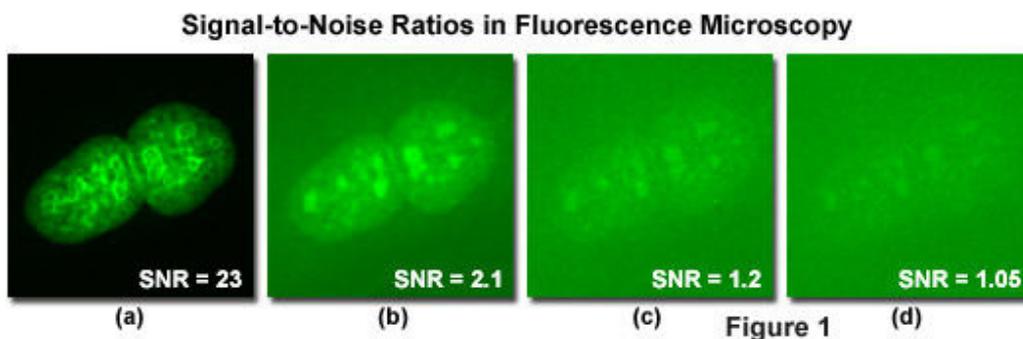


AS ORIGENS DO RUÍDO NO CCD E A RELAÇÃO SINAL - RUÍDO

Os sensores CCD (dispositivo de carga acoplada) têm muitas vantagens em comparação com a película fotográfica, especialmente nas aplicações científicas como a astronomia e a microscopia óptica, permitindo um rápido e fácil processamento das imagens. Ao produzir imagens, directamente num formato digital, apropriado para processar de imediato num computador, os sistemas de captação de imagens baseadas nos sensores CCD (CMOS), estão adaptados para uma ampla escala de aplicação dos actuais métodos de análise de imagens digitais. A maior sensibilidade destes sensores, em comparação com a película fotossensível é particularmente útil nas técnicas com pouca luz, em que cada fóton disponível pode ser significativo.



O ruído, originado por uma série de fontes distintas, é inerente a todos os sensores de imagem electrónica (digital) e é necessário um controle cuidadoso dos componentes do ruído, tanto no projecto do sensor, como na operação do mesmo. Isto para assegurar que o nível do sinal relativamente ao nível do ruído está adaptado para permitir a captação precisa da informação na imagem. Em todos os sistemas de medida electrónica, o SNR (*signal-to-noise ratio*) relação ou razão do sinal com o ruído, determina a qualidade da imagem e das medidas nela efectuadas, tal como da operação do sistema. Em câmaras digitais bem concebidas e projectada, a representação do ruído é limitado pelo sensor CCD, mais do que pelos componentes dos sistemas electrónicos a si associados.

O valor da relação SNR num sensor de imagem CCD (CMOS), representa especificamente a relação entre a medida do sinal luminoso e o ruído combinado, que consiste e resulta dos sinais indesejados originados no dispositivo, tal como nas variações inerentes produzidas pelo fluxo dos fótons incidentes da imagem. Um sensor CCD (CMOS) recolhe a carga de um sistema discreto de posições físicas fixas (matriz do sensor), razão pela qual podemos entender a relação SNR como representado a magnitude relativa do sinal.

O estudo detalhado da engenharia, sobre a estrutura do ruído nos CCD (CMOS) inclui muitas origens, que se incluem na prática, para um fácil manejo dos mesmos, em categorias mais gerais. As três grandes componentes gerais do

ruído, num sistema de imagem como um CCD (CMOS) são o ruído fotónico, o ruído negro (*dark frame*) e o ruído de leitura (*bias*). Estes devem ser tidos em consideração no cálculo da relação SNR. Outra útil classificação, distingue as origens do ruído, separando-as em fonte **temporal** e fonte **espacial**. O ruído temporal, por definição varia no tempo, sendo então possível reduzi-lo por meio de aplicação de filtros de mediana (*frame averaging*). Na componente de ruído espacial tal não é possível. O ruído espacial está sujeito a eliminação parcial (ou quase total), mediante a aplicação de algoritmos de subtração ou a técnicas de amplificação ou de correcção no *offset* (*bias*). A categoria de ruído temporal inclui o ruído fotónico e o ruído negro (ambos do tipo *impulsive-shot noise*), o ruído de leitura (originada principalmente no amplificador de saída) e o ruído do reinicialização (*reset*). As fontes do ruído espacial têm factores que produzem sinais de saída (dos pixéis) não uniforme, tanto na resposta da luz (não uniformidade da resposta fotónica), como uma não uniformidade na resposta electrónica (*dark frame* não uniforme).

Os efeitos da diminuição da razão SNR numa imagem digital de microscopia fluorescente estão retratados nas imagens da figura 1. Com uma relação SNR “elevada” (esta qualificação depende da dinâmica) é nítida a existência de um par de núcleos celulares (figura 1(a)), representados com um contraste muito marcado e uma boa definição de detalhes, num fundo preto. Ao diminuirmos a razão SNR (figuras 1(b) e 1(c)), a definição e o contraste dos núcleos diminui até que se começam a confundir com o ruído de fundo (figura 1(d)).

Durante a aquisição da imagem com sensores electrónicos (do tipo CCD ou CMOS), o ruído adicionado ao sinal manifesta-se como flutuações aparentemente aleatórias na intensidade do sinal, e com o aumento no valor do ruído, a incerteza do sinal medido torna-se maior (como ilustrado na figura 1). A razão SNR é normalmente calculada em termos das categorias gerais, anteriormente mencionadas, embora cada categoria possa incluir diversos componentes que contribuem para criar o ruído (ver as secções seguintes). A importância de cada potencial fonte do ruído depende do dispositivo específico e do tipo de aplicação em que é usada. Como referido, um valor elevado de SNR é importante na aquisição de imagens digitais da alta qualidade, e é particularmente fundamental nas aplicações que requerem medidas muito precisas de iluminação (fotometria). As variações feitas nos factores que afectam directamente o valor SNR, e aquelas variáveis que contribuem principalmente com ruído no sistema, têm obviamente um efeito inverso na razão SNR.

