

文章编号: 1672-8785(2010)03-0024-06

频率选择表面的分析方法和仿真技术研究

孙艳军¹ 董连和¹ 陈 宇² 冷雁冰¹

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学电信学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 采用有限元法对频率选择表面进行分析, 研究 Ansoft HFSS 软件用于频率选择表面仿真的可行性。以六边形单元频率选择表面为实例探索 Ansoft HFSS 软件仿真频率选择表面的方法及过程。采用光刻技术制作出六边形单元频率选择表面样片。通过对仿真曲线和样片实测曲线的对比, 证明 Ansoft HFSS 软件用于频率选择表面仿真的方法是正确的。同时, 通过圆环和十字单元结构的实例, 进一步验证了其仿真的可靠性。软件仿真中同时考虑了频率选择表面的频域特性和时域特性, 而用传统的计算方法设计的频率选择表面只能考虑其中的一种特性, 因此该仿真设计方法更准确。

关键词: 频率选择表面; Ansoft HFSS; 有限元法; 仿真; 光刻

中图分类号: V243.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.03.006

Study of Analysis Method and Simulation Technology of Frequency Selective Surfaces

SUN Yan-jun¹, DONG Lian-he¹, CHEN Yu², LENG Yan-bing¹

(1. School of Photoelectronic Engineering, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Frequency selective surfaces were analyzed by using a finite element method and the feasibility of simulating frequency selective surfaces by an Ansoft HFSS software was studied. By taking the frequency selective surfaces of a hexagon cell for example, the simulation method and process of the frequency selective surfaces were explored. A hexagon cell sample with frequency selective surfaces was fabricated by using a photolithography technology. The simulation curves were compared with the measured curves of the sample. The result showed that simulating the frequency selective surfaces by using the Ansoft HFSS was feasible. At the same time, the reliability of the simulation was further verified in the circle and cross cell structure examples. In this simulation, both time domain characteristics and frequency domain characteristics of the frequency selective surfaces were considered. In contrast, either time domain characteristics or frequency domain characteristics could be considered in the traditional method. So, this simulaion method was more accurate.

Key words: frequency slective surfaces; Ansoft HFSS; finite element method; simulate; lithography

1 引言

频率选择表面(FSS)是一种周期结构, 根据

单元图案的不同, 可分为带通型(贴片型)和带阻型(孔径型)。FSS最早是由美国物理学家 David Rittenhouse 通过观察用发丝制成的等间距栅对

收稿日期: 2009-10-30

作者简介: 孙艳军(1978-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为先进光学制造。E-mail: custsun@126.com

日光的衍射现象而发现并提出的。FSS 出现以来, 其应用十分广泛, 应用范围涉及电磁领域的许多方面, 如在微波波段用作反射面天线的副反射器、雷达罩; 在远红外波段用作波极化器、分波束仪、分子激光器的“腔体镜”; 在红外波段用作红外传感器等。

近些年来, 有关 FSS 的分析及设计方法不断出现, 设计出的单元结构复杂多样、繁简不一。然而, 即使简单的 FSS 单元结构, 其制作工艺也相当繁琐, 不但制作周期较长, 造价也非常高。如进行理论设计和实际数据的对比, 在时间和经费上都会造成很大的浪费。因此寻求一种可靠的 FSS 仿真技术势在必行。

2 频率选择表面的有限元分析方法

2.1 电磁场有限元法的基本原理

有限元方法是近似求解数理边值问题的一种数值技术, 最早由库伦特提出。它是通过变分解法在某一个内积空间中求式 (1) 和式 (2) 的近似解, 即

$$Lu = g(\text{在域}\Omega\text{内})$$

$$Bu = q(\text{在边界}\Gamma\text{上})$$

式中, L 和 B 分别是域内和边界上的线性微分算子或积分算子, u 是自变量, g 和 q 是域内和边界的源项。如果相应的支配方程是由麦克斯韦方程组演化而来的亥姆赫兹方程或者泊松方程, 则可得到有限元方法。

2.2 频率选择表面的泛函数表达式

由频率选择表面抽象的几何结构模型, 我们可得到第 (m, n) 单元的场和第 $(0, 0)$ 单元的场之间的关系, 如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$E(r + mT_x + nT_y) = E(r)e^{-jk(mT_x + nT_y)} \quad (1)$$

$$H(r + mT_x + nT_y) = H(r)e^{-jk(mT_x + nT_y)} \quad (2)$$

根据场之间关系式求解场满足的空间波函数式 (3), 得到频率选择表面泛函数表达式 (4):

