

微波设备表面电磁泄漏位置检测方法研究

白 明, 欧乃铭, 苗俊刚

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对微波设备表面电磁泄漏位置的检测方法进行研究, 根据其表面等效辐射源形式的不同, 设计了不同的检测方法, 并提出了相应的实验测试方案. 其中, 综合孔径被动辐射计成像的方法适用于表面等效辐射源为非相干源的情况; 数字透镜相移成像的方法适用于表面等效辐射源为相干源的情况; 物理透镜成像的方法适用于表面等效辐射源为非相干源、相干源和部分相干源的全部三种情况.

关键词: 电磁泄漏; 微波设备; 成像; 综合孔径; 数字透镜; 物理透镜

中图分类号: TN806 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1224-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.028

The Detection Methods for Locating the Electromagnetic Leakage Position on the Surface of Microwave Equipment

BAI Ming, OU Nai-ming, MIAO Jun-gang

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The detection methods for locating the electromagnetic leakage position on the surface of microwave equipment are researched. According to the different style of the equivalent radiation source, several different detection methods are designed, and the corresponding experimental test plans are also presented. Among them, the synthetic aperture passive radiometer imaging method is suitable for the situation that the equivalent radiation source is incoherent; the digital lens imaging method is suitable for the situation that the equivalent radiation source is coherent; the physical lens imaging method is suitable for all the three situations that the equivalent radiation sources are incoherent, coherent and partial coherent.

Key words: electromagnetic leakage; microwave equipment; imaging; synthetic aperture; digital lens; physical lens

1 引言

随着航天技术及信息技术的发展, 航天器所携带的微波设备日趋复杂, 其链路中的微波信号会通过线缆耦合、接头泄漏或天线旁瓣等途径辐射到外界空间中去. 航天器系统为了抑制这类辐射, 会采用壳体将各种设备封闭起来. 然而为了安装星表设备或保障星体内外设备, 总会在这些壳体上切割一些小孔作为安装孔及线缆进出的路径. 由于这些小孔的存在, 使得微波设备表面壳体的电磁屏蔽特性受到破坏, 造成设备内部的电磁信号泄漏出去, 对周围电磁设备形成干扰, 从而引起电磁兼容性问题. 因此需要在航天器出厂前对其所携带微波设备的电磁辐射情况进行了解, 检测其电磁泄漏情况, 并能够对造成电磁泄漏的小孔进行定位, 从而采取相应的改进措施.

微波设备表面各小孔被其内部泄漏源照射后, 可分

别被视为等效的辐射源, 这些辐射源可能以三种形式存在, 即非相干源、相干源、部分相干源.

为了对造成电磁泄漏的小孔进行定位, 可采用探针探测法^[1,2]直接在微波设备表面进行扫描测试. 在得到微波设备表面的近场分布后, 其场强幅值较大的位置即可认为是造成电磁泄漏的小孔的位置. 该方法的探测过程较为直接, 原理较为简单, 同时, 对各小孔等效辐射源为非相干源、相干源、部分相干源的三种情况均适用. 但是其最大的缺点是需要使探针紧贴设备表面进行测试, 这对于表面结构较为平滑的设备尚可实现, 但对于外形较为复杂或表面存在起伏的设备, 测试过程难于进行. 另外, 一些设备的表面会涂覆特殊的材料或存在精密的结构, 为对其进行保护, 通常不允许近距离的接触, 此时, 同样无法采用探针探测的方法.

针对上述问题, 并依据各小孔等效辐射源的三种形式, 本文设计了在远距离对造成微波设备表面电磁泄漏

的小孔进行定位的方法,即综合孔径被动辐射计成像方法^[3~5]、数字透镜相移成像方法以及物理透镜成像方法^[6,7].本文将首先对微波设备表面小孔等效辐射源的三种形式(非相干源、相干源、部分相干源)的存在条件进行说明,然后对相应的三种检测方法的原理和实验测试方案进行介绍,最后全文进行总结.

2 微波设备表面小孔等效辐射源的三种形式

微波设备内部泄漏源产生的电磁辐射,通过设备表面小孔的衍射,传播到外部空间,并形成一定的电磁分布.

泄漏源按照与各小孔的位置关系可分为两类,如图 1 所示.第一类泄漏源至微波设备表面壳体有一定距离,其产生的电磁泄漏会通过多个小孔衍射到设备外部空间;第二类泄漏源与微波设备表面壳体的距离很近且位于某一小孔的正后方,其产生的电磁泄漏只会通过该小孔衍射到设备外部空间.