O sinal de um sistema de processamento de imagem com CCD (CMOS), usado para calcular o valor da razão SNR, depende do fluxo do fotões que incide nos fotodiodos do CCD (expresso em fotões por pixel por segundo), da eficiência quântica do dispositivo (onde a unidade representaria uma eficiência de 100%) e do intervalo de tempo de integração (tempo de exposição) durante o qual o sinal é “construído”. O produto destas três variáveis determina a parte do sinal (numerador) da razão SNR, contra todas as fontes que originam o ruído e contribuem para o denominador da dita razão, e que “distorcem” o funcionamento do dispositivo e o processamento das imagens do CCD (CMOS). Há fundamental

três componentes no “sinal” que vão contribuir com ruído e que são normalmente considerados no cálculo da razão SNR:

O **ruído fotónico** é o resultado da variação estatística da taxa de chegada dos fótons constituintes da imagem, que chegam aos fotodiodos do sensor (pixeis). Os fotoelectrões gerados dentro do dispositivo do semicondutor constituem o sinal, cuja intensidade flutua aleatoriamente com a incidência de fótons em cada pixel do CCD (CMOS). O intervalo da chegada de cada fóton é governado pela estatística de *Poisson*, e conseqüentemente o ruído fotónico é equivalente à raiz quadrada do sinal. Por vezes usamos a designação de *impulsive-shot noise*, para qualquer componente do ruído que mostre uma variação estatística similar na medida do número dos fótons recebidos durante um dado intervalo de tempo.

O **ruído negro** (*dark frame* ou *dark noise*) surge da variação estatística no número dos electrões que são gerados termicamente no interior da estrutura de silício do CCD (CMOS), que é independente do sinal gerado pelos fótons, mas depende em larga medida da temperatura do dispositivo. Ao índice de aparecimento de electrões térmicos gerados a uma dada temperatura do CCD – denominamos de corrente negra (*dark current*). Do mesmo modo que ruído fotónico, o ruído negro é governado pela relação do *Poisson* e é equivalente à raiz quadrada do número de electrões térmicos gerados durante o intervalo de tempo da integração da imagem. Arrefecer o CCD (CMOS) reduz a corrente negra de uma maneira drástica e notória, melhorando em muito o desempenho da câmara. Nas de elevado desempenho, a temperatura a que são arrefecidas (-50 °C ou -100 °C) é tal que a corrente negra é insignificante durante o intervalo de tempo típico das integrações em que está a ser aplicada.

O **ruído da leitura** é uma combinação dos componentes de ruído do sistema, próprio do processo de conversão dos transportadores das cargas geradas nos pixeis do CCD (CMOS), para um sinal de tensão e um posterior processamento e conversão de sinal analógico (tensão) a um sinal digital (número) no ADC. A base fundamental do ruído da leitura é normalmente originada no pré-amplificador do sensor e este tipo de ruído estende-se de maneira uniforme a cada pixel da imagem. Determinados tipos de ruído do amplificador do CCD dependem da frequência (depende do modo de aplicação do sensor/câmara) e a velocidade de leitura requerida determina em parte as condições do ruído da leitura e de seus efeitos práticos na razão SNR. Os sistemas nas câmaras de elevado desempenho e rendimento tem substanciais melhorias no seu *design* que reduzem drasticamente a importância e “peso” do ruído de leitura.

Para calcular a razão SNR do sistema de uma câmara digital, podemos usar a seguinte equação:

$$SNR = \frac{FQ_e t}{\sqrt{FQ_e t + Dt + N_R^2}} \quad (1)$$

onde F é o fluxo do fótons incidentes (fótons/pixel/segundo), Q_e representa a eficiência quântica do CCD (CMOS), t o intervalo de integração (em segundos), D

é o valor da corrente negra (electrões/pixel/segundo) e N_R representa o ruído de leitura (electrões *rms*/pixel).

Um exame cuidadoso da expressão indica que a equação está estruturada simplesmente como a relação do sinal total gerado durante a integração dividida pelo ruído combinado atribuído aos três componentes fundamentais do ruído. Os termos do ruído não têm qualquer correlação entre si e o denominador incorpora valores apropriados para cada componente do ruído. A raiz quadrada do sinal representa o ruído fotónico, o ruído negro é equivalente à raiz quadrada do produto da corrente negra e do tempo de integração e a raiz quadrada de N_R ao quadrado corresponde à componente do ruído de leitura.

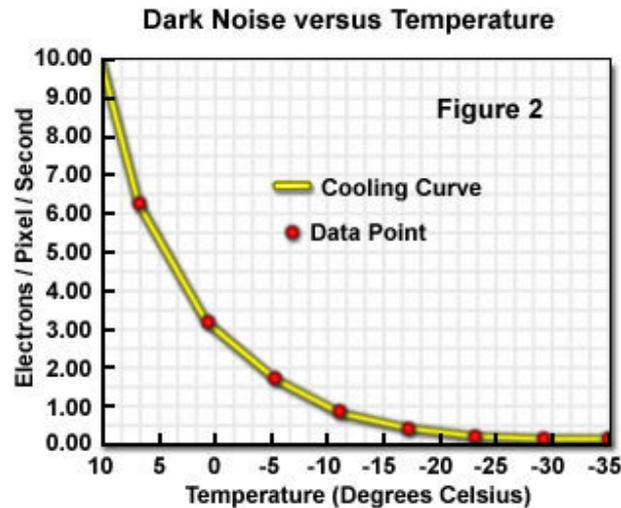
O cálculo de SNR na equação anterior pressupõe que o sinal é a única fonte de luz. Em algumas aplicações, como nos microscópios óptico ou em imagens astronómicas, podemos ter diversas fontes de iluminação (de fundo) não desejadas, como a luz reflectida no sistema de iluminação do microscópio ou o fundo do céu, que contribuem para produzir ruído. Se este for significativo, então o fluxo destes fotões de fundo (B) tem que ser adicionado à componente do ruído fotónico, vindo:

$$\text{SNR} = \frac{FQ_e t}{\sqrt{(F + B)Q_e t + Dt + N_R^2}} \quad (2)$$

Outro factor adicional a ter em consideração é que o valor do fluxo de fotões incidentes e de fotões de fundo, tal como a eficiência quântica, é função do comprimento de onda da radiação. Quando as fontes de iluminação usadas são de banda larga, o cálculo do SNR requer que os parâmetros mencionados sejam integrados ao longo dos vários comprimentos.

RUÍDO NEGRO E TEMPERATURA

São usadas diferentes aproximações para aumentar a razão SNR nos sistemas de imagem de elevado desempenho. A fim de reduzir a geração de carga térmica dentro do sensor CCD (CMOS), sob a forma de corrente negra, são utilizadas técnicas especiais na fabricação e outros modos de funcionamento. É comum refrigerar o CCD para reduzir a corrente negra a um nível insignificante, usando refrigeração termoelétrica ou criogénica, ou mesmo chegando ao extremo de usar-se nitrogénio (azoto) líquido. Geralmente o sensor CCD de elevado desempenho mostra uma redução para metade na corrente negra, por cada 8-10 graus *Celsius* de refrigeração abaixo da temperatura ambiente de funcionamento. Esta variação é denominada temperatura dobrada (*doubling temperature*). Este índice de melhoria contínua normalmente até uma temperatura de -5 °C a -10 °C, (figura 2). Para mais, num *design* electrónico e num circuito especializado, são postas em prática técnicas de filtração que usam circuitos integrados avançados e métodos da amostragem duplicada (*double simplifying methods*) para eliminar determinados componentes do ruído de leitura.



Diversos fabricantes das câmaras/sensores CCD de elevado desempenho (como a pco.imaging <http://www.vhtm.com/>), inclui uma especificação para a razão SNR, em decibéis (dB). Este valor é equivalente à razão da capacidade máxima de poço dos pixels dividida pelo número dos electrões do ruído que resultam das fontes térmicas e eléctricas do chip, e que não devem ser confundidos com o cálculo do SNR descrito. Não representa a quantificação do valor SNR em certas condições de específicas de funcionamento, mas é uma representação útil da escala dinâmica da câmara, e depende de como ela é usada. Sob condições de sinal baixo (pouca iluminação), em que o ruído da leitura é a fonte dominante do ruído, a equação completa da relação SNR apresentada anteriormente ((1) ou (2)), pode ser reduzida a uma relação mais simples, equivalente ao sinal total recolhido durante o tempo de integração dividido pelo valor do ruído de leitura, de uma forma similar às especificações da escala dinâmica a que já fizemos referência. Não obstante, o valor da escala dinâmica corresponde com a situação limite em que a capacidade de enchimento de poço do sensor é alcançada, e que se define da seguinte maneira:

$$\text{Alcance Dinâmico} = \frac{\text{Capacidade máxima de poço (electrões)}}{\text{Ruido de leitura (electrões)}} \quad (3)$$

A capacidade de enchimento de poço do CCD representa o número máximo de cargas (electrões) que podem ser armazenadas em cada pixel e determinam conseqüentemente o máximo sinal disponível numa única leitura. A razão do valor do enchimento de poço e o número de electrões do ruído de leitura por pixel definem a capacidade do dispositivo capturar sinais tanto grandes como pequenos numa imagem.

A escala dinâmica de um CCD (CMOS) e a profundidade máxima real em bit do conversor ADC da câmara estão intimamente relacionados, no sentido em que o sinal total disponível relativamente ao ruído governa o número máximo dos níveis de cinzentos em que o sinal pode ser dividido. A fim de representar diferenças muito subtis na intensidade da imagem digital é assim necessário discriminar tantos níveis de cinzentos quanto possível, e conseqüentemente a aproximação

típica consiste em igualar a conversão do ADC à profundidade da escala dinâmica do CCD. A escala dinâmica relativo à profundidade de bit determina o número de electrões que compõem cada nível de cinzentos na imagem final. É necessário considerar que o conversor ADC com uma especificação de profundidade de bit que exceda a escala dinâmica do sensor CCD (CMOS) da imagem não pode alcançar completamente seu alcance teórico da discriminação na escala de cinzentos, porque cada nível da escala de cinzentos deve corresponder no limite a uma diferença mínima de um electrão.

Como exemplo de uma solução apropriada, um CCD com uma capacidade de enchimento de poço de 18.000 electrões e um ruído de leitura de 4 electrões por pixel (num determinado índice de leitura), têm uma escala dinâmica de $18.000/4$ ou seja de 4.500. A fim de usar completamente a escala dinâmica do CCD, seria necessário uma câmara que incorporasse um conversor ADC de 12 bits, que tem a capacidade de detectar 4.096 níveis (2^{12}) na escala de cinzentos (ou seja o correspondente a 1.1 electrões por cada nível de cinzentos da escala). Se usarmos um conversor ADC de 10 bits, apenas disporemos de 1.024 níveis (2^{10}), o que corresponderá a 4.4 electrões por cada nível de cinzentos da escala. Por outro lado se uma câmara usar um conversor ADC de 14 bits, com a capacidade discriminar 16.384 (2^{14}) níveis na escala de cinzentos, será limitada pela escala dinâmica (de 4.500 níveis acessíveis de cinzentos) do CCD, e não alcançará um nível do rendimento satisfatório.

