



具有 LFM 和距离检测功能的车用 3 μm HDR 图像传感器

具有 LFM 和距离检测功能的车用 3 μm HDR 图像传感器

Sergey Velichko、Dave Jasinski、Michael Guidash、Daniel Tekleab、Manuel Innocent、Andrew Perkins、Shaheen Amanullah、Maheedhar Suryadevara、Chris Silsby 和 Jeff Beck

摘要

本文描述了一个应用于汽车的 3 μm 超级曝光 130 万像素 CMOS 图像传感器，提供基于多重曝光机制的高达 140dB 高动态范围 (HDR)，该 HDR 功能同时支持 LED 闪烁消除。由于像素脉冲栅极操作的进一步发展和工艺优化，在超过 +100°C 的结温下，总信噪比保持在 30 dB 或以上。提供脉冲 LFM 操作以捕获任何亮度的闪烁光。通过两个感光像素共享同一个微镜头的方式，支持彩色图像像素内相位检测，可以提取距离信息。

索引词

CMOS、距离、高动态范围 (HDR)、图像传感器、LED 闪烁消除 (LFM)。

I. 引言

最新的车用图像传感器正在应对具有闪烁 LED 和高动态范围 (HDR) 的复杂道路场景。我们开发了经典的多重曝光图像传感器架构 [1]，HDR 可达超过 140 dB [2]，结温高达 +125 °C。而解决 HDR 和 LED 闪烁消除 (LFM) 问题的图像传感器架构是使用脉冲像素操作 [3] 和大小像素架构 [4]-[6] 开发的。这些解决方案实现了良好的 LFM 功能，但会导致图像质量下降，尤其是在汽车处于高温条件下。横向溢出集成电路 (LOFIC) 架构 [7]、[8] 的早期概念针对汽车用途进行了重大更改和修改 [9]、[10]，即使在汽车处于高温条件下也能实现带 LFM 的高性能 HDR。这些新的车用图像传感器正在推动自动驾驶和辅助驾驶的最新进展，以及更好的视觉应用，如环视和后视、电子后视镜、数字视频录制和增强现实显示。一些应用还需要使用相同的摄像头解决方案来融合图像和距离数据。

手稿于 2022 年 1 月 14 日收到；2022 年 3 月 22 日修订；2022 年 4 月 1 日接受。本文的审阅由编辑 G. Meynants 安排。

(通讯作者: Sergey Velichko。)

作者来自安森美 (onsemi) 智能感知部，美国爱达荷州默里迪恩 (邮编 83642，电子邮件: sergey.velichko@onsemi.com)。

本文中一个或多个图像的彩色版本可在 <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3165517> 上获得。

数字对象标识符 10.1109/TED.2022.3165517

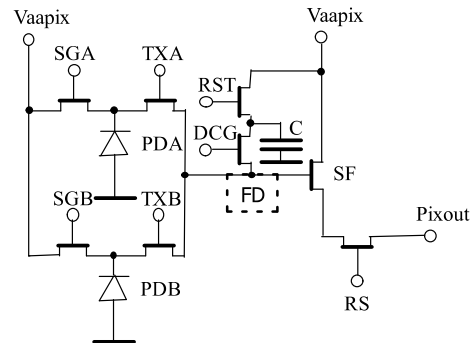


图 1. SE 两个光电二极管 (PD) 的 DCG 像素原理图。

II. 像素设计

我们设计并测试了一个 3 μm 130 万像素 CMOS 成像器，即使在高温下也能提供电影级 HDR 图像质量，所有信噪比 (SNR) 转换都在 30 dB 或以上。两个光电二极管 (PD) 的双转换增益 (DCG) 八栅极像素原理图见图 1。

传感器有效地执行了一组操作，如下所示：

- 1) 四曝光 140 dB HDR 图像捕获 [2]；
- 2) 脉冲 LFM (pLFM) [3] 使用快门栅极 SGA 和 SGB、传输栅极 TXA 和 TXB，以及由浮动扩散 (FD)、DCG 栅极和电容器 C 组成的像素内存储节点；
- 3) 超级曝光 (SE) LOFIC HDR LFM [9]、[10] 结合内存节点使用 TXA 和 TXB；
- 4) 通过利用来自单个微镜头覆盖的两个 PD (PDA 和 PDB) 的信号电平，使用像素内相位检测实现距离提取和彩色图像 [11]。