可以认为微波设备内部任意两个泄漏源均为非相干的.若存在两个相干的泄漏源,可将它们视为一个整体,并将该整体归入第一类泄漏源的范畴.

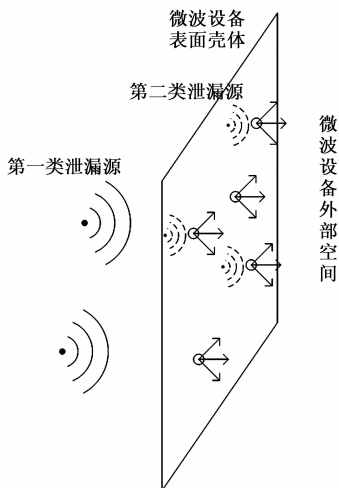
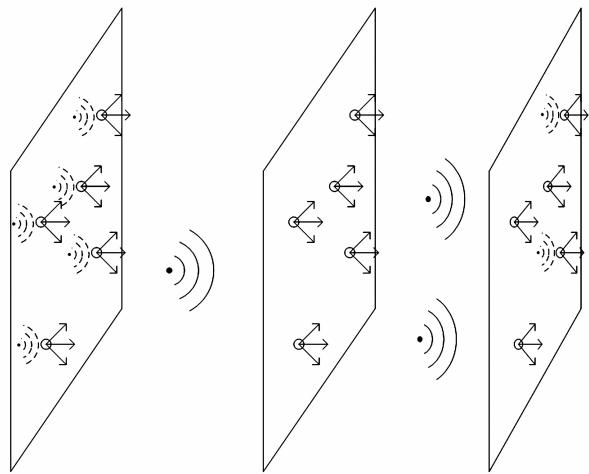


图1 微波设备内部的两类泄漏源

根据微波设备内部泄漏源的位置分布情况,微波设备表面小孔的等效辐射源可能以三种形式存在,即非相干源、相干源、部分相干源.下面分别对这三种形式等效辐射源的存在条件进行介绍.

首先,当微波设备内部所有泄漏源均为第二类泄漏源时,各小孔的等效辐射源为非相干源,如图 2(a);其次,当微波设备内部只存在一个泄漏源,且该泄漏源为第一类泄漏源时,各小孔的等效辐射源为相干源,如图 2(b);最后,当微波设备内部至少存在两个泄漏源,且这些泄漏源不全为第二类泄漏源时,各小孔的等效

辐射源为部分相干源,如图 2(c).



(a) 非相干源情形 (b) 相干源情形 (c) 部分相干源情形

图2 微波设备表面小孔等效辐射源可能存在的三种形式

3 非相干源-综合孔径被动辐射计成像

综合孔径被动辐射计成像的方法适用于各小孔等效辐射源为非相干源的情况.本节将对综合孔径被动辐射计成像的原理进行介绍,并给出相应的实验测试方案及仿真分析结果.

3.1 成像原理

图 3 为综合孔径被动辐射计成像的原理示意图.

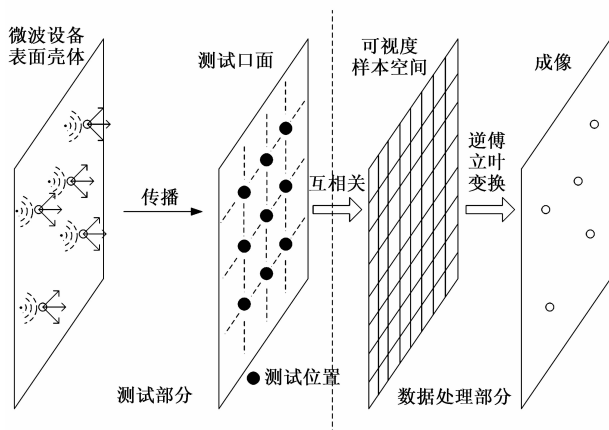


图3 综合孔径被动辐射计成像原理示意图

微波设备表面小孔泄露出来的电磁波传播到测试口面,被位于测试口面上的接收天线接收.将每两个位置上接收天线的接收信号做互相关处理,可以得到测试目标的可视度样本空间,用 $V(u, v)$ 表示.其中, $u = (x_i - x_j)/\lambda$, $v = (y_i - y_j)/\lambda$,分别为两个接收天线 i 、 j 在 x 、 y 方向上的位置差(以波长为单位).

