

改进了的以白天天空为背景的靶扑获

文 摘

闭路电视设备可以帮助观察员用眼睛扑获以白天天空为背景的弱目标。这篇文章评论理论和实际因素，并示出结果。

绪 言

此文中，我们给出采用闭路电视（CCTV）设备做为增强以白天天空为背景的弱目标的有效对比度的装置的研究结果，因此容易扑获这样的靶。首先，我们描述观察员直接用眼睛观察的扑获性能一既起标准比较的作用又起在装备电视的扑获装置中最后传感的作用。然后，我们用光电参数和靶及背景的光通量写出该装置可得到的性能的数学表达式。其次，我们辨别并描述由于实际部件而产生的某些性能上的限制。然后介绍一种方块图系统以减小这种不完善并使电子部分的参数最佳化。最后，我们描述这种实验装置，示出已获得的结果，并且指出今后工作的方向。

直接观察的扑获性能

在不同照明和对比度条件下直接观察目标的探测和扑获性能是许多年来一系列研究的对象。代表多年仔细地漫长地观察的某些研究结果在这类文章（1，2，3）中已有报导。这些研究多半是考虑了含在某些未分的处于单调的或不规则背景中的各种张角的靶，因此研究结果也是着急于目标和其背景之间的对比度的。本文主要部分将涉及象星或相当远的物体那样的未分辨的目标。对于这样的靶，对比度的概念有点是人为的，同时考虑来自靶的照明或辐射以及天空背景附

加其上的辐射或光通量比较容易。在若干星和卫星能见度的研究中发现了此种方法有用。

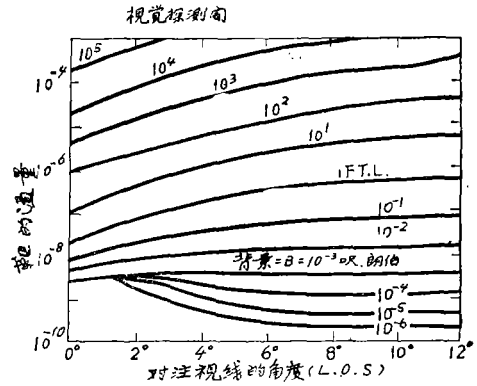


图1 直接观察的灵敏度；在背景照度为若干值时，作为对观察员注视线角度的函数的靶照明阈。

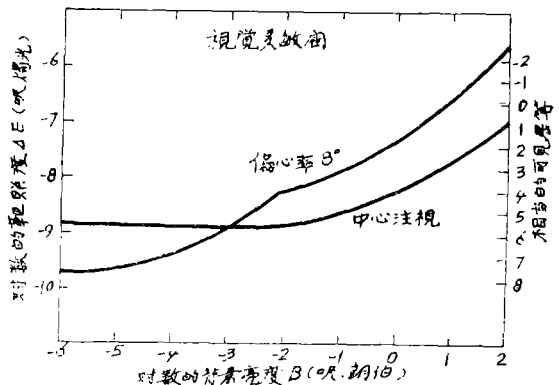


图2 直接观察的灵敏度：在观察员注视线上或偏离注视线时作为背景亮度函数的靶照明阈。

因此，我们在图1和图2的直接视觉灵敏度的曲线图中采用这些较简单的参数。这些曲线图表示在观察员位置处的靶照明阈 ΔE (呎·烛光)这是在改变背景亮度 B (呎·朗伯)和视线到靶和观察员注视线间不同角度所需要的。 ΔE 和 B 都是以对数形式被画成曲线图。这些曲线图来自文献中给定的数据，并且被归一化到极限的情形，即：均匀的背景，不受限制的观察时间，预知的靶位置和50%的探测几率。在先前的参考文献和其它地方已经描述了各类情况所需要的阈的改变。在这里就不必重复，因为对于这些曲线图的重要数据属于曲线的形状而不是在于绝对照度级。

有几件事立即明显看出：在足够低的背景光平，根据注视线选择的任意角度时，灵敏阈对背景光平并不敏感，而实质上眼睛是受靶亮度限制的；在足够高的背景光平，根据注视线选择的任意角度时，所要求的靶的照度几乎比例于背景亮度而眼睛实质上是受对比度限制的。在高的背景光平时，眼睛沿着注视线是最灵敏的，而在低背景光平时，从注视线开始约 8° 的范围最灵敏。在高背景光平时，眼睛的灵敏度随着靶离开注视线而急剧地减小；有一个约为 10^{-3} 呎·朗伯的适中的背景光平，在此时整个广阔视场的视觉灵敏度基本不变（这个亮度大约为在等于 $\frac{1}{4}$ 的月球的亮光下夜晚旷野大地的亮度）。在较大注视线角的曲线中有一个明显的中断；这可能是由于杆体细胞和锥体细胞这两类存在视神经敏感元所造成的。

这些事实直接导致一个概念：即观察员对于以明亮的白天天空为背景的弱目标的景象应如何使用闭路电视装置更有效的去显示出目标。若向下旋转电视的“亮度”控制，那么在显示器上显示的天空非常暗，可以看到特别是在离开观察员注视线有一定角度时，描述目标的亮度增量变得更加显而易见。这样天空亮度被消除了，之后向上旋转电视的“对比度”的控制，那么所显示的目标在暗的萤光屏上以一个更加明亮的斑点表现。这

种过程的作用就是增大亮天空景象下的有效对比度，于是，在直接观察是因对比度低看不见的目标，在电视显示器上变得容易看见了。在实际执行这种方案中存在许多复杂问题，但是此概念的要点却如同所说的那样。可能这些要点是明显的，值得再重复。为了使观察员能迅速而可靠地在处于离开他的直接视线的位置的地方扑获目标，显示器的平均亮度和它周围的亮度必须很低，约为 10^{-3} 呎·朗伯。这就给观察位置周围允许的照明级以严峻的限制。

电视系统性能的阐述 (公式化)