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \bar{E} - k_0^2 \varepsilon_r \bar{E} = -jk_0 Z_0 \bar{J} \quad (3)$$

$$F(\bar{E}_{ad}, \bar{E}) = \iiint_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \bar{E}_{ad} \cdot \nabla \times \bar{E} - k_0^2 \varepsilon_r \bar{E}_{ad} \cdot \bar{E} + jk_0 Z_0 \bar{E}_{ad} \cdot \bar{J} \right] d\Omega + jk_0 Z_0 \iint_s \bar{E}_{ad} (\bar{H} \times \bar{n}) ds = 0 \quad (4)$$

2.3 有限元积分边界的表示

根据弗洛盖模离散积分方程, 平面 FSS 阵列外表面和内表面的切向电场可表示为式 (5) 和式 (6):

$$E_t(\bar{\Gamma}_T^+) = \sum_{k,n} \left[A_{kn}^e \bar{\phi}_{kn}^e + A_{kn}^h \bar{\phi}_{kn}^h \right] e^{-jk_z(z - z_{\Gamma_T})} \quad (5)$$

$$E_t(\bar{\Gamma}_B^+) = \sum_{k,n} \left[B_{kn}^e \bar{\phi}_{kn}^e + B_{kn}^h \bar{\phi}_{kn}^h \right] e^{-jk_z(z_{\Gamma_B} - z)} \quad (6)$$

式中, e 和 h 分别表示 TE 模和 TM 模, A_{kn}^e 、 B_{kn}^e 表示展开系数。

2.4 泛函数有限元的离散

对单元进行有限元划分, 可以很容易地得到系数矩阵。将系数矩阵两部分分别积分得

$$[K^e] = \iiint_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \bar{N}^e)(\nabla \times \bar{N}^e)^T - k_0^2 \varepsilon_r^e (\bar{N}^e)(\bar{N}^e)^T \right] d\Omega \quad (7)$$

$$[B_1^e] = \frac{\sigma \delta}{1+j} \iint_{\Gamma} \bar{N}^e \bar{N}^{eT} d\Gamma \quad (8)$$

根据式 (7) 和式 (8), 可以得到的有限元展开式为

$$B_2 = \sum_{i=e,h} \left[\sum_{kn} Y_{kn}^i [S_{kn}]_{\Gamma_B}^H + \sum_{kn} Y_{kn}^i [S_{kn}] [S_{kn}]_{\Gamma_B}^H \right] \quad (9)$$

$$b = \sum_{i=e,h} 2A_{00}^i Y_{00}^i \iint_{\Gamma_T} \bar{\phi}_{00}^i \cdot \bar{N}_j^e d\Gamma_T \quad (10)$$

3 理论分析

Ansoft HFSS 是 Ansoft 公司推出的基于电磁场有限元 (FEM) 方法分析微波工程问题的三维电磁仿真软件, 在航空、航天、电子、通信等很多领域都有广泛应用。拥有空前电性能分析能力的功能强大的后处理器, 能计算任意形状三维无源结构的 S 参数和全波电磁场, 可直接得到特征阻抗、传播常数、S 参数与电磁场、辐射场以及天线方向图等结果。Ansoft HFSS 中有限元

法的建模过程可分为四步：(1) 区域离散。在任何有限元分析中，区域离散是第一步，也是最重要的一步，因为区域离散方式会影响计算机的内存需求、计算时间和数值结果的精确度；(2) 插值函数选择。每一个离散单元结点上的值是要要求的未知量，其内部其它点上的值是依靠结点值对其进行插值的；(3) 方程组的建立。对麦克斯韦方程利用变分方法建立误差函数，由于问题已经离散化为很多个子域的组合，因此可以在每个单元内建立函数对应的小的线性表达式，最后利用边界条件来得到矩阵方程的最终形式；(4) 方程组求解。

近些年来，有限元方法在频率选择表面设计中得到了广泛的应用。其它一些方法，如矩量法在解决倾斜排列的 FSS 结构或是当考虑介质特性的影响时，构建模型通常比较困难。采用有限元法，辅以边界条件则可以很好地克服这些难点。文献 [1]、[2] 中有关 FSS 的设计都涉及到有限元方法。

