JSST
Journal of Space Science & Technology

Vol. 2, No. 5, Fall 2009 and Winter 2010

Satellite Camera CCD Read-out System Design, Based on Noise Optimization with Respect to Satellite Limitations

H. Bazrafshan[1*], S. Baradaran Shokouhi[2], B. Ghorbani Vagheii[3]

1, 2 and 3. Iran University of Science and Technology

* Narmak, Tehran, IRAN

HashemBazrafshan@yahoo.com

Satellite camera Charged Coupled Device (CCD) read out system needs a high Signal to Noise Ratio (SNR). This is because of the special and inevitable space imaging payload noises. These noises include CCD noises, satellite noises such as lack of complete stability, and environmental noises such as atmospheric interferences, charged particles, relative earth and satellite movement and electromagnetic interferences. CCD noises because of their low output voltage compose the main part of the final read out system noise. Therefore if the CCD read out system is not designed properly, SNR declines significantly. These noises depend on CCD characteristics and design parameters such as temperature and frequency. On the other hand, in a satellite temperature and frequency range is partially controllable. The algorithm presented in this paper, with respect to the applied limitations and dependencies, designs the system parameters so that the optimized SNR is achieved.

Keywords: LEO satellite camera, CCD Read Out System, CCD Noises, Satellite Limitations, Design Parameters

---

1. M.Sc. of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology (Respected Author)
2. Professor of Electrical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology
3. Professor of Railway Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology

JSST
جلد ۲/ شمارهٔ ۵ / پاییز و زمستان ۱۳۸۸
ص. ص ۲۶- ۱۹

طراحی سیستم خواندن CCD دوربین ماهواره، براساس بهینه‌سازی نویز و با در نظرگرفتن محدودیت‌های ماهواره

هاشم بذرافشان[1*]، شهریار برادران شکوهی[2] و بهمن قربانی واقعی[3]

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار، دانشکدهٔ مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، نارمک، خ فرجام

HashemBazrafshan@yahoo.com

سیستم خواندن CCD (Charged Coupled Device Read-Out System) دوربین ماهواره‌ها، نیازمند نسبت سیگنال به نویز بالا یی است. علت این مسئله، وجود نویزهای خاص و اجتناب‌ناپذیر محموله تصویربرداری فضایی است. این نویزها شامل نویزهای CCD، نویزهای ماهواره مانند عدم پایداری کامل ماهواره و نویزهای محیطی مانند تداخل اتمسفر، ذرات باردار، حرکت زمین و ماهواره نسبت به هم، و تداخل‌های الکترومغناطیس است. نویزهای CCD به دلیل ولتاژ کم خروجی آن بخش عمدهٔ نویز نهایی سیستم خواندن را تشکیل می‌دهند. این وضعیت سبب می‌شود که در صورت طراحی نامناسب مدار خواندن CCD، سیگنال به نویز دوربین دچار افت شدیدی شود. این نویزها به پارامترهای CCD و پارامترهای طراحی مانند دما و فرکانس وابسته است. از طرف دیگر محدودهٔ تغییرات دما و فرکانس در ماهواره را تا حدودی می‌توان کنترل کرد. الگوریتم ارائه شده در این مقاله، با ملاحظهٔ کلیه محدودیت‌ها و وابستگی‌های عملی، پارامترهای سیستم را به شکلی طراحی می‌کند که نسبت سیگنال به نویز بهینه حاصل شود.

واژه‌های کلیدی: دوربین ماهواره LEO، مدار خواندن CCD، نویزهای CCD، محدودیت‌های ماهواره، پارامترهای طراحی

مقدمه

ماهواره‌های مدار پایین[1] با حرکت در مدارهای نزدیک زمین از سطح زمین تصویربرداری می‌کنند. هنگام تصویربرداری، عواملی مانند جو، فضا، فاصلهٔ دور دوربین از زمین، و میزان پایداری ماهواره سبب تولید نویز و در نتیجه کاهش قابلیت تفکیک تصویر می‌شوند.

