

# 红外图像处理技术 之红外图像处理技术

航空航天学院  
陆哲明/郑阳明

## 前言

- 红外焦平面阵列的**响应非均匀性、响应漂移性、盲元、目标辐射对比度**是决定原始红外图像质量的主要因素。
  - ✓ 响应非均匀性导致红外图像存在固定图案噪声
  - ✓ 响应漂移性导致图像信号的缓慢变化
  - ✓ 盲元导致红外图像存在亮点或暗点
  - ✓ 目标的辐射对比度系数小，导致红外图像对比度低。
- 因此，在热成像系统中要进行实时的**非均匀性校正、漂移补偿、盲元替代和对比度增强**。

## 主要内容

- 12.1红外成像中的信号处理
- 12.2红外图像的特点
- 12.3红外图像的非均匀校正
- 12.4盲元检测与补偿
- 12.5红外图像增强

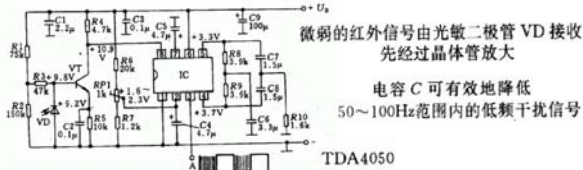
## 12.1 红外成像中的信号处理

- 红外成像系统为获取景物图像，首先将景物进行空间分解，然后依次将这些单元空间的景物温度转换成相应的时序视频信号。
- 红外成像中的信号处理的基本任务是：形成与景物温度相应的视频信号，如要测温，还要根据景物各单元对应的视频信号标出景物各部分的温度。
- 红外成像系统与普通的电视摄像系统在信号处理上有许多共同之处，如**放大、滤波、全电视信号的合成**等。

### 12.1.1前置放大器

- 根据红外探测器输出信号十分微弱、且含有噪声的特点，对**前置放大器**的设计要求是：**低噪声、高增益、低输出阻抗、良好的线性特性**。此外，还要仔细屏蔽，以**消除干扰信号**。
  - 当探测器和前置放大器的**阻抗不匹配**时，可采用射级输出电路来克服解决。
  - 当**信号振幅变化范围很宽**又不可能使用增益转换开关时，可以使用对数增益前置放大器，以保证弱信号获得高增益，强信号得到低增益。
  - 为保证系统的**低噪声系数**，前置放大器的最小增益应为10以上，这样才能保证后面各级放大器产生的噪声忽略不计。

- 在大多数系统应用中，前置放大器具有30~100的电压增益是最合适的。
- 前置放大器的**动态范围不宜过大**，它受到输入端的探测器噪声电平和允许的最大输出信号的限制。
- 前置放大器设计完成后，应通过实验验证各项参数是否满足指标要求，如某些指标达不到要求，应进行反复修改，直到使前置放大器在噪声系数、增益、带宽、稳定性和阻抗匹配等方面均满足指标要求。



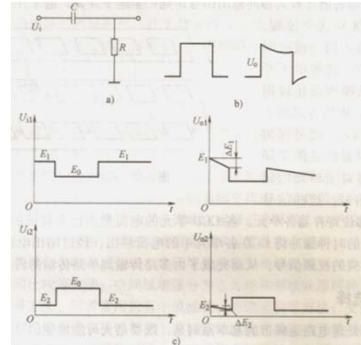
带有前置集成放大器的红外接收电路

### 12.1.2 直流恢复

- 信号中的直流成分常常需要在信号处理之前用隔直的方法将其去掉，这不仅可使信号处理变得简单，而且可达到抑制背景和消弱 $1/f$ 噪声的目的。
- 但是，采用交流耦合时也存在两个大问题：一方面信号直流分量被滤除了，因而输出信号便不具有温度绝对数值的意义；另一方面，由RC组成的高速交流耦合电路，在对目标进行扫描时会产生两种缺陷。

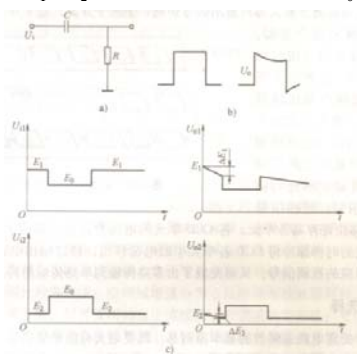
**$1/f$ 噪声**：红外成像传感器的 $1/f$ 噪声(亦称为闪烁噪声)是一种低频噪声，频率低端的 $1/f$ 噪声比频率高端的白噪声在强度上至少要高一个数量级到几个数量级，从而制约了成像制导系统和搜索跟踪系统对弱小目标的探测能力。因此降低红外成像传感器的 $1/f$ 噪声的强度，对于提高红外成像系统对弱小目标的探测能力具有重要意义。宏观上 $1/f$ 噪声表现为慢起伏低频色噪声，功率谱密度具有长拖尾的特点，其功率谱密度与频率之间呈 $1/f$ 的规律。