在像素中，复位栅极 (RST) 和 SGA/SGB 栅极用于复位 PD (PDA 和 PDB)，以及存储节点 FD 和 C。源极跟随器 (SF) 和行选择 (RS) 栅极用于将像素连接到列电路以实现读出序列。

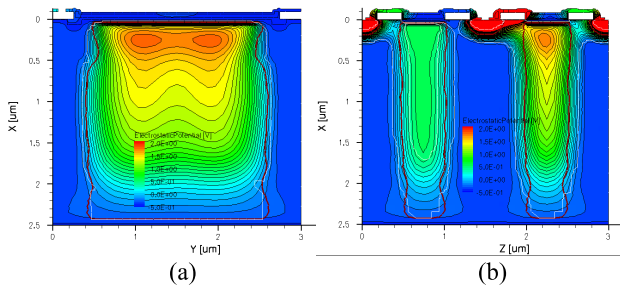


图 2. 像素的两个 PD 和栅极的 TCAD 电势分布模拟。
(a) 侧视图和 (b) 剖面图。

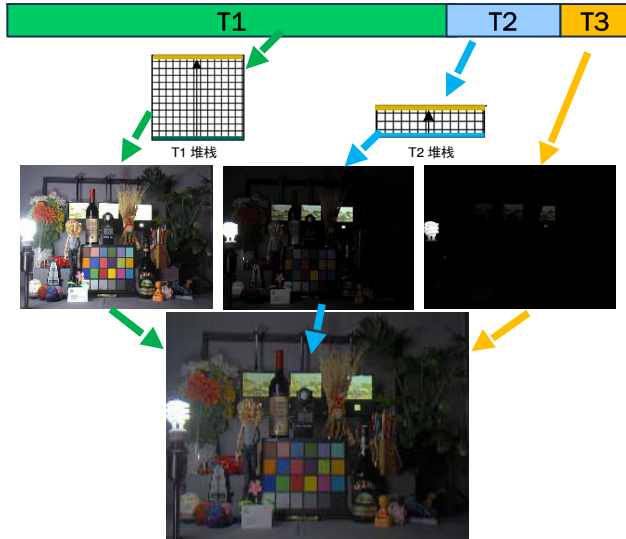


图 3. 具有延迟缓冲区的多重曝光 HDR 架构。

图 2 展示了像素的两个 PD 和栅极的 TCAD 电势分布仿真结果，证实了完全的电荷转移和 PD 间极低的串扰特性。在仿真 1 中，PD 正在被读出，而另一个 PD 仍然持有采集的光子产生的电荷。图 2(a) 显示了正在读出的 PD 的横截面以及外围的一些 RST、SF、DCG 和 RS 栅极。图 2(b) 显示了中心的 TXA/TXB 栅极和外围的 SGA/SGB 栅极，左侧 PD 持有电荷，右侧 PD 正在读出。

III. 多重曝光 HDR

多重曝光的实现遵循经典 HDR 模式 [1] 和延迟缓冲区 (图 3)。T1 堆栈和 T2 堆栈存储缓冲区分别用于保存在第一次较长 T1 曝光和第二次较短 T2 曝光期间获取的像素信号的数字值。这些缓冲区位于传感器内，并在 HDR 每像素信号重组期间使用。在第三次最短曝光 T3 结束时，所有三个像素值被组合成一个 HDR 多位值，通常三次曝光为 20 位，或四次曝光为 24 位 (具有额外的 T3 堆栈内存)。因此，在帧图像捕获中，三次曝光允许高达 120 dB，四次曝光允许高达 140 dB -HDR。

室温下四次曝光 HDR 模式的特性描述显示 140 dB 动态范围和所有总信噪比转换等于或高于 30 dB，第一次 T1 曝光读出使用高转换增益 (HCG) (图 4)。

具有低读出噪声的 HCG T1 与具有扩展动态范围的低转换增益 (LCG) T2、T3 和 T4 读出相组合，提供了出色的低光和中高光性能，同时涵盖了七个数量级的光照曝光范围。

具有低读出噪声的 HCG T1 与具有扩展动态范围的低转换增益 (LCG) T2、T3 和 T4 读出相组合，提供了出色的低光和中高光性能，同时涵盖了七个数量级的光照曝光范围。