当我们测量典型电视系统的靶探测性能时，将最小的看得见的靶辐射照度作为背景亮度的函数，我们发现这些数据很适合这种形式的表达式：

$$H_{\text{最小}} = H_0 + \Omega N \quad (1)$$

其中 $H_{\text{最小}}$ 是被探测靶辐射照度

H_0 是零背景亮度时的 $H_{\text{最小}}$ 的值。

N 是背景亮度

Ω 是具有立体角量纲的参数

可以认为参数 Ω 代表一个背景光的有效立体角的大小，也正是在这个立体角内也还有靶的辐照出现在某种意义上看两者是相“对抗”的。同时还涉及光学响应效能，摄像管的分辨本领，可见度，杂光，光谱滤波和各种电子学和显示等因素的影响。注意这点很有趣：上面的表达式只包含 (ΩN) 的一次幂而不是人们所期望的象典型的教科书中的“背景受限制的传感器”的 $(\Omega N)^{1/2}$ 。相反，这种典型的系统是“对比度受限制的”。

现在，我们将重新阐述上面的表达式以明确地陈述所有相关的参数。我们将为综合或分析有用的电视系统提供数学的工具。特别是，我们将能够确定系统性能与任意目标和背景的光谱分布，测量实验的波长等因素相关的表达式。

因为靶的背景一般具有不同的光谱分布，所以我们如下规定某些滤波函数：

$$\phi_{\lambda t} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} H_{\lambda} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda}{H_{\lambda_0 t} S_{\lambda_0} (\Delta\lambda)} \quad (2)$$

$$\text{并且 } \phi_{\lambda b} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} N_{\lambda b} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda}{N_{\lambda_0 b} S_{\lambda_0} (\Delta\lambda)} \quad (3)$$

其中

- $\phi_{\lambda t}$ 是靶辐射通量的滤波器因数，
- $\phi_{\lambda b}$ 是背景辐射通量的滤波器因数
- $H_{\lambda t}$ 是来自靶的光谱，
- $N_{\lambda b}$ 是背景的光谱亮度，
- S_{λ} 是摄像管的光谱灵敏度，
- F_{λ} 是滤波器和光学系统的光谱透过率，

$H_{\lambda_0 t}$, $N_{\lambda_0 b}$, S_{λ_0} 是实验波长 λ_0 的值， $(\Delta\lambda)$ 是 λ_0 时的有效光谱带宽，

除了穿过光学系统的指定光路的从靶和背景来的光通量的辐射之外，摄像管会受杂光辐照的影响。由于这种光会具有不同于背景的光谱分布，因此在杂光受 F_{λ} 规定的相同光谱滤波影响的前题下，我们规定下面的滤波函数：

$$\phi_{\lambda l} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \overline{N}_{\lambda L} S_{\lambda} F_{\lambda} \alpha \lambda}{\overline{N}_{\lambda_0 L} S_{\lambda_0} (\Delta\lambda)} \quad (4)$$

其中

- $\phi_{\lambda l}$ 是杂光辐射通量的滤波器因数。
 - $\overline{N}_{\lambda L}$ 是杂光的平均光谱亮度。
 - $\overline{N}_{\lambda_0 L}$ 是实验波长 λ_0 时的 $\overline{N}_{\lambda L}$ 的数值。
- 这时我们可以写成：

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} H_{\lambda t} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda = \phi_{\lambda t} H_{\lambda_0 t} S_{\lambda_0} (\Delta\lambda)$$

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} N_{\lambda b} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda = \phi_{\lambda b} N_{\lambda_0 b} S_{\lambda_0} (\Delta\lambda)$$

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} \overline{N}_{\lambda L} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda = \phi_{\lambda l} \overline{N}_{\lambda_0 L} S_{\lambda_0} (\Delta\lambda)$$

为了以后使用，我们还规定在实验波长

λ_0 时，杂光和天空的亮度之间的相对强度比：

$$R_{Lb} = \frac{\overline{N}_{\lambda_0 L}}{N_{\lambda_0 b}} \quad (5)$$

现在，我们用下面的立体角定为靶和背景辐射通量的瞬时有有效视场：

$$\Omega_{tb} = \Omega_{opt} + \Omega_{TV} + \Omega_{AT} \text{ 其中}$$

Ω_{tb} 是有效视场。

Ω_{opt} 是光学分辨率的立体角。

Ω_{TV} 是电视分辨率的立体角。

Ω_{AT} 是大气模糊（“可见度”）的立体角。

这些项的值是：

$$\Omega_{opt} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{m\lambda}{D} \right)^2 \quad (6)$$

其中

D 是仪器的孔径。

m 是取决于遮光和像差的分辨率因数。

$$2.44 \leq m \leq 20$$

$$\Omega_{TV} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{Knf} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{n}{n_{\infty}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

其中

n 是扫描光栅中单位长度的扫描行数。

f 是仪器的焦距，相同的长度单位。

K 是Kelt因数，约为0.7

n_{∞} 是用摄像管可分辨的单位长度中的最大的电视扫描线数。

$$\Omega_{AT} = \frac{\pi}{4} S_{AT}^2 \quad (8)$$

其中

S_{AT} 是大气可见度（弧度）

因此

$$\Omega_{tb} = \frac{\pi}{4} \left\{ \left(\frac{m\lambda}{D} \right)^2 + \left(\frac{1}{Knf} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{n}{n_{\infty}} \right)^2 \right] + S_{AT}^2 \right\} \quad (9)$$

我们规定包括透射和反射的光学损耗在内的有效的收集孔径面积为 A 。基于同一孔径面积 A 我们还规定杂光的有效视场立体角 Ω_L 。

对于系统的目标信号 S_t ，我们可以写做：

$$S_t = A \int_{\lambda=0}^{\infty} H_{\lambda,t} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda \\ = A \phi_{\lambda,t} H_{\lambda_0,t} S_{\lambda_0}(\Delta\lambda) \quad (10)$$

对瞬时有有效视场 $\Omega_{t,b}$ 内的天空背景的稳态响应 \bar{B} ，我们写做：

$$\bar{B} = A \Omega_{t,b} \int_{\lambda=0}^{\infty} N_{\lambda,b} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda \\ = A \Omega_{t,b} \phi_{\lambda,b} N_{\lambda_0,b} S_{\lambda_0}(\Delta\lambda) \quad (11)$$

并且对漏光的响应 \bar{L} 我们写做：

$$\bar{L} = A \Omega_L \int_{\lambda=0}^{\infty} \bar{N}_{\lambda,L} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda \\ = A \Omega_L \phi_{\lambda,L} R_{L,b} N_{\lambda_0,b} S_{\lambda_0}(\Delta\lambda) \quad (12)$$