- ✓ 一个均匀热目标的信号是平顶方波，通过交流耦合后产生平顶降，如图(b)所示。结果造成显示的图像上目标亮度渐暗并有黑色拖尾，严重时甚至会遮盖掉其他图像细节。



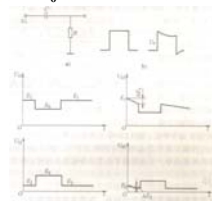
交流耦合产生的图像缺陷  
(a)等效电路  
(b)单路信号失真  
(c)多路信号失真

- ✓ 当采用多元并行扫描时，如图(c)所示。各个元件的前置放大器是交流耦合的，设两个元件各自视场中背景温度分别为 $T_1$ 和 $T_2$ 。视场中有一目标，温度为 $T_0$ ，且 $T_1 > T_0 > T_2$ 。

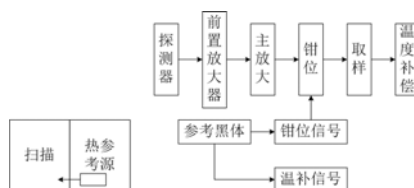


交流耦合产生的图像缺陷  
(a)等效电路  
(b)单路信号失真  
(c)多路信号失真

- 理想情况下，电容 $C$ 无限大，信号将无失真的传输，所显示的图像与景物相一致。
- ✓ 但实际上耦合电容电压 $U_0$ 初始值相等，由于 $T_1 > T_2$ ，则耦合前的电信号 $E_1 > E_2$ ，是两路信号的输出电压 $U_0$ 之差。
- ✓ 在对目标区域成像时，虽然在交流耦合前两路信号电平相同，但耦合后的输出信号却由于电容电压 $U_0$ 的不同而不同。
- ✓ 结果是**热背景的信号输出电平要低些**，反映在图像上，表现为同一目标温度 $T_0$ ，**热背景通道显示的亮度要暗于冷背景通道**。



- 为了减小图像缺陷，需要采用直流恢复技术。下图就是一种直流恢复方案，在系统中设置一个热参考源，在扫描周期的无效部分，探测器扫描热参考源。这个参考源可以是无源的，如光阑；或者是有源的，如黑体。



- 当探测器扫到这个参考热源时，热成像系统接收到参考源的辐射产生的温度信号，用这个信号作为钳位信号，将温度信号通道的信号钳位在零电平上。然后再将与环境温度相应的一个直流电平叠加在经过钳位的温度信号上，以进行环境温度补偿。这样，经过**钳位及环境温度补偿后的温度信号就具有了绝对意义**。



### 12.1.3 多路转换技术

- 当使用**多元探测器**时，通常要采用**多路转换技术**把多个信号通道改为一个信号通道。有两种实现方法：取样保持和ccd的并入/串出方式。
- ✓ **取样保持方式**，将前置放大器的输出信号送到一个电子开关，电子开关按顺序对每个单元取样并周期地重复这一过程，再将多路通道的输入信号按时间顺序输出给单通道，这种电子开关要实现高速、低噪声是比较困难的。
- ✓ **CCD并入/串出方式**，红外探测器并联扫描装置对景物或图像同时取样，并同时将对单元元的辐射信号转换成电信号，这些信号并行注入到CCD移位存储器各单元。各CCD单元的电荷量正比于对应的探测器取样信号，然后由一速度较快的时钟脉冲将CCD各单元中的电荷移出，经过输出电路便形成了一组串行的与取样信号对应的视频信号，从而完成了由多路传输到单路传输的转换。

### 12.1.4 通频带选择

- 确定视频信号处理电路通频带的基本原则是：**既要最大可能地使信号不失真又要尽量抑制噪声**。
- 通频带由高端频率 $f_H$ 及低端频率 $f_L$ 决定。高端频率 $f_H$ 由成像系统所允许的景物最高空间频率对应的信道中的电信号频率决定，如单元探测器光机扫描方式中，信道中的电信号频率就是元件输出端的电信号频率，即：
$$f_H = 1/(2\tau_d)$$
- 前述交流耦合产生图像缺陷的原因在于有限的时间常数限定了通频带低端截止频率 $f_L$ ，造成低频信号衰减，因此需相应地选择 $f_L$ ，通常方法是根据实际需要给定允许的下跌宕量，计算出 $f_L$ 后，考虑 $1/f$ 噪声的影响。一般有 $f_H \gg f_L$ 。

### 12.1.5 温度信号的线性化

- 由探测器输出的信号电平是目标温度的函数，这个函数由**目标辐射特性**、红外成像系统的**光谱透过特性**、探测器的**光谱响应特性**等决定。显然，这个函数是**非线性**的。但是，为了显示红外图像和实际温度，要求送到显示器终端的温度信号与目标温度呈线性关系。因此，要将探测器输出的信号电压进行**线性变换和校正**，使其与温度呈线性关系。
- 环境温度的补偿是用热敏元件测出的，它的信号电平与温度近似呈线性关系。但是，将这个电平信号送去进行温度补偿时，被补偿的温度信号与温度的关系却是**非线性**的。因此要将这个线性的环境温度进行非线性处理，使其与原温度信号的非线性化规律一致，然后再进行补偿。线性化电路可以由**非线性电位计**、**二极管**和**电阻网络**构成。

