

## FRED 在杂散光分析中的应用

杂散光问题出现在几乎所有的光机系统或者照明系统中。通过遮挡或者移除零件、表面涂漆以及在光学器件进行镀膜都可以减少或者消除杂散光。在本文中，我们会对杂散光做出定义并且说明怎样利用 FRED 来分析和减少杂散光问题。

### 1、什么是杂散光？

简单来说，杂散光就是不需要的噪音(光)，它是由光机结构、视场外光源或者不完善的光学零件产生的，或者由光学或者照明系统自身的热辐射引起的。FRED 善于发现这些不需要的噪音，它将运用它的虚拟样机研究分析能力来帮助我们消除它。

在成像系统中，杂散光的成因有很多，具体如下：

#### 鬼像

它之所以叫鬼像正是因为像面离焦或者是由明亮的光源成鬼影一样的像。鬼像是由透镜表面的反射引起的。光必须从透镜表面反射偶数次才会形成鬼像。有两次反射鬼像，四次反射鬼像等等。仅一个镜面（比如卡塞格林望远镜）构成的光学系统是不会形成鬼像的。如果阳光在拍摄视场内或附近时，鬼像就会出现在影像中。汽车的头灯或者街灯也会在夜间摄影时造成杂散光。如果光亮源很小，各个鬼像会形成光学系统的孔径光阑的形态。在下图 1 中呈现的就是一个很好的鬼像例子，其中一个双胶合透镜有着完美镀膜的透镜而另外一个光学系统的透镜则没有镀任何膜。追迹由一点发出的 21\*21 的栅格光线以覆盖系统的第一片透镜。

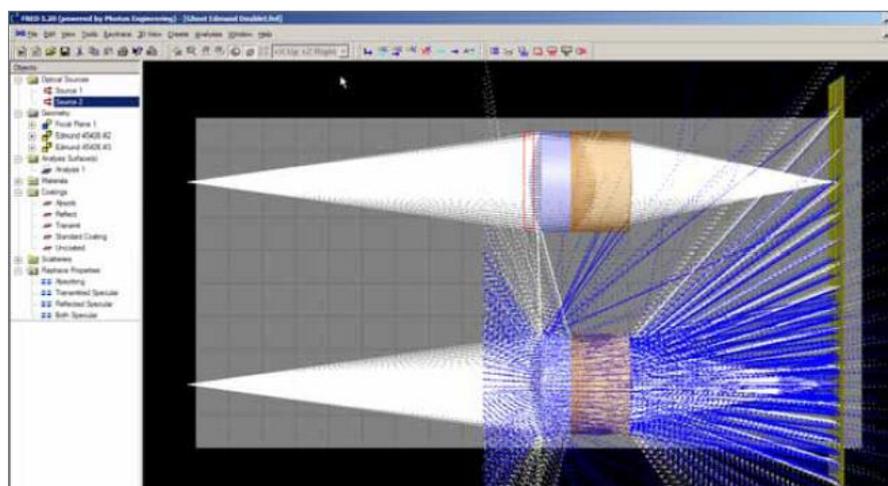


图 1—两个双胶合透镜，上面的双胶合透镜，在它的各个透镜上都镀有理想的增透膜。下面的双胶合透镜由于其透镜没有镀膜，各个光学表面有菲涅尔损耗从而产生鬼像。我们已经改变了在各个表面的光线追迹控制，因此从这个表面反射的由于菲涅尔损耗而出现的光线变成了蓝色。这种反射正是下方光学系统杂散光的成因。

## 直接入射

在诸如卡塞格林式系统中，当中心遮拦太大并且 / 或者望远镜镜筒太短的时候，直接入射就会发生。视场以外的光线能够进入望远镜，直接越过次镜，穿越主镜的开孔，从而以杂散光的形式直接打到焦平面上。如下图 2 所示的那种望远镜系统，假如阳光可以直接进入的话，那这种杂散光危害是非常大的，对系统来说简直就是一场灾难。

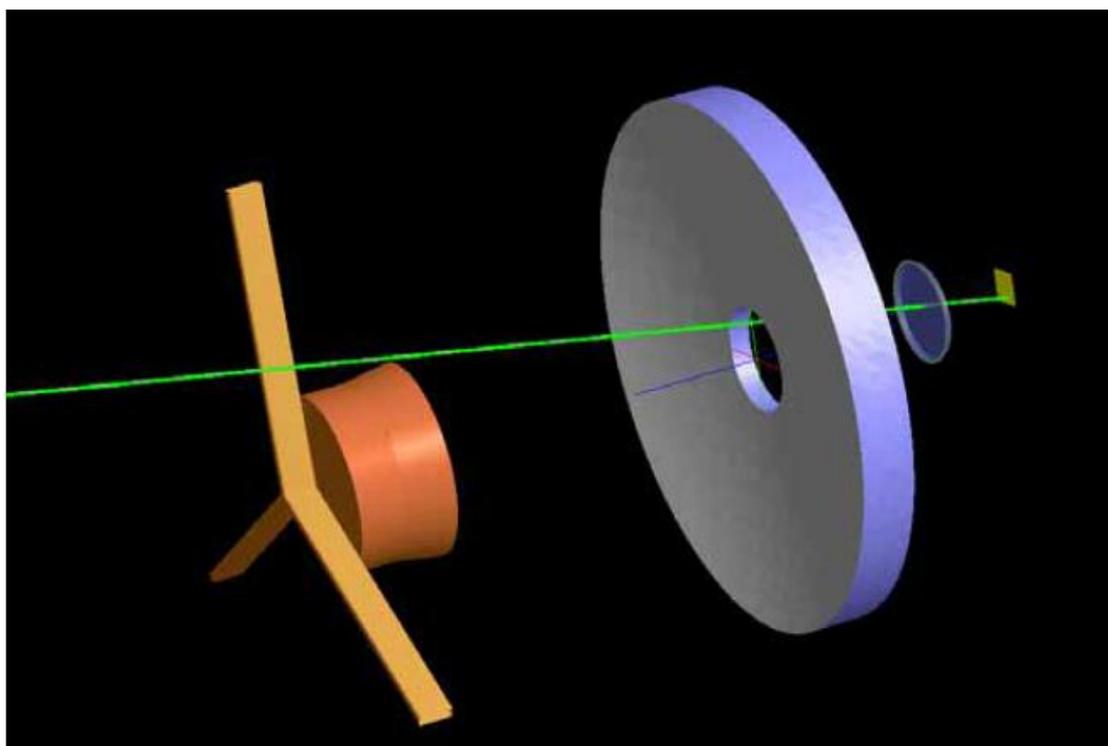


图 2— 图中所示绿色光线是轴外光源发出的光线，该光线绕开所有的光学部件并且直接进入探测器上。FRED 的 3D 可视化效果和用户自定义光路的能力，使得这个问题很容易被发现。