در دوربین این ماهواره‌ها، آشکارسازهای CCD به علت ضریب انباشتگی بالا و بازدهی کوانتومی عالی مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. نویزهای CCD به سه دسته قابل تقسیم هستند. دسته اول، مربوط به شکل‌گیری بار در CCD در اثر فوتون‌هاست، که همان نویز شات فوتون‌هاست. دستهٔ دوم، مربوط به انتقال بار در CCD و تبدیل بار به ولتاژ در خروجی CCD است. نویز جریان تاریک، نویز ریست نیز به این نویزها اضافه می‌شوند. اما دسته سوم نویزهای CCD، مربوط به مدارهای خواندن است که شامل نویز سفید و فلیکر است [۲]. اگرچه عدد نویز[2] نهایی مدار الکترونیک، حاصل ضرب تمامی این عدد نویزهاست که بر کلیه نویزهای

1. Low Earth Orbit (LEO)

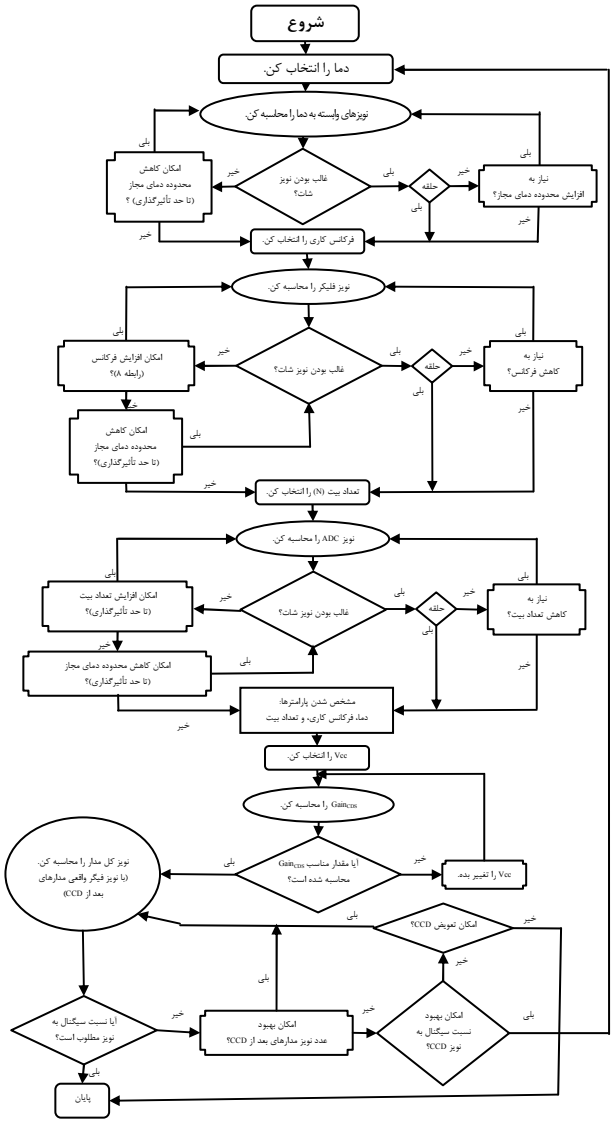
2. Noise figure

سیستم تأثیرگذار هستند، اما به علت ولتاژ پایین سیگنال خروجی CCD، نویزهای این قسمت تأثیر بسیار زیادی در نسبت سیگنال به نویز نهایی خواهند داشت. نقطه ورود این نویزها به سیستم، خروجی CCD است[۳]. هدف این مقاله، طراحی مداری است که بتواند نسبت سیگنال به نویز بهینه را در این نقطه، از CCD دریافت کند و بدین وسیله سیگنال به نویز نهایی مدار را بهبود بخشد؛ به این مدار الکترونیکی، مدار خواندن CCD گفته می‌شود.

به منظور کاهش نویز، اطلاع از منشأ نویز و پارامترهای مؤثر در آن ضروری است. روش‌های مختلف طراحی پارامترهای طراحی برای کاهش نویزهای CCD بیان شده است. اما انتخاب راه‌حل مناسب می‌تواند در مجموع سیگنال به نویز بهینه را ایجاد کند. برای مثال به منظور کاهش نویز تاریک، دو پارامتر قابل تغییر دما و زمان انتگرال‌گیری وجود دارد [۴]. دمای کمتر از ۲۰۰ درجهٔ کلوین عملاً باعث صرفنظر کردن نویز تاریک می‌شود [۵]، اما ممکن است شرایط سیستم، نتواند چنین دمایی را فراهم کند، بنابراین باید زمان انتگرال‌گیری را تا حد ممکن کاهش داد. نویز ریست، نویز خازن مبدل بار به الکترون CCD است [۶] و با مکانیزم CDS قابل حذف است [۷]. CDS علاوه بر حذف این نویز، نویز فلیکر را نیز کاهش می‌دهد [۸]. با توجه به وابستگی نویز سفید مدارهای خواندن به خازن ورودی، می‌توان با افزایش خازن این نویز را کاهش داد. اما کاهش یا افزایش هر یک از این پارامترها، بستگی به نوع سیستم و محدودیت‌های آن دارد.

