

白皮书

宽动态范围功能

WDR解决方案实现取证价值

3月 2026

概述

同时包含极暗和极亮区域的场景是摄像机所面临的一大挑战。在安防领域中，这些宽动态 (WDR) 场景的典型例子有：入户门、车库和隧道，在这些地方，外部光线明亮，内部则比较阴暗，因此对比度较大。有阳光直射但也有阴影的室外场景也是一大难题。

我们现已开发出多种方法，旨在让摄像机能够更好地重建拍摄场景中的所有内容。但没有一种技术能够单独成为所有场景和情形的最佳选择，而且各种方法都有其各自的缺点，其中包括会产生各种视觉异常，即所谓的“伪影”。

安讯士提供与众不同的WDR解决方案，内含两种取证解决方案，它们为高对比度困难场景的成像带来了革新性改进。它们表现卓越，既能够清晰呈现场景的黑暗区域，又不会造成明亮区域的过度曝光，并且提供的图像具有极高的取证价值。

安讯士WDR解决方案包括Forensic WDR、WDR – forensic capture、WDR – dynamic capture以及WDR – dynamic contrast。大多数安讯士摄像机采用Forensic WDR技术，这是一种基于双重曝光的方法。当关闭该功能时，摄像机自动切换至WDR – dynamic contrast。

一些安讯士摄像机使用这些方法的未特定组合来扩展动态范围。在这些摄像机中，针对每台特定的摄像机量身定制宽动态解决方案，并在数据表和其他产品信息中表示为“WDR”（宽动态）。

摄像机的动态范围能力通常用dB值来表示，而实际的WDR性能则难以测量，因为这还取决于其他因素，如场景复杂度、场景中的运动量以及摄像机的图像处理能力。

在摄像机研发过程中，安讯士更注重取证可用性和图像质量，而非单纯测量和标示高dB值。因此，具有某个指定动态范围的安讯士摄像机表现可以远远超过具有较高dB值的其他摄像机。

目录

1	引言	4
2	宽动态范围场景	4
3	摄像机动态范围的物理限制	5
3.1	像素大小和曝光时间	5
3.2	噪声和位深	5
3.3	显示图像	5
4	扩展摄像机动态范围的一般方法	5
4.1	使用双重或多重曝光	5
4.2	使用双敏或多敏像素	6
4.3	使用对比度增强	6
4.4	使用局部对比度增强	6
5	安讯士摄像机的WDR成像	6
5.1	安讯士WDR性能描述	7
5.2	安讯士WDR解决方案	7
6	用dB表示的动态范围能力	8
7	WDR成像中的伪影	9

1 引言

传统上，摄像机难以应付宽动态范围场景，即包含多种不同照度等级的场景。本白皮书阐释了摄像机动态范围限制背后的技术，描述了可用于实现良好WDR性能的一般方法，并介绍了具有更好取证价值和可用性的安讯士WDR解决方案。

2 宽动态范围场景

动态范围是指场景或图像中最暗区域与最亮区域之间的照度差异。因此，具有宽动态范围的场景同时包含明亮和黑暗的区域。监控领域的典型例子：

- 门外有日光但门内环境较暗的入口门。
- 外部有日光但内部环境较暗的车库或隧道。
- 有阳光直射但也有阴影的室外场景。
- 窗户反射光多的办公楼或购物中心。

下面的例子是使用不具备宽动态场景处理技术的监控摄像机拍摄的一个宽动态范围场景。



图 2.1 典型的宽动态范围监控场景：带入口的车库内部。这两个图像采用不同的曝光时间拍摄，左图的曝光时间短，右图的曝光时间长。

根据使用的曝光时间，摄像机既可清晰呈现光线好的入口和明亮的外部区域，也可显示黑暗的车库内部情况。不带宽动态功能的摄像机无法在一个图像中捕捉完整的场景内容。

下图分别是长时间曝光的图像数据被插入短时间曝光的图像中，以及短时间曝光的图像数据被插入长时间曝光的图像中。很明显，不带宽动态功能的摄像机丢失了场景中的重要物体。



图 2.2 场景与之前相同。左图显示了短曝光时间所丢失的细节。右图显示了长曝光时间所丢失的细节。

如要能够捕捉完整的场景内容，需要使用支持WDR功能的监控摄像机。它能够在一张图像中捕捉到这两种极端的情况；也就是说，既能够清楚地显示光线明亮的入口处的细节，也能够清楚地显示车