Um objectivo principal dos fabricantes de CCDs para câmaras da aplicação científica é maximizar o sinal disponível e diminuir o ruído, maximizando assim a escala dinâmica. Arrefecendo o CCD de modo a diminuir o ruído térmico, otimizando os relógios electrónicos, a amostragem e a leitura, consegue-se em algumas câmaras de elevado desempenho, reduzir o ruído associado a cada ciclo da leitura até 2-3 electrões por pixel, em taxas típicas da leitura de ordem do MHz. Com um ruído de leitura semelhante nas actuais máquinas disponíveis, o mecanismo prático restante para melhorar a escala dinâmica consiste em aumentar o nível do sinal disponível. Ainda que um desenho do sensor CCD possa incorporar pixels maiores, com poços respectivamente maiores, que podem levar a cabo esta tarefa, temos o sacrifício da resolução espacial, que é menor, a troco de uma melhoria efectiva na sensibilidade.

Como já foi mencionado previamente, a categoria geral a que nós referimos como o ruído de leitura, é composta na realidade composta por diversas fontes e a corrente negra (*dark current*) não tem unicamente uma componente média, mas este ruído mostra também ter flutuações estatísticas que contribuem para o ruído da imagem (*shot noise*). Embora haja diferentes origens do ruído, o seu efeito é sempre o mesmo: para produzir variações na intensidade da imagem (óptica). O nível dos detalhes que é requerido nas amostras do ruído de um CCD depende da aplicação e é comum ter generalizações aceitáveis para avaliar o funcionamento dos sistemas da câmara. É útil saber e considerar que a maioria das fontes do ruído, por muitas que possam ser, são na prática reduzidas a níveis insignificantes. Na análise da razão SNR às vezes é suficiente considerar o ruído do amplificador do chip, e a maioria dos fabricantes fornece esta especificação

referindo-se a ela como o ruído de leitura, electrões de ruído equivalente ou simplesmente ruído de fundo.

Visto que o ruído da leitura pode considerar-se o ruído de fundo, em relação com as fontes electrónicas, sob circunstâncias de pouca iluminação, o ruído fotónico de uma imagem constitui nesse caso a limitação fundamental natural na operação de uma câmara CCD (ou de qualquer outro sistema de detecção de luz). A incerteza no número dos fotões que se recolhem durante um período de tempo específico é governada pela estatística de *Poisson*, e consequentemente o ruído fotónico pode ser expressado em termos de electrões equivalentes, à saída do sinal, da seguinte maneira:

$$N_s = \sqrt{S} \quad (4)$$

onde N_s é o ruído e S o sinal.

Pelo exemplo, com um sinal detectado de 2.500 electrões, a relação SNR não pode exceder 2.500/50 ou 50 em um CCD ideal, que não contribua também com ruído devido à corrente negra ou aos processos da leitura do sinal.

Como o ruído fotónico de um sinal é inerente à detecção do sinal, independentemente do sensor CCD, este aspecto não é possível de ser reduzido por meio de factores no projecto da câmara. Representa basicamente o nível do ruído mínimo atingível num sistema em que o ruído de leitura e a corrente negra sejam reduzidos a níveis mínimos. Porque há uma relação de raiz quadrada entre o ruído fotónico e o sinal, o nível de ruído diminui em intensidade relativa, face a um número crescente no fluxo de fotões. Como consequência, o conveniente e aconselhável é operar um sistema de processamento de imagem sob condições que são limitadas pelo ruído fotónico, com outros componentes de ruído que estão reduzidos a um valor relativamente insignificante. Nas condições de pouca luz, e assumindo que o ruído negro (térmico) pode ser basicamente eliminado por arrefecimento do CCD), o ruído de leitura é maior que o ruído fotónico e dizemos então que a imagem está unicamente limitada pelo ruído de leitura (***read noise limited***). É possível aumentar o tempo de integração da imagem de modo a recolher mais fotões, e desse modo aumentar o valor da nossa relação SNR até ao instante em que o ruído fotónico supere tanto o ruído de leitura como o ruído negro (térmico). Para tempos de integração superiores, dizemos que a imagem está limitada pelo ruído fotónico (***photon-noise limited***).

Dentro das categorias que consideramos, há sempre um número de fontes de ruído presentes, que são possíveis de reduzir ou quase eliminar, antes da saída final do sinal, por meio do desenho do sistema ou de uma manipulação cuidadosa dentro dos limites apropriados para o específico sistema de uma câmara. O ruído fotónico e o ruído do amplificador afectam a amplitude do sinal detectado, enquanto que outras fontes de ruído não afectam a amplitude, mas produzem flutuações no seu valor de saída. As variações na intensidade da imagem, que resultam do ruído que acompanham o sinal, estão expressas na visualização da imagem, tanto nas diferenças de pixel para pixel, como em diferenças num mesmo pixel de *frame* para *frame*. Para mais, as técnicas quantitativas de processamento de imagens, baseadas em medidas precisas da intensidade do pixel, podem ser

afectadas por qualquer variação que existam nele, proveniente do ruído. De seguida veremos outras fontes de ruído que contribuem para a imagem, no funcionamento global do CCD.