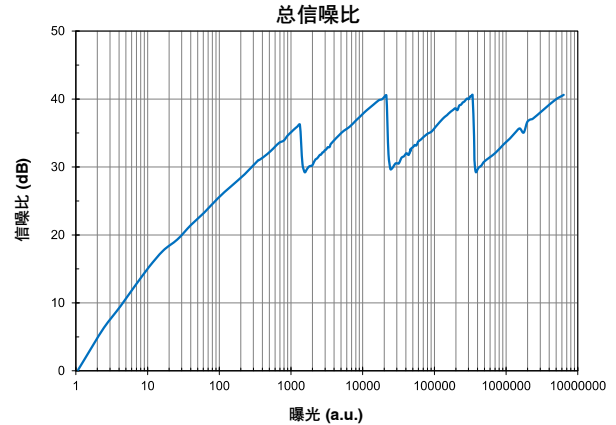


图 4. 四次曝光室温 140 dB 动态范围总信噪比，以及 HCG T1、LCG T2、LCG T3 和 LCG T4 曝光读数。

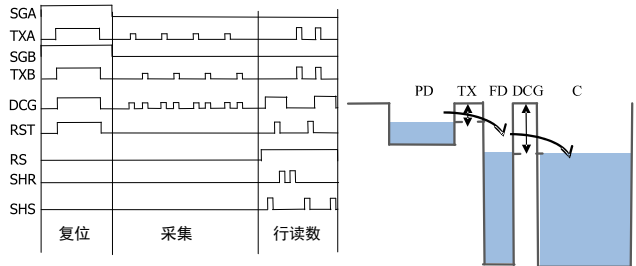


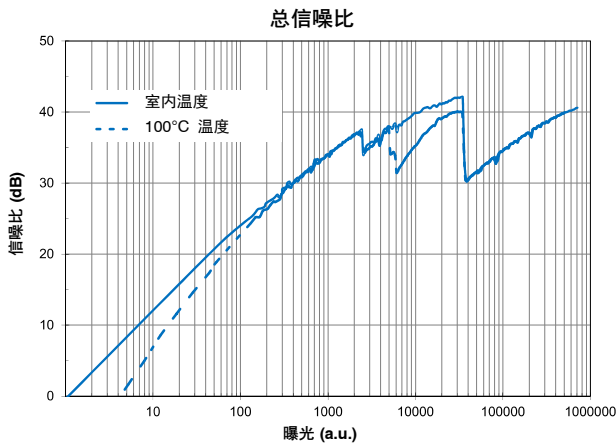
图 5. SE LFM 像素时序和电位图。

IV. 带 LFM 的 HDR

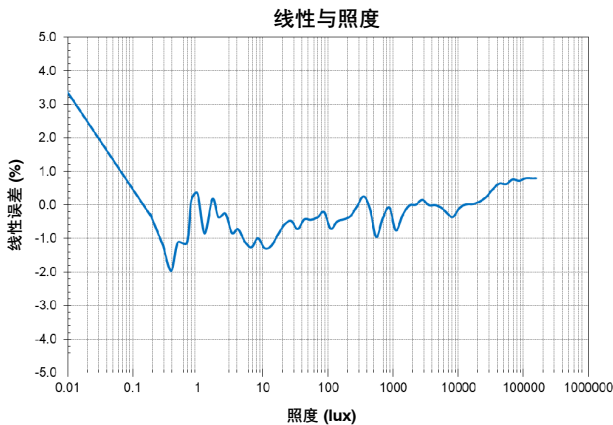
虽然经典的多重曝光 HDR 为静态场景提供了出色的性能，但它确实会受到运动和 LED 闪烁伪影的影响。我们继续开展了之前关于像素 SE LOFIC 操作的工作 [9]、[10]，并进一步改进了高环境温度下的性能。图 5 显示了像素 LOFIC HDR 操作的新时序和电位图。与早期工作 [9]、[10] 相比，TX 和 DCG 栅极在电荷采集期间的中电压脉冲操作和进一步工艺优化减少了存储节点暗噪声影响，从而改善了高温下的信噪比转换。通过在大部分采集时间将 TX 和 DCG 栅极接口表面保持在反转状态，PD 和存储节点的暗电流和暗信号不均匀性 (DSNU) 得到改善。

