

# 卫星成像的反射式三维重构像技术

**摘要:** 衍射极限的限制使得望远镜对卫星成像极其困难。通过测得反射强度和卫星距离的信息,采用重构像技术,就有可能得到卫星的像。本文介绍了美国 HI-CLASS 卫星三维重构像技术,并对其工作原理进行了分析,给出了其工作条件和性能指标。

**关键词:** 重构像技术; HI-CLASS 系统; 卫星成像

## Reflective Tomography Technology for Satellite Imaging

**Abstract:** The lens diffraction limitation makes it hard for satellite imaging. It is probable to solve this difficult but urgent issue with the reflective tomography technology based on almost the same principle as that of X-ray transmission tomography. The difference lies on the reflective way of recording the cross-section information. This paper introduces a general description of HI-CLASS system, and gives its detailed mechanism.

**Keywords:** reflective tomography; HI-CLASS system; satellite imaging

### 1 概述

根据卫星的形貌特征可以判断该卫星的作用,从而可以在战争时采取相应的措施予以对抗。然而,由于一般情况下卫星的轨道往往很高,而观测的望远镜设备的口径  $D$  有限(约为 1 m 的数量级),因此,卫星相对于望远镜的张角小于光学衍射极限  $\lambda/D$ ,在探测器表面是不能获取目标的表面形貌信息的。但是,利用超短脉冲激光,却能够获取目标的距离信息,并同时获取该截面深度的强度信息。利用现在工业领域广泛使用的重构像方法,就能够得到卫星目标的三维特征。本文介绍了该三维重构像技术,

并且将利用外差探测理论结合激光斑点问题讨论该短脉冲激光三维重构像的理论原理。

美国空军飞利浦实验室正在发展地基监视卫星的光电技术。被动光学系统被大气扰动效应所干扰,分辨率受到限制。自适应光学能够补偿这些像差,但是其复杂性和价格都随着孔径尺寸迅速增加。微波雷达系统由于有大的射束宽度,因此限制了角分辨率,而且它需要很大的发射和接收天线。可以通过结合上文提到的这些技术构造激光雷达系统,从而克服光学和雷达系统的这些限制。

通过高性能  $\text{CO}_2$  激光雷达监视系统项目(HI-CLASS),飞利浦实验室正在为 AMOS 60 cm 激光指

向系统开发高功率 CO<sub>2</sub> 激光雷达<sup>[1]</sup>, 如果激光雷达运行在 11.15 μm 处, 在大气透射率方面有一些优势, 但是不能得到轨道上物体的角分辨率; 不过却能通过激光的锁模脉冲序列输出得到非常高的距离分辨率。序列中的每个脉冲脉宽都 < 1.5 ns, 允许实现空间分辨的图像重建。另外, 在经过 AMOS 时, 卫星的很多面都呈现在探测器面前, 因此提供了 2-D 图像信息重建的机会, 这可以通过基于能量强度投射的反射式图像重构技术或反合成孔径雷达方法 (ISAR) 实现。微波雷达也可以通过 ISAR 方法来实现空间分辨的卫星成像。这些技术利用脉冲压缩波形实现了空间分辨。本文给出了 HI-CLASS 激光雷达系统实现重构成像技术的性能分析; 回顾了透射式重构成像技术, 以及基本的关系; 讨论了将透射式重构成像技术应用于反射几何构型的问题; 给出并讨论了取样成像技术; 最后给出了结论。

## 2 重构技术的回顾

所谓的计算机辅助重构术, 即投射式重构成像, 就是指确定 3-D 物体的 2-D 吸收截面的方法。这种方法可以在没有直接逐点测量吸收的条件下实现。如图 1 所示, 这可以通过利用从各种角度对吸收物体发出的一系列的 X 射线来实现。有很多种不同的几何布局可以用来提供重构数据, 本文采用图 1 所示的平行光束几何布局, 因为这种方法最类似于下面要涉及的反射式重构技术。从图 1 中可以看到, X 射线在通过物体之后被一系列探测器测量, 物体的 2-D 吸收分布  $g(x_1, x_2)$  被 X 射线探测器积分成 1-D 的分布。记  $p_\theta(y_1)$  为:

$$p_\theta(y_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(y_1 \cos \theta - y_2 \sin \theta, y_1 \sin \theta + y_2 \cos \theta) dy_2 \quad (1)$$