نویزهای CCD، وابستگی زیادی به پارامترهای مختلف سیستم دارند (جدول ۱) و باید به این نکته نیز توجه داشت که طراحی سیستم‌های فضایی، با محدودیت‌های زیادی همراه است. محدودیت دما، وزن، حجم، و ملاحظات تشعشعی عواملی هستند که راه را برای طراحی دلخواه بسته، و مقادیر بسیاری از این پارامترها را در محدوده‌ای خاص به ما تحمیل می‌کنند. پس برقرارکردن نوعی مصالحه در انتخاب پارامترها ضروری است. اما همانگونه که گفته شد، نویزهای CCD وابستگی به پارامترهای مختلفی دارند که تغییر هر یک بر روی دیگری نیز تأثیر می‌گذارد. برای مثال افزایش زمان انتگرال‌گیری از یک سو قدرت سیگنال خروجی را افزایش می‌دهد، که این مسئله در ظاهر باعث افزایش سیگنال به نویز می‌شود، اما افزایش این زمان از سوی دیگر نویز جریان تاریک و نویز شات را افزایش می‌دهد و پایداری هدف‌گیری بیشتری را برای ماهواره ایجاب می‌کند. لذا طراحی این سیستم با نویز بهینه با ملاحظهٔ تمامی نویزها، پارامترها، و محدودیت‌ها دشوار است.

در این مقاله، ابتدا نویزهای مختلف CCD به همراه روابط مربوطه آورده می‌شود؛ سپس وابستگی این نویزها به پارامترهای طراحی بررسی و نحوهٔ تغییرات پارامترهای مدار به منظور کاهش این نویزها به کمک روابط ریاضی محاسبه خواهد شد. سپس با ارائهٔ معیاری برای بهینه‌سازی نویز در سیستم، به طراحی الگوریتمی برای محاسبهٔ پارامترهای طراحی خواهیم پرداخت. این الگوریتم به شکلی مستقیم و سرراست با ملاحظهٔ تمامی محدودیت‌ها، با برقرار کردن مصالحه‌ای بین این پارامترها، پارامترهای طراحی را برای رسیدن سیگنال به نویز بهینه تعیین می‌کند. در پایان، با شبیه‌سازی به کمک متلب، پارامترها و نویزهای یک سیستم طراحی شده با این الگوریتم محاسبه می‌شود و کارایی الگوریتم نشان داده می‌شود.



شکل ۱- نمودار گردشی الگوریتم طراحی بهینهٔ مدار خواندن CCD

بررسی و محاسبهٔ نویزهای مختلف CCD

در طراحی مدار خواندن CCD دو نوع نویز حائز اهمیت است: نویزهای CCD و نویزهای مدارهای خواندن CCD. در این قسمت به بررسی این نویزها خواهیم پرداخت.

نویزهـای CCD: ایـن نویزهـا در خـود CCD تولیـد و در سیگنال خروجی آن ظاهر می‌شوند. فهرست این نویزها و وابستگی آنها به پارامترهای طراحی در جدول (۱) آورده شده است. در این قسمت به بررسی این نویزها خواهیم پرداخت.

جدول ۱- منشأ نویزهای CCD و وابستگی آنها به پارامترهای طراحی

منشأ	وابستگی به سایر پارامترها	وابستگی به CVF	وابستگی به دما	نویز
نویز حرارتی مقاومت گره حسگر	خازن گره حسگر	✓	✓	ریست (Reset)
رسیدن تصادفی الکترون‌ها	سیگنال		-	شات (Shot)
الکترون‌های تولید شده در اثر حرارت	مساحت پیکسل ناخالصی، زمان	✓	✓	تاریک (Dark)
غیریکنواختی پیکسل‌ها	ساختارپیکسل‌ها	-	-	غیر یکنواختی پیکسل‌ها
غیریکنواختی پیکسل‌ها	ساختار پیکسل‌ها	-	-	غیریکنواختی جریان تاریک

۱. **نویز ریست:** این نویز، از جنس نویز حرارتی و مربوط به نویز حرارتی مقاومت گرهٔ حسگر (گیت ترانزیستوری که بارهای جمع‌آوری شده در CCD را به ولتاژ تبدیل می‌کند) است. روش حذف این نویز در قسمت حذف نویز ریست در این مقاله آورده شده است.

۲. **نویز شات:** این نویز، از جنس نویز شات و مربوط به حرکت تصادفی الکترون‌ها در هنگام رسیدن به گرهٔ حسگر CCD است. چون نویز شات مربوط به حرکت ذاتی و طبیعی الکترون‌هاست، نمی‌توان بر آن غلبه کرد.