从以上分析可以看出，Ansoft HFSS 的基本原理基于电磁场有限元法。FSS 也可以根据有限元方法来分析和设计，因此 Ansoft HFSS 用于 FSS 仿真是可行的。

4 仿真过程

本文以六边形贴片单元为例，介绍 Ansoft HFSS 用于 FSS 仿真的具体过程。FSS 单元的参数如图 1 所示，六边形单元的周长为 17.7mm，单元间距为 0.1mm，六边形线宽为 0.18mm，单元呈正三角形分布。FSS 图案被置于上下两层介质之间，该介质的介电常数为 8.5，单层介质的厚度为 0.3mm。

4.1 建立模型

建立模型的首要条件是确定 FSS 的周期单元。FSS 在实际使用中尺寸较大，如按实际尺寸建立模型，则计算量过于庞大，不但耗时，而且准确性低。因此本文采用确定的周期单元，通过设定边界条件来模拟无限大的 FSS 周期结构。该 FSS 的周期单元模型如图 2 所示，将周期单

元模型置于空气盒中。

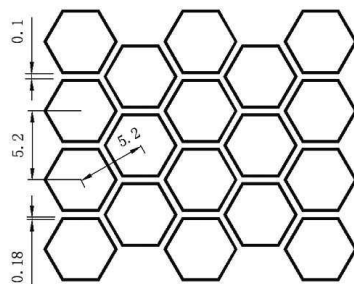


图 1 FSS 的单元参数

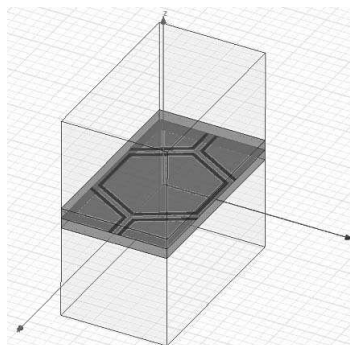


图 2 FSS 的周期单元模型

4.2 边界条件的设置

4.2.1 设置有限导体的边界条件

在实际的 FSS 中应用的导体为金属，由于各种金属的电导率不同，为了保证数据准确，将其设置为实际使用金属材料。在菜单栏中选择 HFSS/Boundaries/Assign/Finite conductivity。本文中选用的材料为金。

4.2.2 设置理想的匹配层 (PML)

理想的匹配层是吸收边界的一种，是一种能够完全吸收入射电磁波的假想材料，可用来截断外场问题中的自由空间。模型中空气盒的上下表面均要设置理想匹配层，在菜单栏中选择 HFSS/Boundaries/PML Setup wizard。在实际运用中，FSS 的上表面入射电磁波，下表面辐射电磁波，因此上下匹配层的设置不同。上表面匹配层被设置为 FSS 参考面 (Reference for FSS)，下表面匹配层被设置为辐射表面 (Radiating Only)。设置匹配层后的模型如图 3 所示。

4.2.3 主、从边界的设置

主从边界条件可以用来模拟无限平面的周期阵列结构。将 FSS 视为是无限大平面的周期

结构, 采用周期单元设置主、从边界的方法, 可极大地减少运算量。设置主从边界时要注意两个原则:

(1) 主、从边界只能定义在平面上 (二维、三维几何表面均可);