## 一次散射光

当杂散光源，比如太阳，直接照射到光学系统的时候就会产生单次散射光。部分散射光线经过光学系统之后，会照射到焦平面。我们认为它散射进了视场。而一旦光线散射进了视场，它就变成了杂散光，要想消除这种杂散光，则不可避免地会伴有渐晕现象。所以遮光罩设计的基本目的就是不让光线照射到系统上。

## 多次散射光线

即使散射光源不直接照射光学器件，散射光也会间接产生。首先散射光源照射到遮光罩表面发生散射，然后照射到光学器件。由此造成的杂散光总是比直接照射的散射光要小，但是它还是因为足够大而引起注意。图 3 是一个很好的示范，它演示了场外光源发出的光线（图中所示的绿色光线），进入卡塞格林望远镜系统后，怎样在系统内的遮光罩与遮光罩之间发生多次散射，并最终到达探测器。

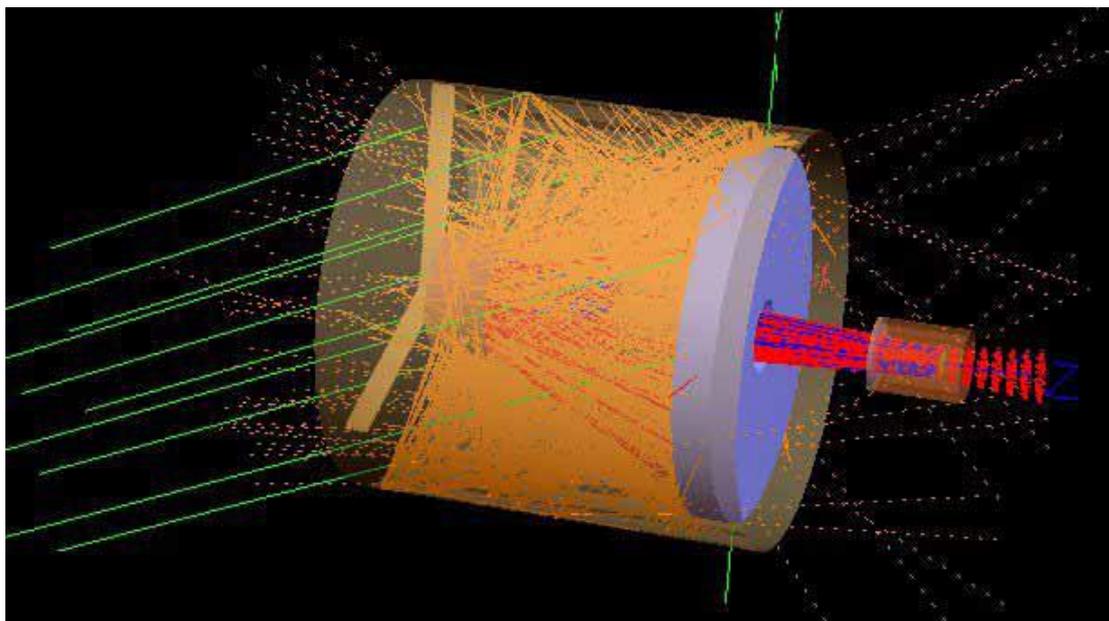


图 3—绿色光线进入卡塞格林望远镜后入射到桶状主遮光罩上发生散射，而后射向主反射镜和次反射镜，（分别以红色和蓝色代表），部分这些光线最终反射到探测器上。

### 边缘衍射

当孔径尺寸和波长比相对较小的时候( $10^4$  或者更小), 场外光源经孔径光阑发生的边缘衍射可能是杂散光的一个重要来源。

### 红外系统中的自辐射

热红外或者热成像系统中也可以出现杂散光, 该杂散光是由设备自身的热辐射引起的。这类系统通过检测叠加在一个大背景上的一个小的信号来运转。室温情况下, 黑体发射率曲线的峰值在大概  $10\mu\text{m}$  处. 因而在这种波长下, 环境也会"发光". 随着温度或者发射率的变化, 黑体发射曲线在发热过程中会有很小的变化。热成像系统一般通过减去背景来增强红外图像的对比度。当背景不均匀, 比如说有水仙花效应, 就产生了一个杂散光信号。特别是, 当冷却了的探测器的一个图像在其自身成像的时候, 背景的局部严重缺损就产生了。典型的表现是在图像的中心形成黑斑。人们可能称它为“杂斑”而不是杂散光。