۳. **نویز تاریک:** این نویز، ناشی از الکترون‌های تولید شده بر اثر حرارت در CCD است و همواره از چالش‌های اصلی نویز در CCD محسوب می‌شود. در مورد نحوهٔ کاهش این نویز، در قسمت کاهش نویز توضیح داده خواهد شد؛ اما به هر حال همواره بهترین راه کاهش این نویز، کاهش دماست.

۴. **نویز غیریکنواختی پیکسل‌ها:** مسلماً در دنیای واقعی نمی‌توان CCD را به‌گونه‌ای ساخت که تمامی پیکسل‌های آن کاملاً یکسان باشند. عدم یکسان بودن اندازه، بهرهٔ کوانتومی (QE)، ناخالصی‌ها، و تله‌های بار در پیکسل‌ها، باعث تولید ولتاژهای مختلف در شرایط شدت نور و زمان نوردهی یکسان در آنها می‌شود. این اختلاف را می‌توان با برداشت یک تصویر از یک منبع نور کاملاً موازی و دارای شدت یکسان و ساختن ماتریس اختلاف پیکسل‌ها رفع کرد. این ماتریس از تصاویر برداشته شده توسط CCD کم می‌شود. به این تکنیک نرم افزاری، هموارکردن[1] گفته می‌شود [۹].

۵. **نویز غیر یکنواختی جریان تاریک:** اگرچه تمامی پیکسل‌ها در اثر حرارت، تولید الکترون‌های نویز تاریک می‌کنند، اما تعداد این الکترون‌های تولیدی، در پیکسل‌های مختلف به علت عدم یکسانی کامل پیکسل‌ها تفاوت دارد. می‌توان در شرایط کاملاً تاریک، تصویری را توسط CCD برداشت و این تصویر را مانند ماتریسی، از تصاویر گرفته شده توسط CCD کم کرد. به این تکنیک نرم‌افزاری، کم‌کردن فریم تاریک[2] گفته می‌شود[۹].

۶. **نویزهای مدارهای خواندن CCD:** علاوه بر نویزهای CCD، مدارهای الکترونیکی بیرون CCD نیز مسلماً دارای نویز هستند. مهم‌ترین و تأثیرگذارترین این نویزها، به غیر از نویزهای عناصر مدار، در جدول (۲) آورده شده است[۳].

۷. **نویز سفید:** این نویز که از جنس نویز حرارتی است، ناشی از مقاومت‌های گرهٔ خروجی CCD است. همان‌طورکه گفته شد؛ بهترین راه کاستن این نویز، کم‌کردن دماست. همچنین می‌توان با افزایش خازن از دید گرهٔ خروجی CCD نیز این نویز را کاهش داد. در قسمت کاهش نویز، در این مورد توضیح داده خواهد شد.

۸. **نویز فلیکر:** این نویز، در مدارهای دیجیتال، که در آنها عناصر در حال خاموش و روشن شدن هستند، ایجاد می‌شود. در بخش بعد دربارهٔ کاهش این نویز نیز مطالبی آمده است.

۹. **نویز تبدیل آنالوگ به دیجیتال (ADC):** در هر سیستم دیجیتال، با کوانتیزه‌کردن ولتاژهای آنالوگ، مقداری از اطلاعات حذف می‌شود. در مدار خواندن CCD، این اطلاعات همان ولتاژ خروجی CCD است، که اندازهٔ آن معرف رنگ یا شدت نور هر پیکسل CCD است. در مورد کاهش این نویز نیز توضیح داده خواهد شد.

جدول ۲- نویزهای مدارهای خواندن CCD [۳]

منشأ	وابستگی به سایر پارامترها	وابستگی به CVF	وابستگی به دما	نویز
نویز حرارتی مقاومت‌های خروجی	خازن گره خروجی	-	✓	سفید(White)
خاموش و روشن‌شدن عناصر	فرکانس	-	-	فلیکر(Flicker)
تبدیل آنالوگ به دیجیتال (ADC)	تعداد بیت	-	-	تعداد بیت تبدیل آنالوگ به دیجیتال
نویز فیگر مدارها	-	-	✓	مدار خارجی

1. Flat fielding

2. Dark frame subtraction

فرمول محاسباتی نویزهای گفته شده در روابط (۱) تا (۶) آورده شده است [۳].