TX 和 DCG 栅极在电荷采集期间的中电压脉冲并行操作还提供了额外的抗晕光保护。

在读出阶段，存储节点中采集的电荷以双采样模式 [第一个采样保持信号 (SHS) 和第一个采样保持复位 (SHR)] 读出，然后使用 HCG (第二个 SHR 和第二个 SHS) 和 LCG (第一个 SHR 和第三个 SHS) 的相关双采样技术来读出两个 PD 中的电荷。



(a)



(b)

图 6. (a) SE 120 dB 动态范围总信噪比与 16 ms 积分时间和温度的关系, (b) 像素 HDR LFM 信号线性度与勒克斯照度的关系。

图 6(a) 中, 室温与 +100°C 结温下的总信噪比比较, 反映了传感器的 120 dB HDR LFM 性能。

这种操作模式还提供了出色的图像质量, 在 +100°C 和 16 ms 积分时间下, 所有总信噪比转换都在 30 dB 或以上 [图 6(a)], 甚至在 +125°C 和更短的 8 ms 积分时间情况下也是如此。通过进一步的工艺和像素操作优化, 控制在室温和 +125°C 温度之间显著变化的内存节点暗电流和 DSNU [9]、[10], 可在高温下实现高性能。由于较高的 LCG 读出噪声, 第一次信噪比转换发生在 HCG 模式的 PD 信号读出和 LCG 模式的读出之间, 第二次信噪比转换增加了像素存储器暗电流和 DSNU, 它们与温度和积分时间相关。虽然双采样读出的读出噪声在室温下导致二次过渡区中的信噪比有所降低, 但在存储节点暗电流和 DSNU 占主导地位的高温条件下, 这不是一个最重要的因素。第三次信噪比转换是在第一次和非常短的第二次曝光之间。第一次和第二次曝光之间的比率控制了信噪比降低的深度。因此, 第三次信噪比转换与温度无关。

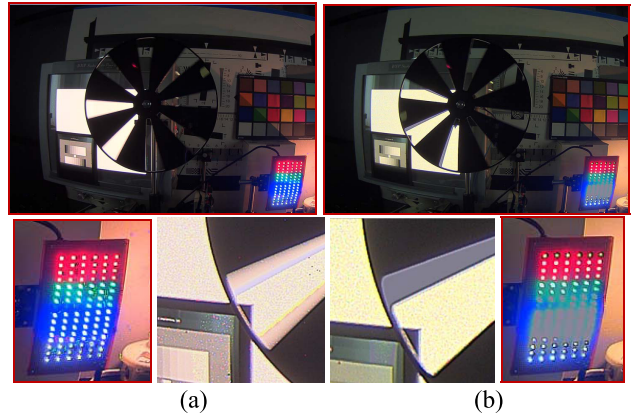


图 7. 闪烁的 LED 和运动伪影图像比较: (a) SE HDR LFM 对比 (b) 三曝光 HDR。

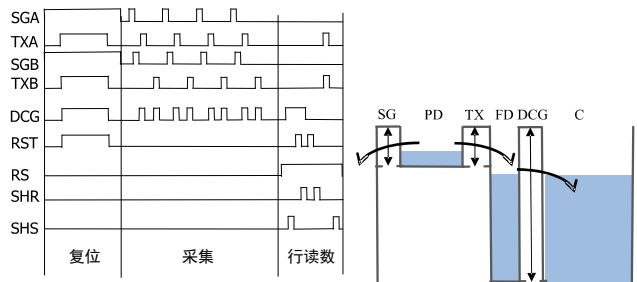


图 8. pLFM 像素时序和电位图。

图 6(b) 中, 从 0.01 lx 到近 200 K lux 的线性测量显示出很好的色彩还原性; 从小于 0.5 lx 到最大水平, 保持在 +1% 到 -1.5% 的信号范围内。与经典的多重曝光 HDR 相比, 像素的 SE HDR LFM 操作捕捉了明亮闪烁的 LED 并消除了运动伪影 [图 7(a) 相比 (b)]。

我们之前开发 [3] 并在传感器中实施的 pLFM 方法允许捕获任何亮度高达数百万 lux 的闪烁光源。pLFM 操作时序图见图 8。

在图 8 中, TXA/TXB 和 SGA/SGB 栅极通过充分的驱动脉冲把电荷转移收集起来 [3]。它们的占空比在很宽的范围内调节电子 PD 响应度以及存储节点中的电荷总和积累。如图所示, DCG 栅极可以开关, 以允许电容器 C 通过 FD 连接到溢出路径, 从而扩展捕获的 pLFM 图像的动态范围。DCG 栅极也可以在整个电荷采集过程中偏置为固定电平。TXA/SGA 和 TXB/SGB 对的不同脉冲时序产生了更高的采样频率, 因此可以更好地捕获极低占空比 LED 脉冲, 保证可以由至少一个 PDA 或 PDB 捕获。