将可视度样本函数 $V(u, v)$ 做逆傅立叶变换,如式(1)所示,即可得到目标场景的衍射能量分布 $T(\xi, \eta)$.其中, (ξ, η) 为目标口面上每一点对于天线阵口面中心

点的方向余弦, $\xi = \sin\theta \cdot \cos\varphi$, $\eta = \sin\theta \cdot \sin\varphi$.

$$\begin{aligned} T(\xi, \eta) &= F^{-1}[V(u, v)] \\ &= \frac{1}{2\pi} \iint V(u, v) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv \end{aligned} \quad (1)$$

根据微波设备表面的衍射能量分布 $T(\xi, \eta)$, 即能判断造成电磁泄漏的小孔的位置.

上述成像过程在远场测试环境下具有很好的成像效果, 但实际成像测试过程是在近场环境下完成的, 此时成像效果会急剧恶化. 为了在近场测试环境下也能精确的判断造成电磁泄漏的小孔的位置, 需要对可视度样本函数 $V(u, v)$ 进行点源相位修正^[8], 具体过程如下:

将图 3 中微波设备表面壳体用一个点源代替, 并使该点源位于微波设备表面壳体的中心位置附近. 该点源的可视度样本空间 $V_p(u, v)$ 可直接通过解析运算获得, 相应的, 能够得到 $V_p(u, v)$ 在各采样点的相位 $\varphi(u, v)$.

利用式(2)对微波设备表面壳体的可视度样本函数 $V(u, v)$ 进行点源相位修正, 修正结果用 $V'(u, v)$ 表示.

$$V'(u, v) = V(u, v) \cdot e^{-j \cdot \varphi(u, v) + j \cdot 2\pi \cdot (u\xi + v\eta)} \quad (2)$$

对 $V'(u, v)$ 同样进行式(1)所示的逆傅立叶变换, 即可得到微波设备表面更为精确的修正的辐射能量分布 $T'(\xi, \eta)$.

需要说明的是, 式(1)中 $V(u, v)$ 与 $T(\xi, \eta)$ 的傅立叶变换关系只有在探测目标上各点辐射源为非相干源的情况下才成立, 因此该成像方案只适用于各小孔等效辐射源为非相干源的情况.

3.2 实验测试方案

对造成微波设备表面电磁泄漏的小孔进行定位时, 在成像实时性方面的要求较低, 因此无需构建一个庞大的天线阵^[9, 10], 在同一时刻得到可视度样本空间上的所有值. 为尽可能减少测试天线数量, 进而降低测试系统成本, 提出以下测试方案.

测试系统包括三个测试天线, 其中两个天线分别固定于测试口面的左下角与右下角, 另一个天线在整个测试口面内进行扫描, 并假定横向和纵向的扫描间隔均为 ds , 扫描点数量均为 N , 如图 4 所示.

扫描天线在每一个测试位置 (i, j) 与两个固定天线同时进行测试, 并通过互相关处理, 可得到相应的可视度样本 $V(\frac{i \cdot ds}{\lambda}, \frac{j \cdot ds}{\lambda})$, $V(\frac{(i - (N - 1)) \cdot ds}{\lambda}, \frac{j \cdot ds}{\lambda})$, 其中 λ 为工作波长.

在对所有位置进行扫描后, 可得到可视度样本空间 $V(u, v)$, $(\frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda} \geq u \geq -\frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda}; \frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda} \geq v \geq 0)$, 再利用可视度样本空间的共轭对称性:

$$V^*(u, v) = V(-u, -v) \quad (3)$$

可进一步将可视度样本空间扩展为: $V(u, v)$, $(\frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda} \geq u \geq -\frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda}; \frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda} \geq v \geq -\frac{(N - 1) \cdot ds}{\lambda})$

将上述可视度样本函数 $V(u, v)$ 通过点源相位修正为 $V'(u, v)$, 再通过式(1)所示的逆傅立叶变换得到 $T'(\xi, \eta)$, 即可判断造成微波设备表面电磁泄漏的小孔的位置.

按照上述测试方案得到的可视度样本空间在横向和纵向的最大范围均为 $2 \cdot (N - 1) \cdot ds / \lambda$, 那么成像的角分辨率应为:

$$\Delta\xi = \Delta\eta = \frac{\lambda}{2(N - 1) \cdot ds} \quad (4)$$

测试过程中需要根据实际情况来选择相应的扫描间隔 ds 及一维扫描点数 N .

3.3 仿真分析

通过对实例的仿真分析, 对综合孔径被动辐射计成像方法的有效性进行验证.