并且：

$$\bar{B} + \bar{L} = A N_{\lambda_0,b} S_{\lambda_0}(\Delta\lambda) \\ \{ \Omega_{t,b} \phi_{\lambda,b} + \Omega_L \phi_{\lambda,L} R_{L,b} \} \quad (13)$$

在“受对比度限制”的范围内，也就是背景和杂光的响应比没有背景时最弱的目标的响应要大得多的情况，我们规定一个对比因数 C ：

$$C = \frac{\Delta S_t}{\bar{B} + \bar{L}} \\ = \frac{\phi_{\lambda,t} H_{\lambda_0,t}}{N_{\lambda_0,b} \{ \Omega_{t,b} \phi_{\lambda,b} + \Omega_L \phi_{\lambda,L} R_{L,b} \}} \quad (14)$$

在“受对比度限制的范围，我们发现有一个最小的有用的对比因数 C_2 ，它是视频带宽和滤波及使用的显示状况的调整，位置以及其它参数的函数。它还是对诸如摄象机、显示器中出现的渐晕，边缘效应、均匀性等累积畸变很敏感的函数。系统中的电磁干扰（象扫描波形的谐波漏泄）是一种加法形式的畸变，但对于大部分效果可适用于乘法式的畸变中。要记住的要点是：畸变要使靶变得容易看见，所存在这些 C_2 值得显著

地加大。在“受对比度限制”的情况下（即高背景光平）我们写出实验波长 λ_0 时最小的容易看见的靶辐照度 $(H_{\lambda_0,t}(\Delta\lambda))_{\text{最小}}$ 表达式：

$$(H_{\lambda_0,t}(\Delta\lambda))_{\text{最小}} = C_2 \frac{\phi_{\lambda,b} N_{\lambda_0,b}(\Delta\lambda)}{N_{\lambda_0,b} \text{大的} \phi_{\lambda,t}} \\ \Omega_{t,b} \{ 1 + R_{L,b} \frac{\Omega_L}{\Omega_{t,b}} \frac{\phi_{\lambda,L}}{\phi_{\lambda,b}} \} \quad (15)$$

这个表达式有两个有趣的特点：第一，它不是孔径 A 的显函数，意思是，在离背景光平时，摄象管即不光照不足也不饱和，透入多少就不是主要。第二，由于括号里的第二项代表杂光对灵敏阈的影响，可见 $R_{L,b} \Omega_L$ 最好是，既不等于也不大于 $\Omega_{t,b}$ 。由于后者在长焦距仪器中具有 10^{-10} 的或更小的球面度，为使 $R_{L,b} \Omega_L$ 足够低的有效值，这种仪器的轴外杂光必须是低于轴上响应的许多数量级。

在很低的光平时，仪器给出一宽带噪音的输出电流 I_{NL} 。它可以用类似于靶的光谱分布的等效的输入噪音光通量 $P_{N\lambda}$ 表达。

$$I_{N1} = \phi_{\lambda,t} S_{\lambda_0} P_{N\lambda} \quad (16)$$

我们可以规定在这种低光平状态时的最小的有用信噪比 C_1 ，它还是视频滤波，显示位置和电磁干扰等的各种参数的函数，它却不必等于 C_2 ，因为这种状态的“噪音”的电频谱的特性不同。因此，对于无背景的最小的易见的靶响应 (S_t) 极小，我们写做：

$$(S_t)_{\text{最小}} = C_1 \phi_{\lambda,t} S_{\lambda_0} P_{N\lambda} \quad (17)$$

对应的最小的易见的零背景的靶辐照度是：

$$(H_{\lambda_0,t}(\Delta\lambda))_{\text{最小}} = \frac{C_1 P_{N\lambda_0}}{A} \quad (18)$$

$$N_{\lambda_0,b} = 0$$

为了完整必须考虑宽带系统的噪音还有一个其它的来源：这就是取样期间 τ 内每个分辨单元和总和的光量子起伏现象。将为明显，仪器噪音处于很低的电平下，而且是

在背景电平很高的对比限制下，其作用可忽略不计。实际结果是：除了特定的长焦距、低杂光，低噪音系统外在所有处于受背景光平限制的情况下都可忽略不计。考虑按泊松分布的光量子过程，我们可以把这种起伏噪音电流 I_{N_2} 书写如下：

$$I_{N_2} = \sqrt{\frac{(S_t + \overline{B} + \overline{L})qG}{\tau}} \quad (19)$$

$$I_{N_2} = \sqrt{\frac{S_{\lambda_0}hc}{\gamma\lambda_0\tau} \left[AS_{\lambda_0}(\Delta\lambda) \{ \phi_{\lambda_t} H_{\lambda_{0,t}} + \phi_{\lambda_b} N_{\lambda_{0,b}} \Omega_{t,b} (1 + \frac{\Omega_L}{\Omega_{t,b}} \frac{\phi_{\lambda_L}}{\phi_{\lambda_b}} R_{L_b}) \} \right]}$$

$$I_{N_2} = AS_{\lambda_0}(\Delta\lambda) \sqrt{\frac{hc}{\gamma\lambda_0 A(\Delta\lambda)\tau} \left\{ \phi_{\lambda_t} H_{\lambda_{0,t}} + \phi_{\lambda_b} N_{\lambda_{0,b}} \Omega_{t,b} (1 + \frac{\Omega_L}{\Omega_{t,b}} \frac{\phi_{\lambda_L}}{\phi_{\lambda_b}} R_{L_b}) \right\}} \quad (20)$$

为了给这种隐蔽的量子过程以明确的表示，以类似 I_{N_1} 的情况（因为电的频谱与空间频谱是相似的）将其对靶的响应也建立一

$$(H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}} = \frac{C_1}{\phi_{\lambda_t}} \sqrt{\frac{hc(\Delta\lambda)}{\gamma\lambda_0 A\tau} \left\{ \phi_{\lambda_t} H_{\lambda_{0,t}} + \phi_{\lambda_b} N_{\lambda_{0,b}} \Omega_{t,b} (1 + \frac{\Omega_L \phi_{\lambda_L}}{\Omega_{t,b} \phi_{\lambda_b}} R_{L_b}) \right\}} \quad (21)$$