### 12.1.6 中心温度与温度范围的选择

- 红外图像的**中心温度**和整个红外图像的温度变化范围，因观测对象的不同而不同。因此，要求显示的中心温度及温度变化范围**应该是可以调节的**。由于放大器的静态工作点是确定的，则中心温度的选择可通过改变（作为放大器输入信号的）**视频信号的直流电平**来实现，而温度范围的选择可用**改变放大器增益**的方法实现。

## 12.2 红外图像的特点

- 红外图像反映了目标和背景红外辐射的空间分布，其辐射亮度主要由**被观察景物的温度和发射率**决定，因此红外图像近似反映了景物温度差或辐射差。
- 但是，目标和背景的红外辐射需经过**大气传输**、**光学系统**、**光电转换**和**电子处理**等过程，才被转换成为红外图像。

- 因此，红外图像具有以下特点：
- ✓ 红外热图像表征景物的温度分布是**灰度图像**，**没有立体感**，对人眼而言，**分辨率低**；
- ✓ 由于受景物热平衡、波长、传输距离远、大气衰减等因素的影响，红外图像**空间相关性强**、**对比度低**、**视觉效果模糊**；
- ✓ 热成像系统的探测能力和空间分辨率低于可见光CCD阵列，使得红外图像的**清晰度低于可见光图像**；
- ✓ 外界环境的随机干扰和热成像系统的不完善，给红外图像带来**多种多样的噪声**，比如热噪声、散粒噪声、 $1/f$ 噪声、光子电子涨落噪声等；
- ✓ 由于红外探测器中各像素的响应特性不一致、光机扫描系统缺陷等原因，造成红外图像的**非均匀性**，体现为图像的**固定空间噪声**、**串扰**、**畸变**等
- 由以上特点可知，红外图像必须经过信号处理才能适于人眼观察。

## 12.3 红外图像的非均匀校正

- 12.3.1 红外图像的非均匀性产生机理
- 12.3.2 红外图像的非均匀性校正方法

### 12.3.1 红外图像的非均匀性产生机理

- 导致红外图像非均匀性的因素非常复杂，目前人们对它的来源认识已经比较清楚，但对其数学描述却大部分**局限于经验公式**，还不能完整地建立红外图像非均匀性产生的数学模型和理论计算公式。
- 从信号传递的过程来看，首先是探测器像素的**响应率的不一致性**，红外焦平面阵列由成千上万个像素组成，由于**各个像素的响应参数不尽相同**，造成即使在均匀输入的情况下，**各个像素的响应也不一致**，这是**红外焦平面阵列非均匀性的主要因素**；其次是读出电路自身以及读出电路和探测器的耦合因素等。
- 在这些非均匀因素中，有些仅与探测器自身性能相关，其中线性的因素比较容易测定和校正，而对于其中与目标红外辐射、期间工作条件等相关的非均匀因素，则很难进行控制。

#### • 器件自身的非均匀性

- ✓ 探测器自身的非均匀性是**造成红外图像非均匀性的主要原因**。导致这种非均匀性的原因，与**材料质量、工艺过程**等有关。如参杂浓度、表面态密度的不均匀、栅极氧化物厚度的变化等引起的阈值电压的变化等，这些非均匀性的来源一般难以避免。不同的阈值电压在相同光栅偏压下的响应是不同的。
- ✓ **像素的尺寸差异**所引起的有效面积的不一致性也是非均匀性产生的因素。这与工艺过程有很大的关系，除了制版、光刻精度等影响像素的面积外，往往腐蚀工艺控制的好坏也直接影响像素的面积。
- ✓ **材料的不均匀性**对响应变化的影响也时分明显。
- ✓ 除了材料和工艺过程的不均匀性的影响外，**器件转移效率的不一致**也有影响，其特点是，随像素位置的变化，这种不均匀性变化比较缓慢，也称作低频响应的不均匀性，通常要求控制在5%的范围内。

#### • 器件工作状态引入的非均匀性

- ✓ 在红外热成像系统的性能中，与红外焦平面器件的工作状态相关的主要参数有**焦平面器件的环境温度和工作温度、红外探测器及读出电路的驱动信号**等。
- ✓ 焦平面探测器的辐射响应性能与它所处的实际温度有关，**焦平面器件的温度均匀性**影响整个焦平面阵列的响应均匀性。
- ✓ 同样，**红外探测单元及其读出电路单元驱动信号的变化**也会影响整个焦平面阵列的均匀性，这类非均匀性主要由焦平面器件的工作状态所决定，同一个焦平面在不同的成像系统中，或在不同的工作环境中都会表现出不同的非均匀性特性。
- ✓ 同时，器件工作时，半导体内部电荷的流动引起了**1/f噪声**。虽然目前对**1/f噪声**的成因尚未完全清楚，但通常认为是由半导体的表面电流所引起的，故称为**电流噪声**。这种噪声主要由加性噪声构成，对探测器的非均匀性也有较大的影响。