图 5 为一个 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的试验件, 其上间隔不等的分布了 64 个小孔, 每个小孔直径为 0.01m . 仿真分析过程中, 将每一个小孔视为独立的辐射点源.

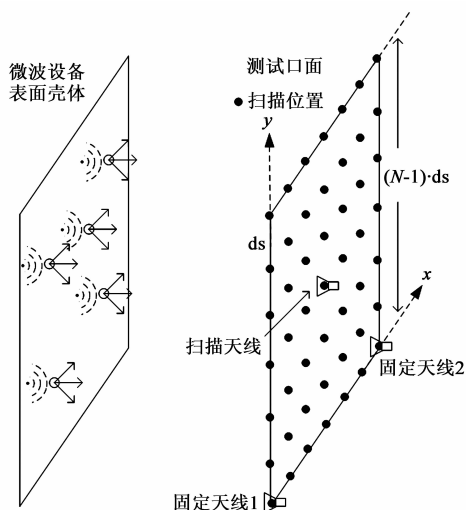


图4 综合孔径被动辐射计成像测试方案示意图

仿真过程中, 设定仿真频率为 60GHz , 试验件与测试口面的距离为 3m , 测试口面上扫描间隔 ds 为 0.01m , 一维扫描点数 N 为 100 (整个测试口面的尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$).

当各小孔的等效辐射点源为非相干源时, 经过点源相位修正后的试验件可视度样本空间 $V'(u, v)$ 如图 6 所示.

将 $V'(u, v)$ 按照式(1)进行逆傅立叶变换, 可得到试验件的辐射能量分布 $T'(\xi, \eta)$, 如图 7.

从上述仿真结果可以看出, 综合孔径被动辐射计

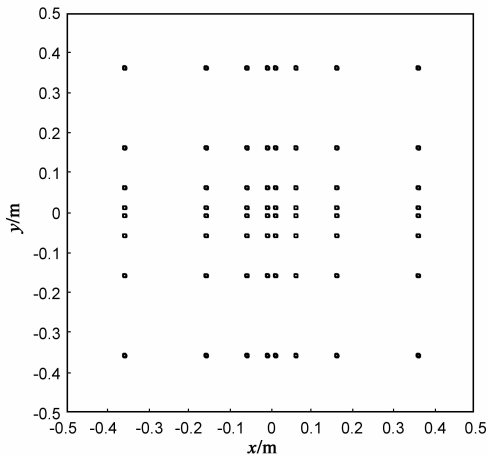


图5 仿真分析试验件

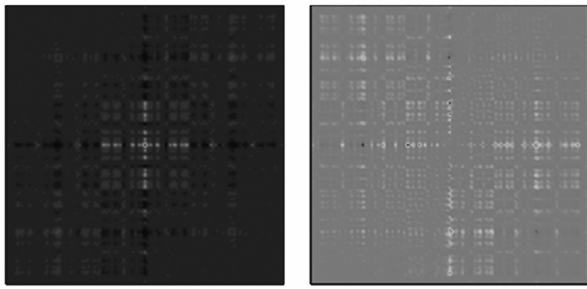


图6 非相干源时的可视度样本空间 $V'(u,v)$ (左为实部, 右为虚部)

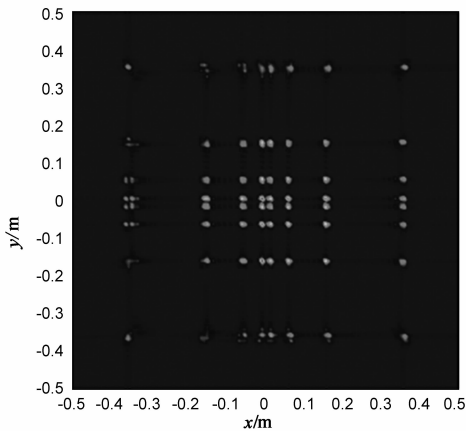


图7 综合孔径被动辐射计成像方案对非相干源成像结果

成像方案能够在非相干源的情况下, 准确的对小孔进行定位.

4 相干源-数字透镜相移成像

数字透镜相移成像方法适用于各小孔等效辐射源为相干源的情况. 本节将对数字透镜相移成像的原理进行介绍, 并给出相应实验测试方案及仿真分析结果.

4.1 成像原理

图 8 为数字透镜相移成像的原理示意图.