任何背景光平下，在出现所有前述的种种现象下可发现的最小的靶辐照度 $(H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}}$ 简单地讲就是克服每种影响所必须的辐照度的和，因此：

$$(H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}} = (H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}} \quad N_{\lambda_{0,b}} = 0$$

$$(H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}} + (H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}} \quad N_{\lambda_{0,b}} \text{ 大的}$$

$$(22)$$

$$(H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}} \simeq \frac{C_1 P N_{\lambda_0}}{A} + C_2 \frac{\phi_{\lambda_b}}{\phi_{\lambda_t}} N_{\lambda_{0,b}}(\Delta\lambda) \Omega_{t,b} \left\{ 1 + R_{L_b} \frac{\Omega_L}{\Omega_{t,b}} \frac{\phi_{\lambda_L}}{\phi_{\lambda_b}} \right\} \quad (23)$$

这与典型的适宜测量的系统具有相同的表示形式：

$$H_{\text{最小}} = H_0 + \Omega N \quad (24)$$

其中 $H_{\text{最小}} = (H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{统计的最小}}$

$$H_0 = \frac{C_1 P N_{\lambda_0}}{A}$$

其中 q 是电子、电荷
 G 是系统电流的增益
接近实验波长 λ_0 。

$$S_{\lambda_0} = \frac{\gamma q G \lambda_0}{hc}$$

其中 γ 是光量子效率，
 hc/λ_0 是光子能量
那么，我们可把 I_{N_2} 写做：

个对比因数 C_1 。于是，我们可以写出受光量子统计噪音限制的相应的最小可发现的靶的辐照度。

通常，由于若干光量子起伏现象而产生的噪音影响与其它影响比可忽略不计，对于最小的可发现的靶辐照度我们给出以下表达式：

$$(H_{\lambda_0}(\Delta\lambda))_{\text{最小}} \simeq (H_{\lambda_{0,t}}(\Delta\lambda))_{\text{最小}} + (H_{\lambda_{0,b}}(\Delta\lambda))_{\text{最小}}; \quad N_{\lambda_{0,t}} = 0$$

$$N = N_{\lambda_{0,b}}(\Delta\lambda)$$

$$\Omega = C_2 \frac{\phi_{\lambda_b}}{\phi_{\lambda_t}} \Omega_{t,b} \left\{ 1 + R_{L_b} \frac{\Omega_L}{\Omega_{t,b}} \frac{\phi_{\lambda_L}}{\phi_{\lambda_b}} \right\}$$

$$= C_2 \left\{ \frac{\phi_{\lambda_b}}{\phi_{\lambda_t}} \Omega_{t,b} + R_{L_b} \frac{\phi_{\lambda_L}}{\phi_{\lambda_b}} \Omega_L \right\}$$

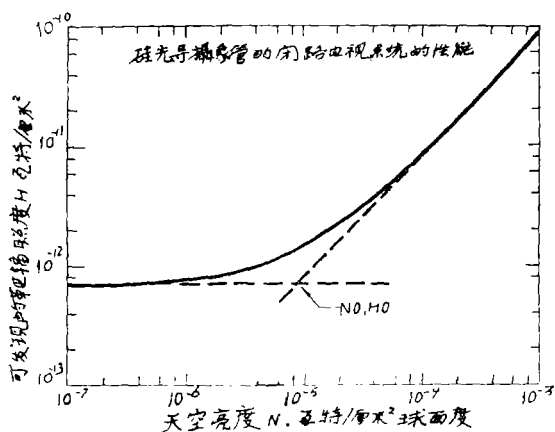


图3 简单的闭路电视系统的性能：作为背景亮度函数的可发现的靶辐照度。

当这个函数以对数—对数形式画在图上时，就产生如图3所示的和两条直线渐近的一条曲线。该曲线表示对于靶和背景光谱是相似的，使用显然是不太好的150毫米f/4.5的透镜的简单的硅光导摄像管系统，在光学台上测得的性能。从渐近线的交点 N_0H_0 可计算出 Ω ，因此：

$$\Omega = \frac{H_0}{N_0} \quad (25)$$

在此种情况下， $\Omega = 9 \times 10^{-8}$ 球面角度。由于 Ω_T 可计算为 3.8×10^{-8} 弧度， Ω_{AT} 在光学台实验中为零，并且用这种透镜时 Ω_L 相对于 $\Omega_{t,b}$ 不大，因此容易计算分辨率 m 在 $\Omega_L = 0$ 时为18，这里假设：对比因数 $C_2 = 1/2$ ，对于为此简单的装置，它是一个合适的值。这些值与使用的透镜的已知缺陷很相当，因此，这公式适合说明这个例子。

在同样的情况下计算

$$(H_{\lambda_0,t}(\Delta\lambda))_{\text{最小统计}}$$

克服由于光量子起伏的噪音所需要的最小的靶辐照度在 $H = 1.3 \times 10^{-12}$ 瓦特/厘米² 和 $N = 7.5 \times 10^{-6}$ 瓦特/厘米² 球面角度，接近曲线中断（在该处光量子统计噪音变得重要了）时，获得下面值：

$$(H_{\lambda_0,t}(\Delta\lambda))_{\text{最小统计}} = 3.22 \times 10^{-15} C_1 \text{ 瓦特/厘米}^2 \quad (26)$$

或者取合理值 $C_1 = 5$ 时，小于实际的最小的可发现的辐照度的80倍。在这种情况下，这个因数完全可以忽略不计。

作为另外的例子，我们可以考虑在1934吋焦距f/32望远镜上使用超正析摄像管的一个大型电视望远镜。在此种分析中，我们将采用以下数值：

$$\begin{aligned} m &= 5.0 \\ \lambda_0 &= 0.65 \text{ 微米} \\ (\Delta\lambda) &= 0.20 \text{ 微米} \\ C_1 &= 5.0 \\ C_2 &= 0.02 \\ P_{N\lambda_0} &= 3.26 \times 10^{-14} \text{ 瓦特} \\ F &= 4.25 \times 10^{-2} \\ \phi_{\lambda_t} &= 1 \\ R_{L_0} \phi_t / \Omega_{t,b} &= 1 \\ n &= 536.4 / \text{吋} \\ f &= 1934 / \text{吋} \\ A &= 1.535 \times 10^4 \text{ 厘米}^2 \\ D &= 60 \text{ 吋} \\ S_{AT} &= 1/2 \text{ 弧秒} \\ S_{\lambda_0} &= 23.3 \text{ 毫安/瓦特} \\ \text{幅面} &= 1.1 \text{ 吋}^2 \\ \phi_{\lambda_b} = \phi_{\lambda_t} &= 0.25 \\ \tau &= 0.04 \text{ 秒} \end{aligned}$$