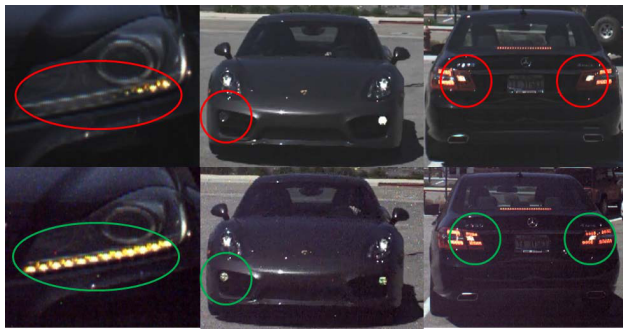


图 9. 闪烁的 LED 转向灯、前大灯和刹车灯图像，三曝光 HDR (顶部) 与 pLFM HDR (底部) 的比较。

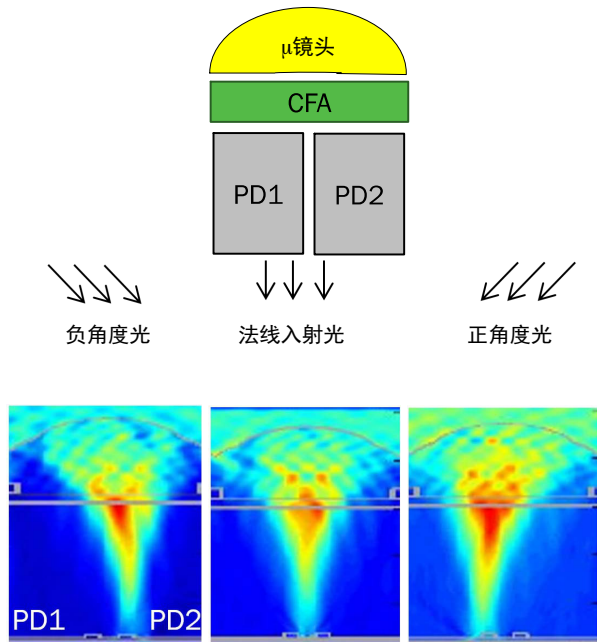


图 10. 具有两个 PD 的相位检测像素及其 FDTD 光学模拟与光线角度的关系。

在读出阶段，存储节点中获取的电荷以双采样模式 (第一个 SHS 和第一个 SHR) 读出，然后是两个 PD 中剩余电荷的 HCG 相关双采样读出 (第二个 RST 和第二个 SHS)。

使用三曝光 HDR 和 pLFM 捕获闪烁的 LED 转向灯、前灯和刹车灯的图像比较，显示在图 9 的顶部和底部图像中。这些图像证实了以真彩色有效捕获汽车 LED 光源。

V. 距离和图像同时捕获

由单个微镜头覆盖的传感器中的两个 PD 像素还可以使用像素内相位检测 [11] 实现距离提取和彩色图像。这是首次将双 PD 像素内相位检测应用于 HDR 像素架构。图 10 显示了具有两个 PD 的像素的有限差分域 (FDTD) 光学模拟，与 $+30^\circ$ 和 -30° 之间的绿光角度相关。