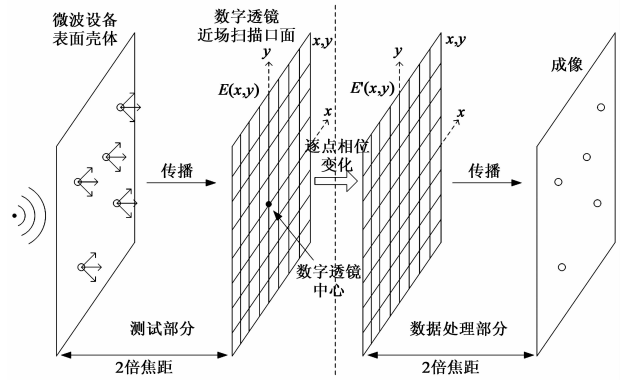


图8 数字透镜相移成像原理示意图

微波设备表面壳体与数字透镜近场扫描口面之间的距离为 2 倍数字透镜焦距. 通过扫描测试, 得到数字透镜口面上各离散点在同一时刻的相对近场分布 $E(x, y)$, 该近场分布通过数字透镜的相移作用^[6]后变为 $E'(x, y)$, 如式(5).

$$E'(x, y) = E(x, y) \cdot e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2f_0}} \quad (5)$$

其中, λ 为工作波长, f_0 为数字透镜焦距.

此时, 根据透镜成像的理论可知, 将近场分布 $E'(x, y)$ 通过仿真的方式继续向前传播 2 倍焦距的距离, 即可得到微波设备表面造成电磁泄漏的小孔的位置(直接成像结果是微波设备表面等大倒立的像, 因此需将其绕中心旋转 180°).

需要特别说明的是, 数字透镜相移成像的方法, 需要得到数字透镜口面上各离散点在同一时刻的相对近场分布 $E(x, y)$, 包括准确的幅值和相位信息. 由于采用的是扫描测试的方式(若不采用扫描测试, 则需要每一测试点放置一个接收天线, 并需要精确保证各天线测试的同步性, 这在测试成本和测试难度上都是不可接受的), 因此需要设法于不同时刻获得各离散点在同一时刻的相对近场分布 $E(x, y)$.

对于相干源, 测试口面上各离散点近场分布 $E(x, y)$ 的相对值是不随时间变化的, 因此利用扫描测量的方式, 于不同时刻获得各离散点在同一时刻的相对近场分布, 是可以实现的. 具体的实验测试方案将于下一小节给出.

但对于非相干源和部分相干源, 各离散点近场分布 $E(x, y)$ 的相对值会随时间变化, 因此也就无法利用扫描测量的方式来得到各离散点在同一时刻的相对近场分布, 这也是数字透镜相移成像方法只适用于各小孔等效辐射源为相干源的情况的原因.

4.2 实验测试方案

测试系统包括两个测试天线, 如图 9 所示, 其中一个天线固定于数字透镜近场扫描口面的中心位置(x_0 ,

y_0), 其在不同时刻的接收信号用 $E(x_0, y_0, t)$ 表示; 另一个天线在数字透镜口面内进行扫描, 其接收信号用 $E(x, y, t)$ 表示.

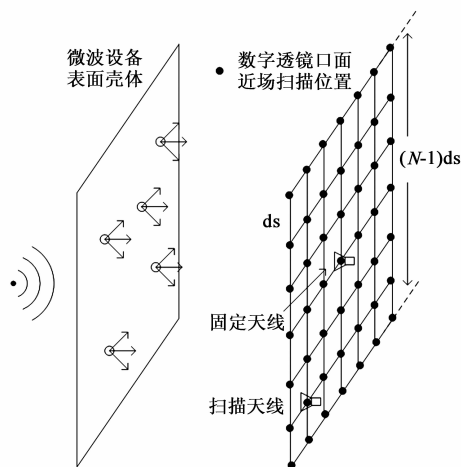


图9 数字透镜相移成像测试方案示意图

当扫描天线运动到某一个测试点 (x_i, y_j) 后, 固定天线与扫描天线同时进行测量, 将相应的接收信号 $E(x_i, y_j, t)$ 与 $E(x_0, y_0, t)$ 相除, 如式(6)所示, 可得到该测试点对于固定点的相对场强值 $E(x_i, y_j)$.

$$E(x_i, y_j) = \frac{E(x_i, y_j, t)}{E(x_0, y_0, t)} \quad (6)$$

对于各小孔等效辐射源为相干源的情况, $E(x_i, y_j)$ 不随时间变化. 那么当扫描天线完成对整个数字透镜口面的扫描测试后, 即可获得各离散点在同一时刻的相对近场分布 $E(x, y)$. 进而利用数字透镜相移成像的原理, 准确判断造成微波设备表面电磁泄漏的小孔的位置.