$$Reset\ Noise = \frac{\sqrt{K.T.C_{sense}}.CVF}{q} \quad (۱)$$

$$Shot\ Noise = \sqrt{S.CVF} \quad (۲)$$

$$Dark\ Noise = \sqrt{2.5\times10^{15}.A_d.I_d.e^{\frac{-E_{g(silicon)}}{2KT}}.t_{int}}.CVF \quad (۳)$$

$$White\ Noise = \sqrt{K.T/C_{tot}} \quad (۴)$$

$$Flicker\ Noise = \sqrt{V_{cc}^2/f} \quad (۵)$$

$$ADC\ Noise = \frac{V_{cc}}{2^N.\sqrt{12}} \quad (۶)$$

در این روابط، K ثابت بولتزمن، T دمای کلوین، q بار الکترون، f فرکانس، Vcc تغذیه، N تعداد بیت دیجیتال‌کردن، S سیگنال خروجی CCD، Csense خازن گره حسگر، CVF فاکتور تبدیل CCD، Ad مساحت هر پیکسل CCD (cm2)، Id جریان تاریک CCD در دمای ۳۰۰ درجه کلوین، Eg شکاف انرژی سیلیکون، Ctot خازن از دید گرهٔ خروجی CCD، و tint زمان انتگرال‌گیری CCD است.

برای تغییردادن پارامترها به منظور رسیدن به نویز کمتر موانعی وجود دارد. ما این موانع را به سه دسته محدودیت‌های ماهواره، محدودیت‌های CCD، و محدودیت‌های مداری تقسیم می‌کنیم. در این قسمت به بررسی روش‌های کاهش نویز در سیستم خواندن CCD با توجه به این سه دسته محدودیت خواهیم پرداخت.

کاهش نویز با بررسی محدودیت‌های اعمالی ماهواره

۱. **دما:** همانگونه که در جدول (۱) و (۲) و فرمول محاسباتی نویزها دیده می‌شود، دما بر روی نویزهای ریست، تاریک، سفید، و نویز مدارات خواندن CCD تأثیر دارد. کاهش دما، همواره باعث کاهش تمامی این نویزها می‌شود. پس همواره بایستی در طراحی سیستم، دما را تا حد ممکن و تا حد محدودیت‌های ماهواره پایین نگه داشت.

۲. **زمان انتگرال‌گیری:** افزایش زمان انتگرال‌گیری، طبق رابطه (۲) و (۳) نویز تاریک و شات CCD را افزایش می‌دهد. اما این افزایش از سویی نیز به افزایش میزان سیگنال خروجی CCD طبق رابطهٔ (۷) و (۸) منجر می‌شود. این روابط میزان سیگنال خروجی CCD را بر حسب پارامترهای مختلف آن می‌دهد. در این رابطه، ne تعداد الکترون‌های خروجی از آشکارساز، Lq رادیانس فرودی روی سیستم اپتیکی، F نسبت کانونی (F=f/D)، h ثابت پلاک، C سرعت نور، Toptics عبور سیستم اپتیکی، λ طول موج، و QE بازدهی کوانتومی CCD هستند.

$$n_e = \frac{\pi A_d}{4\,hcF^2}\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} L_q(\lambda).QE(\lambda).T_{optics}(\lambda).t_{int}.\lambda.\Delta\lambda \quad (۷)$$

$$S = n_e \times CVF \quad (۸)$$

با n برابر شدن t_{int}، نسبت سیگنال به نویز مطابق رابطهٔ (۹) افزایش می‌یابد. در این رابطه، α سایر پارامترهای اندازهٔ سیگنال CCD به غیر از زمان انتگرال‌گیری، β اندازهٔ سایر نویزها، و γ اندازهٔ سایر پارامترهای نویز تاریک به غیر از زمان انتگرال‌گیری است. در حقیقت این سه پارامتر مستقل از زمان انتگرال‌گیری هستند.

$$SNR = \frac{\alpha\times(n\times t_{int})}{\beta+\sqrt{n\times S.CVF}+\gamma\sqrt{(n\times t_{int})}} \quad (۹)$$

$$\Rightarrow SNR = \frac{\alpha\times t_{int}}{\beta/n + 1/\sqrt{n}\,(\sqrt{S.CVF}+\gamma\sqrt{t_{int}})}$$

پس برای رسیدن سیگنال به نویز بهتر، تا حد امکان باید زمان انتگرال‌گیری را افزایش داد. اما هر ماهواره مقدار پایداری و دقت هدف‌گیری محدودی دارد، که این مسئله حداکثر زمان انتگرال‌گیری را که می‌توان انتخاب کرد، محدود می‌کند.

۳. **تعداد بیت دیجیتال‌کردن (N):** با توجه به نویز ADC (رابطهٔ (۶))، با افزایش تعداد بیت، این نویز کاهش می‌یابد. اما باید به این نکته توجه داشت که افزایش تعداد بیت، باعث افزایش حجم اطلاعات تصویر در ماهواره می‌شود. این اطلاعات باید به طور کامل به زمین ارسال شود. ارسال حجم بیشتر اطلاعات هم نیازمند نرخ ارسال بالاتر و هم توان بیشتر است. لذا هنگام تعیین تعداد بیت دیجیتال‌کردن، باید به محدودیت‌های حجم ارسالی اطلاعات ماهواره و توان موردنیاز توجه داشت.