O **ruído de re-inicialização** (*reset*) ocorre quando a carga recolhida em cada pixel da matriz do sensor muda (no processo de medição) do domínio da carga ao domínio da tensão (diferença de potencial eléctrico), mediante o uso de um condensador sensível seguido de um amplificador. Antes de se proceder à medição do pacote de cargas em cada pixel, o condensador do CCD é reajustado de acordo com um nível de referência. É então gerado ruído no nó de leitura, pela incerteza no nível da referência de tensão, devido às variações térmicas na resistência no transistor de reajuste (MOSFET). O nível de referência no condensador é assim diferente de pixel para pixel, e o ruído resultante é calculado da maneira seguinte:

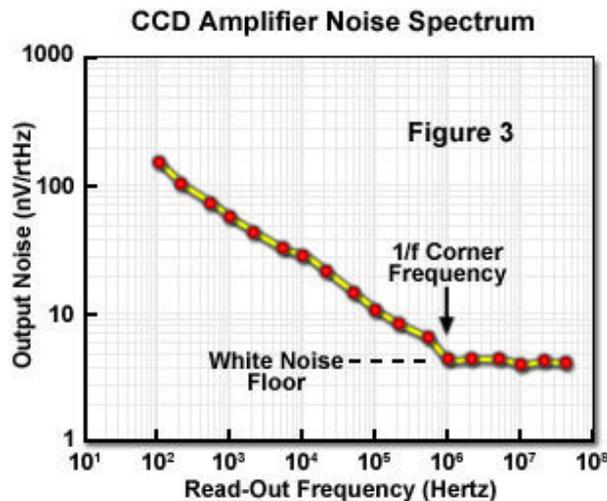
$$N_{reset} = \sqrt{4kTBR} \quad (5)$$

onde N_{reset} é a tensão do ruído no nó de medição, k é a constante de *Boltzmann* (JK^{-1}), T é a temperatura (K), B corresponde à largura de banda da potência do ruído (Hz) e R é a impedância de saída do amplificador (ohm). O ruído de re-inicialização também se pode expressar nas unidade habituais de electrões equivalentes no detector de saída, e se reestrurarmos a expressão (5) e introduzirmos a o valor fundamental para a carga do electrão, q (coulomb):

$$N_{branco}(\text{electrões rms}) = \frac{\sqrt{kTC}}{q} \quad (6)$$

onde o símbolo adicional C representa a capacidade do condensador no nó de medição (farads). Esta forma da equação é a origem do termo comumente utilizado ruído KTC, como um sinónimo de ruído de re-inicialização ou reajuste.

Como o ruído de re-inicialização pode chegar a ser significativo (próximo dos 50 electrões *rms*), a maioria das câmaras com CCDs de elevado desempenho, incorporam algum tipo de mecanismo para eliminá-lo. Uma técnica aplicada é o uso da denominada *correlated double sampling* (amostragem dupla correlacionada), em que um circuito mede a diferença entre a tensão da re-inicialização e a tensão do sinal de cada pixel, e atribui o valor resultante à carga do pixel. A etapa adicional da medição da tensão de referência do nó de saída antes da carga de cada pixel ser transferida, faz com que seja desnecessário a re-inicialização ao mesmo ao nível, para cada pixel. Existem também outros meios electrónicos disponíveis para eliminar o ruído de re-inicialização, e estes podem ser implementados tendo em conta o desenho do sistema em conjunto.



O ruído de leitura de um CCD vem de dois componentes de ruído primários no amplificador de saída, o **ruído branco** e do **ruído flicker** (cintilante). Como o transistor de re-inicialização, o amplificador de saída MOSFET tem uma resistência que gera um ruído térmico cujo valor é governado pela equação do ruído branco de *Johnson*. Podemos no entanto referirmo-nos a ele simplesmente como o ruído de *Johnson* ou como o ruído branco, já que seu valor é independente da frequência. Se se considerar que a resistência efectiva é a impedância do amplificador, o ruído branco em volt, é determinado pela seguinte equação:

$$N_{branco} (volt) = \sqrt{4kTBR_{out}} \quad (7)$$

onde R_{out} é o impedância de saída do amplificador (ohm).

O ruído branco em termos de electrões no nó de medição do CCD é equivalente ao ruído branco em volt, já definido previamente, dividido pelo produto da sensibilidade do amplificador e pelo ganho de saída, como veremos a seguir:

$$N_{branco} (electrões rms) = \frac{\sqrt{4kTBR_{out}}}{S_{amp} \times A_{amp}} \quad (8)$$

nesta equação, S_{amp} é a sensibilidade do amplificador e A_{amp} representa o ganho do amplificador. O valor da sensibilidade é uma função da carga fundamental do electrão e da capacitância do condensador do CCD e é expressa nas unidades de volt por electrão. O ganho do amplificador é simplesmente um factor multiplicador que relaciona tensão de entrada com a tensão de saída (volt/volt).

A segunda fonte do ruído relacionada com o amplificador de saída é o ruído *flicker* (cintilante), geralmente conhecido como o ruído $1/f$, devido à sua dependência inversa aproximada, em frequência. Muitos sistemas, tanto naturais quanto fabricados, mostram de alguma forma este comportamento $1/f$. Em relação ao ruído *flicker* do CCD, a variável da frequência é a taxa (velocidade de leitura do pixel). Para as câmaras em que os pixels são lidos abaixo de 1 MHz aproximadamente, e com um espectro de ruído característico de $1/f$, o mínimo do

ruído de leitura vem determinado pelo ruído $1/f$. A figura 3 mostra o espectro de ruído típico de um amplificador de CCD, determinando o ruído de saída como uma função da frequência de leitura. A redução do ruído ao ser aumentado a frequência é uma das características de um espectro $f/1$ do ruído, onde o ruído diminua com um factor de 3.16 por cada década de aumento na frequência. O ruído continua diminuindo nesta proporção até que fica estabilizado, numa frequência denominada ângulo de frequência $1/f$. A estabilização do nível de ruído com frequências mais elevadas indica que se alcançou o mínimo de ruído branco, e um índice de leitura do pixel maior do que o ângulo de frequência $1/f$ tem como resultado operações limitadas no ruído branco. Num amplificador MOSFET que produza uma curva como a da figura 3, o mínimo do ruído branco acontece aproximadamente para 4.5 nanovolt (10^{-9} V) por Hertz ao quadrado.