库内部阴影中的情况。如果没有宽动态功能，摄像机只能生成场景暗区或亮区的可用图像，而另一区域则会出现曝光不足或曝光过度的情况。

3 摄像机动态范围的物理限制

限制摄像机动态范围的主要原因涉及摄像机传感器中的光捕捉方式、图像处理方式以及光的自身性质。更实际地讲，动态范围取决于像素大小、曝光时间、噪声和位深。

3.1 像素大小和曝光时间

光线由称为光子的离散能量束组成。场景中的光线越强，意味着射向摄像机的光子数量就越多。但摄像机，或者说其图像传感器，在每个曝光间隔中只能侦测有限数量的光子。

图像传感器由无数感光点（被称为像素）组成，这些感光点能够将捕捉的光子转换成电子。摄像机成像时，测量每个像素的电子计数，从而提供与所拍摄场景不同部分的照度等级有关的信息。

每个像素具有设置的尺寸，只能够容纳设置数量的电子，然后便达到饱和。在现代摄像机中，我们希望最大程度增加像素数量，但出于成本原因，又需要缩小传感器的总尺寸，这会有效限制像素大小。

对于宽动态范围场景，长时间曝光将导致在图像较明亮的部分中达到像素饱和。通过缩短曝光时间，并在较短的时间内收集光子，就能够避免较明亮的部分收集的光子过多而曝光过量。然而，曝光时间短同时也可能意味着，在较暗的区域，将只能够捕捉非常少的光子。由于光的粒子特性，以及一种被称为光子散粒噪声的现象，图像的这些区域将呈现明显的噪声。像素的正确曝光时间可将信噪比(SNR)最大化，所以图像较亮部分像素的正确曝光时间比图像较暗部分像素的正确曝光时间要短。

3.2 噪声和位深

从像素层面来说，动态范围被定义为最大信号与基底噪声的比值。基底噪声确定了可识别的高于各种噪声源强度总和的最低信号强度。部分噪声的产生是由于进行电子计数并生成每个像素的读数的模数转换器存在缺陷。另一种噪声类型是光子散粒噪声，即使是最完美的设备，也无法避免这种噪声。各种噪声都会导致像素值无法反映真实场景的实际光强度。

位深是指“捕捉”一个像素中所有信息需要的位数，它决定了能够被检测到的可能照度等级的数量。安防摄像机的位深通常是10位。理论上讲，较高的位深将增加能够被检测到的照度等级数量，但实际上，只有在传感器像素足够大且噪声足够低时，它才会提高图像质量。如果传感器数据噪声较大，那么提高位数也就没有太大的意义。

3.3 显示图像

在位深方面，还应该注意，供安防专业人员查看监控视频的典型监视器在每种颜色通道的位深仅为8位。这就意味着，要实现良好的WDR性能，用于将传感器中的10位转换成监视器中8位的算法至关重要。

4 扩展摄像机动态范围的一般方法

为应对摄像机的动态范围限制并实现良好的WDR成像，现已开发出了多种不同的方法。有时会将多种方法结合使用，以便获得更好的结果。没有哪一种方法能够单独成为各种应用的理想之选，因为每种方法都会产生不同的视觉异常，即所谓的“伪影”。在一个应用场合中不明显的伪影，在另一个应用场合中可能完全突显出来。有关常见伪影的介绍，请参见第7章。

4.1 使用双重或多重曝光

利用合并算法，能够将采用不同曝光时间拍摄的多个图像组合，形成一个图像。这是扩展动态范围的更常见方法。然而，由于连续拍摄，这种方法会产生与场景中的运动相关的伪影。通常情况下，

