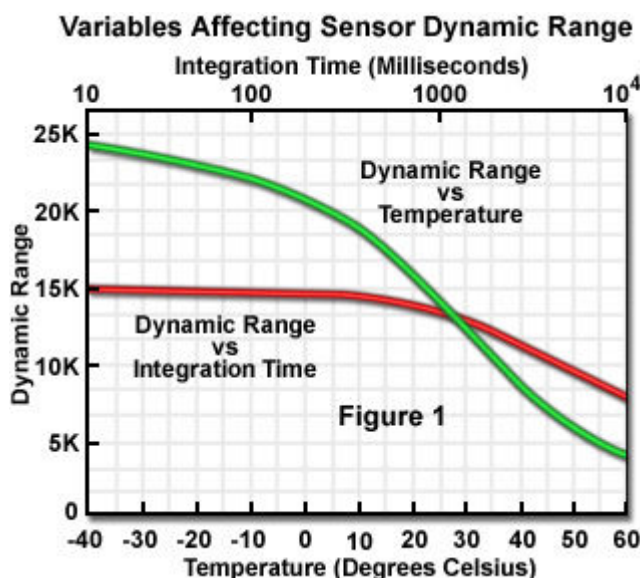


RANGO DINÁMICO

En los sensores de imagen **CCD** (charge-coupled device), o **CMOS** (complementary metal oxide semiconductor), el rango dinámico se especifica típicamente como la máxima señal alcanzable dividida por el ruido de la cámara, donde la fuerza de la señal se determina por la capacidad de llenado del pozo de potencial, y el ruido es la suma de ruidos oscuros y rojos. Si se aumenta el rango dinámico de un dispositivo, aumenta la habilidad de medir cuantitativamente las intensidades más tenues de una imagen (rendimiento intraescena). El rango dinámico intrascena representa el espectro de intensidades que se pueden adoptar cuando la ganancia del detector, el tiempo de integración, la apertura de la lente y otras variables se ajustan para diferentes campos de visión.



El tamaño del fotodiodo determina, en parte, el tamaño de los pozos de depletion -diodos más grandes que tienen una capacidad de llenado del pozo mayor en comparación con el ruido de la cámara. Los tamaños normales de los CCD modernos utilizados en microfotografía varían entre 4.5 y 24 micrones que tienen capacidades de pozos correspondientes de entre 20.000 y 600.000 electrones. El ruido de lectura es una combinación de todo el ruido generado durante la lectura del dispositivo. Esto incluye el ruido del clocking de entrada y fixed pattern, junto con el ruido de reset del transistor y el ruido del amplificador de salida. El ruido de lectura se especifica normalmente en las hojas de los datos de rendimiento que acompañan al sensor CCD con valores típicos de entre 10 y 20 electrones/píxel en chips de alta calidad funcionando a temperatura ambiente y de 2 a 5 electrones/píxel en CCDs Peltier enfriados para la producción de imágenes digitales para aplicaciones científicas. El rango dinámico se expresa en unidades de decibelio según la siguiente ecuación:

$$\text{Dynamic Range} = 20 \times \log\left(\frac{N_{\text{sat}}}{N_{\text{noise}}}\right)$$

Donde **N(sat)** es la capacidad de llenado del pozo lineal establecida como el número de electrones y **N (noise)** es el valor total de los ruidos rojos y oscuros, también expresado como el número de electrones. En la cámara enfriada de un CCD de alto rendimiento, la capacidad de pozo es proporcional al tamaño del fotodiodo individual, tal que el máximo número de electrones almacenados es de alrededor de 1.000 veces el área transversal de cada fotodiodo. De esta manera, un CCD con 6.7 x 6.7 fotodiodos micrón debería tener una capacidad de almacenamiento máxima [capacidad de llenado de pozo] de alrededor de 44.900 electrones [o agujeros]. En una velocidad de lectura típica de 1 MHz, el ruido rojo de este CCD es de aproximadamente 10 electrones/píxel, lo que significa un rango dinámico de 44.900/10 o 4,490. Para utilizar la gama completa de niveles de la escala de grises disponible con este rango dinámico la cámara debería tener un convertidor analógico a digital **(A/D)** de 12-bits con capacidad para resolver 4.096 niveles de gris. El control de los ruidos rojos y oscuros es un factor crítico en el mantenimiento de un rango dinámico alto en estos dispositivos.