کاهش نویز با بررسی محدودیت‌های CCD

خازن گرهٔ حسگر و فاکتور تبدیل (CVF)، مطابق رابطهٔ (۱۰) با یکدیگر در ارتباطند. در این رابطه A ضریب تقویت امپلی‌فایر CCD است.

$$\frac{q}{C_{sense}}\times A = S \Rightarrow CVF = S/q = \frac{A}{C_{sense}} \quad (۱۰)$$

کاهش خازن گرهٔ حسگر و در نتیجهٔ آن افزایش فاکتور تبدیل از سویی طبق روابط (۱) و (۲) و (۳) نویزهای ریست، شات و تاریک

را افزایش می‌دهد (مجموع این نویزها با فرض ۱/n برابر شدن خازن گره حسگر و معادل آن n برابر شدن فاکتور تبدیل، در رابطهٔ (۱۱) محاسبه شده است)، اما این کاهش از سوی دیگر سیگنال خروجی CCD را افزایش می‌دهد (رابطهٔ (۸)). مقدار سیگنال خروجی CCD با همان فرض قبلی، در رابطهٔ (۱۲) آمده است. در نهایت ۱/n برابر شدن خازن گرهٔ حسگر، طبق رابطهٔ (۱۳) باعث افزایش سیگنال به نویز می‌شود. در این فرمول‌ها نیز α، β، γ، و B سایر پارامترهای سیگنال و نویز مستقل از اندازهٔ خازن گرهٔ حسگر و فاکتور تبدیل هستند.

$$Noise=\sqrt{K.T.\frac{1}{n}.C_{sense}}.\frac{A}{\frac{1}{n}.C_{sense}}+\sqrt{\frac{q.A}{\frac{1}{n}.C_{sense}}.\frac{A}{\frac{1}{n}.C_{sense}}}+B.\frac{A}{\frac{1}{n}.C_{sense}} \quad (11)$$

$$Signal = \frac{q.A}{\frac{1}{n}.C_{sense}} \quad (12)$$

$$SNR = \frac{\alpha \times n}{\beta+\gamma.\sqrt{n}+\delta.n} = \frac{\alpha}{\frac{\beta}{n}+\frac{\gamma}{\sqrt{n}}+\delta} \quad (13)$$

در نتیجه انتخاب CCD با فاکتور تبدیل بالاتر، نسبت سیگنال به نویز بالاتری را نیز نتیجه می‌دهد. البته شرکت‌های سازنده، اکثراً این پارامتر را ارائه نمی‌دهند. مقدار مطلوب این پارامتر را می‌توان از ولتاژ اشباع CCD و میزان تابش لازم برای آن استنباط کرد.

افزایش مساحت هر پیکسل CCD، مطابق روابط (۲) و (۳) و (۷) هم منجر به افزایش نویز شات و تاریک و هم منجر به افزایش سیگنال خروجی CCD می‌شود. اما مطابق رابطهٔ (۱۴) افزایش مساحت پیکسل‌ها در نهایت باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌شود. (مساحت پیکسل‌ها n برابر فرض می‌شود). در این رابطه، α سایر پارامترهای سیگنال خروجی CCD به غیر از مساحت پیکسل‌ها، β سایر نویزها، و γ سایر پارامترهای نویز شات و تاریک به غیر از مساحت پیکسل‌هاست.

$$SNR = \frac{\alpha.n.A_d}{\beta+\gamma.\sqrt{n.A_d}} = \frac{\alpha.A_d}{\frac{\beta}{n}+\frac{\gamma}{\sqrt{n}}.\sqrt{A_d}} \quad (14)$$

در نتیجه انتخاب CCD با ابعاد بیشتر پیکسل‌ها نیز در نسبت سیگنال به نویز خروجی تأثیر مثبت دارد.

از پارامترهای بسیار مهم CCD بهرهٔ کوانتومی آن است. این پارامتر بیانگر در صد فوتون‌هایی است که بر اثر برخورد به CCD، موفق به تولید الکترون می‌شوند. مسلماً هر چه بهرهٔ کوانتومی CCD بالاتر باشد، سیگنال خروجی قوی‌تر و در نتیجه سیگنال به نویز بهتری حاصل می‌شود. البته شرکت‌های سازنده، اکثراً این پارامتر را نیز ارائه نمی‌دهند. مقدار مطلوب این پارامتر را نیز مجدداً می‌توان از ولتاژ اشباع CCD و مقدار تابش لازم برای آن استنباط کرد.

