

文章编号: 1001 - 9014 (2009) 05 - 0350 - 03

# 一种新型红外 / 毫米波共口径目标模拟器 电磁特性的优化设计方法

陈亚萍, 孙厚军, 吕昕

(北京理工大学 电子工程系, 北京 100081)

**摘要:** 为了减小反射红外、透射毫米波的介质对红外 / 毫米波共口径目标模拟器的电场相位分布的影响, 提高毫米波信号与红外信号的指向一致性, 将几何光学法 (GO) 和遗传算法 (GA) 相结合, 对红外 / 毫米波共口径目标模拟器中的反射红外并且透射毫米电磁波的介质表面形状进行优化, 且得出了函数表达式. 利用电磁仿真软件对优化后的目标模拟器指定距离处电场幅度和相位的分布进行仿真. 仿真结果表明: 优化后的共口径目标模拟器电磁波相位分布变化很小, 毫米波信号与红外信号指向具有良好的 consistency.

**关键词:** 红外 / 毫米波; 目标模拟器; 几何光学法; 共口径

**中图分类号:** TN955 **文献标识码:** A

## OPTIMIZATION DESIGN METHOD OF ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS FOR A NOVEL INFRARED / MILLIMETER-WAVE CO-APERTURE OBJECT SIMULATOR

CHEN Ya-Ping, SUN Hou-Jun, LV Xin

(Department of Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to reduce the dielectric effects, mainly induced by the reflection of infrared signals and the transmission of electromagnetic waves, on the electric field phases of the infrared/millimeter-wave co-aperture object simulator and improve the direction uniformity of infrared and millimeter-wave signals, the geometrical optics (GO) method was combined with the genetic algorithm to obtain the shape functions for generating the dielectric surfaces. The amplitude and phase distributions of the electric fields at the specific distance from the optimized co-aperture object simulator were computed by using the commercial EM software. The numerical results illustrate that the phase variation of the electric fields of the co-aperture object simulator is very small after optimization, and good direction consistency of infrared and millimeter-wave signals is also observed.

**Key words:** infrared/millimeter wave; object simulator; geometrical optics (GO) approach; co-aperture

### 引言

为了满足日益发展的红外 / 毫米波复合系统测试的需求, 红外 / 毫米波复合半实物系统仿真技术得到了快速发展. 目前, 研究较多的是利用天线阵列产生毫米波信号的复合目标模拟器<sup>[1]</sup>, 但这种产生毫米波信号的系统比较复杂, 成本十分高昂. 为此, 研究一种简单实用的红外 / 毫米波共口径目标模拟器, 它将红外信号与毫米波信号统一于同一个反射面内, 可以同时或分时发射红外信号和毫米波信号. 将目标模拟器和接收装置分别放置于 5 轴转台<sup>[2]</sup>的两

端, 通过转台的控制实现信号在二维平面上的运动. 红外信号和毫米波信号的指向一致性是该目标模拟器的一项重要指标, 因此将几何光学法和遗传算法相结合, 对目标模拟器中反射红外、透射毫米波的介质进行优化, 减小由于介质对毫米波的折射对目标模拟器电场相位分布产生的影响, 提高目标模拟器红外信号和毫米波信号的指向一致性.