#### • 外界输入的相关非均匀性

- ✓ 在红外热成像系统中，目标和背景的红外辐射强度变化范围、红外热像仪光学系统的背景辐射等外界特性均会对焦平面器件的非均匀性产生影响。
- ✓ 景物的红外辐射变化主要为辐射总量和辐射光谱两种形式，由于红外探测器的光谱响应比较复杂，辐射总量的响应均匀性并不能代表其辐射光谱变化后仍然具有相同的均匀性。
- ✓ 红外光学系统背景辐射条件的变化将直接影响红外探测器所处的工作环境、工作参数和工作性能。
- ✓ 这类非均匀性与实际外界条件密切相关，在焦平面器件的研制和红外热成像系统的设计中很难预测和检验。

#### • 光学系统的影响

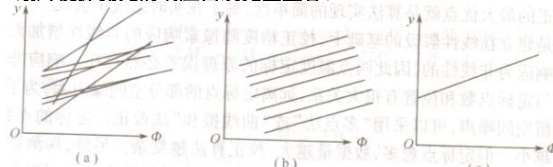
- ✓ 如红外光学镜头的加工精度、摄像镜头对光轴的偏转角度等。
- ✓ 文献报告的红外图像的非均匀性一般为20%左右，对红外图像质量有着严重的印象，如果不进行校正，目标图像很难从背景中分辨出来。因此，必须进行非均匀性校正。

### 12.3.2 红外图像的非均匀性校正方法

- 红外图像的非均匀性校正方法很多，基本可以分为两类：**基于参考源**和**基于场景**的校正技术。
- 基于参考源的校正技术要求在特定温度的黑体均匀辐射下，对红外焦平面阵列定标，通常使用**两点定标技术**或多点定标技术。
- 基于场景的方法不需黑体标定，而是根据场景的运动，在每个像素上产生场景温度的变化。这些温度变化依次提供统计参考点，依照这些参考点，探测器的非均匀性响应就可以被校正了。
- 目前，在商业上有推广价值的和在军事上能够实用的还是两点法和扩展两点法。

### 两点温度定标算法

- 假设红外探测元的响应为线性响应，如图（a）所示。从图中可以看出各探测元在相同输入条件下，具有不同的输出特性。
- 输入输出曲线截距的不同反映了探测器的噪声电流的不均匀性，曲线斜率的不同反映了响应率的不均匀性。
- 非均匀性校正就是使相同辐射条件下的探测器的响应曲线重合于一条曲线，为此设定一条标准曲线，将各探测元的响应曲线分别做旋转和平移变换，可得图(b)和图(c)所示的曲线，最终使探测元的响应曲线完全重合。



- 两点非均匀性校正算法根据系统的动态范围，使黑体分别工作在两个不同温度下，分别测出各探测元在不同温度下的响应值，然后归一化，得到各像素校正增益和偏移量分别为

$$G_{ij} = \frac{V_H - V_L}{y_{ij}(\phi_H) - y_{ij}(\phi_L)} \quad O_{ij} = \frac{V_H \bar{y}_{ij}(\phi_L) - V_L \bar{y}_{ij}(\phi_H)}{\bar{y}_{ij}(\phi_L) - \bar{y}_{ij}(\phi_H)}$$

- 式中， $V_H$ 和 $V_L$ 分别为高温和低温下所有探测元的响应平均值； $\bar{y}_{ij}(\phi_H)$ 和 $\bar{y}_{ij}(\phi_L)$ 为多帧响应平均值； $\phi_H$ 和 $\phi_L$ 分别代表高温和低温下的入射辐射。
- 经过两点校正后的输出表示为
- $y_{ij}(n) = G_{ij}(n)x_{ij}(n) + O_{ij}(n) \quad *$
- 式中， $x_{ij}(n)$ 为 $n$ 时刻像素 $(i,j)$ 非均匀校正前的输出； $y_{ij}(n)$ 为 $n$ 时刻像素 $(i,j)$ 非均匀校正后的输出。

### 12.4 盲元检测与补偿

- 12.4.1 盲元检测
- 12.4.2 盲元补偿
- 12.4.3 盲元检测与补偿算法评估

#### 12.4.1 盲元检测

- 盲元包括**死像素**和**过热像素**。死像素指响应率小于平均响应率的1/10的像素；而过热像素是响应率大于平均响应率的10倍的像素。
- IRFPA中的盲元与正常像素在响应特性上有很大差异，在一定的动态范围内，正常像素的温度响应特性曲线是线性的，而**盲元的动态范围远离正常的像素动态范围**，盲元的温度响应特性曲线多为非线性的，并且变化斜率偏高或者偏低，对两个不同温度的响应，其两点差值偏离正常的像素的两点差值。

- 最直接的盲元检测技术就是根据盲元的定义进行测试，盲元的定义是按IRFPA器件对黑体辐射的响应程度作为量化指标，它是基于实验室测量结果给出的关系式。因此，采用均匀辐射的黑体源照射IRFPA，得到一组响应数据，由于死像素和过热像素是随机的，其统计平均响应值应接近于零，总的响应平均值与剔除盲元后的响应平均值基本相同。