红外辐射计测量绝对辐射而不是一个相对辐射, 所以任何背景辐射都是不可接受的。在这样一个设备中, 冷却整个设备来降低温度以消除因为自身散射引起的杂散光是必要的。

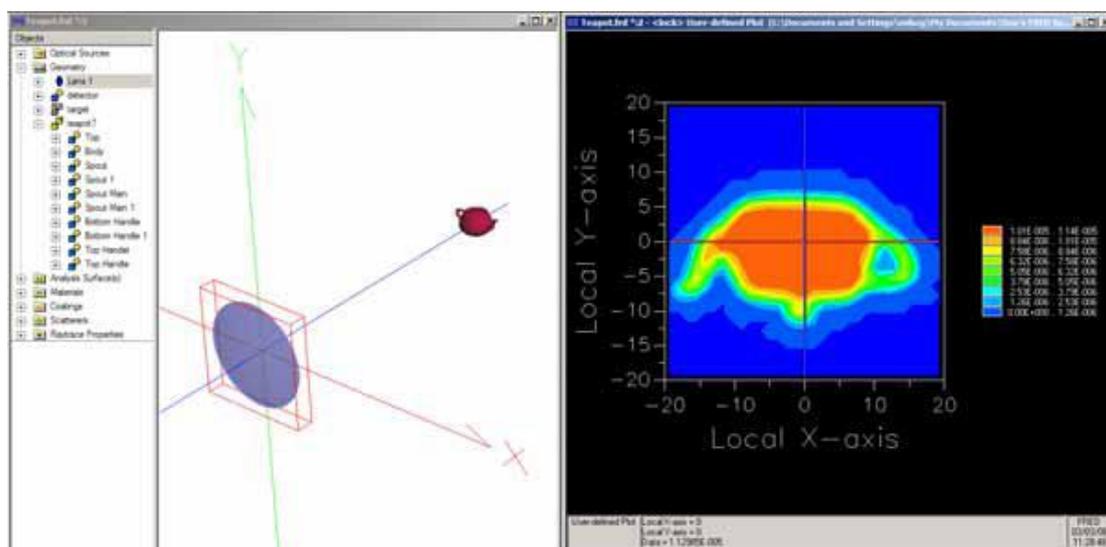


图4—该图演示这样一个简单的问题，一个温热的茶壶，其表面有着不同的发射率和温度分布。茶壶通过一个单透镜成像，探测器放置在透镜后面（看不见）。许多红外系统中都发现机械结构自身辐射到探测器的问题。而解决的方法不是移除自辐射源就是对这些辐射加以遮挡。

### 以上几种现象的组合

以上现象的组合也会发生，并且可能很重要。比如，自辐射光线可能继而从光学器件上散射进入视场里面。由孔径衍射的光线也可能从光学器件上面散射进入视场内。

## 2. FRED 怎样呈现散射光？

有几种方法可以跟踪散射光。第一种方法是制造一个光源，再追迹通过光学系统的光线。第二种方法是通过系统从探测器的进行反向光线追迹。能够通过使用任何 3D 光线追迹软件程序来显示杂散光光路是相当重要的。光学工程师利用 FRED 的软件来显示杂散光发生的位置。反射光线以及折射光线仅仅是问题的一部分，散射光也是一个问题。

## 3、FRED 怎样产生几何界面？

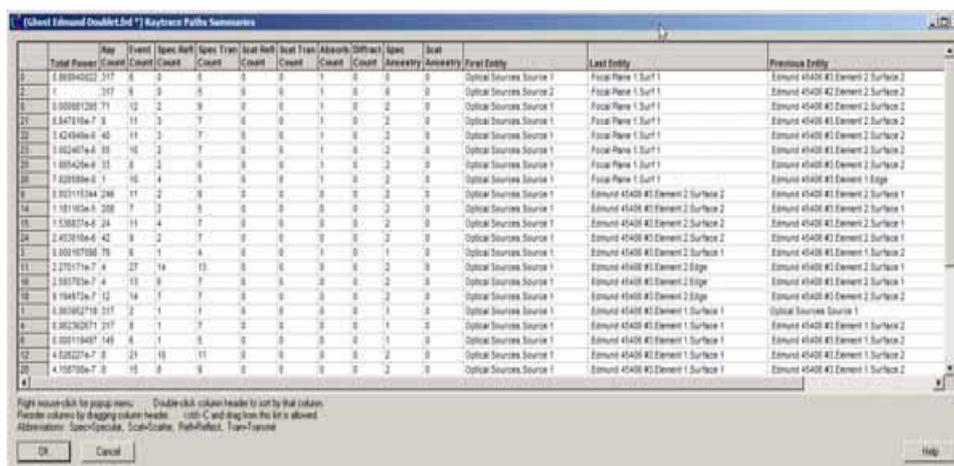
系统的几何结构可以直接在 FRED 中通过运用简单图形界面来生成。也可以输入由机械软件设计的 IGES 或者 STEP 格式文件，和光学设计程序设计的文件，或者从 ASAP 输出文档中转换过来。FRED 程序有许多选项用于生成表面，包括标准平面，二次曲线，柱面，椭圆体，双曲线，环形，多项式曲面，泽尼克，非均匀有理 B 样条，网状，旋转曲线，压边曲线，复合曲线，凹线和用户自定义表面。图 1 和图 2 中所示的为 FRED 绘制的那些表面之一。

因为 FRED 有一个多文档用户界面，所以可以在文档间进行元件的相互剪切，复制以及粘贴。实体在理论上可能被设置为各层组装体，组件和元件等等。它符合系统的物理层结构；任何一个物体都可以在任意的坐标系统中定义。任何表面都可能被任何隐式曲面或者任何孔径收集曲线所整理（切开），以下是详细说明。

#### 4、FRED 怎样追踪光路？

FRED 有能力去完成一次高级的光线追迹。这种光线追迹可以清晰地追踪系统中所有光线的的所有路径。图 5 显示了在图 1 中的两个双胶合透镜的光线路径的列表。光线历史报表是一个对所有光线的完整报告，记载了有多少光线以这条光路发射，他们怎样到达最终的实体（在这个事例中是焦平面）以及他们穿过了多少表面（事件计数）。也可以取任一条光线追迹的光路然后将其复制到用户定义光路列表（选择光路，将鼠标移至光路然后选择一个选项将这条光路复制到用户定义光路列表）。这条光路将立刻在高级光线追迹中呈现一个可选光路作为一个可用的光线追迹方法。还可以仅对这条光线绘制弥散斑图或点扩散函数图。

通过使用这种方法可以发现每个鬼像，直接入射，一次或多重散射光路中所占多大比例。



Ray	Energy	Event	Spec. Refl.	Spec. Tran.	Scat. Refl.	Scat. Tran.	Absorb.	Diffus.	Spec. Anisot.	Scat. Anisot.	Final Entity	Last Entity	Previous Entity
0	1.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
1	0.86800000	12	2	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
2	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
3	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
4	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
5	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
6	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
7	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Focal Plane 1 Surf 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2
8	0.00000000	71	12	2	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
9	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
10	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
11	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
12	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
13	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
14	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
15	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
16	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
17	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
18	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
19	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1
20	0.00000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Optical Sources Source 1	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 2	Edmund 45408 K1 Element 2 Surface 1

图 5—表中所示为在图 1 中的双胶合透镜系统的光线路径。注意到有 8 条光路到达了探测器，表中第二栏到最后 一栏所示。第二条光路是完美镀膜系统的光路，光路 0 是未镀膜系统的一个光路。注意到两条光路中所代表的能量都有不同，1 是 0 光路，0.868 是第二光路。第 8 光路有 71 条光线，与表面有 12 个交叉点和 2 个反射。这条光路显示在图 6 下方。这条清晰的光路是可以看到的，它显示在图 7 中。