其中  $p_\theta(y_1)$  被称为  $g(x_1, x_2)$  在角度为  $\theta$  处的投影。因此, 将 2-D 的分布投射到 1-D 时利用了线积分。对于 X 射线, 探测器探测到的强度  $I_\theta(y_1)$  与  $p_\theta(y_1)$  的关系是:

$$p_\theta(y_1) = -\log[I_\theta(y_1)/I_0] \quad (2)$$

其中  $I_0$  是 X 射线源的强度。

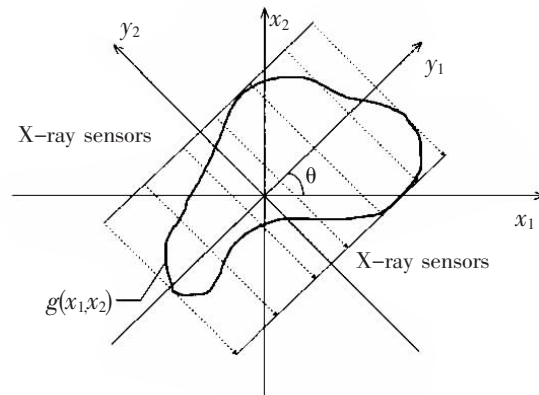


图 1 X 射线断层摄像技术的几何原理

之所以能够重构, 是因为  $p_\theta(y_1)$  的傅立叶变换  $p_\theta(v_1)$  和  $g(x, y)$  的傅立叶变换  $G(u_1, u_2)$  之间的关系。这种关系被称为投射切片定理 (Projection-slice theorem), 即

$$p_\theta(v_1) = G(v_1 \cos \theta, v_1 \sin \theta) \quad (3)$$

换句话说,  $\theta$  角投影的傅立叶变换等于  $g(u_1, u_2)$  的傅立叶变换沿着一条通过原点的线。这条线在  $(u_1, u_2)$  平面的倾斜方式与在  $(x_1, x_2)$  平面投影的倾斜方式相同。因此, 可得到  $g(u_1, u_2)$  投影到  $G(u_1, u_2)$  上的样本点。在像空间通过测量各种不同角度的  $\theta$ , 可以在不直接测量  $g(u_1, u_2)$  的情况下逐点重构  $G(u_1, u_2)$ 。可以看到, X 射线测量方法如果用于 3-D 情况并且不受限于一个平面, 就能够获取 3-D 傅立叶变换的点。因此, 我们可以逐点完成物体的 3-D 傅立叶变换, 通过傅立叶逆变换即可得到物体本身的像。不过, 为了简单, 我们只考虑 2-D 的情况。

一个非常重要的问题是要确定在投影面需要多少种视角来准确重建  $g$ , 也就是说, 为了优化重建必须满足取样定理。文献 [2] 给出了在极坐标面收集投影线所需的最少的投影点个数。像的长度最大值为  $x_{\max}$ , 频率的截止值为  $u_{\max}$ 。透射式情况下总的角度个数为:

$$N_\theta \geq \frac{\pi}{\Phi} = \pi x_{\max} u_{\max} \quad (4)$$

反射式情况下总的角度个数为:

$$N_\theta \geq \frac{2\pi}{\Phi} = 2\pi x_{\max} u_{\max} \quad (5)$$

从式 (4)、(5) 可以看出, 物体越大, 物体中的高频信息越多, 所需的视角就越多。最后, 每个角度上投影所需的取样量  $N_p$  也可以确定:

$$N_p \geq \frac{2\pi}{\phi} = 2\pi x_{\max} u_{\max} \quad (6)$$

注意,  $N_o$  和  $N_p$  都是空间带宽的乘积。

这样, 所有需要用于决定如何采样的信息都已具备。数据采集后, 下一步是如何利用数据重建像。目前已经发展了很多种方法, 并且有人都做了比较。本文使用了盘背投影法 (Convolution-back projection algorithm)。