### 1 目标模拟器系统工作原理

红外 / 毫米波共口径模拟器结构如图 1 所示, 双曲面所在介质为反射红外信号并透射毫米波信号的

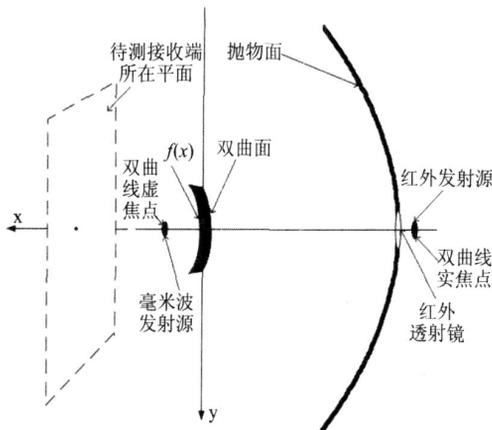


图 1 红外/毫米波共口径目标模拟器原理图

Fig 1 Sketch of the infrared/millimeter wave co-aperture object simulator

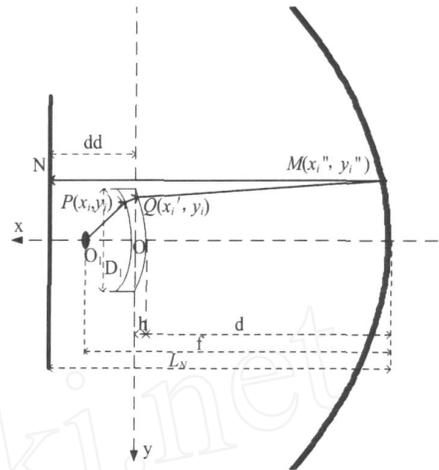


图 2 毫米波传输示意图

Fig 2 Transmission path of the millimeter wave

介质. 红外部分为用于测试红外/毫米波复合系统红外跟踪<sup>[3,4]</sup>性能的双反射系统,位于双曲面实焦点处的红外源产生的信号,经过双曲面和抛物面的两次反射后,形成与抛物面旋转对称轴(x轴)平行的光束<sup>[5]</sup>.毫米波的馈源天线位于双曲面的虚焦点上,电磁波经过介质折射后到达抛物面,经抛物面反射后形成与红外信号共轴的电磁波.

由于红外信号的波长与毫米波信号的波长相差几个数量级,因此红外信号对反射面表面的光滑度和曲率的精确度等指标要求更高.在该目标模拟器中,同时涉及到红外信号和毫米波信号的部分,优先满足红外信号的要求.发射源的相位中心和曲面 $f(x)$ 的形状决定毫米波信号的指向.下面讨论当发射源相位中心在抛物面焦点(即双曲面虚焦点)上时 $f(x)$ 对毫米波信号指向的影响.

## 2 介质曲面优化方法及实例

### 2.1 介质曲面优化方法

根据抛物面天线性质,当发射源相位中心位于抛物面焦点上时,经抛物面反射后的电磁波平行于抛物面的对称轴(图1中x轴).如图1所示,共口径目标模拟器中,介质位于发射源与抛物面之间,由于介质的折射效应,透射过介质的电磁波传播方向将发生改变.如果照明面( $f(x)$ 绕x轴旋转形成的曲面)的形状不合适,透过介质的电磁波照射到抛物面上,经抛物面反射后的电磁波,在抛物面的口径面上将不再是平面波.当电磁波的相位呈立方率分布时,图2所示N点所在直线上电场分布将不是关于x轴对称的,方向图指向将不与红外信号共轴.

以下将采用几何光学法对 $f(x)$ 进行优化,毫米波传输路径如图2所示.设双曲面的直径为 $D_1$ ,介质的折射率为 $n$ .分别取各旋转对称曲面与 $x-y$ 坐标平面的截线为例进行分析.

毫米波在介质中的传播,遵循光的折射定律,下面利用几何光学法<sup>[6]</sup>对其传播路径进行推导计算.由于 $f(x)$ 是关于x轴旋转对称的曲线,设图2中P点所在曲线方程为:

$$y^2 = f(x) = \sum_{i=0}^N a_i x^i \quad (1)$$

双曲线方程为:

$$\frac{(x + (a + h))^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

$O_1P$ 斜率为:

$$k_0(i) = y_i / (x_i - L) \quad (3)$$

过P点的法线斜率为:

$$k_p(i) = -2 \frac{\sum_{i=0}^N a_i x^i}{\sum_{i=1}^N i a_i x^{i-1}} \quad (4)$$

$O_1P$ 的入射角为 $\alpha_0$ ,根据两条相交直线斜率与其夹角关系,可以得出入射角正弦为:

$$\sin \alpha_0 = \frac{k_0(i) - k_p(i)}{\sqrt{(1 + k_0(i)^2)(1 + k_p(i)^2)}} \quad (5)$$

$O_1P$ 经过折射后,沿PQ传播,PQ与过P点的法线夹角为 $\alpha$ ,根据折射定律:

$$\sin \alpha = \sin \alpha_0 / n \quad (6)$$

PQ斜率为:

$$k_1(i) = \frac{\sin \alpha_0 + k_p(i) \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0 - k_p(i) \sin \alpha}} \quad (7)$$

过PQ与双曲线交点Q点的法线斜率为:

$$k_q(i) = - \left( \frac{a}{b} \right)^2 \frac{y}{x - x_0}, \quad (8)$$

PQ对双曲线的入射角为  $\theta_1$ , 其正弦值为:

$$\sin \theta_1 = \frac{k_1(i) - k_q(i)}{\sqrt{(1 + k_1(i)^2)(1 + k_q(i)^2)}}. \quad (9)$$