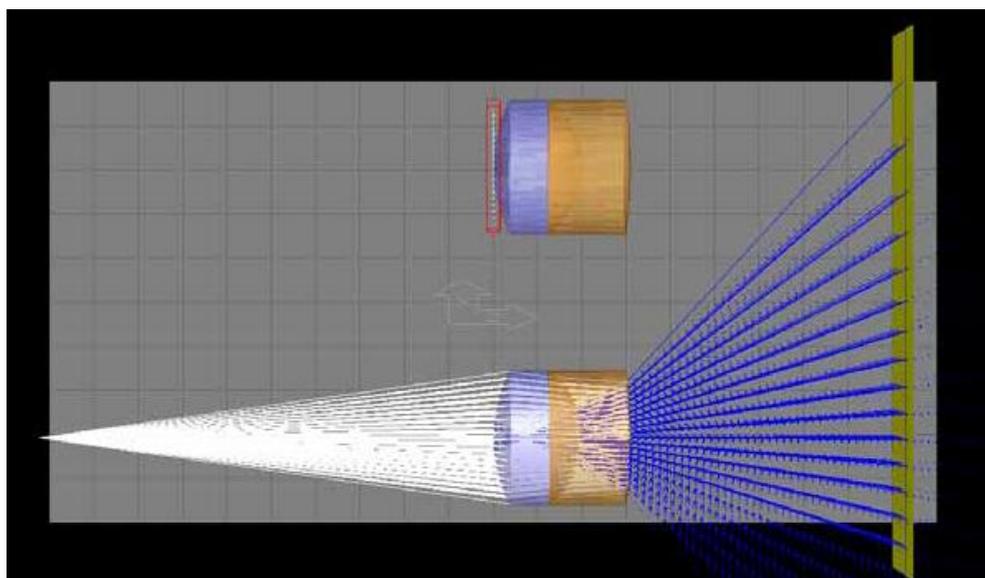


图 6—追迹未镀膜双胶合透镜中的第八条路径

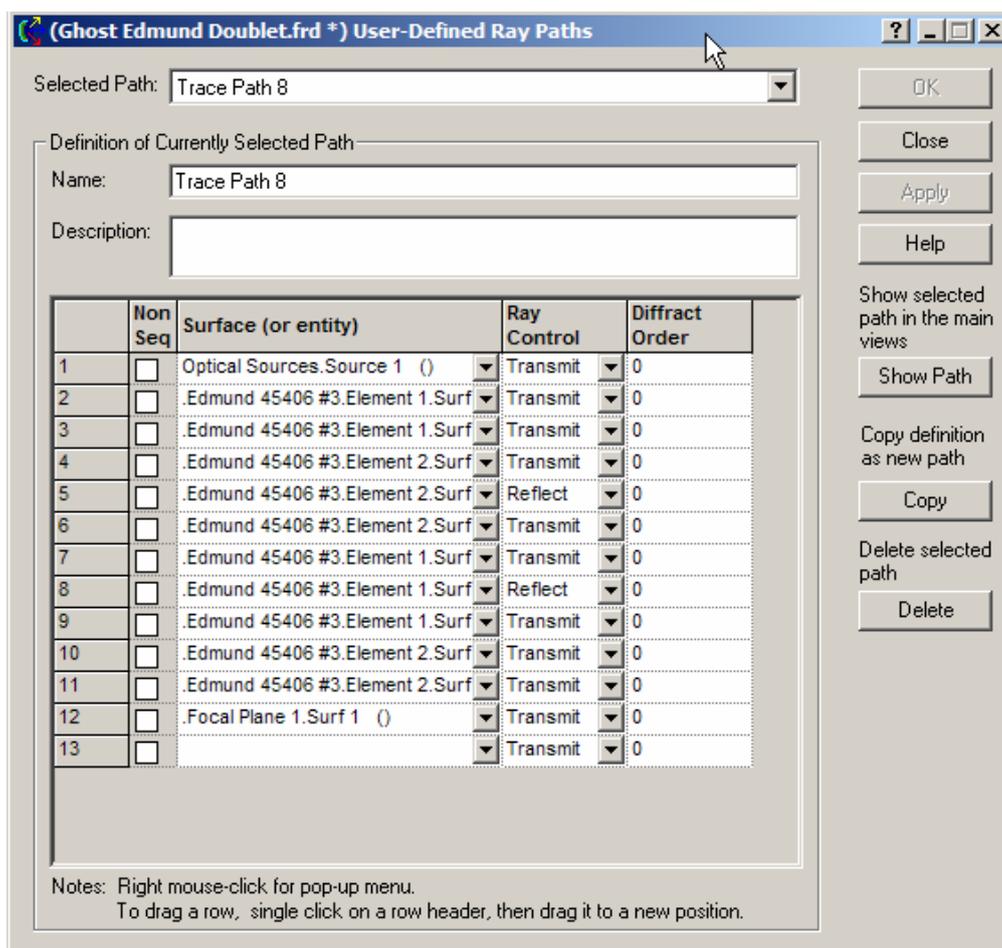


图 7—在图 6 中呈现的光线路径信息

## 5、FRED 怎样显示弥散斑图

FRED以光线颜色来显示弥散斑。在图8中，我们可以很容易的发现，鬼像的光线集中在未镀膜信号周围并且以蓝色表示，在右边是镀有膜的完善透镜系统。

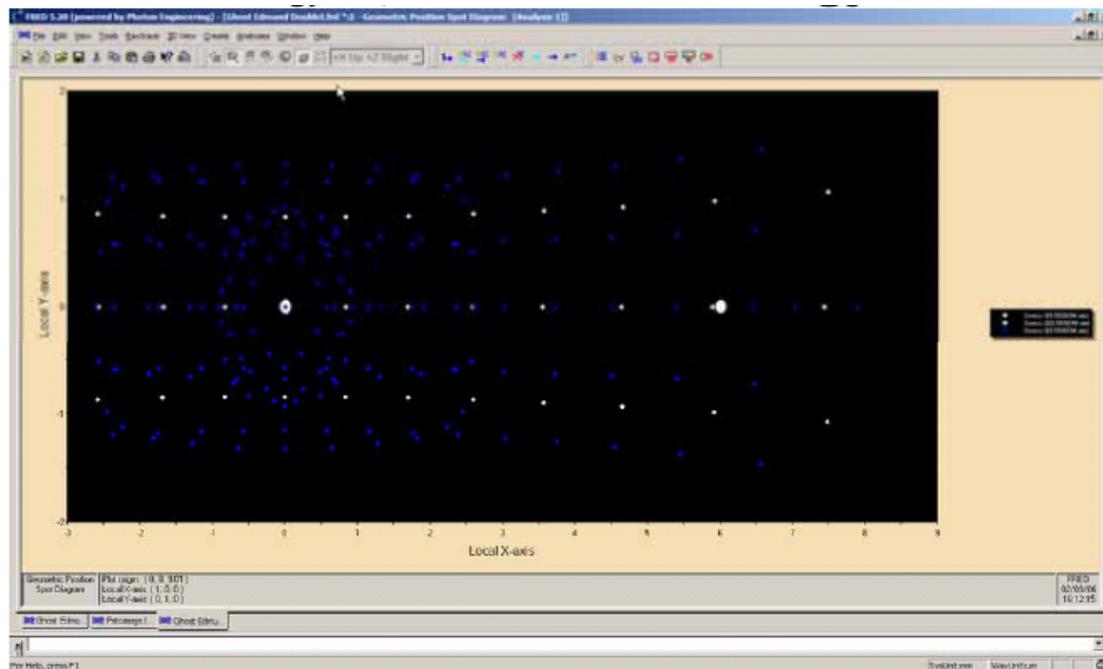


图 8—图 1 中的双胶合透镜系统所成的弥散斑图

## 6、FRED 怎样呈现辐照度图？

FRED 以四色的面板呈现辐照度图。左上方是一个等大的伪彩色图，它显示的是在选中分析面上单元功率。右边的刻度显示的是这个图中的功率等级。右上和左下的面板是左上面板的横截面。