快速运动可能会产生问题，因为在两次拍摄之间，目标的位置发生了变化，导致无法合并两个曝光的图像。

双重曝光需要两个曝光时间：一个非常短，另一个则很长。由于短曝光时间无法与各种类型的现代人造光源(LED)同步，因此，图像中亮区的闪烁现象可能会非常明显。

双重曝光导致的常见伪影包括：

- 闪烁
- 运动模糊和重影
- 场景暗区噪点
- 场景中间灰色区域反直觉噪点

4.2 使用双敏或多敏像素

借助这种方法，摄像机就能够使用包含两种或更多像素类型且具有不同感光度的图像传感器。所以，一次曝光能够基本上创建两个图像，一个较暗的图像和一个较亮的图像，每个像素集分别创建一个这样的图像。利用合并算法和色调映射，通过组合这些图像即可实时创建最终图像。在相邻像素的灵敏度差异方面，通常存在限制，比如灵敏度比率是固定的，这就限制了这种方法能够实现的动态范围。由于同时曝光，与运动和闪烁相关的伪影得以避免，但却可能产生其他类型的伪影。比如，这种方法引起的分辨率降低（因为只能有较少的像素用于形成图像）可能导致图像中形成摩尔纹和阶梯效应。另外，将两个像素集组合到一起的处理过程可能较为复杂，在某些情况下，可能会带来其他的问题。典型伪影：

- 摩尔纹和阶梯效应
- 噪声
- 模糊

4.3 使用对比度增强

这是一种数字方法，它使用曝光不足的图像，以数字方式提亮最暗的区域。这种方法不会真正扩展捕捉的动态范围，但能够改善最终图像中的检测能力，尤其是在过度曝光的区域。它非常适合动态范围有限且包含大量运动的场景。产生的典型伪影包括：

- 在较暗的区域中存在反直觉噪点
- 某些区域的灰度级很少
- 颜色不自然

4.4 使用局部对比度增强

传统上，摄像机使用全局法来调整色调曲线，这意味着图像中的所有像素使用了相同的转换。它也可以使用局部法，以不同方式对传感器的不同区域进行色调曲线调整。这种方法不会真正扩展捕捉的动态范围，但通过优化对比度，能够提供一款强大的可视化工具，以较窄的动态范围，实现更好的场景呈现。典型伪影取决于这种方法的使用强度，可能包括：

- 重影
- 卡通化
- 对比度不足
- 颜色过度

5 安讯士摄像机的WDR成像

安讯士提供多种宽动态成像解决方案，将上一章所述的某些一般方法与先进的图像处理和伪影消减方法相结合。

5.1 安讯士WDR性能描述

安讯士对自有的WDR解决方案从多个关键方面展开评估。在确定适合特定监控场合的解决方案时，应结合具体情况从不同的角度考量这些方面。基于实际用途和主观判断对这些方面做出评估。

表格 5.1 宽动态性能的决定因素方面。

方面	含义
运动	对运动和闪烁相关的伪影有怎样的规避效果？
范围	实际动态范围。用dB值表示。
呈现	对困难场景的图像呈现效果如何？

运动方面评估总结了解决方案在不产生与采样技术相关的伪影的前提下，对包含运动的场景的捕捉能力。在这一方面，闪烁处理是一大重要因素，另一个重要因素则是避免合并伪影。

范围方面评估总结了在保持图像监控可用性的前提下，图像最亮部分与最暗部分之间的亮度差能够有多大。

呈现方面评估总结了解决方案再现困难光照条件、但仍呈现可供安防人员在电脑监视器上查看的图像的能力。其目的不在于尽可能高保真再现场景，因为这会让观察者无法看到细节。

5.2 安讯士WDR解决方案

摄像机的动态范围通常以dB值来表示，这个值涉及上节所述的“范围”方面。然而，为了保证典型监控场景的监控图像可用性和细节呈现，安讯士WDR解决方案优先考虑“运动”和“呈现”方面，而不是“范围”方面。这样的优先级意味着，安讯士摄像机提供的动态范围成像比其dB值所表现的效果要更好。在消减伪影并改善可用性的前提下，dB值低的安讯士摄像机可能比dB值高的其他品牌摄像机表现得更加出色。有关dB值的详细内容，请参见第6章。

下面列出了安讯士WDR解决方案。

- **猎影超宽动态技术 (Forensic WDR)** 是双重曝光与局部对比度增强法的结合。它提供的图像经过调整，以实现最大的取证可用性。这项技术采用最新一代图像处理算法，有效减少了可见噪声和伪影。Forensic WDR还适合拍摄包含运动的场景，同时也是超高分辨率摄像机的理想搭档。
- **WDR Forensic Capture (WDR宽动态猎影技术)** 是双重曝光与局部对比度增强法的结合。它提供的图像经过调整，以实现最大的取证可用性。
- **WDR - 宽动态捕捉技术** 采用双重曝光法，以合并包含不同曝光时间的图像。
- **WDR - 宽动态对比技术** 采用对比度增强法，动态范围相当有限，但伪影非常少。由于使用的是一次曝光，因此这种解决方案在高运动场景有着良好表现。