Los sensores CCD enfriados de alto rendimiento diseñados con amplificadores de salida de ruido bajo y apropiados para utilizarlos en la producción de imágenes de exploración lenta a menudo tienen un ruido rojo más bajo y un rango dinámico extenso. Por ejemplo, el sensor CCD39-01 de Tecnologías Aplicadas Marconi se ilumina por detrás y tiene un tamaño de píxel cuadrado/al cuadrado de 24 micrones con un registro de salida dividido que permite el uso de amplificadores de salida quad. La capacidad de llenado de este dispositivo puede alcanzar un nivel de 300.000 electrones. Coupled with a readout noise root-mean-square (rms) level de tres electrones a 20 kilohercios (si está enfriado), el CCD39-01 es capaz de alcanzar un rango dinámico de aproximadamente 100.000:1. Para emplear el potencial total de este CCD, se debería utilizar un convertidor a 17 bits A/D con 131.072 niveles en la escala de grises (aunque un convertidor a 16 bits A/D con 65.536 niveles en la escala de grises también podría ser suficiente).

El rango dinámico de un CCD depende de varias variables. La corriente de oscuridad está fuertemente influida por la temperatura (Figura 1),

doblando cada 8 a 10 grados Centígrados. Con temperaturas más altas domina la corriente de oscuridad, mientras que con temperaturas más bajas el rango dinámico viene determinado por el ruido del amplificador de salida. La cantidad de carga oscura recogida en cada píxel depende no sólo de la temperatura del dispositivo, sino también del tiempo de integración y el tiempo de almacenamiento previo a la lectura. El nivel de ruido también es proporcional al ancho de banda del amplificador de lectura, que está influido por la velocidad de transferencia de los píxeles y se ve afectado por la frecuencia del clock. A medida que aumenta la frecuencia de clock, el número de corriente oscura y shot noise electrons disminuye proporcionalmente y el amplificador de salida y el sistema de procesamiento de video necesitan menos ancho de banda. El tiempo de integración

También afecta el rango dinámico de un CCD, como se muestra en la Figura 1. Un aumento del tiempo de integración total produce un aumento de la corriente de oscuridad y por lo tanto, una disminución en el rango dinámico, pero este efecto solo entra en juego en tiempos de integración que exceden los 5 minutos.

Profundidad de Bit y Niveles de Grises en Imágenes Digitales

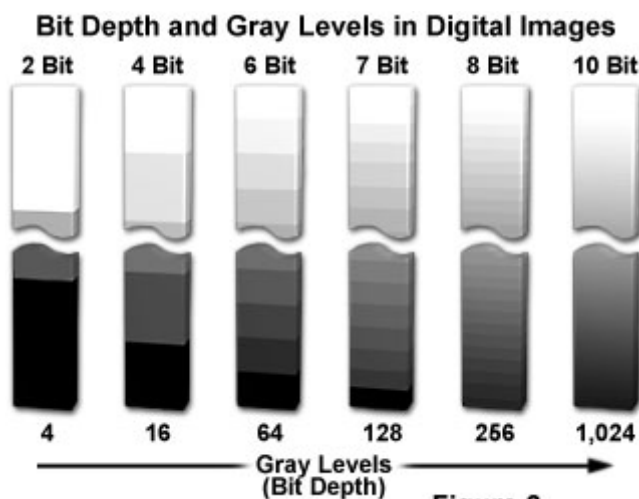


Figure 2

La profundidad de bit se refiere a la gama binaria de los posibles valores en la escala de grises utilizadas por el convertidor A/D para traducir la información analógica de la imagen a valores digitales discretos que el ordenador puede leer y analizar. Por ejemplo, los convertidores a 8 bits A/D más frecuentes tienen una gama binaria de 2^8 o 256 valores posibles (Figura 2), mientras que un convertidor a 12 bits tiene un rango de 2^{12} o 4.096 valores, y un convertidor a 16 bits tiene 2^{16} o 65.536 valores posibles. La profundidad de bit del convertidor A/D determina los incrementos de la escala de grises, donde las profundidades mayores se corresponden con un campo mayor de información útil disponible para la cámara. Se obtienen mejores resultados si la señal se muestra