点击左上方图中的任一处，一个横截面将会出现在水平以及垂直两个方向，在这个位置的坐标和辐射将会显示在这个左上方的面板的左下角。右下方的图显示在这个分析面上定义的各个像素的数量和光线。如果用户点击右下方的图，就可以看到每个探测器像素的相对误差。这是一个很好的方式让你知道是否已经追迹了足够多的光线来为系统绘制有效的辐照度图， 这点对于照明系统来说尤其重要。两个双胶合透镜系统的辐照图在下图 9 中显示。

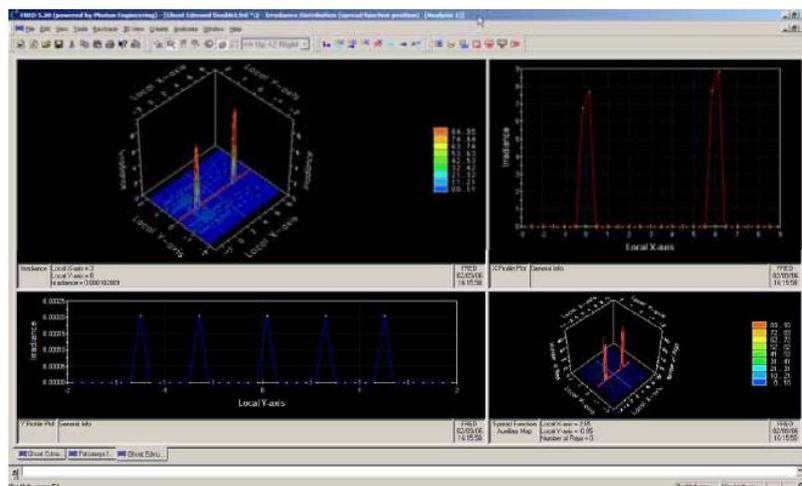


图 9—双胶合透镜系统的辐射图

只看一个面板的时候，鼠标左键双击界面。因为接下来的两个图是为左上的面板而制的。

如果立刻用鼠标右键点击左上面板，可以选择刻度数据选项来获得鬼像光线的具体信息。在选择了缩放数据选项，菜单也显示了以后，选择对数选项，点击OK键查看图10。如用右键再次点击左上的面板并且选择透视图，将会取消选项并且会有一个2D的图像出现在图11。