(2) 主、从表面几何结构必须匹配 (主边界是矩形, 从边界也为矩形)。

在菜单栏中选择 HFSS/ Boundaries /Assign /Master(slave)。图 4 分别为两对主、从边界。

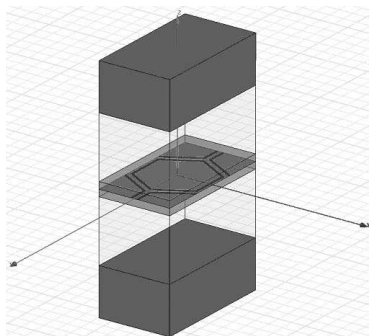


图 3 设置理想匹配层

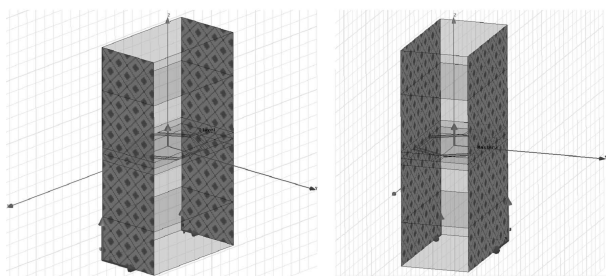


图 4 两对主、从边界

4.3 激励设置

激励设置就是定义物体或者其表面上的电磁场、电荷、电流或者电压。Ansoft HFSS 软件中提供的激励方式很多, 如波端口激励、磁偏置源激励、差分对激励、照射波激励等。频率选择表面多用于远场问题中, 因此我们这里选用照射波激励方式中的平面波激励。平面波的相位面与传播方向相垂直, 它入射到 FSS 上的角度称为入射角, 本文中入射波的角度为 90° 。Ansoft HFSS 计算入射波的方程为

$$E_{inc} = E_0 e^{-jk_0(k-r)} \quad (5)$$

式中, E_{inc} 表示入射波, E_0 是电场极化矢量, k_0 是自由空间波数, k 是传播矢量, r 是方向矢量。

在菜单栏选择 HFSS/ Excitations/ Assian/ Incident Wave/ Plane Wave。设置激励后如图 5。

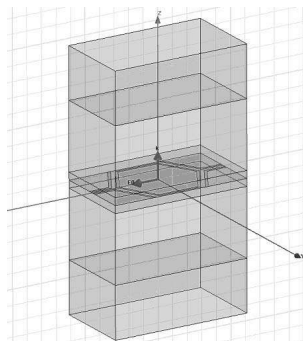


图 5 激励设置

4.4 求解设置

(1) 设置求解频率

在菜单栏中选择 HFSS > Anaysis Setup > Add Solution, 根据本文的 FSS 设置求解频率为 10GHz。

(2) 设置扫频

在菜单栏中选择 HFSS > Anaysis Setup > Add Sweep, 设置扫频范围为 2GHz ~ 22GHz, 进行插值求解。

4.5 计算及结果输出

求解设置完成后, 在菜单栏中选择 HFSS > Anayze 进行计算求解。计算完毕后可将需要的结果输出, 在菜单栏中选择 HFSS > Result > Creat Report。本文得到的反射 (S11) 和传输 (S21) 曲线如图 6 所示。

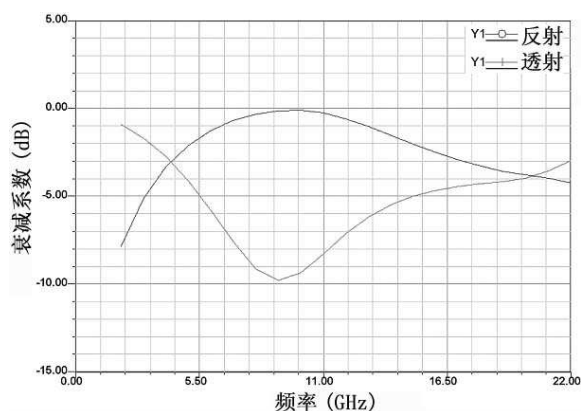


图 6 反射及传输曲线

5 实验与分析

为了验证仿真结果的准确性, 根据之前设计的 FSS 结构参数, 采用光刻方法在单层介质上制得 FSS 样片。样片尺寸为 $180 \times 180 \text{ mm}$, 厚度为 0.3 mm 。测试时, 将另一等厚介质片材料紧贴于 FSS 的另一侧, 使 FSS 处于介质中间。由于条件的限制, 只测得如图 7 所示的反射率曲线。

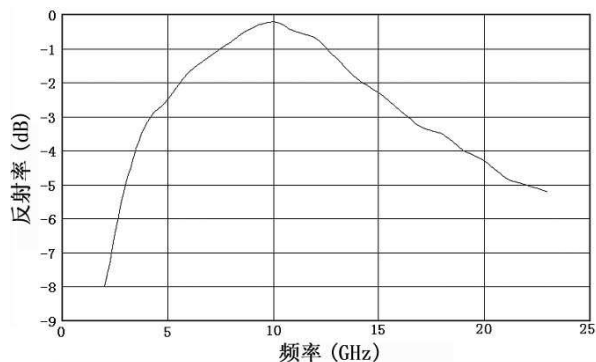


图 7 FSS 样片的反射率曲线

将图 6 和图 7 的反射率曲线对比后可以看出, 两条曲线走向基本一致。但由于样片制作及测试过程中都会产生误差, 因此样品曲线与模拟曲线在位置上稍有偏移。

同时对另外两种 FSS 单元图形进行了仿真。图 8 和图 9 分别为取自文献 [6] 和 [3] 的单元贴片结构, 图 10 和图 11 为仿真结果与文献实测结果的对比。对曲线进行比较后可以看出, 两者的吻合结果良好。