4.3 仿真分析

同样对图5所示的试验件进行仿真分析, 验证数字透镜相移成像方法的有效性.

仿真过程中, 设定仿真频率为 60GHz, 试验件与数字透镜扫描口面的距离为 2.5m (数字透镜焦距为 1.25m), 数字透镜扫描口面上扫描间隔 ds 为 0.01m, 一维扫描点数 N 为 100 (整个口面的尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m}$). 用一个位于试验件正后方 1m 处的点源对试验件进行照射, 从而使试验件上各小孔等效辐射源呈现相干源的形式.

此时, 数字透镜近场扫描口面上各离散点的相对近场分布 $E(x, y)$ 如图10所示.

利用式(5), 将 $E(x, y)$ 进行数字透镜相移作用, 可得近场分布 $E'(x, y)$, 如图11.

将近场分布 $E'(x, y)$ 通过仿真的方式继续向前传播 2 倍焦距的距离, 即可得到试验件上小孔的像 (dB 形

式), 如图12.

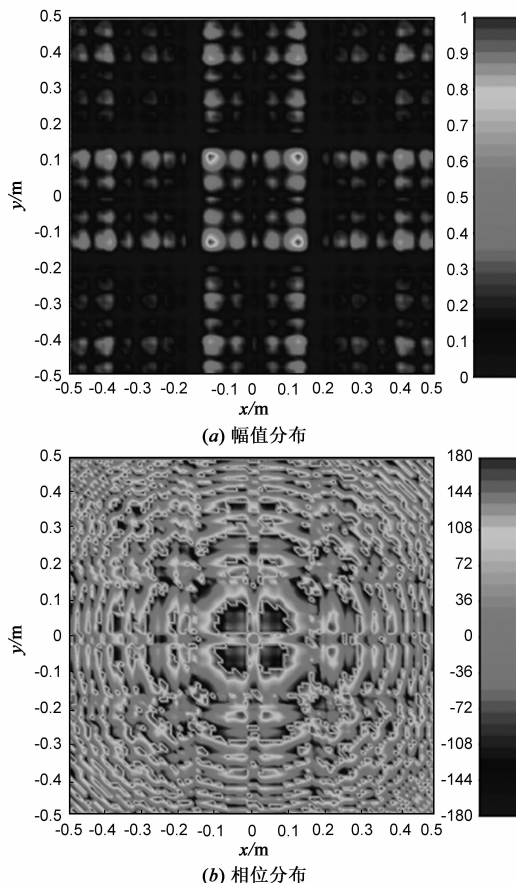


图10 数字透镜近场扫描口面近场分布 $E(x, y)$

从上述成像结果可以看出, 数字透镜相移成像的方法在微波设备表面小孔等效辐射源为相干源的情况下, 能够准确的对小孔进行定位.

5 物理透镜成像

物理透镜成像的方法适用于各小孔等效辐射源为非相干源、相干源和部分相干源的全部三种情况, 在无法预知各小孔等效辐射源的形式时, 该检测方法尤为重要. 但该方案相对于综合孔径被动辐射计成像方法及数字透镜相移成像方法, 需要制造一个额外的微波透镜, 因此系统成本会更高.

图13为物理透镜成像方法的原理及测试方案示意图.

与综合孔径被动辐射计成像及数字透镜相移成像不同, 物理透镜成像的方法没有数字处理的过程.

将需要被检测的微波设备表面置于透镜左侧 2 倍焦距的位置, 那么根据透镜成像的相关理论可知, 微波设备表面各小孔等效辐射源的辐射电磁波, 在经过透镜的作用后, 会重新汇聚于透镜右侧 2 倍焦距处垂直于透镜光轴的平面上, 该平面即为微波设备表面各小孔