(sampled) a un nivel por debajo del límite sugerido por el ruido de lectura. Por ejemplo, si el CCD39-01 se utiliza con la señal media, un convertidor A/D a 18 bits (262.144 niveles en la escala de grises) se podría emplear para muestrear datos a una parte en 262.144. Sin embargo, la estadística del nivel de ruido de este dispositivo indica que no se puede medir con precisión los datos de la imagen a más de una parte de 100.000. sin signal averaging. Claramente, un convertidor A/D a 16 o 18 bits producirá mejores resultados si se le acopla el chip del CCD Marconi 39-01. Por el contrario se ha demostrado que Fujichrome Velvia, a fine-grained color transparency film, produce menos de 10 stops (1024 niveles en la escala de grises) de rango dinámico.

La Tabla 1 presenta la relación entre el número de bits empleados para almacenar la información digital, el equivalente numérico en niveles de la escala de grises y los valores correspondientes en decibelios (un bit equivale aproximadamente a 6 decibelios). Como se muestra en la tabla, si se digitalizara una video señal de 0,72 voltios con un convertidor A/D de un bit de precisión, la señal se representaría con valores binarios, 0 o 1 con valores en voltios de 0 y 0,72. La mayoría de los digitalizadores que se encuentran en las cámaras digitales empleadas para la fotomicrografía utilizan convertidores A/D a 8 bits, que tienen 256 niveles discretos en la escala de grises (entre 0 y 255) para representar las amplitudes del voltaje. Una señal de un máximo de 0,72 voltios se subdividiría en 256 etapas, cada una de ellas con un valor de 2,9 milivoltios.

Profundidad de Bit y Rango Dinámico de los CCD

Bit Depth and Dynamic Range of Charge-Coupled Devices

Bit Depth	Grayscale Levels	Dynamic Range (Decibels)
1	2	6 dB
2	4	12 dB
3	8	18 dB
4	16	24 dB
5	32	30 dB
6	64	36 dB
7	128	42 dB
8	256	48 dB
9	512	54 dB
10	1,024	60 dB
11	2,048	66 dB
12	4,096	72 dB
13	8,192	78 dB
14	16,384	84 dB
16	65,536	96 dB
18	262,144	108 dB
20	1,048,576	120 dB