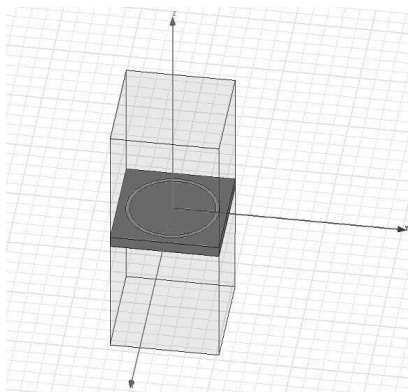


图 8 圆环单元的仿真模型

通过理论分析和实验验证, 证明 Ansoft HFSS 用于 FSS 的仿真是可靠的。文中介绍的虽然是

带阻贴片型 FSS 仿真的方法, 但它对带通孔径型 FSS 同样适用。仿真的成功与否关键是要看是否能够根据设计的 FSS 结构正确建立起周期单元模型。由于本人研究此软件的时间尚短, 对某些问题的领会还不够深刻, 如对有关 FSS 结构参数优化、仿真曲线误差修正等问题还需作进一步的研究。

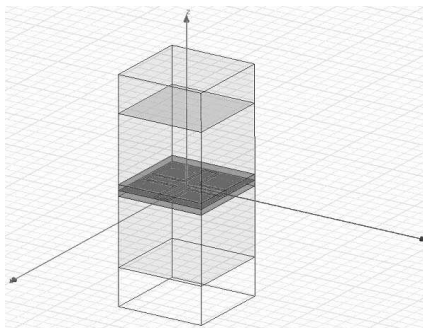
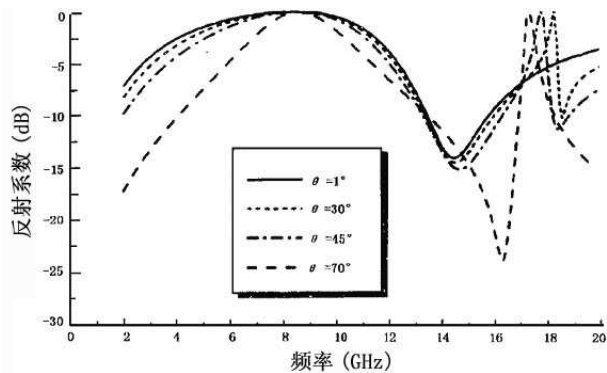
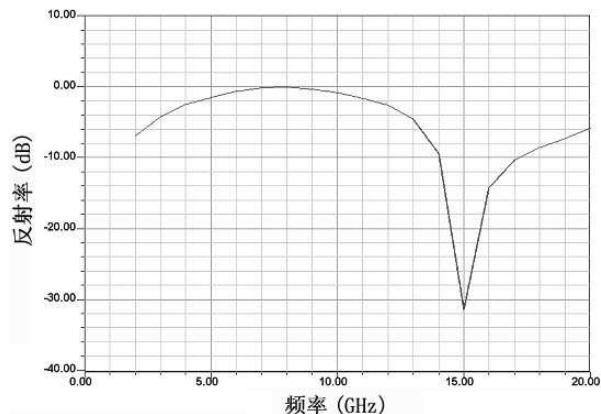