### 12.4.2 盲元补偿

- 盲元补偿技术是**根据相邻像素或前后帧图像的响应相关性对盲元位置的信息进行预测和替代的过程**。红外成像系统主要是对景物的实时动态成像，根据图像信息理论，其相邻两点或两帧之间的图像数据具有极高的相关性。
- 根据插值理论，对于连续变化的函数，**可以采用一点的前后两点或多点对该点数值进行插值预测**。
- 像素间的线性插值可以采用行间、列间或行列间2点、4点、8点等线性插值，行间或列间线性插值采用同一行或同一列的像素的线性关系进行插值，行列间线性插值采用前后、左右的4像素或8像素等进行插值，**行列间的线性插值在理论上效果最好**。

- 增加了数据的存储与读取时间，比较适用于数据块处理方式。对于点对点的数据处理方式，采用行间或列间2点或4点线性插值为不错的选择。若 $I(i,j)$ 像素为盲元，采用行间4点线性插值，则盲元补偿后的输出为

$$I(i,j) = \frac{I(i-2,j) + I(i-1,j) + I(i+1,j) + I(i+2,j)}{4}$$

- 这种方法的缺陷是图中可能出现条纹。
- 另一种盲元补偿方法是采用相邻前一非盲元像素响应值替代的方法。该方法的具体实现如下：通过实验室检测，在有盲元的地方做标记，作为查找表存放在SRAM中，每次图像处理时可以省去盲元的检测时间。

- 如果为盲元，则用上一像素的灰度值替代，然后输出。如果有大面积的盲元存在，则所有盲元的响应值被最近一个非盲元的响应值替换。该方法在算法实现上与两点矫正算法很相似，可以使用查找表的方法，实现简单，实时性强。

### 14.1.3 盲元检测与补偿算法评估

- 在盲元补偿时，**如果采用邻域平均补偿法，盲元可能很难完全得到补偿**。如果用同列相邻行的像素替代的方法效果可能会更好，其实现过程如下：
- 如果大面积的连续的盲元出现，第一个出现的盲元被同列上一行非盲元的响应值 $y$ 替代作为输出，第二个出现的盲元又被第一个被替代的盲元的输出值所替代，即仍输出为 $y$ ，以此类推，则连续的盲元的响应值很接近，因此，**采用临近像素替代的方法对较大区域的盲元补偿很有效**。

## 12.5 红外图像增强

- 12.5.1 红外图像直方图
- 12.5.2 直方图均衡
- 12.5.3 自适应分段线性变换
- 12.5.4 离散小波变换红外图像增强方法

## 前言

- 为了提高图像质量，常常利用计算机对红外图像进行数字化处理。图像增强处理是通过**增强图像中的有用信息、抑制无用信息**，来突出观察者感兴趣的区域。
- 影响红外图像质量的因素有**固定噪声干扰、随机噪声干、响应度的差异**等。
- 应用计算机对图像进行处理，可抑制噪声、补偿不均匀性，从而提高图像质量及温度观测的精度。
- ✓ 由于图像的随机噪声是**加性噪声**，帧间互不相关且均值为零，采用**多帧平均法**可提高图像的信噪比。
- ✓ **响应度的差异**可由对输入到计算机中的图像逐像素地作**响应度修正**来补偿。
- ✓ 对于**固定噪声的抑制**，可采用**帧间相减**的方法消除，而由计算机完成图像相减运算是方便的。

- 图像增强的方法可分为**时间处理**、**空域处理**和**变换域处理**三类。增强算法处理的效果，除了与算法本身有一定关系外，还与图像的数据特征直接相关。
- ✓ 时间域增强包括时间延迟积分、帧间比较等方法；
- ✓ 空间域增强分为点处理和邻域处理两种，前者包括对比度拉伸、直方图处理等方法；后者常用的有中值滤波、均值滤波等方法；
- ✓ 变换域增强是在离散傅里叶变换、小波变换等图像变换的基础上进行各种滤波、最终达到增强的目的。
- 一种图像增强算法的优劣不是绝对的。由于具体应用的目的和要求不同，所需增强技术也大不相同。因此从原理上讲，没有图像增强的通用标准，观察者才是某种增强方法的最终判断者。
- 增强算法处理的效果，除与算法本身有一定关系外，还与图像的数据特征直接相关。实际应用中，应当根据图像数据特征和处理要求来选择合适的方法。

### 12.5.1 红外图像直方图

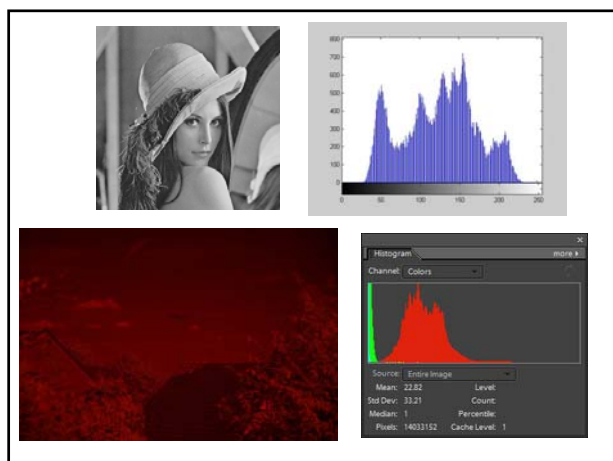
- 灰度直方图是用于表示图像像素值分布情况的统计图表，最常用一维直方图，定义是对于数字图像 $f(i,j)$ ，设图像灰度值为 $a_0, a_1, \dots, a_{k-1}$ ，则概率密度函数 $P(a_i)$ 为：

$$P(a_i) = \frac{\text{灰度级为 } a_i \text{ 的像素数}}{\text{图像中的总像素数}} \quad (i = 0, 1, \dots, k-1)$$

