y \quad (6)$$

从而可得反射功率: 
$$P_r = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \quad (7)$$

反射系数的模值为: 
$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{P_r}{P_{\text{in}}}} \quad (8)$$

驻波比为: 
$$\rho = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (9)$$

至此,可以从驻波比的值较为直接地了解到隔板式圆极化器是否良好匹配。

通过计算得出,在隔板式圆极化器的工作频段内,驻波比  $\rho$  的值均小于 1.7,与实测值符合,满足要求。

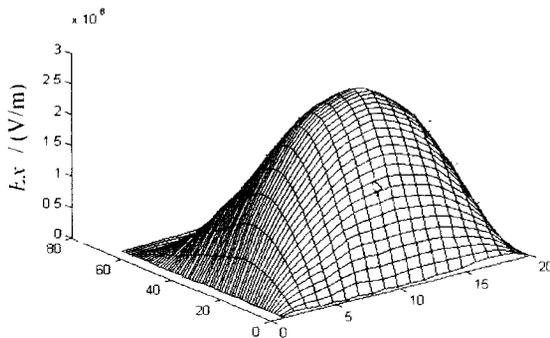
### 2.2.2 隔板式圆极化器轴比的计算

由于 FDTD 法计算得到的结果仅为瞬时值,要计算隔板式圆极化器输出波形的轴比,首先要计算输出端各网格点处的振幅分布,由:

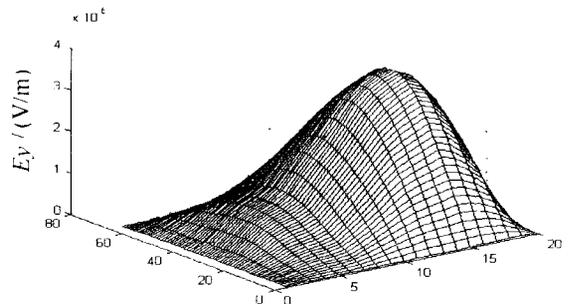
$$\begin{cases} E_{\eta_1}(i, j, k) = \frac{1}{T} \int_0^T E_{\eta}(i, j, k) \cos \omega t dt \\ E_{\eta_2}(i, j, k) = \frac{1}{T} \int_0^T E_{\eta}(i, j, k) \sin \omega t dt \end{cases} \quad (10)$$

则其幅度为: 
$$E_{\eta_0}(i, j, k) = \sqrt{E_{\eta_1}^2(i, j, k) + E_{\eta_2}^2(i, j, k)} \quad (11)$$

式中  $E_{\eta}(i, j, k)$  为 FDTD 法计算得到的瞬时值,其中  $\eta$  为  $x, y$  中的任意一个。选择隔板式圆极化器的输出端面 ( $z = N_z$ ),分别计算各网格点处  $E_x$  和  $E_y$  的幅值,如图 5 所示:



(a) 隔板式圆极化器输出端面上  $E_x$  的振幅分布



(b) 隔板式圆极化器输出端面上  $E_y$  的振幅分布

图 5 隔板式圆极化器输出端面上电场的振幅分布

再分别计算轴比,其结果如图 6 所示;可见,在隔板式圆极化器的输出端面上,除极少数网格点外,大部分点的轴比均在 0.6 到 1.6 之间,与实测值相符合。

## 3 结论

由以上分析得出,用 FDTD 方法可得出隔板式圆极化器——这种新型圆极化器的性能参数和清晰的物理图象,很直观地展示了隔板式圆极化器内部场的分布情况,通过进一步对隔板式圆极化器的圆极化参数的计算,可以看出隔板式圆极化器的确是一种结构紧凑、性能良好和使用方便的圆极化器。

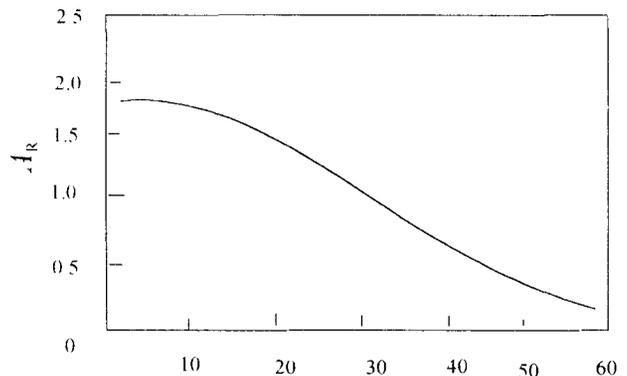


图 6 输出端面轴比分布图

## 参 考 文 献

- [1] Bornemann Jens, Labay Vladimir A. Ridge Waveguide Polarizer with Finite and Stepped-Thickness Septum [J]. IEEE Transaction MTT, 1995, 42(8): 1782 - 1787.
- [2] Ege T, McAndrew P. Analysis of Stepped Septum Polarizers [J]. Electronics Letters, 1985, 21(11): 1166 - 1168
- [3] Lapidus Alex D, Shapiro Michael A. A Septum Polarizer [J]. MICROWAVE JOURNAL, 1998, 41(5): 293 - 302.
- [4] 徐继东. 导体膜片圆极化器的功能与应用 [J]. 现代雷达, 1993, 15(4): 128 - 132.
- [5] 高本庆. 时域有限差分法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

## The FDTD Analysis of A New Type of Polarizer

TANG Wei-ping, ZHEN Shu-chun, YANG Shou-guo  
(The Missile Institute, AFEU., Sanyuan 710038 China)

**Abstract:** In this paper, the Finite Difference Time-Domain method (FDTD method) is employed for the first time to analyse the septum polarizer of antenna system in airborne nacelle jammer designed by ourselves in detail. The performance parameters and distinct physical images of this new type of polarizer are yielded. And a new kind of annotation of polarizer is given, which is easy to understand.

**Key words:** septum polarizer; circular polarization; FDTD method