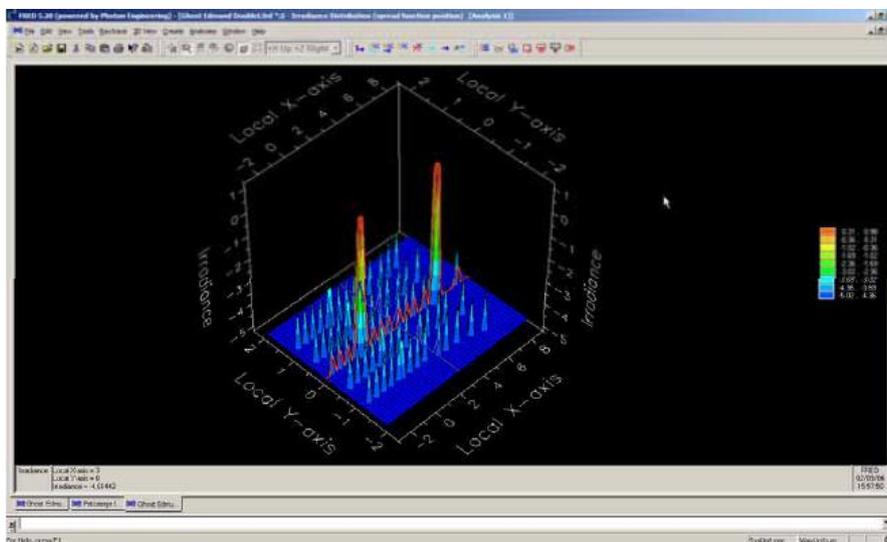


图10—双胶合透镜系统的对数缩放辐照度图

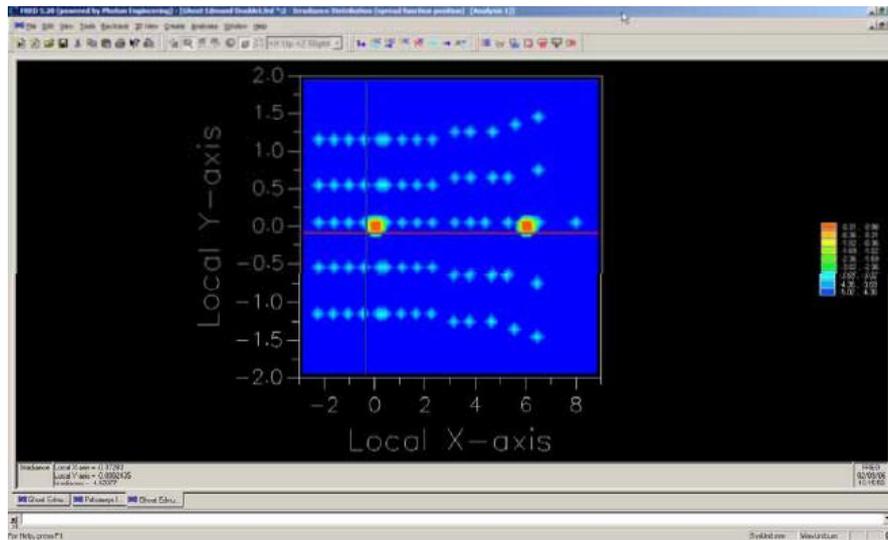


图 11—对数缩放辐照图的 2D 画面

## 7、FRED 怎样定义散射表面？

在“散射”文件夹中包括了默认和用户自己输入的散射模型，这些模型都可以应用于 FRED 的任何表面上。根据入射光角度以及局部曲面法线的方向，每个模型计算出合适的三维双向散射分布函数（BSDF）。BSDF 的另一种定义方式是双向反射分布函数（BRDF）以及双向透射分布函数（BTDF）。

FRED 自带三个默认的散射模型：黑朗伯（4%黑漫反射率），白朗伯（96%白漫反射率）以及 Harvey-Shack（抛光面）。另外，以参量描述的散射模型在 FRED 中也是可用的：黑漆（热成像系统），ABg，表面颗粒（Mie）和 Phong。一个表面至少可以应用一种类型的散射模型。图 12 显示创建一个用户自定义散射模型的对话框列表，解释了 FRED 最新的散射定义，是一个支持脚本的 BSDF 函数，用户可以通过方程来定义的一种散射模型。允许或者停止反射和传输散射组分最近应用于表面的每个光线追踪控制。每个散射表面必须有至少一个散射方向，通过运用菜单栏选项工具自动设置该方向，或采用散射重要性抽样，或可以通过“Surface”对话框的“Scatter”栏手动定义。每个散射方向都可以应用于设置在表面的每个散射模型。图 13 显示的是为表面设置多重重点采样的对话框。通过把目标定义在特定方向上，比如镜像或对着特定的实体，闭合曲线，空间中的一点或者椭圆柱体来实现多重重点采样。

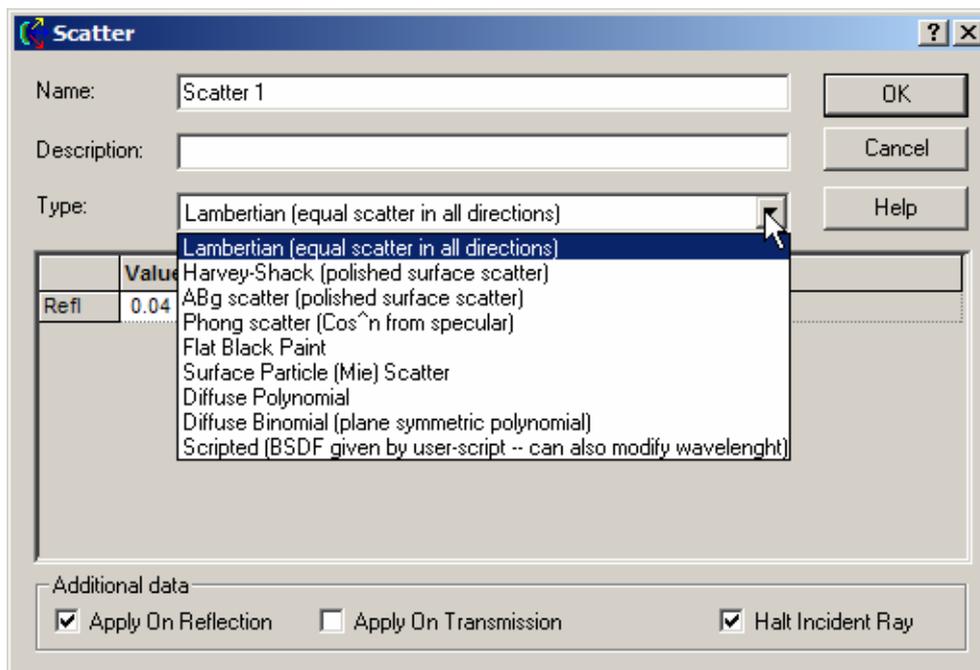


图 12—散射对话框显示有多种方法来定义散射

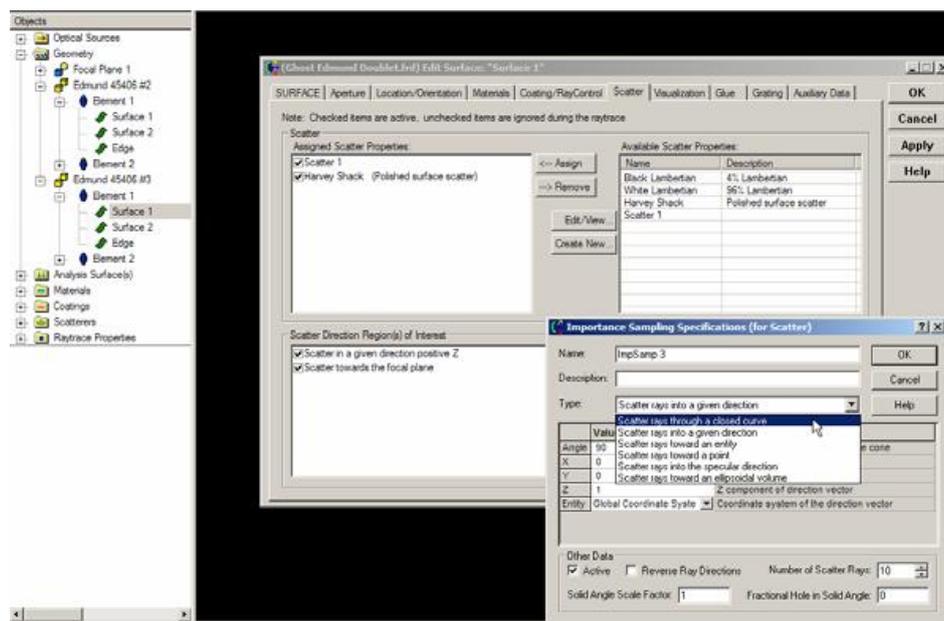


图 13—应用于一个特定表面上的重点采样定义选项。如图中所示，多重散射特性和多个重点采样目标可以一起运用。注意到该图中，该面同时定义了 MIE 散射特性和 Harvey Shack 抛光面散射，并且还定义两个重点采样目标，一个指向表面，一个朝向焦平面。