且有

$$\sum_{i=0}^{k-1} P(a_i) = 1$$

- ✓ 因此一副图像的直方图可以反映图像的一些特点。当图像的对比度较小时，它的灰度直方图在灰度轴上较小的一段区间非零，较暗的图像在直方图上主体出现在低灰度区间，在高灰度区间上的幅度很小或为零，较亮的图像恰好相反。



- 可以看出红外图像直方图具有以下特点：
- ✓ **像素灰度值动态范围不大**，很少充满真个灰度级空间。可见光图像的像素则分布于几乎整个灰度级空间。
- ✓ **绝大部分像素集中于某些相邻的灰度级范围**，这些范围以外的灰度级上则没有或只有很少的像素。可见光图像的像素分布比较均匀。
- ✓ **直方图中有明显的峰存在**，多数情况下为**单峰或双峰**，若为双峰，则一般主峰为信号，次峰为噪声。可见光图像直方图的峰不如红外图像明显，一般多个峰同时存在。
- 因此，先行灰度拉伸有利于红外图像对比度的增强。

### 12.5.2 直方图均衡

- **直方图均衡的作用是改变图像中灰度概率分布，使其均匀化**，其实质是使图像中灰度概率密度较大的像素向附近灰度级扩散，因而灰度层次拉开，而概率密度较小的像素的灰度级收缩，从而让出原来占有的部分灰度级。这样的处理使图像充分地利用各个灰度级，因而**增强了图像对比度**。
- 由于红外图像的灰度大多数集中在灰度值较高或灰度值较低的部分，致使图像的灰度级很少，层次感很差，因此，这种方法对红外图像增强效果较为明显。

- 设原始图像在 $(x,y)$ 处的灰度为 $f$ ，而改变后的图像为 $g$ ，则对图像增强的方法可表述为将在 $(x,y)$ 处的灰度/映射为 $g$ 。在灰度直方图均衡化处理中，对图像的映射函数可定义为
- $$g = T(f) \quad 0 \leq f \leq L-1$$
- 这个映射函数 $T(f)$ 必须满足两个条件：
  - ◆ (1)  $T(f)$ 在 $0 \leq f \leq L-1$ 范围内是一个单值单增函数，这是为了保证增强处理没有打乱原始图像的灰度排列次序，原图各灰度级在变换后仍保持从黑到白（或从白到黑）的排列。（ $L$ 为图像的灰度级数）
  - ◆ (2) 对于 $0 \leq f \leq L-1$  有 $0 \leq g \leq L-1$ ，这个条件保证了变化前后灰度值动态范围的一致性。

- 累计分布函数 (Cumulative distribution function, CDF) 即可满足上述两个条件, 并且通过该函数可以完成将原始图像  $f$  的分布转换为  $g$  的均匀分布。此时的直方图均衡化映射函数为:

$$c(g) = \sum_{f=0}^L p(x_f) \quad f = 0, 1, 2, \dots, L-1$$

- 上述求和区间为0到  $g$ , 根据该方程可以由源图像的各像素灰度值直接得到直方图均衡化后各像素的灰度值。在实际处理变换时, 一般先对原始图像的灰度情况进行统计分析, 并计算出原始直方图分布, 然后根据计算出的累计直方图分布求出  $f_k$  到  $g_k$  的灰度映射关系。在重复上述步骤得到源图像所有灰度级到目标图像灰度级的映射关系后, 按照这个映射关系对源图像各点像素进行灰度转换, 即可完成对源图像的直方图均衡化。



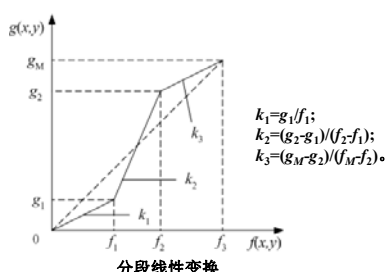
- 直方图均衡化的处理过程中出现相邻灰度级合并的现象。即原来直方图上频数较小的灰度级被归入很少几个或一个灰度级内, 并且可能不再原来的灰度级上。因此, 它有如下特点:
  - ◆ (1) 直方图均衡克服了线性拉伸过程中存在的较少的像素占用较大的灰度区间这样的问题。
  - ◆ (2) 当被合并掉的灰度级构成的是重要细节, 则均衡后细节信息损失较大。此时可采用局部直方图均衡法来处理。
  - ◆ (3) 均衡后的直方图并未完全平坦, 这是因为在离散灰度下, 直方图只是近似的概率密度。