一些安讯士摄像机使用这些方法的未特定组合来扩展动态范围。在这些摄像机中，针对每台特定的摄像机量身定制宽动态解决方案，并在产品信息文档中表示为“WDR”（宽动态）。

安讯士宽动态解决方案是预设设置，但您可以选择开启或关闭双重曝光功能。有些人购买了配备Forensic WDR功能的摄像机，但由于场景中大量运动，便关闭了双重曝光功能，此时只能依靠局部对比度增强功能来优化画面。由于性能限制，某些传感器和系统芯片 (SoC) 无法同时处理高分辨率和双重曝光。这些摄像机仅支持局部对比度增强功能。

在某些摄像机上，关闭双重曝光后，帧速可能会提高（有时甚至能翻倍）。

下表显示了安讯士宽动态解决方案在性能方面的评估。

表格 5.2 安讯士宽动态解决方案根据运动情况、覆盖范围和呈现效果三个方面进行评级。+：表示性能评级。-：表示普通摄像机性能（不具备动态范围功能）。

WDR解决方案	运动 对运动和闪烁相关的伪影有怎样的规避效果？	范围 摄像机在处理真实场景中暗区和亮区之间的差异时表现如何？（也称为dB值）	呈现 对困难场景的图像呈现效果如何？
Forensic WDR	+++	+++	+++++
WDR Forensic Capture（WDR宽动态猎影技术）	++	+++	+++
WDR – 宽动态捕捉技术	+	+	++
WDR – 宽动态对比技术	+++++	-	-

根据评估，总体表现最佳的宽动态解决方案是Forensic WDR（猎影超宽动态技术）技术，相比WDR Forensic Capture（WDR宽动态猎影技术），它对运动方面和呈现方面都有改善。然而，这两种取证解决方案都为困难场景的成像带来了革新性改进。它们表现卓越，既能够清晰呈现场景的黑暗区域，又不会造成明亮区域的过度曝光，并且提供的图像具有极高的取证价值。

由于取证解决方案的目的是重点考虑取证可用性，因此阴影得到提亮，细节也得到增强，使图像观感与（比如）广播视频中所呈现的大为不同。利用Forensic WDR摄像机，场景的动态范围被压缩成小得多的动态范围，同时又不丢失细节。这优化了视频呈现，安防中心的专业人员可以轻松查看实时的和录制的视频。

下图比较了用两种不同的摄像机拍摄同一场景：左边是用不带宽动态功能的摄像机拍摄的，右边是用安讯士Forensic WDR（猎影超宽动态技术）摄像机拍摄的。利用猎影超宽动态技术（Forensic WDR），图像细节清晰呈现，不受室内和室外背光的影响。



图 5.1 强背光下的室内场景。不带宽动态功能的摄像机（左边）与安讯士Forensic WDR（猎影超宽动态技术）摄像机（右边）的对比。

6 用dB表示的动态范围能力

摄像机的动态范围能力通常用dB值来表示，与第5章所述的“范围”方面相关。

dB是一个比值，即摄像机能够捕捉到的最亮物体与最暗物体的辐射亮度之比。如果照度比为1000:1，则dB值为60dB。这个值的计算方法是：照度比的对数（本例中为3）乘以20。

最暗的可检测水平定义为传感器像素的基底噪声，在这个水平之下的信号均淹没于噪声之中。根据这个定义，良好的图像传感器通常可以达到约70dB的动态范围。通过宽动态技术，我们可以在不改变摄像机实际dB值的情况下增加实际动态范围。

然而，dB值和范围都不能完全说明摄像机的动态范围能力。宽动态图像的质量还取决于所使用的宽动态方法、是否留下可见伪影以及图像处理质量。第5章所述的“呈现”方面和“运动”方面对其中的某些因素进行了总结。

拍摄下方右图使用的摄像机的dB规格值小于左图所用的摄像机。出乎意料，在这种宽动态场景中，dB值较低的摄像机提供的清晰图像更适合视频监控用途。显而易见，dB值较低的摄像机拥有其他的功能，如更好的图像处理，从而改善了其WDR能力。