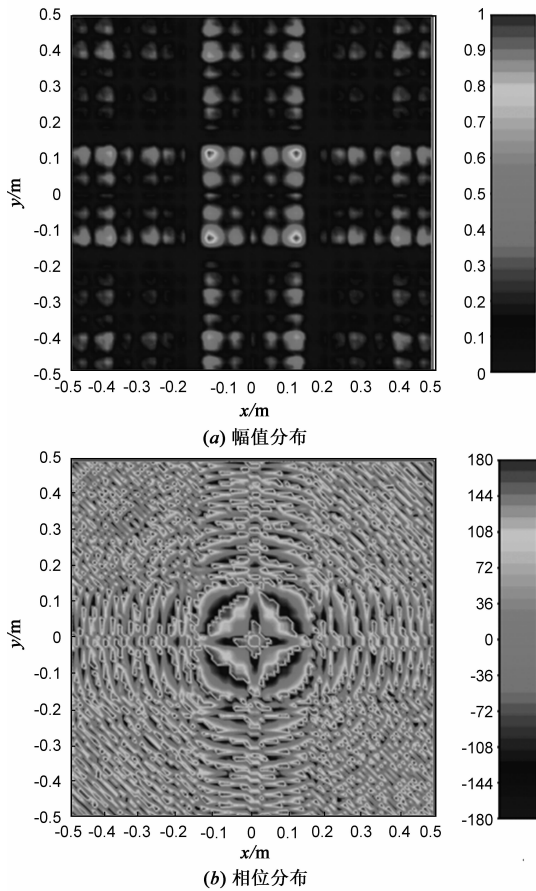


图11 经过数字透镜相移作用后的近场分布 $E(x,y)$

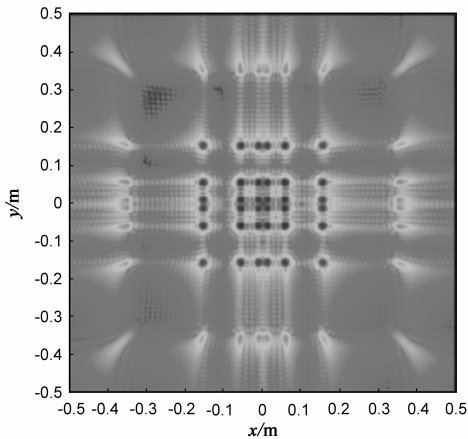


图12 数字透镜相移成像方案对试验件小孔成像结果

的像平面. 因此, 只要对该平面上各点的信号强度进行测试, 就能得到各小孔的等大的像.

测试过程中只需要一个接收天线, 该天线在成像平面内进行扫描测试.

由于各小孔等效辐射源的辐射强度并不是恒定不变的, 可能具有一定的随机信号的特性, 因此, 在成像平面各测试点的瞬时测量值 $A(x, y, t)$ 并不能完全准

确的反映该点的信号强度. 为此, 在测试过程中, 对于某一测试点 (x_i, y_j) , 需取接收天线在一定时间 t_0 内接收信号强度的平均值, 作为该点的实际信号强度 $A(x_i, y_j)$, 如式(7).

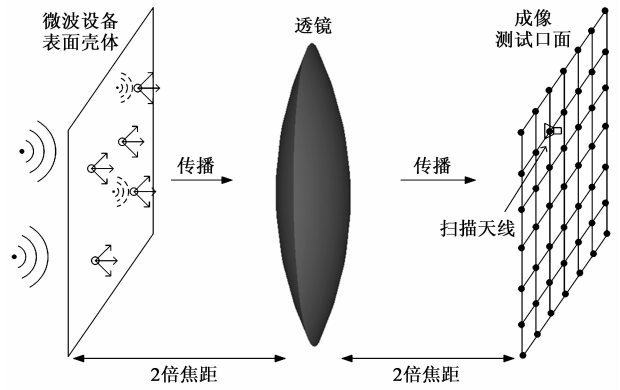


图13 物理透镜成像方法原理及测试方案示意图

$$A(x_i, y_j) = \frac{\sum_{m=1}^{t_0/\Delta t} A(x_i, y_j, m \cdot \Delta t)}{t_0/\Delta t} \quad (7)$$

通过上述方式完成对测试口面的扫描后, 可得到整个测试口面上的接收信号强度分布 $A(x, y)$, 而该分布即能准确反映造成微波设备表面电磁泄漏的小孔的位置.

在该检测方法中, 电磁波通过物理透镜时, 会产生相位的变化, 对于理想透镜, 该相位变化同样可用式(5)表示.

由于是直接透镜的成像平面上进行测试, 因此只需关注各测试点的强度分布, 而无需关注相位分布, 即能对各小孔进行准确的定位. 这也是物理透镜成像方法适用于各小孔等效辐射源为非相干源、相干源和部分相干源全部三种情况的原因.

从模拟电磁波传播的角度来说, 数字透镜成像和物理透镜成像的方法是一致的. 两者不同之处在于, 数字透镜方法探测透镜口面处各离散点的相对电磁场幅、相分布, 再用数字的方法模拟电磁波经过透镜汇聚、并于像平面聚焦的过程, 但它的局限性在于只能对相干波源进行探测; 而物理透镜成像方法中, 电磁波利用真实透镜完全在物理空间完成衍射、传播、汇聚、聚焦的过程, 并直接在像平面上进行幅度的成像测试, 不受小孔衍射波源形式的限制, 因此可视为对数字透镜成像方法的一种有效补充.