这种仪器对于1/2弧秒可见度， $\Omega_{t,b} = 0.972 \times 10^{-11}$ 球面角度，而对于1弧秒可见度 $\Omega_{t,b} = 2.353 \times 10^{-11}$ 球面角度。模糊直径对应的电视扫描线数是3.65和5.69条线。在前面的情况下，光学系统主宰了分辨率；在此种情况下，可见度可主宰分辨率，而不是受电视的分辨率限制的情况。

计算获得以下值：

$$\begin{aligned} \text{当 } C_1 = 5 \text{ 时, } (H_{\lambda_0,t}(\Delta\lambda))_{\text{最小统计}} \\ N_{\lambda_0,b} = 0 \\ = 1.06 \times 10^{-17} \text{ 瓦特/厘米}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{当 } C_2 = 0.02 \text{ 时, } (H_{\lambda, t}(\Delta\lambda))_{\text{最小}} \\ N_{\lambda, b} \text{ 大的} \\ = 9.72 \times 10^{-14} (N_{\lambda, b}(\Delta\lambda))_{\text{大的}} \end{aligned}$$

当 $N_{\lambda, b}(\Delta\lambda) = 1.091 \times 10^{-4}$ 瓦特/厘米² 球面角度时, 这两个表达式相等。在那个背景亮度时, 3.56×10^{-17} 瓦特/厘米² 辐照度的靶是可以发现的, 并且最小辐照度的起伏分量可计算出来。

$$\begin{aligned} (H_{\lambda, t}(\Delta\lambda))_{\text{最小统计}} = 1.44 \\ \times 10^{-17} \text{ 瓦特/厘米}^2 \end{aligned}$$

在这种情况下。在所处境背景亮度下, 做为起伏分量的1/2方项与零次方, 一次方项是相当的, 即这几项近乎相等。然而, 这种实际的效果只不过使得在这一区域内 H、N 曲线过渡为圆弧了。因此, 对这个仪器要说明性能用人们可以利用的较简单的表达式。

将注意到, 在这个计算了的最近渡越点处, 背景的亮度大约是10千呎处的普通白天天空的亮度的 $\frac{1}{10}$ 。基于在0.65微米处正常天空的光谱为 1.6×10^{-8} 瓦特/厘米², 球面角度, 微米, 计算表明: 需要 1.79×10^{-16} 瓦特/厘米²的靶辐照度才能发现它。这等同于10.77视觉等级的靶。

还将注意: 在前面的计算中使用了 $C_2 = 0.02$ 的数值。这是一个小的数值, 只有注意后面部分中的详情才能获得它。并且, 对于参数 $R_{L, b} \Omega_L / \Omega_{i, b}$ 采用了1。这就要求杂光的有效立体角视场 Ω_L 具有约与瞬间有效视场 $\Omega_{i, b}$ 相同的数值。由于后者与可见度有关而定为1或 2×10^{-11} 球面角度, 显然为了避免影响整个仪器的灵敏度, 离轴角杂光一定要非常低。

根据有效视场 $\Omega_{i, b}$ 和电视分辨率立体角 Ω_{TV} 的表达式会发现: 在任何情况下靠简单地增大焦距 f 到某一个足够大的值都可以使后者忽略不计。然而, 对于人们可做到这点到什么程度有一个极限。当焦距增大时, 摄像管面板的平均照度就减低。在某一个照度

级, 受管子的种类限制, 最大的可分辨的电视扫描线数 n_s 要随面板照明度进一步减低而骤然下降。因此, 对于一确定的摄像管和仪器, 有一个最小的可达到的 Ω_{TV} 的值。实际就是说, 不应使焦距太长, 以致使 Ω_{TV} 小得的 $\Omega_{i, b}$ 微不足道的地步, 因为仪器总视场的这种分配在灵敏度上并不导致发现能力的改进。

实际系统的性能极限

在捕获以白天天空为背景的靶所用的实际闭路电视系统中, 对发现指定的靶目标所用的必要的对比度 C_1 和 C_2 值, 严重地受系统物理性能特别是它的种种缺陷的影响。首先我们考虑对比度 C_1 的较简单情况, 它是最小可发现的靶辐照度与系统中的白噪音所等效的辐照度之比。由于存在噪声, 必须从电视的雪片干扰背景中提取目标, 如不用特殊的空间滤波或处理装置要清楚地觉察目标按经验办法对比值采用 $C_1 = 5$ 。用完善的滤波以及对发现目标的引导, C_1 值可缩减到 $C_1 \geq 1$ 。显然, 由于增大等效的单色输入噪音的光通量 $P_{N\lambda}$ 的值即出现过度的系统噪音或电磁干扰时, 就必须增大所需要的最小的发现的零一背景情况下的靶辐照度, 甚至用最完善的滤波器也没用了。

因为我们正在使用对比因数 C_2 来表达既是相加的又是倍增的若干系统的畸变过程, 所以 C_2 比较复杂些。在表示靶一背景景象的电波形图中, 我们将研究这些过程。

图4表示理想系统中的波形。反映水平波形, 可从中推论出垂直波形。用一个小的尖峰信号代表靶, 它比图示中布满图象幅面的天空背景的“白”还要“白些”。每次扫一条线以后, 当电视扫描返回到另一条线的始端时, 波形移到代表“黑”的电平。实际上, 有某些小的电平移动重迭在这种简化的图上, 并且在“熄灭脉冲电平”间隔中有同步脉冲, 但它们对目前的讨论没有什么关系。