### 3 卫星图像重建的反射式重构像技术和 HI-CLASS 激光雷达系统

上一节阐述了透射式重构像的数学基础, 给出了所有数据采集以及图像重构所需的相关的方程式。本节将利用这些结果用于卫星的反射式重构。

#### 3.1 HI-CLASS 系统描述

HI-CLASS 激光雷达系统工作在脉冲模式, 用来发送一系列利用  $\text{CO}_2$  激光脉冲增强波包 (即增益选择) 调制的锁模短脉冲<sup>[1]</sup>。短脉冲的半高值脉宽 (FWHM)  $< 1.5 \text{ ns}$ , 脉冲间距大约为  $40 \text{ ns}$ , 脉冲增强波包的宽度  $> 10 \mu\text{s}$ 。为了保证卫星在一个时刻只被一个脉冲照射, 对于某些目标, 后面的脉冲可能需要阻止其照射卫星。对于  $40 \text{ ns}$  的脉冲间隔, 卫星的空间延展不能  $> 6 \text{ m}$ , 脉冲增强波包的重复频率为  $30 \text{ Hz}$ , 脉冲增强波包的总能量为  $30 \text{ J}$ 。

对于上面描述的 HI-CLASS 脉冲波形, 恢复空间分辨信息的能力取决于激光脉冲的宽度远远小于卫星的尺寸。一个  $1.5 \text{ ns}$  的脉冲对应于  $45 \text{ cm}$  的距离。因此, 反射条件下最小可分辨的尺寸  $< 23 \text{ cm}$ , 这要比一般的卫星尺寸小。

卫星的角分辨特征不能实现, 这是由激光的波长 ( $11.15 \mu\text{m}$ ) 以及接收孔径 ( $0.6 \text{ m}$ ) 造成的。该系统最小的角分辨是  $\lambda/D$ , 约为  $20 \mu\text{rad}$ 。大部分感兴趣的卫星的特征角度小于该值, 因此只有距离分辨是可能的。

#### 3.2 投射数据估计

为了增强激光雷达回波的信噪比 (SNR), 我们采用外差探测而不是直接探测。因此, 为了获取卫星的图像信息, 激光雷达数据的后期处理是必要的。我们把物体图像信息定义为直接探测到的物体反射的强度。对于激光雷达系统, 该图像信息是物体反射的强度分布作为视深度以及照明角度的函数。由于我们利用了外差探测, 因而测得的强度包括物体的电场反射性质。因此, 有必要比较外差探测的输出和直接探测的输出, 直接探测系统直接测量反射的强度分布。这有助于确定外差输出合适的后处理方法, 从而获得物体像信息。

考虑如图 2 所示系统, 一束相干激光脉冲通过透射透镜发出, 光束宽度足够覆盖整个物体。反射的激光被透镜收集, 并将光聚焦于像平面。尽管图中没有明确指出, 但其使用了相干探测。相干探测利用向外发出的激光的频移且与回波信号发生混合, 从而生成了外差信号。

为了在数学上描述该过程, 向外发射的电场信号的方程为:

$$s(t, y) = A_p(t, y) \cos(\omega_1 t) \quad (7)$$

其中  $A_p(t, y)$  是向外发出的辐射脉冲波形,  $\omega_1$  是其频率。该光从位于  $R$  处的物体表面反射回来。在任意时刻  $t$ , 从点  $(x, y)$  处微分区域反射的电场强度  $E$  在  $x=0$  平面 [用  $o_{\text{diff}}(t, x, y)$ ] 为:

$$o_{\text{diff}}(t, x, y) dx = A_p \left( t - \frac{R+2x}{c}, y \right) a(x, y) \cos \left[ \omega_1 \left( t - \frac{R+2x}{c} \right) \right] dx \quad (8)$$

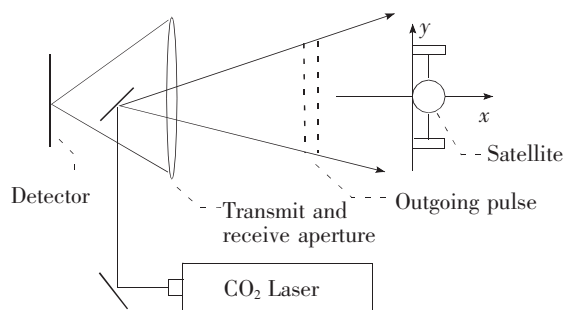


图 2 HI-CLASS 系统的框架图

其中  $c$  为光速,  $a(x, y)$  是坐标  $(x, y)$  处的实数电场反射率。总的来说,  $a(x, y)$  是个随机变量, 这是由卫星材料的微结构造成的。另外, 我们假设卫星附加部分的反射率与照明的角度无关。