A origem do ruído *flicker* é devida à existência de estados de interferência no silício do sensor de imagem que ligam e desligam ao acaso, dependendo de diferentes constantes temporais. Todos os sistemas com um comportamento de $1/f$ têm captações de correntes similares no que refere a estados arbitrários de conexão e desconexão. No MOSFET, os estados são “armadilhas” na interface do óxido de silício, que aparecem devido às disfunções na malha do silício superficial. Quando os electrões são capturados nos estados da superfície, o fluxo de corrente é afectado quando se libertam que estes electrões capturados durante uma ampla variedade de períodos de emissão governados pelas diferentes constantes das “armadilhas”. As disfunções na malha do silício que levam a formar “armadilhas” na interface produzem uma distribuição dos níveis de energia nas “armadilhas” dentro da cavidade proibida. O alcance da profundidade da armadilha na interface silício - dióxido silício, e suas constantes temporais variáveis, determinam as frequências de interrupção da armadilha e produzem uma distribuição uniforme da energia ao longo da faixa de silício. A distribuição da frequência característica do espectro do ruído $1/f$ acontece porque é possível que ocorram flutuações maiores nos estados de constantes longas (frequências baixas), produzindo-se assim maiores flutuações na saída (ruído), que são possíveis nas armadilhas de constantes mais curtas (altas frequências). Podem-se utilizar diversos procedimentos diferentes no processamento do CCD para reduzir a densidade destes estados da interface, e além disso os comutadores de silício que tem determinados orientações cristalográficas tem densidades inerentes mais baixas, que os fazem mais apropriadas para o fabrico de CCDs.

A geração da corrente negra já descrita como uma fonte do ruído nas câmaras com CCD, e também se deve às imperfeições ou impurezas na malha que produzem a entrada de energia dentro da zona proibida. A corrente negra é intrínseca aos semicondutores e aparece da maneira natural quando os electrões usam a energia térmica para se mover pelas etapas intermediárias da transição entre as faixas do valência e de condução, o que lhes permite alcançar a banda de condução onde são medidos como sinal. Referimo-nos a esta origem da corrente como a corrente negra, porque é produzida mesmo quando o CCD continua na mais completa obscuridade. O índice da acumulação da corrente negra nos poços do potencial do pixel limita o tempo de integração, durante o qual se guarda o sinal

útil. Porque tem origem térmica, o modo mais eficaz para reduzir a corrente negra é refrigerar o CCD.

Há umas séries de regiões específicas num sensor CCD que contribuem para a geração de corrente negra, incluindo áreas de fibra de silício neutras exteriores ao poço de potencial do pixel, material drenado no poço de potencial e estados superficiais formados na interface silício-óxido de silício. Em termos do nível da corrente negra gerada dentro de cada região do CCD, as causas principais são o fluxo da corrente negra da região de depleção e a corrente negra da superfície, onde os estados da superfície são sem dúvida a origem dominante. O fluxo da corrente negra na ausência da geração da superfície pode ser mantido em níveis extremamente baixos. O número dos estados da superfície pode ser reduzido durante a manufactura com tratamentos térmicos e passivação com diversos materiais para diminuir o número das ligações oscilantes ou quebradas, que são causadas pela desigualdade da malha na interface epitaxial. Não obstante, os centros geradores de corrente na interface de silício-dióxido de silício são normalmente 100 vezes mais numerosos do que aqueles do material volume.

A corrente negra superficial varia muito de fabricante para fabricante, dependendo da tecnologia de processamento que se emprega no desenvolvimento da camada de óxido e de passivação, junto com outras etapas usadas após a formação do óxido. Independentemente das técnicas usadas para minimizar a formação de estados superficial, estas continuam sendo a fonte principal da corrente negra. Embora os centros superficiais da geração não possam ser completamente eliminados, a sua contribuição de corrente negra pode ser reduzida na maior parte das vezes por uma operação do CCD que se conhece como a modo invertido. Os CCDs que usam a tecnologia *multipinned phase* (MPP) operam no modo invertido, com uma corrente negra muito reduzida, o que leva a outras vantagens adicionais como a redução de dispositivos de arrefecimento.

A geração da corrente negra na interface do silício-dióxido depende tanto da densidade dos estados superficiais como da densidade dos portadores livres (cavidades e electrões) na interface. A presença de portadores livres pode encher os estados da interface e diminuir as oportunidades dos electrões “de saltar” termicamente dos estados da interface para a banda de condução, reduzindo em grande parte a corrente negra de corrente no volume. A operação do CCD num modo normal (não invertido) tem como resultado uma geração de corrente negra máxima porque a interface e o canal de sinal estão completamente esgotadas de portadores livres. Nas condições de inversão, como os empregados nos sensores MPP, muda-se o *CCD Array Clock Bias* para um estado negativo, invertendo-se assim o canal portador de sinal e causando assim “cavidades” que povoam a interface de silício-dióxido de silício. Com este esquema de transição, também denominado transição de modo de acumulação, as cavidades na capa de inversão que se forma entre a superfície e o poço do pixel combina-se com os electrões procedentes dos estados superficiais, impedindo que o poço os recolha como corrente negra. A operação no estado invertido tem um efeito significativo em muitos parâmetros do funcionamento do CCD, além da eliminação da corrente negra superficial.