经过第二次折射后, 电磁波沿 QM 传播, QM 与过 Q 点的法线夹角正弦值为:

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_1', \quad (10)$$

QM斜率为:

$$k_2(i) = \frac{\sin \theta_1 + k_q(i)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1'}}, \quad (11)$$

过 QM 与抛物线交点 M 的法线斜率为:

$$k_m(i) = - y(i) / 2f, \quad (12)$$

QM 与过 M 点法线夹角正弦为:

$$\sin \theta_2 = \frac{k_2(i) - k_m(i)}{\sqrt{(1 + k_2(i)^2)(1 + k_m(i)^2)}}. \quad (13)$$

经抛物线反射后, 电磁波沿 MN 传播. 根据光学反射定律, MN 斜率为:

$$k_3(i) = \frac{k_m(i) \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} - \sin \theta_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} + k_m(i) \sin \theta_2}, \quad (14)$$

MN 与 x 轴夹角正弦值为:

$$\sin \theta_3 = k_3(i) / \sqrt{1 + k_3(i)^2}. \quad (15)$$

从  $O_1$  点发出的电磁波经过两次折射一次反射达到口径面上的总路程为:

$$\begin{aligned} l(i) &= |O_1P| + n|PQ| + |QM| + |MN| \\ &= \sqrt{(x_i - L)^2 + y_i^2} + n \sqrt{(x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2} \\ &\quad + \sqrt{(x_i - x_i'')^2 + (y_i - y_i'')^2} + \frac{|x_i - dd|}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_3}}, \end{aligned} \quad (16)$$

电磁波在抛物面口径面上的相位分布变化情况由  $l(i)$  与  $l_0$  的差值决定,  $l_0$  为沿 x 轴入射的那条线. 对于给定的介质中心厚度  $h$ , 设定优化目标为

$\min \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l(i) - l_0)^2}$ , 采用遗传算法进行优化, 可以求出  $f(x)$  的解析表达式.

### 2.2 优化设计实例

如图 2 的坐标系所示, 抛物线直径为  $D = 180\text{mm}$ , 取抛物线方程为:

$$y^2 = 297(x + 54.05). \quad (17)$$

双曲线方程中各参数分别为:  $a = 15.425$ ,  $b = 37.042$ , 直径  $D_1 = 60\text{mm}$ , 中心厚度  $h = 4.5\text{mm}$ , 介质折射率为  $n = 1.43$  ( $n_r = n^2$ ). 待优化曲线方程为:

$$y^2 = a_2 x^2 + a_1 x + a_0, \quad (18)$$

根据上述推导, 利用遗传算法<sup>[7]</sup>对目标函数进行优化, 得出

$$y^2 = 222.733x + 445.327. \quad (19)$$

上述在利用几何光学法进行优化过程中, 假设发射源为理想点源, 没有考虑电磁波的衰减、绕射、反射以及经过抛物面反射后介质对电磁波的二次反射, 因此存在一定的误差. 几何光学法是一种高频近似方法, 这种方法的优点是物理概念清楚、简单易行, 但它不能计算绕射问题, 可以进一步采取几何绕射法 (GTD) 精确修正. 只要获得介质在设定频率的损耗参数, 即可获得电磁波在介质中的衰减.

当发射源为  $f_0 = 35\text{GHz}$  的毫米波天线时, 利用基于数值算法的电磁仿真软件分别对优化后的目标模拟器和不存在折射介质的抛物面天线电场分布情况进行仿真分析.

如图 2 所示, 设在距 y 轴  $dd = 1\text{m}$  且平行于 y 轴的直线上, 各点引入介质前的电场为:

$$\vec{E}_{1i} = E_{1i} e^{j 2i} \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (20)$$

引入介质后电场为:

$$\vec{E}_{2i} = E_{2i} e^{j 2i} \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (21)$$

电场幅度的相对变化量为:

$$E_i = (E_{2i} - E_{1i}) / E_{1\text{max}} \times 100\% \quad (22)$$

电场相位的变化量为:

$$\theta_i = \theta_{2i} - \theta_{1i}. \quad (23)$$

由于介质的存在而引起的电场幅度变化和相位变化情况, 分别如图 3 和图 4 所示.