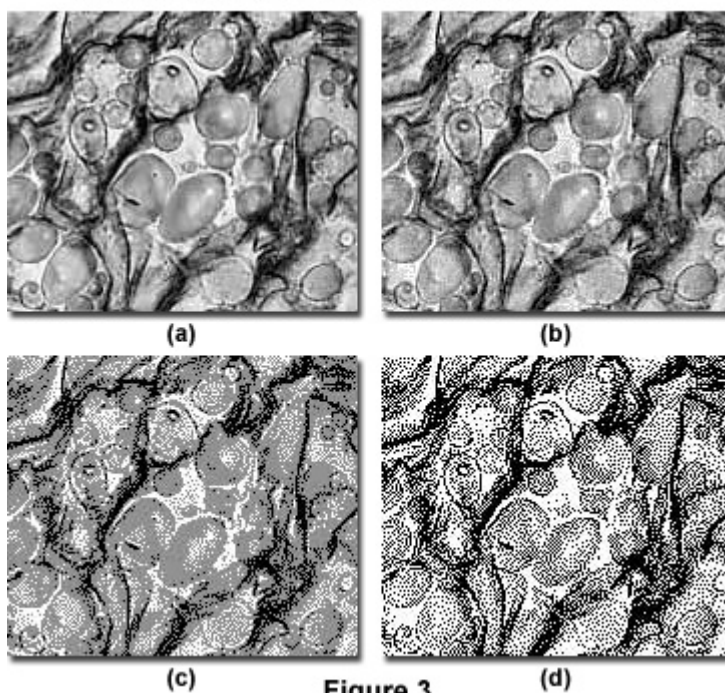
Tabla 1

El número de los niveles en la escala de grises que se deben generar para conseguir una calidad visual aceptable debería ser tal que las etapas entre los valores individuales de grises no sean discernibles por el ojo humano. La "mínima diferencia perceptible" en la intensidad de una imagen a nivel de grises para la media del ojo humano es de alrededor del dos por ciento en condiciones visuales ideales. Como mucho, el ojo puede distinguir 50 sombras discretas de grises dentro del ámbito de intensidad de un monitor de video, lo que significa que el rango dinámico mínimo de una imagen se encontraría entre 6 y 7 bits (64 y 128 niveles en la escala de grises; Figura 2).

Las imágenes digitales deberían tener al menos una resolución de 8 bits para evitar producir etapas de grises visualmente obvias en la imagen procesada si el contraste aumenta durante el procesamiento de la imagen. El efecto de reducir el número de niveles en la escala de grises en la apariencia de fotomicrografías se puede observar en la Figura 3, que muestra una imagen en blanco y negro (originalmente 8 bits) de una sección fina y teñida de *Solanum tuberosum* (patata) que se visualiza con diferentes resoluciones entre 6 bits (Figura 3(a)), 5 bits (Figura 3(b)), 4 bits (Figura 3(c)) y 3 bits (Figura 3(d)).

Resolución de la Escala de Grises y Aspecto de la Imagen

Grayscale Resolution and Image Appearance



Las cámaras mejoradas con CCDs con capacidad de resolución de 12 bits permiten a los investigadores visualizar imágenes con mayor latitud de lo que es posible con imágenes de 8 bits. Esto es posible porque el software apropiado puede traducir las sombras necesarias de gris a una gama más amplia (4.096 niveles de la escala de grises) para su visualización en los monitores de los ordenadores, que normalmente muestran imágenes en 256 sombras de gris. Por el contrario, una imagen digital de 8 bits está limitada a una paleta o gama de 256 niveles en la escala de grises que se capturaron originalmente con la cámara. Debido a que el aumento crece durante el procesamiento de la imagen, el software puede elegir las escalas de grises más precisas para reproducir porciones de la imagen aumentada sin cambiar los datos originales. Esto es especialmente importante al examinar áreas sombreadas en las que la profundidad de la imagen digital de 12 bits permite al investigador al visualización de detalles muy sutiles que no estarían presentes en una imagen de 8 bits.

La precisión necesaria para la conversión a digital de señales de video análogas depende de la diferencia entre el nivel de gris y el ruido rms de la salida de la cámara. Las cámaras de los CCDs con un convertor A/D interno producen una corriente de datos digitales de manera que el ordenador no tiene que digitalizarlos. Estas cámaras son capaces de producir imágenes digitales con hasta una resolución de 18 bits (262.144 escalas de grises) en los modelos más modernos, no tienen que sufrir las limitaciones a 0.72 voltios de señal de los sistemas de video RS-170 y emplean un registro más amplio de voltaje analógico en sus convertidores A/D. La ventaja más importante del enorme campo digital que muestran las cámaras CCD tiene que ver por una parte con las mejoras en la relación señal/ruido de las imágenes de 8 bits visualizadas y por otra con el amplio rango dinámico lineal a través del cual se pueden digitalizar las imágenes.

Bibliografía:

Kenneth R. Spring - Scientific Consultant, Lusby, Maryland, 20657.

Michael W. Davidson - National High Magnetic Field Laboratory, 1800 East Paul Dirac Dr., The Florida State University, Tallahassee, Florida, 32310.