Como já foi referido, a corrente negra pode ser mantida em níveis muito baixos, e a maioria desta corrente recolhida na região do poço do pixel é gerada internamente ou próximo da região de depleção dos pixels. O nível da corrente negra varia consideravelmente de fabricante para fabricante de CCDs e depende da qualidade do material do silício das “bolachas” e das técnicas de processamento usadas na manufatura do dispositivo. O nível da corrente negra que é originada no volume tem a ver fundamentalmente com defeitos do silício, e diversas técnicas de processamento, incluindo de captura, são usadas para eliminar as impurezas naquelas regiões do sensor em que se produz o sinal. Após a manufatura do dispositivo, o único mecanismo que pode reduzir o fluxo da corrente negra é refrigerar o CCD. Os brilhos (*hot pixel*) da corrente negra são manifestações de uma corrente negra anormalmente elevada originada num único pixel e pensa-se de que devem às impurezas ou às imperfeições da malha do silício. Não obstante os *hot pixels* não tem que necessariamente seguir o comportamento em temperatura, típica de outras formas da corrente negra.

Existe uma fórmula empírica, ou equação da corrente negra, para descrever a relação entre a temperatura e a corrente negra produzidas pelos sensores CCD. Isto corresponde precisamente a medidas feitas realmente à corrente negra, e é valioso para determinar a temperatura de operação requerida para eliminar a corrente negra da câmara. Foi desenvolvida a partir de uma fórmula geral da corrente negra, que se combina com uma expressão que descreve a variação da energia da cavidade de banda de silício, devido à temperatura, e um valor medido da corrente negra a uma temperatura padrão (300 K). A cavidade de banda do silício, E_g (electrão-volt), varia com a temperatura, como se descreve a seguir, onde T representa a temperatura (Kelvin):

$$E_g = 1.1557 - ((7.021 \times 10^{-4} \times T^2) / (1108 + T)) \quad (9)$$

A fórmula da corrente negra que daqui se deriva, é:

$$D = 2.5 \times 10^{15} \times A \times I_d \times T^{1.5} \times e^{E_g / 2kT} \quad (10)$$

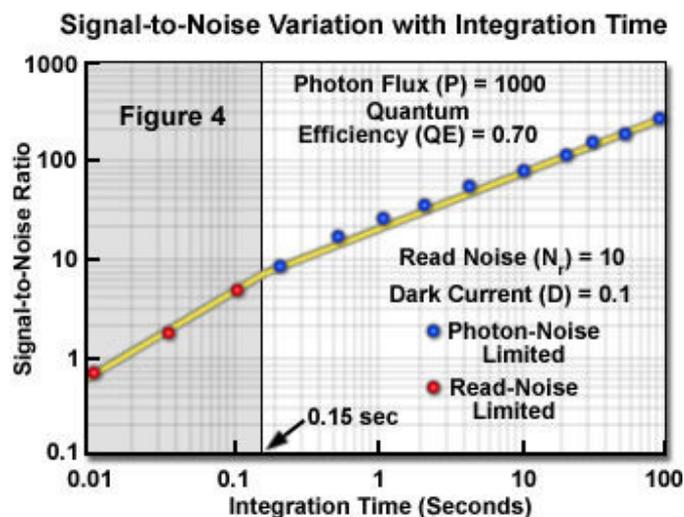
onde D é a corrente negra (electrões/pixel/segundo), A é a área de pixels (medida em centímetros quadrados), I_d é a corrente negra medida a 300 K (nanoamperes/centímetro quadrado), T temperatura (K) e E_g é a cavidade de banda à temperatura T (electrão-volt).

Há dois tipos de ruído associados à corrente negra, de ruído de disparado da corrente negra e corrente escura não-uniforme. O componente do disparo do ruído é governado pela estatística de *Poisson*, de maneira similar ao ruído fotónico no disparo, e é equivalente à raiz quadrada do sinal negro. O único mecanismo que pode reduzir ou eliminar o ruído de disparado da corrente negra é refrigerar o CCD. Os ruídos da corrente negra não-uniformes são a variação da corrente negra entre os pixels da matriz do sensor, devido ao facto que os pixels têm índices intrínsecos de geração do sinal negro ligeiramente diferentes entre si. Este tipo de ruído espacial é reduzido por meio do arrefecimento e também é possível

de ser eliminado com técnicas de processar de imagem, onde a imagem de referência negra pode ser subtraído de cada imagem. A imagem de referência negra é adquirida sob condições idênticas de temperatura, mas com o CCD fechado a toda e qualquer luz.

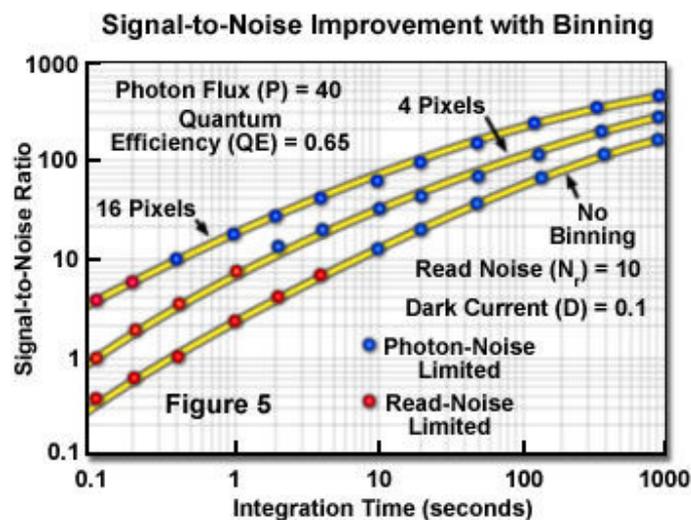
Um outro factor que produz uma não-uniformidade na saída do pixel, e cujo resultado é ruído sobreposto na imagem, é a não-uniformidade de resposta fotométrica (às vezes abreviado de PRNU *photo response non-uniformity*). Devido às variações no processo de manufactura da matriz, os pixels não têm todos a mesma sensibilidade à luz e uma imagem de um campo liso uniformemente iluminado reflectirá um desenho similar a um tabuleiro de xadrez, apenas visível ao nível do pixel individual. A técnica de processamento da imagem de campo uniforme (*flat field*) pode ser usada para eliminar este desenho causado pela variação na sensibilidade dos pixels. Isto faz com que tenhamos de captar uma imagem de correcção separadamente das imagens de trabalho, o que permite corrigir a não-uniformidade na sensibilidade dos pixels (embora o ruído de disparo seja aumentado por um factor de 1.414 ($\sqrt{2}$)). Normalmente, a não-uniformidade está na ordem dos 1 ou 2 por cento do nível médio do sinal em toda a matriz do sensor, e a relevância deste componente do ruído e do benefício para eliminá-la depende da aplicação.