## 8、FRED 怎样追迹散射光路？

完成一次高级的光线追迹以后，只要选择了保存光线历史选项，FRED 就会生成一份杂散光报告。这样就有可能从工具菜单中得到一份详细的杂散光光线报告，该报告将指出鬼像以及散射光路怎样到达任何一个表面。图 14 所示的高级光线追迹对话框中，

可以看到该对话框有设置/运用光线历史档案的选项并勾选了“确定光线路径”的选项。  
图 15 显示的是一个简单的卡塞格林望远镜系统的杂散光光线报告，该报告详细说明了杂散光是怎样以离轴 5 度的视场从光源射入的望远镜的。

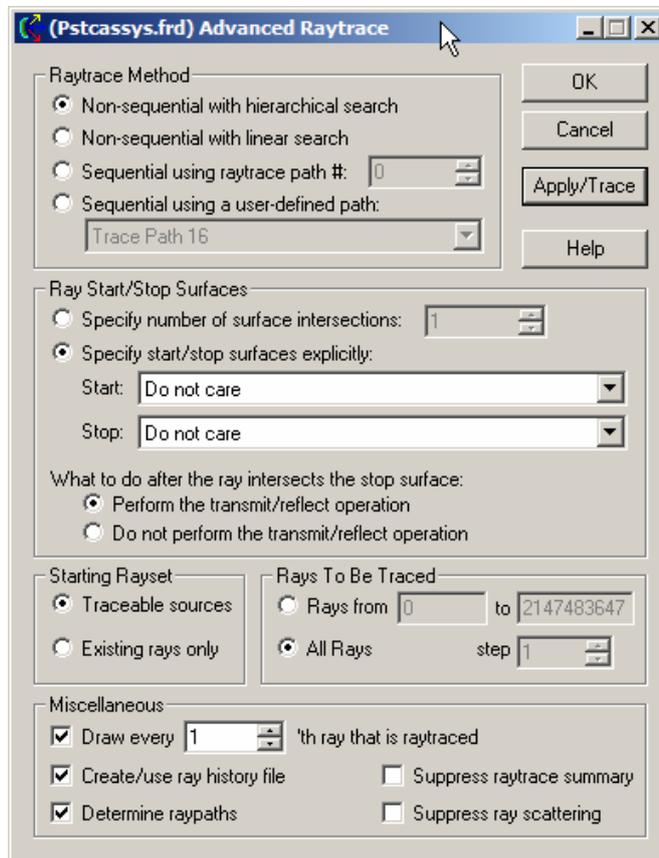


图 14—高级光线追迹对话框，该对话框有创建/运用光线历史档案的选项和“确定光线路径”的选项。

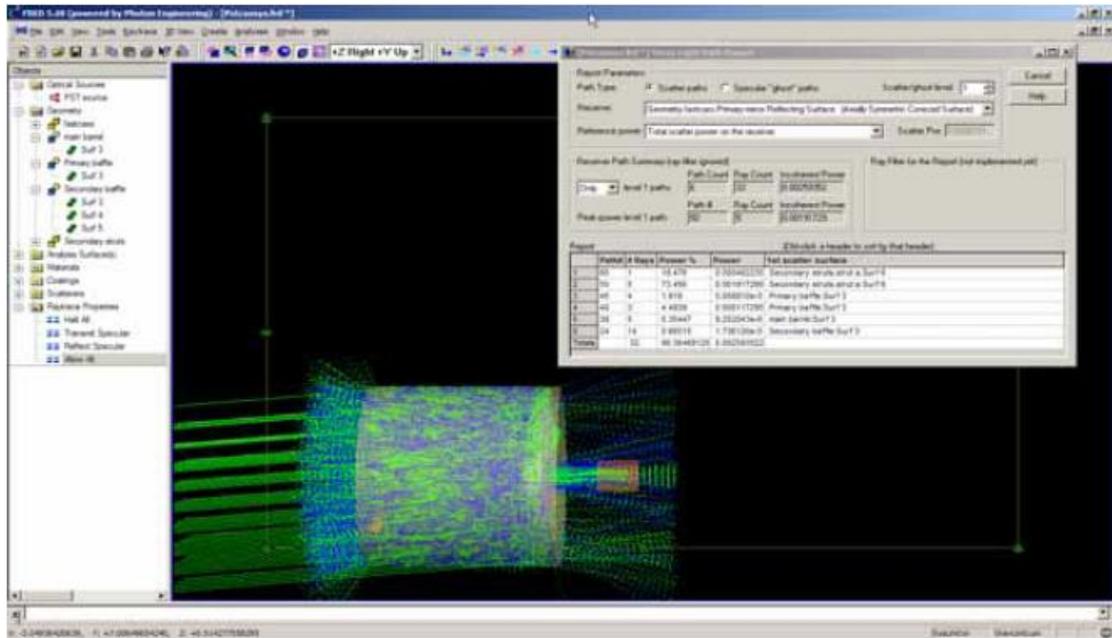


图 15—杂散光光线报告数据表可以用来追踪任一级别的散射光以及鬼像光路，并且该报表项可以在指定接收面后，输出到达该面的光路数，光线数功率百分率和各个光路的总功率。

### 9、FRED 如何通过多点光源迭代来输出对应的角功率点源传输曲线？

FRED 有一个内置汇编BASIC脚本语言。几乎所有的图形界面命令都可以用Visual Basic 汇编语言来表述。 FRED 也有“自动客户服务”功能， 该功能可以被调用或者调用其他“自动激活”程序，比如Excel。 基于此，我们就可以定义多个轴外光源，并且可以在FRED BASIC脚本语言中，利用“NEXT”循环，依次在环绕系统作水平和垂直两个方向的扫描，从而得到点光源传输曲线。 图17中显示了图15的卡塞格林望远镜系统对数点源传输曲线。 注意到，图17中显示的PST图形是由图16中的BASIC脚本调用 EXCEL来完成绘制的。