- (4) 直方图均衡将直方图区域的灰度级拉开, 实际上提高了图像主要内容的对比度, 灰度重组使得均衡后的直方图等间距分布, 故相对于均衡而言, 图像主要内容的对比度降低。次要内容的对比度提高。
- (5) 在对比度增强处理中, 直方图均衡比灰度级线性变换、指数变换的运算速度慢, 但比空间域处理和变换域处理的速度快。因此, 在实时处理中, 直方图均衡是一种常用的方法。
- (6) 直方图均衡虽然增大了图像的对比度, 但往往处理后的图像视觉效果生硬、不够柔和, 有时甚至会造成图像质量的恶化。另外, 均衡后的噪声比处理前明显, 这是因为均衡没有区分有用信号和噪声, 当原图像噪声较多时, 噪声被增强。

### 12.5.3 自适应分段线性变换

- 在实际应用中, 许多图像增强算法由于复杂度、运算量或缺乏硬件的支持难以实现实时处理。期望能找到简便有效、运算速度快、通用性强、能够明显改善图像质量的方法。根据红外图像直方图的特点, **灰度分段线性变换**很好地满足了以上要求。
- 红外图像的目标灰度往往集中在**整个图像动态范围内较窄的区间**, 分段线性变换通过把较窄的目标分布区间展宽, 以增强目标和背景的灰度对比度, 进而从红外图像中识别出所感兴趣的目標。同时由于图像对比度的加大, 图像中的线与边缘特征也得到了加强。**分段线性变换后, 被压缩区间灰度层次的减少换来了被展宽区间(增强区间)灰度层次的丰富。**

- 灰度分段变换 (以三段为例) 的数学表达式为:

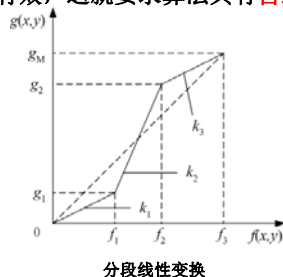


$$g(x, y) = \begin{cases} k_1 f(x, y), & 0 < f(x, y) < f_1 \\ k_2 [f(x, y) - f_1] + g_1, & f_1 \leq f(x, y) < f_2 \\ k_3 [f(x, y) - f_2] + g_2, & f_2 \leq f(x, y) < f_M \end{cases}$$

- 在一般情况下, 变换前后灰度变换范围是不变的, 即  $g_M = f_M$ 。此时, **感兴趣的区间的展宽是以其他区间的压缩为代价的**, 也就是说, 增强区间的灰度层次丰富了, 对比度增强了, 同时, 增前区间以外的对比度降低了。但是因为图像增强并不以保真原则为前提, 只要能更好地从背景中识别出感兴趣的目标, 那么这种方法就是切实可行的。
- 分段线性变换的关键是灰度分段区地选择, **分段线性的选择直接决定了图像增强和消弱的区域**。最简单的方法就是采用固定的区间, 对所有的图像进行相同的变换。



- 但实际图像的内容大相径庭，其直方图分布也各具特点。所以要找到一个对所有图像都适用的变换区间是不现实的。
- 一种好的算法必须结合图像的具体特征，对于绝大多数图像有效，这就要求算法具有**自适应性**。



- 自适应分段线性变换，对大多数图像都比较适用。定义：
  - ✓ 灰度最频值——直方图中具有最大像素数的灰度级；
  - ✓ 频数——灰度值重复次数，即图像中具有某灰度值的像素总数；
  - ✓  $\{a_i, n_i\}$ ——灰度级  $a_i$  对应的频数为  $n_i$ 。
  - ✓ 如果存在  $\{a_0, n_0\}$  其中  $a_0$  为灰度最频值， $n_0$  为最频值对应的频数，令  $n_T = n_0 \times 10\%$ 。那么存在  $[0, a_0]$  的灰度区间，必然存在  $\{a_L, n_L\}$  使得区间  $[0, a_L]$  所有的  $n_i < n_T$ ；同样，对于  $[a_0, 255]$  的灰度区间，必然存在  $\{a_R, n_R\}$  使得  $[a_R, 255]$  区间所有的  $n_i < n_T$ ，令

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & (f(x, y) < a_L) \\ \frac{1}{a_R - a_L} \cdot [f(x, y) - f_1] & (a_L \leq f(x, y) \leq a_R) \\ 1 & (f(x, y) > a_R) \end{cases}$$

- ✓ 式中， $f(x, y)$  为原始图像像素的灰度值； $g(x, y)$  为增强后的灰度值。

- 自适应分段线性变换算法的实现过程是：
  - ✓ (1) 统计灰度直方图，找到灰度最频值  $a_0$  和对应的频数  $n_0$ ；
  - ✓ (2) 令  $n_T = n_0 \times p$ ；
  - ✓ (3) 从直方图的0灰度级开始向右搜索，直到找到  $a_L$ ，满足其对应的  $n_L > n_T$ ，且  $n_{L-1} < n_T$ ，记为  $a_L$ ；
  - ✓ (4) 从直方图的255灰度级开始向左搜索，直到找到  $a_R$ ，满足其对应的  $n_R > n_T$ ，且  $n_{R-1} < n_T$ ，记为  $a_R$ ；
  - ✓ (5) 根据上式建立查找表；
  - ✓ (6) 根据(5)中建立的查找表，对原始图像中的像素逐点进行灰度变换，达到图像增强的目的。