由图 3 和图 4 可以看出, 在  $dd = 1\text{m}$  直线上, 由于介质的影响电场幅度的最大衰减量为 1.24%, 最小衰减量为 1.06%; 相位最大变化量为 25.13°, 最小变化为 24.72°. 介质对电磁波的衰减是不可避免的. 几何光学法优化的目标是电磁波的相位分布, 由

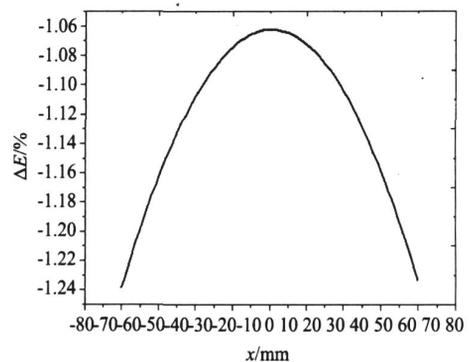


图 3 电场幅度相对变化曲线  
Fig 3 Relative change of the amplitude

- textual influences[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, **25**(8): 1282—1290
- [6] Jones J P, Palmer L A. An evaluation of the two dimensional Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1987, **58**: 1233—1258
- [7] DeVabis R L, Albrecht D G, Thorell L G. Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex[J]. *Vision*

- Research*, 1982, **22**: 545—559
- [8] Tan T N. Texture edge detection by modeling visual cortical channels[J]. *Pattern Recognition*, 1995, **28**(9): 1283—1298
- [9] Abdou I E, Pratt W K. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors[C]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, **69**(5): 753—763

(上接 352页)

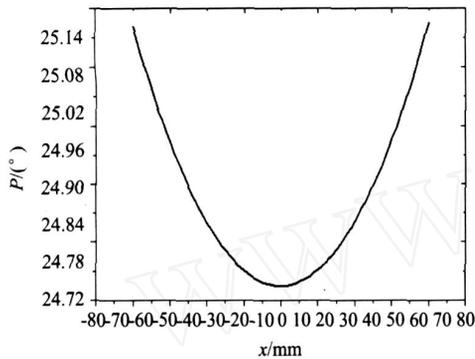


图 4 电场相位变化曲线

Fig 4 Absolute change of the phase

图 4 可以看出,引入介质后,相位变化量的最大起伏为  $0.41^\circ$ 。图中电场幅度和相位的变化关于零点基本是对称的,因此电磁波的指向为  $x$  轴,与红外波束指向一致。

### 3 结论

根据红外/毫米波复合系统要求红外目标与毫米波目标来波方向一致的特点,基于波的折射定律、反射定律和抛物面天线的性质,将几何光学法与遗传算法相结合,提出了一种对透射毫米波信号、反射红外信号的介质的形状进行优化的方法。利用电磁仿真软件进行了仿真验证,仿真结果表明,采用该方法设计的共口径目标模拟器,介质对毫米波的相位

分布影响很小,毫米波信号与红外信号具有良好的指向一致性。该方法对提高红外/毫米波目标模拟器性能具有重要意义。

### REFERENCES

- [1] Lev Sadovnik. Infrared/millimeter wave beam combiner utilizing holographic optical element[C]. *SPIE conference on optical analogies in microwave/millimeter wave*, 1998, **3464**: 155—163.
- [2] Peng Xiao-Yuan. *System simulation technique*[M]. Beijing: Beijing aeronautics and astronautics Press(彭晓源. 系统仿真技术. 北京:北京航空航天大学出版社), 2006: 154—156
- [3] LUAN Hui, ZHAO Kai. Error analysis and accuracy validation of two-point calibration for microwave radiometer receiver[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(栾卉,赵凯. 微波辐射计接收机两点定标法误差分析及准确性验证. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(4): 289—292
- [4] WANG Li-Hui, YU Yun-Jian, LU Duan-Jun. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(王立辉, 郁蕴健, 陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计. 红外与毫米波学报), 2008, **27**(1): 39—41.
- [5] Lin Chang-Lu. *Modem antenna design*[M]. Beijing: Posts and Telecom Press(林昌禄. 近代天线设计. 北京:人民邮电出版社), 1987: 472—474.
- [6] Cheng Yong. Design and optimization method for a new type dielectric lens[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*(程勇. 一种新型介质透镜的优化设计方案. 南京邮电学院学报), 2001, **21**(2): 28—32
- [7] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithm in engineering electromagnetics[J]. *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, 1997, **39**(4): 7—21.