### Figure 16 – *FRED* Basic Script to create a Log PST plot in Excel

'PST script example showing changing incoming ray directions For analysis' declarations

```
Dim op As T_OPERATION
Dim pRay As T_RAY
Dim PST As Double
Dim XIRows As Constant
Dim xLXYScatterLinesNoMarkers As Long

' Connect to Excel
' Objects to be used
Dim excelApp As Object
Dim excelWB As Object
Dim excelRange As Object
Dim excelChart As Object

' Excel Object Setup
Set excelApp=CreateObject("Excel.Application")
Set excelWB=excelApp.Workbooks.Add
Set excelRange=excelWB.ActiveSheet.Cells(1,1)

' Show Excel
excelApp.Visible=True
htCount=1

'find source node, for the Cassys file this is the PST source, change as needed
node = FindName( "PST source" )
Print "found PST source at node " & node

'find detector node, for the Cassys file this is the detector array, change as needed
detNode = FindFullName( "Geometry.fastcass.dewar.FPA.detector array" )
Print "found detector at node " & detNode

Print out column headers
i = GetTextCurCol : j = GetTextCurRow
SetTextPosition j, i+3 : Print "PST"

EnableTextPrinting( False ) ' No printing

'Specify the detector area for the system, for cassys is is rectangular .125 in radius
detArea = ( 2 * 0.125 )^2

Loop to do the PST at every 2 degrees up to 80, change as needed
For angle = 0 To 80 Step 2

    SetSourceDirection node, 0, Tau( angle * .017453), 1
    Update
    DeleteRays           'Delete rays for subsequent loops
    CreateSources       ' Make sources
    TraceExisting 'Draw   ' Trace (and optionally draw) the rays

'PST calculation
PST = GetSurfIncidentPower ( detNode ) ' Get Power On Detector
PST = PST * Cos( angle * .017453) / detArea ' Calculate PST
```

```

EnableTextPrinting( True )
Print "PST at " & angle & " degrees =;" ' Print out PST header to the output window
i = GetTextCurCol : j = GetTextCurRow ' Get which row and column text cursor is on
SetTextPosition j, i+2 : Print "#" & PST ' Set the text position
EnableTextPrinting( False )
  htCount = htCount + 1

  ' Print the data into the Active Worksheet
  ' Column Headers
  excelRange.Cells(1,1).Value="Angle"
  excelRange.Cells(1,2).Value="PST"

  ' Data
  excelRange.Cells(htCount,1).Value=angle
  excelRange.Cells(htCount,2).Value="=IF("& PST & "<0,LOG("& PST & ",10),-8)"

  ' Size the Columns to the Text
  excelWB.Worksheets("Sheet1").Columns("A:B").Autofit
  
```

Next angle

```

' Graph Macro
Set excelChart=excelWB.Charts.Add
excelChart.ChartType = 75 '4 is XLLine 75 is XIScatter
excelChart.HasTitle = True
excelChart.Name="PST Plot"
excelChart.ChartTitle.Text = "PST Plot"
'ActiveChart.ApplyCustomType ChartType:=xlBuiltin, TypeName:="Logarithmic"
excelChart.SetSourceData(excelRange.Range("a2:b42"))
excelChart.PlotBy = 2 'Plots by columns if 2, 1 by rows
excelChart.Location 2, "Sheet1"
  
```

```

Set excelRange=Nothing
Set excelWB=Nothing
Set excelApp=Nothing
  
```

```

Print ">>> Calculation ends here!"
EnableTextPrinting( True ) ' Allow printing
  
```

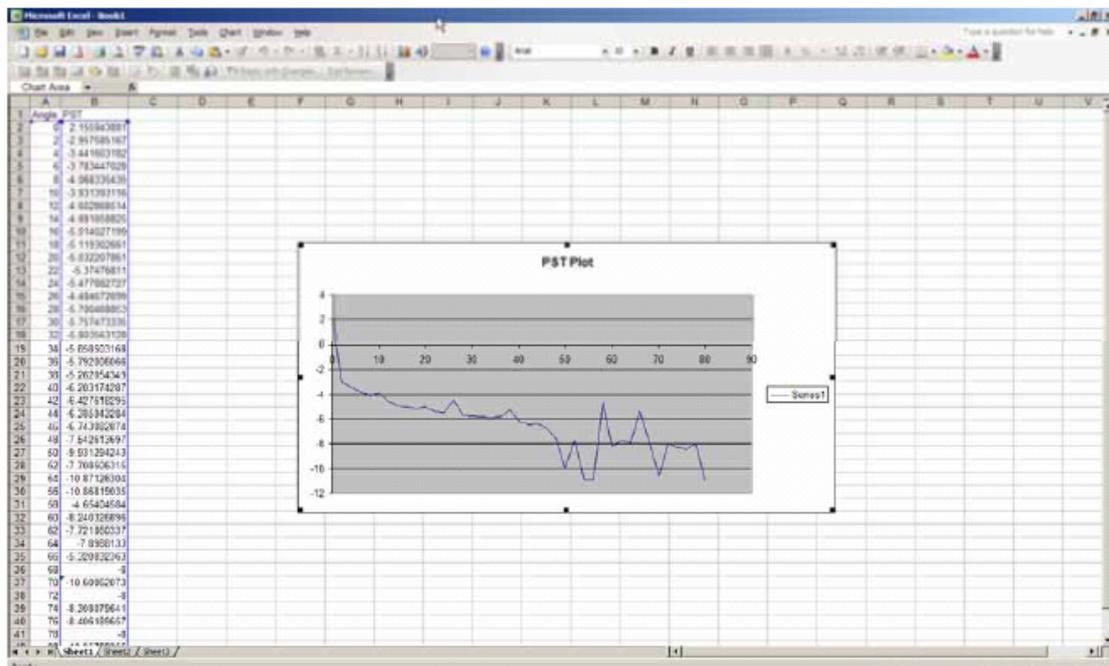


图 17— BASIC 脚本输出生成的 Excel 图表



## 讯技光电科技(上海)有限公司

Add: 上海市徐汇区钦州路428弄5号201室 邮编: 200235  
TEL: +86-21-6440-1131 E-mail: sales@infotek.com.cn  
FAX: +86-21-5497-1081 <http://www.infotek.com.cn>

---

讯技光电科技(上海)有限公司 上海地址: 上海市徐汇区钦州路 428 弄 5 号 201 室  
上海电话: +86-21-6440-1131 ; 64511038 ; 64327758  
上海传真: +86-21-5497-1081 邮 箱: sales@infotek.com.cn

仿真科技 创意人生

完美的服务品质, 源自於优异的专业能力, 十足的用心以及对服务的坚持