图 9 十字偶极子单元的仿真模型

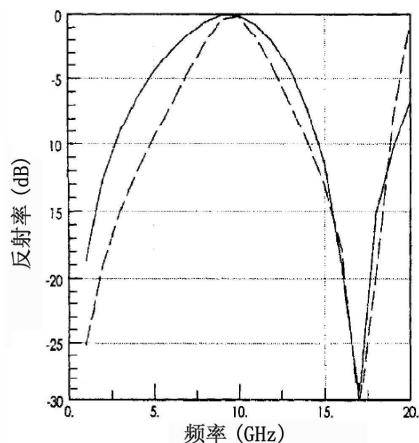


(a) 文献中的测试结果

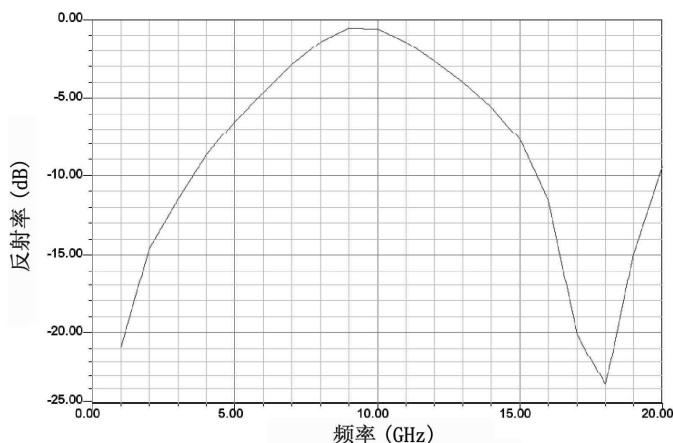


(b) 仿真结果

图 10 圆环单元的文献实测结果与仿真结果的对比



(a) 文献中的实测结果



(b) 仿真结果

图 11 文献中十字偶极子单元的实测结果与仿真结果的对比

参考文献

- [1] Thomas F Eibert, John Volakis, Donald R Wiiton. Hybrid FE/BI Modeling of 3-D Doubly Periodic Structures Utilizing Triangular Prismatic Elements and an MPIE Formulation Accelerated By the Ewald transformation [C]. *Proc IEEE*, 1999, **47**(5):843-849, (6): 221-225.
- [2] 谢拥军. **Ansoft HFSS 基础及应用** [M]. 西安电子科技大学出版社, 2007(4): 12-16.
- [3] Munk B A. *Frequency selective surfaces: theory and design* [M]. New York: John Wiley, 2000(8): 128-132.
- [4] 俞君, 曾智江, 等. 紫外激光在微细加工技术中的优势研究 [J]. **红外**, 2008, **29**(6): 9-13.
- [5] 谷荣亮. 隐身技术在导弹上的应用 [J]. **红外**, 2008, **29**(11): 29-32.
- [6] Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun, et al. Laser direct writing system with Cartesian and polar coordinate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 616-619.

新闻动态 News

德国推出新型智能长波红外摄像机

据 www.selectscience.net 网站报道, 德国 Stemmer Imaging 公司最近推出一款型号为 Xenics Gobi-384 的新式小型长波红外摄像机, 从而将智能摄像机引入到了红外成像领域。该摄像机的价格并不太高, 其特色在于拥有一个性能出众的机载式数字信号处理器, 因此能更好地进行实时图像处理。它还在帧率、用户界面和温度范围等方面具有高度的灵活性, 使得用户能够将其用于各种工业装配和生产任务当中。

这种小型智能摄像机很容易适应过程控制中的工业环境, 并能作为 IP 网络摄像机来使用或直接连接到个人计算机和视频监视器。此外, 它的应用范围还包括研究开发以及医学成像。

Gobi-384 型摄像机的工作波长范围为 $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$, 它能探测小到 0.05°C 的温差。其中的

384×384 元非制冷型非晶硅微测辐射热探测器阵列所贡献的像素数, 要比基于同一探测器技术的其他系统高出 44 个百分点。这种摄像机同用于动态分析及记录的 Thermography Studio 软件是完全兼容的。Thermography Studio 软件拥有一个功能强大的工具库, 能够精确分析各种物体和材料的热性能。

Gobi-384 型摄像机在控制和连接上也具有较大的灵活性, 它同时具备以太网 (TCP/IP) 接口和摄像机链路接口, 在进行标准的 100Mbit 以太网连接时可以得到高达 50fps 的帧率。另外, 一个支持 C++、VB、LabView 和 Linux 语言的软件开发包让用户在开放式结构中的编程变得更加灵活。优秀的图像用户界面 (GUI) 还使它能够进行实时图像的观察、数字图像及影片的存储、数字变焦、感兴趣区域的选取以及谱线轮廓与图像直方图等数据的显示。

□ 岳桢千