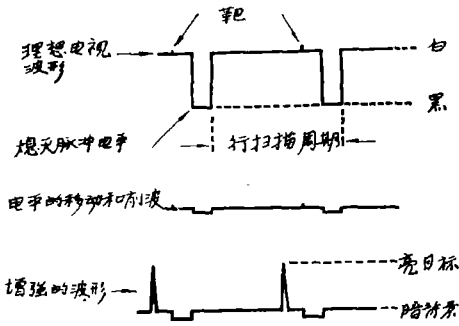


图4 理想的闭路电视对对比度增强的系统中的视频波形

如果我们向下旋转“亮度”控制，使电平移动并进行削波，我们就得到第二个波形。其效果是相对靶的尖峰信号幅度来说使熄灭电平受到压缩。然后，我们向上旋转“对比”控制就放大这个波形，我们就得到第三个波形，即用降低它周围的平均亮度和增强靶本身的方法，使靶变得更加清晰可见了。显然，如果横跨扫描线上代表天空的信号是严格地不变，且图象的所有各条线都一样。那么我们可按要求尽量采用小熄灭脉冲电平，并且使靶的尖峰信号放大到满意的程度。用这种方法我们对任意的 C_2 值做到显示发现的目标，这种仪器就是教科书上的所谓“受背景限制的传感器”。

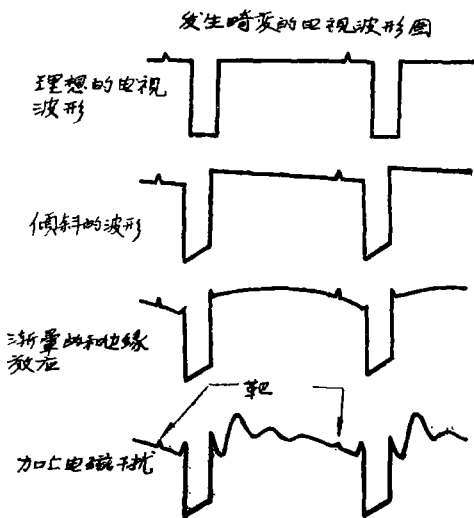


图5 非理想系统中发生畸变的电视波形图，说明典型畸变的累积效应。

当然，真实的系统不出现这样简单的理想响应。在图5中，我们概括某些真实畸变过程的效果。由于视频系统低频响应不理想，或者景象实际背景亮度有个变化的梯度，或者作为补偿这种倾斜的“线性补偿”线路调整的不完善，使电视波形通常变得倾斜了。再则在光学上，和摄像管的收集电子装置中经常都产生渐晕。这就引起波形的弯曲。而且，为补偿这种误差的“抛物线补偿”线路的调整得不完善会使波形或向上或下弯曲。我们发现另外一种出现在图象的边缘上的对称效应：由于摄像管在图象范围外的成像面上通常也曝光了的，因此，由扫描成的移动在图像边界上出现有窄的通带是亮的边缘。

至此，我们列举了通过适当地使用补偿控制和修整掉不需要的图象边缘的办法可稍微缩减一点的那些畸变。但有些畸变不容许这样处理。通常由于扫描的谐波漏电或功率信号引起的电磁干扰，当我们试图要放大视频波形时，都要以图象的“褶皱”或“条纹”表现。而且，甚至于当这些叠加的畸变现象被抑制了的时候，我们发现另一个问题：也许是制造时表面的不均匀的特性，或是使用中引起的退化造成摄像管的敏感表面实际是均匀的。所有这些畸变的效应在图5的最后一个波形图中表示。

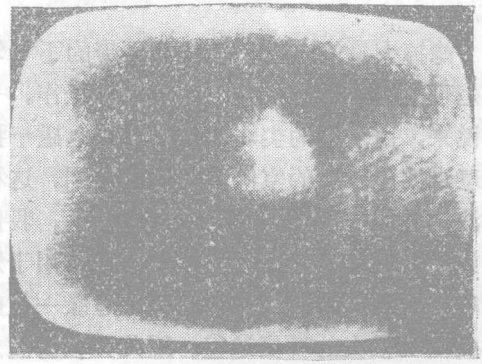


图6 由闭路电视系统监视器显示的，光亮背景上未分辨出来的弱目标的图像。显然，不均匀性影响其性能。

图 6 是用闭路电视系统的监视器观察显示发光背景上的弱的未分辨的目标的一张照片。仔细地把该系统的背景倾斜和抛物线阴影调整，并遮蔽了边缘效应的边缘。然而，这点是清楚的：既有与水平、垂直扫描相关联的电磁干扰，还有未知原因的一菱形摄像管的斑点。靶是在中间的一个小白点。观察到：若圆点移到暗区，就变得太暗以至看不清楚；若圆点移到亮区，由于对比不足，它还是消失了。需要比这里所示的强四倍的靶辐照度才能使景象在任何地方都被察觉。由于图象无显著的“雪片干扰”，显然性能主要是受可达到的 C_2 值的限制，而在这个仔细地调整的系统中的已为电磁干扰和不均匀性畸变所决定了。

改进闭路电视系统性能的方法：

很清楚，改进系统性能的最简单的方法是尽量清除电磁干扰，放入现有最好的摄像管并且仔细地调整。然而，用这种方法可完成的事有一个限度，因为在正常图像显示的工作中完全看不见的小量的畸变在高视频增益的工作状态中仍可以看到。由于是另行设计相机有缺陷和又是用拚凑方式构成的系统的其余部分，我们所能做到的改进办法只是装配可适用的部件。但仍留下许多要完成的工作。

滤掉大量的电磁干扰和摄像管的不均匀性是可能的，但要很仔细地做这项工作。一般说来，由于靶的尖峰信号具有比电磁干扰和斑点波形较少的空间和时间的范围，这种滤波的性质上应是高通的。参照图 7，我们看到：假若我们把这种滤波直接地应用于发生畸变的波形，会在熄灭脉冲和边缘一效应的尖出现很大的瞬变过程。因此，在滤波之前一定要避免这些。而且为了获得从一条电视线末端到另一条的始端的连续的传递，我们必须避免波形的倾斜。