O processamento do sinal acumulado e de sua transmissão até a saída do sensor CCD, requer um número de circuitos de relógio que estão sob o controle do relógio principal. O ruído do relógio pode ser o resultado da manipulação destes circuitos se houver um sinal de relógio alimentado com a forma de onda da saída. O nível do ruído do relógio aumenta com o sinal e segue uma relação pela raiz quadrada com respeito à frequência do relógio. Os sistemas das câmaras cujos relógio principais são conduzidos por um oscilador de cristal, geralmente não só mostram o ruído do relógio, mas as melhorias na sensibilidade dos sensores aumentaram à probabilidade da ocorrência do sinal do relógio alimentado por eles.



O número limitado de fótons disponíveis para a formação da imagem é um factor crítico em muitas técnicas de fluorescência microscópica e em astronomia, e os sistemas das câmaras com CCDs de elevado desempenho são projectadas para especificamente alcançar um modo de manejo do ruído fotónico limitado, em níveis de sinal muito mais baixos do que nas câmaras convencionais, que normalmente nunca alcançam um funcionamento de ruído fotónico limitado (e uma relação SNR elevada) em níveis baixos de luz.

A figura 4 representa um *plot* da relação SNR em função do tempo de integração numa câmara CCD de elevado desempenho, projectada para digitalizar imagens com níveis baixos de sinal, com um fluxo de fótons e características do sensor com os valores que estão no gráfico. Num *plot* deste tipo, podemos identificar rapidamente uma região limitada pelo ruído de leitura e uma região limitada pelo ruído fotónico, separado durante o tempo de exposição, pelo que o ruído fotónico começa a superar o ruído de leitura (aproximadamente 0.15 segundos para os valores do sensor e o fluxo luminoso especificado no gráfico). Devido à relação da raiz quadrada entre o ruído fotónico e o sinal, esta divisão entre as duas regiões acontece durante um tempo de exposição para que o sinal total detectado pelo pixel é aproximadamente o quadrado do valor do ruído da leitura. Por exemplo, com uma especificação de um ruído de leitura de 5 electrões *rms* por pixel, ruído fotónico passa a ser a fonte de ruído dominante se o tempo de exposição for suficiente para obter mais do que 25 fótons detectados pelo pixel no fluxo de fótons incidentes existente. A transição entre os dois regimes de ruído dominantes supõe que o ruído negro é insignificante, algo normal na manipulação dos sistemas de digitalização das imagens com o CCDs de grau científico, embora outras situações sejam possíveis. A manipulação em níveis elevados da corrente negra altera a importância dos valores relativos do ruído de leitura e do ruído fotónico sob determinadas condições, e naquelas circunstâncias o ruído negro pode superar tanto o sinal como outros componentes do ruído.



Muitas câmaras com sensores CCD de grau científico permitem implantar uma função de *binning* como outro mecanismo para aumentar a relação SNR. Será

necessário considerar que esta técnica implica sacrificar a parte da resolução espacial, além a um aumento simultâneo na corrente negra. Com a melhoria da relação SNR do CCD, o sistema de digitalização da imagem pode alcançar condições do ruído fotónico limitado a um nível de luz mais baixa e/ou um tempo de integração mais curto. Alguns sistemas usam automaticamente um modo de *binning* do pixel para a visualização no monitor, vista preliminar da imagem e assim fornecer uma imagem mais brilhante, com taxas muito rápidas, o que facilita um enquadramento mais rápido. A figura 5 mostra o efeito de diferentes valores de *binning* nas curvas que representam a variação da relação SNR com o tempo de exposição. A equação que é usada para calcular a relação SNR modifica-se para explicar o *binning*, como se mostra abaixo:

$$SNR = MPQ_e t / \sqrt{MPQ_e t + MDt + N_r^2} \quad (11)$$

nesta equação modificada, **M** representa o número de *binned* pixels, e supõe-se que o sinal em cada um destes pixels é o mesmo. As três curvas representam as mesmas especificações do CCD, como se indica no gráfico, para uma intensidade muito baixa do sinal da amostra, produzindo um fluxo de 40 fotões por segundo incidentes no sensor. Sem *binning* requer-se um tempo de exposição de 4 segundos, aproximadamente, para alcançar um nível de sinal de ruído fotónico limitado. Executando um *binning* de 16 pixels o valor SNR alcançado e número total dos fotões detectados pelo pixel equivalente com um tempo de exposição de somente 0.25 segundos (ver figura 4), o que permite actualizar uma inspecção prévia da imagem com uma taxa de imagens que permite o posicionamento e foco da mesma. Um outro factor é que uma imagem adquirida com um tempo de integração de 4 segundos terá uma melhoria de 5 vezes no valor SNR se for usado *binning* de 16 pixels na comparação com a maneira simples (sem *binning*). Em muitas situações, e especialmente em baixos níveis de luz, os benefícios na redução de ruído e na melhoria resultante no contraste da imagem são maiores do que a perda de definição espacial, que em teoria é inerente ao processo de *binning* de pixels.

Bibliografia:

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