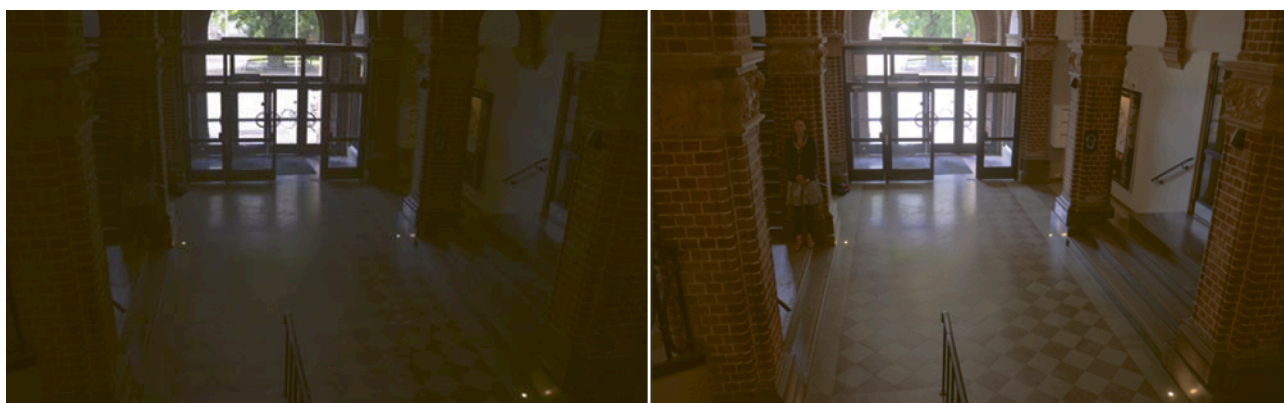


图 6.1 用具有不同dB值的摄像机拍摄的背光内部场景。出乎意料，拍摄右图使用的摄像机的dB规格值小于左图所用的摄像机。

7 WDR成像中的伪影

本章讲述了一些常见的视觉伪影及其成因。

- **运动模糊**：在单帧记录期间，若由于场景中出现快速移动，或仅因曝光时间过长而导致录制的图像发生变化，则会产生动态模糊。在使用多重曝光的宽动态摄像机中，图像不同区域会产生不同程度的运动模糊，具体取决于该区域的亮度。



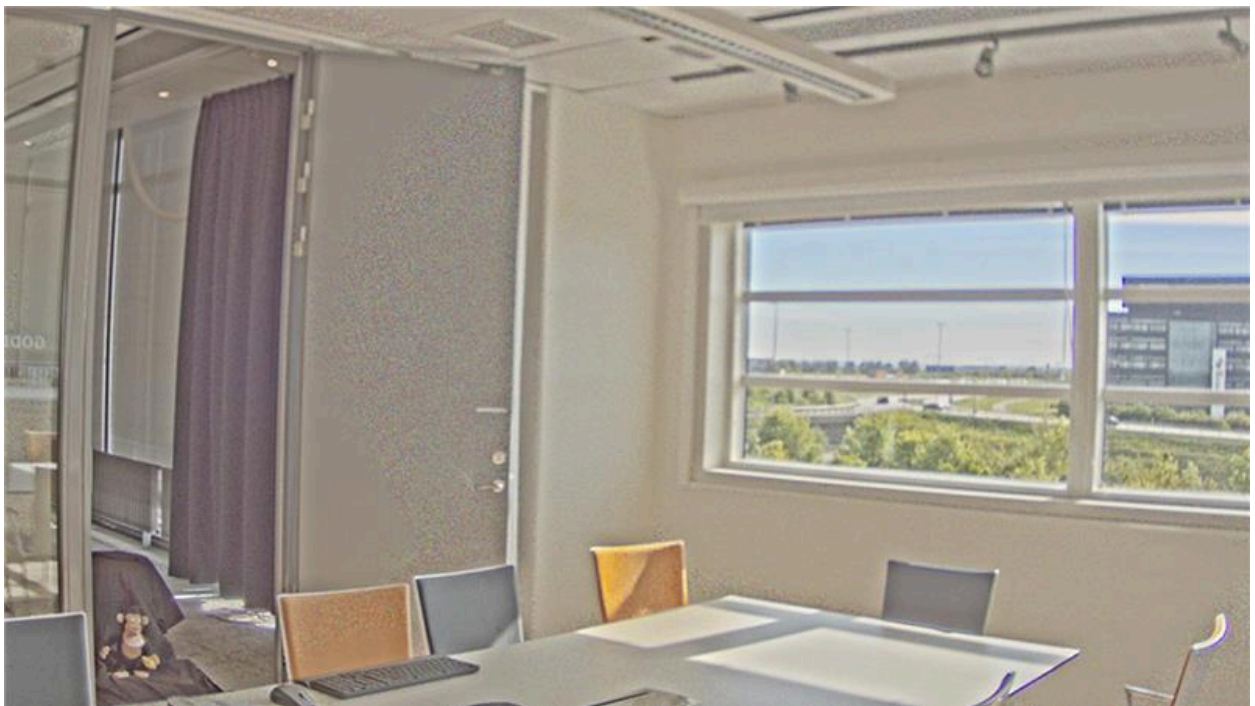
- **重影**：当使用多重曝光来拍摄一个图像时，拍摄的运动物体可能处于不同的位置上。这可能会导致运动物体或人员周围出现“鬼影”般的效果。