在  $t$  时刻, 在  $x=0$  处总的电场分布可以通过对  $x$  的积分获得, 从而得到

$$o(t, y)dx = \int A_p \left( t - \frac{R+2x}{c}, y \right) a(x, y) \cos \left[ \omega_1 \left( t - \frac{R+2x}{c} \right) \right] dx A_p \quad (9)$$

这就是考虑物体的反射率时发出的脉冲的卷积。为了简便, 假设在  $y$  方向上照明是均匀的, 方程式 (9) 可以重新写成:

$$I(t, y) = \left[ \int h(y-\xi) \int A_p \left( t - 2\frac{R+x}{c} \right) a(x-\xi) \cos \left[ \omega_1 \left( t - 2\frac{R+x}{c} \right) \right] dx d\xi + E_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \right]^2 \quad (12)$$

我们假设探测器不能够对卫星实现角分辨探测, 这会导致在整个  $o(t, y)$  不为 0 的区域  $h(y) \approx K$ , 即为常

$$I(t) = \left[ K \int A_p \left( t - 2\frac{x}{c} \right) \int a(x, \xi) \cos \left[ \omega_1 \left( t - 2\frac{x}{c} \right) \right] d\xi dx + E_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \right]^2 \quad (13)$$

其中为了方便, 关于位置  $R$  的项被忽略掉了。对于常数  $K$  的值, 稍后再来确定。

考虑对  $\xi$  积分, 并且对距离积分,  $\delta x$  比波长要

$$I(t) = \left[ K \int A_p \left( t - 2\frac{x}{c} \right) \int \operatorname{Re} \{ \exp(j\omega_2 t) [a_1(x) + ja_2(x)] \} dx + E_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \right]^2 \quad (14)$$

其中  $a_1(x)$  和  $a_2(x)$  是平均值为 0、相互独立的具有相同分布的高斯随机变量。自协方差为:

$$E[a_1(x)a_1(\xi)] = E[a_2(x)a_2(\xi)] = 1/2c(x)\delta(x-\delta) \quad (15)$$

其中  $c(x)$  为反射强度关于距离 (深度) 的函数。由于为随机变量,  $I(t)$  必须理解为即时强度, 具有随机特

$$I(t) = \left[ K \cos(\omega_1 t) \int A_p \left( t - 2\frac{x}{c} \right) a_1(x) dx - K \sin(\omega_1 t) \int A_p \left( t - 2\frac{x}{c} \right) a_2(x) dx + E_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \right]^2 \quad (16)$$

然后对其进行平方运算操作。注意平方式 (16) 中的每一项都会产生以直流电 (dc) 为中心的项, 以及中心频率为  $2\omega_1$  和  $2\omega_2$  的项。因为探测器不能够响应光波段的频率, 只有 dc 项可以在探测器上看到。假设 LO 的幅度足够大, 在式 (16) 中, dc 项导致的积分

$$I(t) = 2KE_0 \left[ \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \int A_p \left( t - 2\frac{x}{c} \right) a_1(x) dx - \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \int A_p \left( t - 2\frac{x}{c} \right) a_2(x) dx + \frac{E_0^2}{2} \right] \quad (17)$$

$$o(t, y)dx = \int A_p \left( t - \frac{R+2x}{c} \right) a(x, y) \cos \left[ \omega_1 \left( t - \frac{R+2x}{c} \right) \right] dx \quad (10)$$

因此,  $o(t, y)$  仅与  $y$  相关。

使电场分布和本地震荡 (LO) 同时成像于我们的接收设备 (Monostatic)。由于激光照明是相干的, 系统与电场成线性, 打到我们探测器像面上面的强度分布为:

$$I(t, y) = \left[ \int h(y-\xi) o \left( t - \frac{R}{c}, \xi \right) d\xi + E_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_L) \right]^2 \quad (11)$$

其中第二项为 LO 项,  $E_0$  是 LO 电场的强度。 $\varphi_L$  是 LO 和透射电场 (假设为常数) 的相对位相,  $\omega_2$  为 LO 的频率。其中  $h(y)$  是图像系统的电场激励响应函数。将式 (10) 代入式 (11) 得出:

数。那么, 式 (12) 可以简化为:

长, 但又要比  $A_p(t)$  小。我们得到了成像系统的平坦表面上激光斑点问题针对每一个  $\delta x$  的经典形式解<sup>[9]</sup>, 假设表面反射为漫反射,  $I(t)$  可以写成:

性。为了决定平均强度关于时间的函数, 必须计算期待值  $I(t)$ 。

在将如式 (14) 所示的复数转化为实数之后, 我们得到:

项相比交叉项和 LO 的 dc 项可以忽略不计。因此, 忽略这些项。另外, 假设  $2\omega_{12}$  足够低 (可以保证), 式 (16) 中表达式的交叉相乘会导致频率为  $\omega_1 - \omega_2$  和  $\omega_1 + \omega_2$  这两项中, 探测器只能检测到  $\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2$  的项。在这些简化之后进行平方运算操作:



下一步,把三角函数的乘积项简化为单三角函数的项,并且忽略 $\omega_1+\omega_2$ 的项,可以得到

$$I(t)=KE_0\left[\cos(\omega_{12}t-\varphi_L)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_1(x)dx-\sin(\omega_{12}t-\varphi_L)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_2(x)dx\right]+\frac{E_0^2}{2} \quad (18)$$

现在仍然需要理解 $I(t)$ 如何“后处理”才能模拟所需的强度分布关于时间的函数。同样类似式(9)到(16)的步骤,除了设LO的幅值为0外。我们得到强度分布 $I_d(t)$ :

$$I_d(t)=K_1h_d(t)*\left[K\cos(\omega_Lt)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_1(x)dx-K\sin(\omega_Lt)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_2(x)dx\right]^2 \quad (19)$$

其中 $h_d(t)$ 是探测器激励响应函数,该值描述了将入射能量转化为输出电流;星号表示卷积; $K_1$ 是常数,能够把电流变化为强度单位[为了和式(18)比较];中括号中的量为探测器表面的电场。可以看到,通过比较式(18)和(19), $I(t)$ 是一个重新定标后(用来获得强度单位)叠加到LO上面发生频移的探测器平面电场分布。由于 $h_d(t)$ 的低通特性,只有波包 $I(t)$ 可以被探测器探测。因此,为了模拟直接探测,必须减去 $I(t)$ 中为常数的LO强度,平方该结果,并且低通滤波平方项得到波包方程,令 $p(t)$ 为 $I(t)$ 经过此操作的结果。有:

$$i(t)=qCI(t)=qCKE_0\left[\cos(\omega_{12}t-\varphi_L)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_1(x)dx-\sin(\omega_{12}t-\varphi_L)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_2(x)dx\right]+\frac{CE_0^2}{2} \quad (21)$$

$i(t)$ 为:

处理后的电流投影数据为:

$$p(t)=LP(t)\left[i(t)-q\frac{CE_0^2}{2}\right]^2 \quad (22)$$

式(22)的结果在光子噪声可以忽略的情况下是正确的。已经证明,如果式(22)给出的 $p(t)$ 用来考虑光子噪声的情况下估计真实的投影,结果就有偏差。考虑光子噪声条件, $p(t)$ 的真值,或者说无偏估计值 $\hat{p}(t)$ 为:

$$\hat{p}(t)=LP(t)*\left[i(t)-q\frac{CE_0^2}{2}\right]^2-\frac{CE_0^2}{2}\int h^2(\alpha)d\alpha \quad (23)$$

最后,在LO关闭以及LO光子速率为 $N_{10}$ (当没有目

$$i(t)=2q\sqrt{\frac{N_{10}N_{10}}{\int A_p^2(\beta)d\beta\int c(\xi)d\xi}}\left[\cos(\omega_{12}t-\varphi_L)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_1(x)dx-\sin(\omega_{12}t-\varphi_L)\int A_p\left(t-2\frac{x}{c}\right)a_2(x)dx\right]+qN_{10} \quad (26)$$

投射值 $p(t)$ 的无偏估计值 $\hat{p}(t)$ 为[把式(25)代入式(23)]:

$$\hat{p}(t)=LP(t)[i(t)-qN_{10}]^2-N_{10}\int h_d^2(\alpha)d\alpha \quad (27)$$

其中 $i(t)$ 由式(26)给出。

$$p(t)=LP(t)*\left[I(t)-\frac{E_0^2}{2}\right]^2 \quad (20)$$

其中低通滤波函数 $LP(t)$ 保证能够使 $I(t)$ 所有的波包通过,并且不包含频移项。因为大多数卫星的角度延展都比 $\lambda/D$ 小,因此,作为透射式重构像技术,利用式(20)获得的图像信息是一系列物体强度分布的投影。因此,重构像技术是图像重建的一种可能的选择。