距成像镜头不同距离的物体会在像素内的两个 PD 中的每一个采集的信号中产生差异。

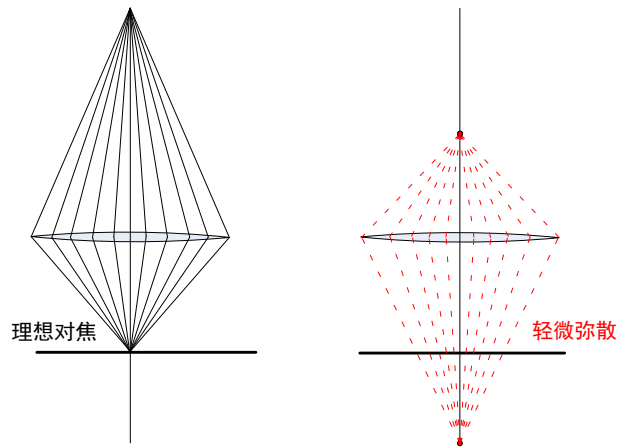


图 11. 用于相位检测的像素阵列几何光学构造。

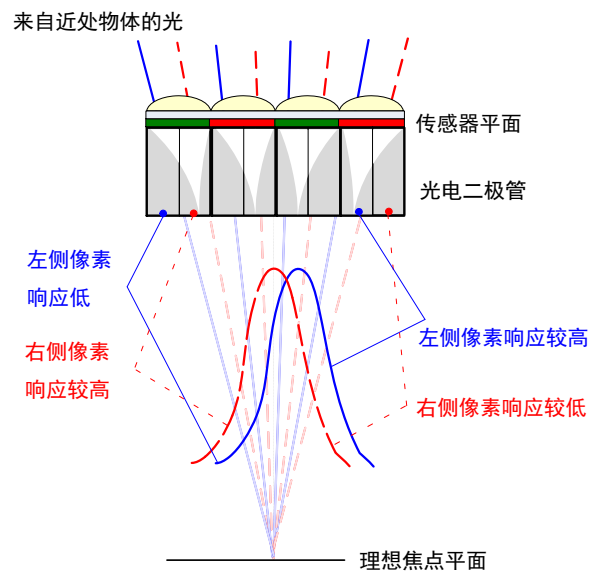


图 12. 相位检测像素 PD 中的不同响应。

图 11 展示了使用几何光学结构的相位机制的原理。理想对焦的物体将在传感器平面上形成理想的图像点，从而产生零相位。当一个物体失焦时，它的像点超出了传感器平面，导致一束锥形光线在传感器平面上形成模糊圈。根据散焦的程度，模糊圈可能跨越传感器阵列的几个像素。

在每个像素 PD 位置，入射光线的角度由产生相位响应的相位检测自动对焦 (PDAF) 传感器感测 (图 12)。下面的推导考虑了点源的图像，但在实践中，相位测量是从场景中的边缘分析中推导出来的。

图 13 显示了可以从几何光学中导出的相位生成的基本原理。对于相移的推导，我们考虑了对焦在距离 S_0 处的物体上的镜头。这将图像平面放置在距离为 S_0' 处。靠近镜头的点光源将失焦，在成像器的焦平面上形成一个模糊的圆圈。为简单起见，我们假设模糊圈内的所有像素都被均匀地照亮，而外面的像素没有接收到光子，但实际上，衍射效应会导致模糊圈具有一些类似高斯的强度分布。

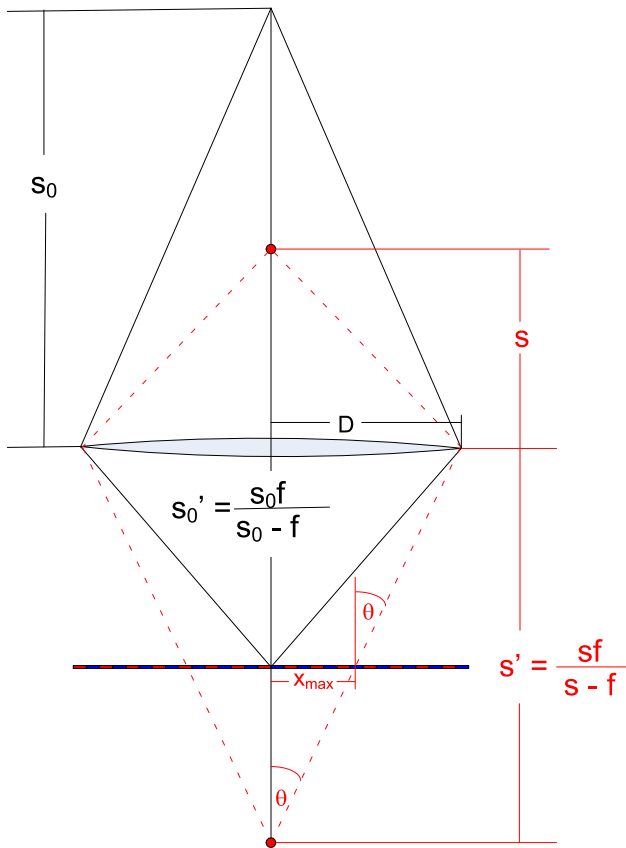


图 13. 近散焦响应的几何推导。

D 是镜头通光孔径的二分之一。根据镜头光圈数值 (f-number) 的定义, N 等于焦距除以通光孔径直径。通过相似三角形, 模糊圆的最大直径 X_{max} 可以表示为:

$$X_{max} = \frac{f(s' - s_0)}{2Ns'} \quad (1)$$

对于传感器阵列上穿过模糊圆范围的任何点, 我们可以计算光线从失焦点发出的角度, 如下所示:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{s' - s_0'} \right) \quad (2)$$

基于上述 (1) 和 (2) 的推导, 我们得出结论: 光斑的范围和入射光线的角度均由入射光瞳的直径决定, 入射光瞳的直径与镜头光圈数值和镜头焦距直接相关, 因此, 深度能力直接类比为镜头的景深特性。所有物体都有效对焦的大景深广角镜头提供的相位信息非常少, 因此景深范围有限。焦距较长和光圈数值较低的长焦镜头将具有较浅的景深, 允许从更远的物体测量

足够的相位信息。但是, 存在一个实际限制, 即附近的物体变得太模糊而无法充分测量。图 14 显示了不同镜头的光圈数值和焦距所对应的像素距离性能特征。

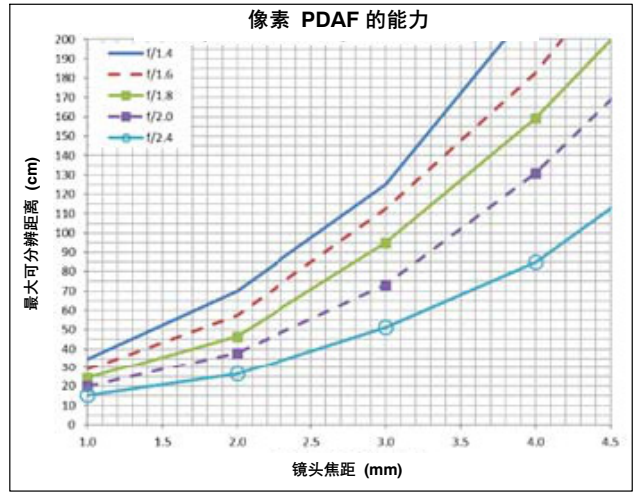


图 14. 像素深度范围与镜头光圈数值和焦距的关系。



图 15. 捕获的彩色图像和相应的信号相位/距离 (近处物体偏红, 远处物体偏蓝)。

单个微镜头下相同颜色像素的双 PD 实现允许使用场景中不同对象的边缘进行有效的距离提取。如图 15 中所示, 能以合理的精度获取高达几米的彩色 HDR 图像和距离信息, 其中右侧图像距离数据的红色表示物体离摄像头较近, 蓝色表示物体离摄像头较远。

此附加功能对于需要融合距离和图像数据的某些汽车舱内应用和近距离应用很有价值。

VI. 性能比较

一些最新的 HDR LFM 背照式 (BSI) 像素性能指标总结在表 1 中。在该表中, 捕获了不同架构的像素类型及其一些主要参数: 像素线性全阱 (LFW) 容量、最大动态范围、LFM HDR、转换中的最大信噪比与温度以及可用的操作模式。

表 1. 最新 HDR LFM 像素的主要参数比较。

| | 本文成果 | [10] | [4] | [5] | [6] |
|-----------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 像素大小 | 3.0 μm | 3.0 μm | 3.0 μm | 3.0 μm | 2.8 μm |
| 架构 | SE 双 PD LOFIC | SE LOFIC | 大小像素 | 大小像素 | 大小像素 |
| 技术 | BSI | BSI | BSI | BSI | BSI |
| 像素 LFW | 175 Ke- | 140 Ke- | 78 Ke- | 165 Ke- | 22 Ke- |
| 动态范围 | 140 dB | 120 dB | -110 dB | 130 dB | 120 dB |
| HDR LFM | 120 dB | 120 dB | -110 dB | 120 dB | 120 dB |
| 转换中的最大信噪比 | 30 dB @ 100°C 30 dB @ 125°C & 8 ms | 25 dB @ 100°C ~20dB @ 125°C | <18 dB @100°C <15 dB @125°C | -25 dB @ 100°C <20 dB @ 125°C | <23 dB @100°C <18 dB @125°C |
| 工作模式 | HDR LFM 4 曝光 HDR pLFM 距离 | HDRLF | HDR LFM | HDR LFM | HDR LFM |