- 自适应分段线性变换算法具有以下特点：

- ✓ 在基本线性变换的基础上，自适应线性变换增加了**搜索目标线性灰度变换的范围**，运算量增加很少，基本线性变换本身具有运算量小的特点，因此该算法可以保证实现的实时性。
- ✓ 自适应分段线性变换通过搜寻目标灰度范围，保证了信号的大部分能量，并通过对信号部分的拉伸，增加了信号部分的对比度；同时去除了大部分的图像噪声，克服了基本线性变换增加噪声对比度的问题。
- ✓ 阈值  $n_T = n_0 p$  中采用了可调比例  $p$ ，因此增加了算法的灵活性。



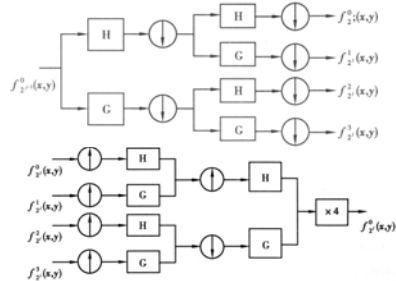
## 12.5.4 离散小波变换红外图像增强方法

- 小波变换技术在图像增强领域的应用，是利用了小波变换的多分辨率特性，该方法大致分为**小波分解**、**图像增强**、**小波重构**三个步骤。
- 二维图像的小波分解通常采用离散小波变换。假设二维尺度函数可以分解为低通和高通滤波器两部分，分别用  $H$ （低通）和  $G$ （高通）表示，则**按照Mallat快速算法**，对二维图像在尺度  $j-1$  上的小波分解公式如下：

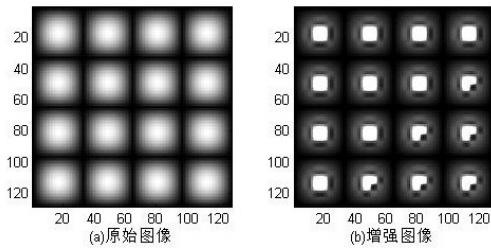
$$\begin{cases} A_j = H_m H_n A_{j-1} \\ D_j^H = G_m H_n A_{j-1} \\ D_j^V = H_m G_n A_{j-1} \\ D_j^D = G_m G_n A_{j-1} \end{cases}$$

- 式中， $A_j, D_j^H, D_j^V, D_j^D$  分别对应于图像  $A_{j-1}$  的低频部分、水平细节（高频的水平边缘分量）、垂直细节（垂直边缘分量）、对角细节（对角边缘分量）。
- 图像的进一步分解对低频分量进行，图像经  $N$  次分解后，可以得到  $3N+1$  个子图像，其中一个低频分量， $3N$  个高频分量。子图像矩阵大小随分解级数的增加而呈现递减趋势，下一级分解的子图像矩阵仅为上一级分解子图像矩阵的  $1/2$ 。
- 与之相应的小波重构公式为
 
$$C_{j-1} = H_m^* H_n^* C_j + H_m^* G_n^* D_j^H + G_m^* H_n^* D_j^V + G_m^* G_n^* D_j^D$$
- 式中， $H^*, G^*$  分别为  $H, G$  的共轭转置矩阵。

- 则按照Mallat快速算法，图像的小波分解算法如上图所示。小波变换的重构算法如下图所示。
- 分解后的图像，其主要信息（即轮廓）由低频部分来表征，而其细节部分则由高频部分表征。因此，通过对低频分解系数进行增强处理，对高频分解系数进行衰减处理，即可起到图像增强的效果。



```
<span style="font-size:18px;">clear all;
load sinsin
subplot(121);image(X); %画出原始图像
colormap(map);
xlabel('a)原始图像');
axis square
%下面进行图像的增强处理
%用小波函数sym4对X进行2层小波分解
[c,s]=wavedec2(X,2,'sym4');
sizec=size(c);
%对分解系数进行处理以突出轮廓部分，弱化细节部分
for i=1:sizec(2)
    if(c(i)>350)
        c(i)=2*c(i);
    else
        c(i)=0.5*c(i);
    end
end
xx=waverec2(c,s,'sym4'); %下面对处理后的系数进行重构
%画出重构后的图像
subplot(122);image(xx);
colormap(map);
xlabel('b)增强图像');
axis square</span><span style="font-size:24px;">
</span>
```



- 无论是直方图均衡、普通线性灰度拉伸还是线性灰度拉伸，在目标得到增强的同时，图像的噪声也被增强，即目标和噪声同时被增强。而在小波图像增强中，图像的噪声得到抑制，目标也得到增强，视觉效果最好。