需要说明的是, 虽然物理透镜成像的方法适用于非相干源、相干源和部分相干源全部三种情况, 但非相干源和部分相干源的波束传播及探测过程难以用仿真的方式来实现, 而物理透镜成像方法对相干源的成像仿真过程与数字透镜成像仿真过程一致. 因此, 这里不

再给出物理透镜成像方法的仿真分析与验证。

6 结论

本文对微波设备表面电磁泄漏位置的检测方法进行研究,针对其表面各小孔等效辐射源可能存在的三种形式,即非相干源、相干源和部分相干源,提出了三种不同的检测方法.其中,综合孔径被动辐射计成像的方法,只适用于各小孔等效辐射源为非相干源的情况;数字透镜相移成像的方法,只适用于各小孔等效辐射源为相干源的情况;物理透镜成像的方法,则适用于各小孔等效辐射源为非相干源、相干源和部分相干源的全部三种情况,但该方案相对于综合孔径被动辐射计成像方法及数字透镜相移成像方法,需要制造一个额外的微波透镜,因此系统成本会更高.

本文对上述三种方法的成像原理进行了介绍,并根据对微波设备表面电磁泄漏位置进行检测的任务背景,提出了相应的具有针对性的实验测试方案.对于综合孔径被动辐射计成像和数字透镜相移成像两种检测方法,本文给出了具体的仿真分析实例,验证了它们在检测微波设备表面电磁泄漏位置方面的有效性和可行性.针对物理透镜成像的方法,由于其仿真过程中无法对非相干源和部分相干源的效果进行模拟,而其对于相干源的仿真成像过程与数字透镜成像方法对于相干源的仿真成像过程一致,因此没有给出具体的仿真实例,但从物理透镜的成像原理来看,该方法的有效性同样能够保障.

这三种检测方法及其相应实验测试方案的提出,为微波设备表面电磁泄漏位置的检测提供了指导和设计依据.

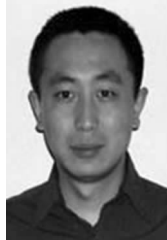
参考文献

- [1] KANTOR R, SHVETS I V. Measurement of electric field intensities using scanning near-field microwave microscopy[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(11): 2228 – 2234.
- [2] HANSEN T B, YAGHJIAN A D. Formulation of probe-corrected planar near-field scanning in the time domain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(6): 569 – 584.
- [3] RUF C S, SWIFT C T, TANNER A B, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(5): 597 – 611.
- [4] PEICHL M, SUESS M, KERN S, et al. Microwave imaging of the brightness temperature distribution of extended areas in the near and far field using two-dimensional aperture synthesis with high spatial resolution[J]. Radio Science, 1998, 33(3): 781 – 801.
- [5] LAURSEN B, SKOU N. Synthetic aperture radiometry evaluated

by a two-channel demonstration model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 822 – 832.

- [6] GOODMAN J. Introduction to Fourier Optics[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1996. 96 – 125.
- [7] GOLDSMITH P F, HSIEH C T, HUGUENIN G R, et al. Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(10): 1664 – 1675.
- [8] TANNER A, LAMBRIGSTEN B, GAIER T, et al. Near field characterization of the GeoSTAR demonstrator[A]. IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006 [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2006. 2529 – 2532.
- [9] LAMBRIGTSEN B, WILSON W, TANNER A, et al. GeoSTAR-A synthetic aperture approach for a geostationary microwave sounder[A]. IEEE Aerospace Conference, 2004 [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2004. 1008 – 1014.
- [10] MARTIN-NEIRA M, MENARD Y, GOUTOULE J M, et al. MIRAS, a two-dimensional aperture synthesis radiometer[A]. IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994 [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 1994. 1323 – 1325.

作者简介



白明 男, 1973年5月生于吉林省吉林市, 博士, 副教授. 主要研究方向为微波成像技术, 计算电磁学.

E-mail: mbai@buaa.edu.cn



欧乃铭 男, 1986年4月生于河北省唐山市, 博士. 主要研究方向为相控阵及反射面天线技术, 计算电磁学.

E-mail: ocean@ee.buaa.edu.cn



苗俊刚 男, 1963年7月出生于河北省石家庄市, 博士, 教授. 主要研究方向为电磁场理论, 微波工程技术, 微波遥感技术.

E-mail: jmiaobremen@tom.com