波形的过程

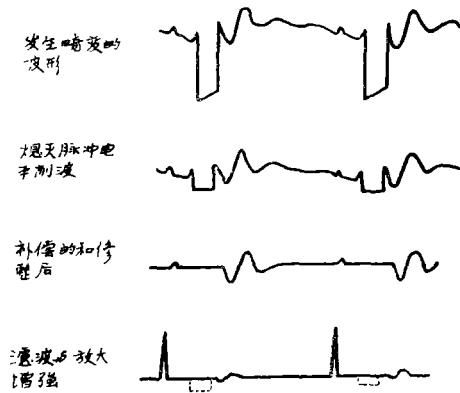


图 7 抑制不均匀性和增强靶响应的视频波形处理

图中另外的几个波形表示做这项工作的方法。首先，为了缩小接后面的处理过程的信号的动态范围，把熄灭脉冲电平截去一点，使它低于最小的背景光平。然后，既在水平又在垂直方面加上线性的和抛物线的补偿信号以除去所有的倾斜和弯曲，信号进行均匀性修整后对包括熄灭电平及边缘效应的瞬变现象在内的整个周期的平均背景电平精确地箝位。为了免除大量的手控调整，特别是当系统要对付变化的背景亮度和亮度梯度工作时，所有的这些补偿和箝位电平的调整工作应自动地进行。补偿和修整的波形，基本就是图 6 中所示的内容。

现在，如果我们将补偿和修整了的波形再滤波，放大就得到图 7 所示的增强的波形。再引入一个新的熄灭脉冲电平和同步脉冲以虚线矩形表示即可用于显示。显然，这种波形是从图 4 中的理想波形推演出来的。

图 8 表示完成这些工作用的视频对比增强器设备的方块图。用一个开关可以使系统离开这一设备正常工作或者用这一设备以免除种种缺陷。闭路电视摄像管给出的带有畸变的视频波形首先施给同步切割器，这就从视频中提取出同步脉冲。这个同步信号用来控制计时发生器以提供其余设备使用的各种

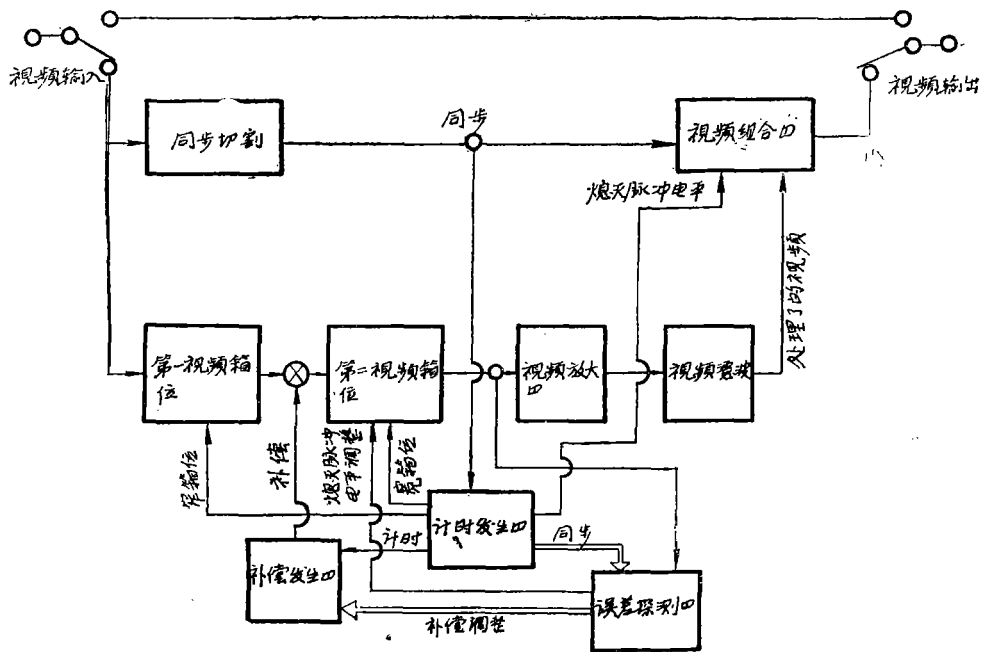


图 8 发生畸变的波形自动处理过程中用的视频对比增强器方块图

计时的、转换的，箝位的和熄灭脉冲电平波形；由于熄灭脉冲电平在处理过程中被截去时失去同步，所以这种同步还供给视频组合器以便加到视频输出上。

输入视频还施给第一视频箝位，在比熄灭脉冲电平周期大一点但还是较窄的箝位周期内把视频位置箝位到略低于最小的背景电平上。所得到的截去熄灭脉冲电平的波形与补偿波形组合，施给第二视频箝位。再在包括不理想成份的稍宽的箝位周期内对背景电平实行箝位，以便除去残余的熄灭脉冲和边缘效应的瞬变现象。

所得到的补偿和修整过的波形施给误差探测器，在那里一组取样开关把代表图象左右侧，上下方、中心和两侧及中心和上下方之间的任意背景差则扩展成误差电压。用这些误差电压来调整水平的和垂直补偿发生器产生的线性的和抛物线的波的强度和极性，与视频混合所形成的结果是：一旦回路闭合对任意的图象的均匀性都有理想的零背景输出。

同时，误差探测器中的另一个取样开关把代表宽箝位的箝位电平和平均背景电平之间的差值变成误差电压将该误差电压送到第二箝位电路做为调节熄灭电平的信号，因此一旦回路闭合在箝位电平与平均背景电平出现差异时使输出仍为零电平。

补偿与修整后的视频再放大，滤波并重新与同步和消隐复合以便供给显示器使用作视频的增强显示。

滤波的量和类型决定由磁干扰和不均匀畸变的抑制程度，因此也就决定可达到的 C_2 的值和系统的整个高背景的性能。靠简单的高通 RC 滤波，在短焦距系统中可得到相当大的改进，RC 滤波可减低一般缓慢的波形畸变突出锐靶的尖峰信号。甚至于比这种一维的拟微分法更好的是让畸变波形的尖锐边缘通过延迟线 (tapped-delay-line) 或横向滤波器 (transversal filter) 类型的一个一维的脉冲形状的鉴别器。还要好的是一个二维的脉冲形状的鉴别器，其中把一套一行延迟线做成的起加权作用上的水平滤波器构成

矩阵就获得垂直滤波，除非有一个一场的时间延迟，否则这个图像就不能用隔行扫描。

需要最佳的性能时，就需要有一个一帧的记忆储存以便能以定时排除重复的电磁干扰和畸变信号。这样还能在二维脉冲形状滤波器中提供隔行扫描所需要的一个一场时间的延迟。应注意：因为在长焦距系统中，目标占有若干条电视线，所以需要二维的脉冲滤波以获得满意的性能改善。目前能增强对比度的视频波形滤波和实现方法是各方面研究的课题。