因为探测器输出为电流,有必要将式(18)和(20)转化为电流单位。令 $q$ 表示一个电子的电量, $C$ 是把强度转化为光子数的常数,探测器输出的电流

标回波光子时LO的光子速率为 $\dot{N}_{10}$ 时,重新把表达式(21)和(22)用探测目标光子数的总量 $N_{10}$ 平均值表示会有用处。可以证明:

$$CK^2=\frac{2N_{10}}{\int c(x)dx\int_0^T A_p^2(t)dt} \quad (24)$$

以及

$$CE_0^2=2N_{10} \quad (25)$$

将这些结果代入式(21),给出探测器电流表达式的最最终形式为:

## 4 实验结果

Lasché<sup>[1]</sup>等人使用仿制的卫星进行了物理仿真,其实验仿真“卫星”如图3所示。

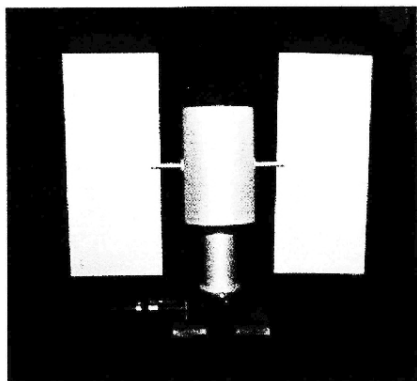


图3 仿制卫星

三维重构像是沿着旋转轴线方向进行计算的,也就是说,计算反应的结果对应沿着轴方向的侧面观察结果。实验时,目标放置在距 HIST 约 1 km 的位置。用来实现重构像的数据是从目标旋转的全部数据中抽取出来的。如图 4 所示,计算出的结果同俯视图非常接近。

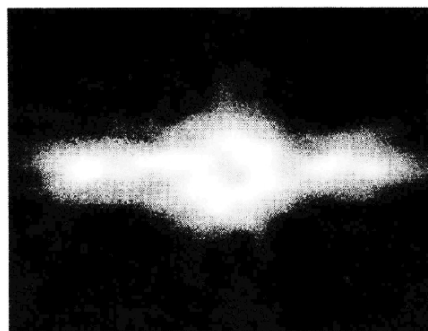


图4 三维重构像的结果

## 5 结 论

本文介绍了卫星的三维重构像技术,集中对其原理进行了阐述。该方法应用于位于毛哩岛的 AMOS 设施中部署的 HI-CLASS 激光雷达系统。分析表明,图像特征可以通过非图像数据获得。该技术具有潜在的战略意义。我国还没有发展相关技术的能力,通过本文对原理的分析,为下一步发展相关核心技术提供了理论依据。

(中科院长春光机所 邵俊峰, 郭 劲)

## 长春希达大型悬浮显示系统亮相BIRTV2010

在8月23日开幕的2010年BIRTV(北京国际广播电影电视设备展览会)上,来自中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的一件稀罕展品赢得了众多与会人士的赞叹,这就是中科院长春光机所控股的长春希达电子有限公司代理商展位展示的“大型悬浮显示系统”。

悬浮显示系统是继3D显示之后又一个显示领域的重大突破,被誉为人类显示技术的“终极产品”之一。理论上的悬浮显示系统能够实现全空间360°的“真实”显示。不同的观众可以像观看现实中的物体一样,在任意的不同角度观赏到真实的3D效果,且不需要佩戴任何眼镜等辅助设施。这样的显示设备不仅是科学家努力攻关的重要方向,同时也已经成为“科幻电影”中经常光顾的主角。

中科院长春光机所展示的“大型悬浮显示系统”采用先进的光电设计,在自主知识产权下实现了水平360°、四面立体显示和景象悬空透明介质显示。现场观众可以在不同的侧面观看到显示物体不同的立体画面,而在显示物体的周围则是类似玻璃的透明介质,可以观赏到显示系统后侧的任何景物。

对比传统显示技术,该产品具有能够真实立体显示、多角度观看、无需佩戴复杂眼镜系统、可以透明观看、无观看角度和空间限制,以及可以显示物体内部多层次信息的优势。其显示能力完全超越了常规3D系统,以及平面显示系统。

据现场工作人员介绍,这是一款全新的显示设备,甚至还没有准确的名称和型号,只是被冠以“大型悬浮显示系统”的概称。未来该产品将进一步完善、小型化、系列化并走向市场。