在表 1 中，一些参数是从图中提取的或使用其他参数推导出来的。在这些情况下使用符号“~”和“<”。

VII. 结论

我们讨论了基于增强型 3 μm 像素、具有两个光电二极管和八个栅极的 130 万像素车用 HDR 图像传感器的性能和特点。该像素架构允许实现多种操作模式，包括多重曝光 HDR、SE LOFIC HDR LFM 和 pLFM。这些模式涵盖了所有典型的汽车使用场景，可以有效消除闪烁的 LED 和灯光。即使结温高于 +100°C，动态范围也可达到 140 dB，所有总信噪比转换均达到或高于 30 dB。与 HCG 相结合，由于在非常低亮度到非常高亮度范围内信号呈 +1% 和 -1.5% 之间的线性度，低光信号读出能提供电影级图像质量和清晰的高色彩保真度。

附加操作模式与由单个微镜头覆盖的两个 PD 相结合，可以使用像素内相位检测机制提取几米距离的彩色图像。

我们未来的研究重点是基于相同架构原理的性能更好且更小的 HDR LFM 像素。

致谢

感谢 Ross Jatou、Chris Adams 和 Rick Mauritzson 的支持和校对。

参考文献

[1] J. Solhusvik et al., “A 1280x960 3.75 μm pixel CMOS imager with triple exposure HDR,” in *Proc. Int. Image Sensor Workshop*, Jun. 2009, pp. 344–347.

[2] S. Velichko et al., “140 dB dynamic range sub-electron noise floor image sensor,” in *Proc. Int. Image Sensor Workshop*, Jun. 2017, pp. 294–297.

[3] C. Silsby, S. Velichko, S. Johnson, Y. P. Lim, R. Mentzer, and J. Beck, “A 1.2 MP 1/3' CMOS image sensor with light flicker mitigation,” in *Proc. Int. Image Sensor Workshop*, Jun. 2015, pp. 405–408.

[4] S. Iida et al., “A 0.68e-rms random-noise 121 dB dynamic-range subpixel architecture CMOS image sensor with LED flicker mitigation,” in *IEDM Tech. Dig.*, Dec. 2018, pp. 2–10.

[5] Y. Sakano et al., “A 132 dB single-exposure-dynamic-range CMOS image sensor with high temperature tolerance,” in *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers*, Feb. 2020, pp. 105–107.

[6] J. Solhusvik et al., “A 1280x960 2.8 μm HDR CIS with DCG and split-pixel combined,” in *Proc. Int. Image Sensor Workshop (IISW)*, 2019, pp. 254–257.

[7] S. Sugawa et al., “A 100 dB dynamic range CMOS image sensor using a lateral overflow integration capacitor,” in *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers*, Feb. 2005, pp. 352–353.

[8] Y. Sakano et al., “224-ke saturation signal global shutter CMOS image sensor with in-pixel pinned storage and lateral overflow integration capacitor,” in *Proc. Symp. VLSI Circuits*, Jun. 2017, pp. C250–C251.

[9] M. Oh et al., “3.0 μm backside illuminated, lateral overflow, high dynamic range, LED flicker mitigation image sensor,” in *Proc. Int. Image Sensor Workshop*, Jun. 2019, pp. 262–265.

[10] M. Oh et al., “Automotive 3.0 μm pixel high dynamic range sensor with LED flicker mitigation,” *Sensors*, vol. 20, no. 5, p. 1390, 2020.

[11] S. Choi et al., “An all pixel PDAF CMOS image sensor with 0.64 μm x 1.28 μm photodiode separated by self-aligned in-pixel deep trench isolation for high AF performance,” in *Proc. Symp. VLSI Technol.*, Jun. 2017, pp. T104–T105.

onsemi, **Onsemi**, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Email Requests to: orderlit@onsemi.com

onsemi Website: www.onsemi.com

TECHNICAL SUPPORT

North American Technical Support:

Voice Mail: 1 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

Phone: 011 421 33 790 2910

Europe, Middle East and Africa Technical Support:

Phone: 00421 33 790 2910

For additional information, please contact your local Sales Representative