为了验证V部分中描述的方法有效，我们根据图8中所示的方案图制造了一个简单的视频对比增强器。它包括图9中所示的四块晶体管化的电路板和一小块为各种简单放大器和滤波器用的电路板。左上方的那块电路板包括大部分的视频线路，包括视频箝位，同步切割器和视频组合器。已发现：廉价的微电子彩色电视的双色彩解调器(Motorola MC 1325P)为视频箝位提供了紧凑的高性能的视频开关。

往右的另一块电路板是由效能好又方便的MRTL逻辑系列加上个别元件做成的计时发生器。电路板包括一套对26倍于垂直频率和20倍于水平频率的相位锁定环节及相元的分频器，保持与电源同步的频率相位检波器，及组成设备所用的许多时序波形的门电路。

其下一块电路板上有关误差探测器。不难看出均匀性补偿误差探测器是用的双平衡二极管开关，而熄灭电平误差探测器是用的单平衡二极管开关。自从这种器件制成以后，就有了现成的优良的CMOS视频开关，今后还会有更紧凑的器件。

最后一块电路板是补偿发生器。由现成的微电子组件做成，否则是麻烦问题。Motorola MFC6040电子衰减器做相位变换输出，连同其本身的输入提供从对最大到零再到相反相位的最大的不均匀性补偿信号，这是自动的补偿调整电路必要功能。

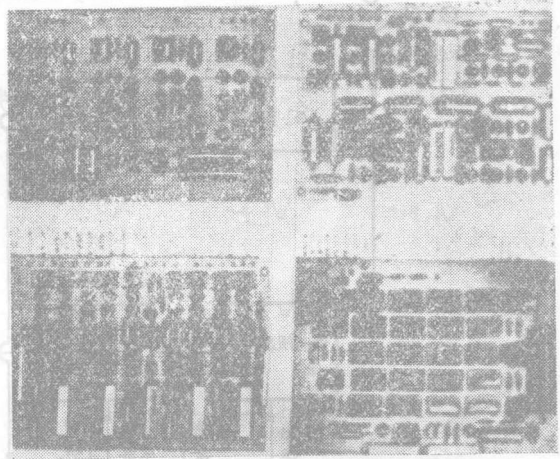


图9 简单的实验视频对比增强器的电路板组件。

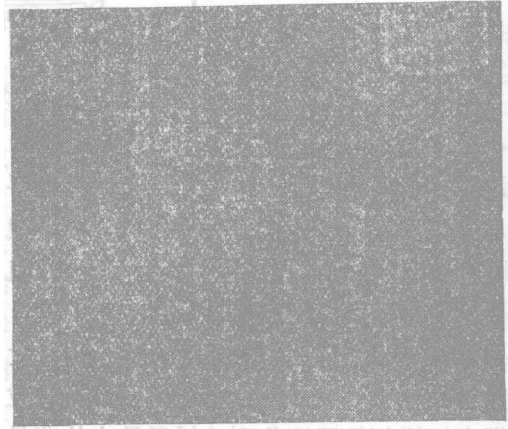


图10 采用简单滤波办法的视频对比增强器的闭路电视系统的监视器的显示。甚至比图6中的还要弱的目标也显示得很清楚。

这个装置与产生图6中所示图象的同一闭路电视系统共同工作。如果线路中使用增强器其图象就如图10所显示的情况。在这种情况下，靶目标比图6的情况还弱2.5倍，图象也比图6各处的亮度小10倍。因为工作限制在约7呎朗伯的亮度而不是近于280呎朗伯的普通天空，所以再进一步把靶强度减低2倍就会混在细“雪片”之中。因为自动补偿线路按照设计工作，所以保证不正确的调整相机的补偿控制时对图象没有不良影

响。应指出：这种实验采用的滤波是简单的高通RC；采用抑制斑点波形锐边缘的方法，脉冲形状的滤波器有较高视频增益，有较大的敏感度。然而，这种简单的装置确立了V节所描述的增强方法的实用性，并且说明用闭路电视装置作为增强以亮的天空为背景的弱目标的有效对比度手段能带来好处。

结 果 和 应 用

根据得到的结果已经清楚说明：采用闭路电视装置以增强白天天空为背景的靶的对比度的办法；便于捕获在其它情况下不能察觉的目标，这一思路是有价值的。我们已经指出了限制增强程度的系统上的缺点；我们还指出了为避免或校正这些缺点要做的事；并且验证了自动图象均匀性补偿和使背景箝位到零的视频滤波的重要方案。因此看来，图象对比度增强电路的能力和我们对实现这种能力的了解已足以保证实际应用。闭路电视系统对比度增强方法的应用有三个非常有希望的方面：空中监视弹道导弹的捕获系统，白天跟踪空间目标的大型望远镜系统和增强飞机白天可见度的航空运输控制塔系统。

在空中监视系统中，使用电视对比增强可以显著地增大白天捕获自发光的或由太阳照明的以白天天空为背景的目标的能力，尤其是低空目标或在太阳周围的光圈附近的目标。当视线改变时，平均光平和背景梯度有

显著变化的情况下，自动补偿调整的能力特别有用。

在Ⅲ部分中，根据对比度增强的闭路电视系统的性能计算的第二个例子，我们制定了采用超正折摄像管的大型长焦距电视望远镜的参数，这些参数是仔细地选择了的。为了使白天捕获和跟踪空间目标的性能最佳所计算的极限10.77目视等级是可以处理许多感兴趣的目标。必须记住：这种性能要求最好的设计和结构；必须严格考虑小量的轴外杂光的破坏性影响。而且，空间目标跟踪望远镜的有用的观察时间增大一倍也有可能，这也使得对比增强方法看来经济合理。

在航运控制中进行操作经常为难的是白天飞机接近时可见度不良而在夜晚显示时飞机有很大的可见度。出现这类情况也正好是表面跟踪雷达几乎被搅乱了并且二次雷达被周围的环绕和反射搅乱时降低了可见度。显然，对比增强的闭路电视系统能够改善飞机的可见度，确切地说在这类情况下应用最有意义。

前面三种应用是对比增强的闭路电视系统的最直接用的部分。可以设想云层散布的测量以及常规战术空袭的地对空监视等方面都可应用，但在提出这些应用课题之前，还需要做很多考虑。

译自 “Optical Engineering”
Vol.13, No. 2, p105—
115, March/April, 1974。