- **闪烁引发的伪像：**各种类型的摄像机都无法规避因闪烁光导致的伪影。由于通常假设的照明是恒定照明，因此调制光源（如荧光灯或LED）就是一大难点。所产生的伪影可能看起来像条纹或呈现搏动，这取决于具体的摄像机类型。在采用多重曝光的宽动态摄像机中，这种效果通常在短曝光时更为明显，可能导致图像中的闪烁现象格外明显，因为不同曝光时间拍摄的区域之间可能存在明显的过渡情况。



- **反直觉噪点**：当您将两个或多个图像合成为一个具有更高动态范围的新图像时，这个新图像的噪声特性将与具有真正大动态范围的图像不同。必须接受的一个折衷方案是，合成后的图像会比理想图像包含更多的噪点。这种噪点并非均匀分布于各个亮度级别，而是在两个图像混合的区域更为明显。如果摄像机的降噪滤波器无法抵消这种效应，结果可能导致在原本应无噪点的区域出现意料之外的噪点。



- **卡通化与不自然**：动态范围极高的场景可能难以在普通监视器上显示。尽管先进图像处理技术会竭尽全力保留色彩和对比度，但有时这仍不足以使图像呈现出自然的效果。结果可能会出现奇怪的颜色，或者整体上给人一种不自然的体验。



- **边缘紫光**：边缘紫光（有时也称为蓝边）是一种光学效应，即由于镜头中的色差，图像中锐利且高对比度的边缘可能会呈现紫色调。当不同波长的光在镜头中未得到同等折射时，便会出现色差，从而导致传感器发生轻微失焦。这种效应在传感器边缘附近可能更为明显。由于宽动态摄像机在保留色彩和对比度方面表现更佳，因此它们对色差的敏感度可能高于其他摄像机。与非宽动态摄像机容易在靠近强光源的区域出现色彩饱和或过度曝光的情况不同，宽动态摄像机通常能够保留这些区域的色彩信息，而在这种情况下，光学系统的缺陷往往会变得更加明显。



- **镜头光晕和起雾**：光进入光学镜头系统时，部分光在镜头系统中得不到正确收集，而是被散射。这种光中有部分被设计用来减少反射光的内部挡板收集，但也有部分光会到达图像传感器中的错误位置，从而产生不同类型的伪影。最常见的伪影是镜头光晕，这在迎着强光源（如太阳）的大多数摄像机中可以看到。另一种现象（被称为起雾）会大面积降低图像的对比度和色饱和度。这两种现象都尤其会受到图像中的强光源、宽动态范围场景、前端镜片脏污或镜头系统灰尘的干扰。在镜头前安装防风雨罩可能会同时减少光晕和起雾现象。宽动态摄像机的性能（即捕捉和再现具有极高动态范围场景的能力）仍会受到光学系统中散射光的影响。



关于安讯士 (Axis Communications)

安讯士通过打造各种解决方案，提高安全水平和企业效益，旨在创建一个高度智能、更加安全的世界。作为一家网络技术公司和行业领导者，安讯士致力于推出视频监控、访问控制、内部通信和音频系统解决方案。安讯士通过智能分析应用程序增强解决方案，并提供高质量培训支持。

安讯士在全球50多个国家和地区设有办事机构，拥有超过5,000名尽职的员工，并与遍布世界各地的技术和系统集成合作伙伴携手并进，为客户带来高价值的解决方案。安讯士创立于1984年，总部位于瑞典。