در زمینهٔ انتخاب CCD صرفنظر از محدودیت‌های تکنولوژیکی، شرط دارا بودن خصوصیات فضایی مناسب، همواره انتخاب‌ها را محدود می‌کند.

کاهش نویز با بررسی محدودیت‌های مداری

۱. خازن از دید گرهٔ خروجی CCD و فرکانس کاری مدار: همانگونه که در روابط (۴) و (۵) دیده می‌شود، افزایش خازن از دید گرهٔ خروجی CCD و فرکانس کاری مدار، به کاهش نویزهای سفید و فلیکر می‌انجامد. اما برای انجام این کار باید به دو نکته توجه داشت: نکتهٔ اول: فرکانس کاری CCD و نیز فرکانس کاری عناصر مجتمع با نویز کم، محدود است. نکتهٔ دوم: افزایش این خازن طبق رابطهٔ (۱۵) ثابت زمانی مدار را افزایش می‌دهد. در این رابطه، R_o مقاومت خروجی CCD است (مقاومت ورودی مدار خواندن CCD مسلماً در مقایسه با مقاومت خروجی CCD بسیار بزرگ‌تر است).

$$\tau = R_o \times C_{tot} \quad (15)$$

با توجه به این رابطه و حداکثر فرکانس کاری مدار، ارتباط خازن و فرکانس کاری مطابق رابطهٔ (۱۶) محاسبه می‌شود (زمان قرار مدار، ۴ برابر ثابت زمانی درنظرگرفته می‌شود).

$$\frac{1}{f} > 4 \times R_o \times C_{tot} \quad (16)$$

با توجه به رابطهٔ (۱۶) محدودهٔ مجاز انتخاب خازن و فرکانس کاری به‌دست می‌آید. اما مقدار نمودار سیگنال به نویز بر حسب تغییرات خازن و فرکانس یک کمینه دارد. مقدار خازن و فرکانس برای رسیدن به این کمینه از رابطهٔ (۱۷) و (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$C_{tot} = \sqrt{\frac{K.T}{R_0}}.\frac{1}{2.V_{cc}} \quad (17)$$

$$f = \frac{1}{4.R_0.C_{tot}} \quad (18)$$

Vcc: همانگونه که در روابط (۵) و (۶) دیده می‌شود، کاهش Vcc تا حد امکان، نویز را کم می‌کند.

معیار بهینه بودن نویز

واضح است که نویز را نمی‌توان کاملاً از مدارهای الکترونیکی حذف کرد، اما می‌توان آن را بهینه کرد. همانگونه که گفته شد نویز شات، نویز ذاتی نیمه‌هادی‌ها و ناشی از حرکت اتفاقی الکترون‌هاست. به علت طبیعی‌بودن این نویز، نمی‌توان بر آن غلبه کرد. اگر در یک سیستم نویز غالب نویز شات باشد، نسبت سیگنال به نویز در آن

سیستم بهینه است [۱۰]. برای غالب بودن نویز شات، حداکثر مقدار مجاز مجموع نویزها[1]، را ۰/۱ متوسط نویز شات درنظر می‌گیریم (رابطهٔ ۱۹). متوسط نویز شات در این رابطه در واقع مقدار متوسط انتگرال نویز شات در حالتی است که حداکثر سیگنال خروجی CCD برابر V_{sat} (ولتاژ اشباع) باشد.

$$TotalNoise \quad < 0.1 \times \frac{2}{3} \cdot \sqrt{V_{sat} \cdot CVF} \qquad (۱۹)$$

الگوریتم طراحی پارامترهای سیستم

در قسمت‌های قبلی، نویزهای مختلف CCD و سایر نویزهای مدار مورد بررسی قرارگرفت و وابستگی آنها به پارامترهای طراحی و نحوهٔ کم‌کردن هر یک از آنها توضیح داده شد. اما همانگونه که دیده شد، به علت وجود پارامترهای مختلف در نویزها و وابستگی بعضاً مشترک و معکوس یکدیگر مقدار نویزها به برخی پارامترها، طراحی بهینهٔ نویز با درنظرگرفتن محدودیت‌های ماهواره مشکل است. در این قسمت سعی شده است، الگوریتمی سرراست با روشی مشخص برای طراحی و انتخاب پارامترهای سیستم ارائه شود. اصول کلی این الگوریتم مطابق زیر است:

- غالب‌بودن نویز شات
- محدودیت‌های ماهواره
- عدم اعمال محدودیت‌های غیرضروری بر روی پارامترهای طراحی
- نویزهای غیریکنواختی پیکسل‌ها و جریان تاریک، با توجه به تکنیک‌های نرم‌افزاری گفته شده، هر کدام به صورت تنها یک مضرب $\sqrt{2}$ در نویز کل ظاهر می‌شوند.
- انتخاب مقدار بهینهٔ پارامترها: در این الگوریتم هرگاه مقدار یک پارامتر به اندازه‌ای رسید که مثلاً اضافه کردن بیشتر آن تأثیری در نویز مربوطه یا نویز کلی سیستم ندارد، از اضافه یا کم‌کردن آن خودداری کرده و همان مقدار را برای پارامتر انتخاب می‌کنیم. به علت اینکه در چنین شرایطی الگوریتم دائماً مقدار این پارامتر را حول این نقطهٔ بحرانی کم و زیاد می‌کند و در یک حلقه قرار می‌گیرید، این حالت در نمودار به عنوان حلقه معرفی شده است.

حال به توضیح الگوریتم طراحی خواهیم پرداخت:

قدم اول: اولین قدم در طراحی کم نویز مدار CCD، همواره انتخاب CCD با مشخصات خوب است. با توجه به مطالب گفته شده، پارامترهای مهم و نحوهٔ انتخاب آنها در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- انتخاب مناسب پارامترهای CCD

پارامترهای CCD	تغییرات در راستای بهبود نویز
جریان تاریک	↓
ابعاد پیکسل	↑
فاکتور تبدیل	↑
غیریکنواختی پیکسل‌ها	↓
غیریکنواختی جریان تاریک	↓
بازدهی کوانتومی	↑

قدم دوم: ابتدا فرض می‌کنیم نویز فیگر مدارهای خارجی CCD برابر یک است. این فرض در نهایت اصلاح می‌شود. مطابق شکل (۱)، ابتدا با توجه به محدودیت دما در ماهواره، به عنوان محدودیتی اساسی در سیستم‌های فضایی، محدودهٔ مطلوب دما انتخاب می‌شود. به این منظور مقدار نویزهای تابع دما را محاسبه کرده و دما را در صورت امکان تا جایی کاهش می‌دهیم که نویزهای تابع دما از معیار تعیین شده برای بهینه بودن نویز کمتر شوند. در اینجا توجه به این نکته ضروری است؛ اگرچه کم‌کردن دما نویزها را کاهش می‌دهد، اما این کاهش باید تا حد تأثیرگذاری انجام گیرد. حد تأثیرگذاری به این معنی است که گاهی یک نویز در سیستم غالب است که تابعیتی از دما نیز ندارد، در این هنگام کم کردن دما اگرچه نویزهای تابع دما را کاهش می‌دهد اما تأثیری در نویز کلی سیستم نخواهد داشت. در چنین مواقعی باید از اعمال محدودیت‌های بی‌مورد بر روی پارامترها اجتناب کرد.

قدم سوم: پس از انتخاب دما، فرکانس مناسب برای قابل صرفنظر شدن نویز فلیکر، با رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود (در قسمت بعد این نویز مجدداً کاهش می‌یابد). خازن از دید گرهٔ خروجی مدار نیز با کمک رابطهٔ (۱۷) محاسبه می‌شود.

قدم چهارم: با درنظرگرفتن نویز تبدیل آنالوگ به دیجیتال، حداقل تعداد بیت‌های لازم برای دیجیتال‌کردن داده‌ها محاسبه می‌شود. در ظاهر به نظر می‌رسد که هر چه تعداد بیت‌ها بیشتر باشد نویز سیستم کمتر است، اما باز هم باید به نکتهٔ قبلی توجه کرد که اگرچه در این حالت نویز تبدیل آنالوگ به دیجیتال کاهش پیدا می‌کند، اما چون نویز غالب نویزهای دیگر هستند، افزایش تعداد بیت تأثیری در نویز کلی سیستم نخواهد داشت. افزایش تعداد بیت تا زمانی‌که نویز شات نسبت به این نویز غالب نباشد، به شرط اینکه محدودیت‌های ماهواره به ما اجازهٔ افزایش تعداد بیت را بدهند، انجام می‌گیرد.

توضیح: در کلّیه این مراحل در صورتی‌که نویز مطلوب حاصل نشود، اگر کاهش دما یا افزایش فرکانس در نویزها همچنان تأثیرگذار باشند و امکان این کار نیز وجود داشته باشد، دما و فرکانس مجدداً اصلاح می‌شود.

1.Total noise

قدم پنجم: پس از انتخاب تمامی پارامترها با توجه به کلّیه محدودیت‌ها، نویز فیگر مدارهای خارجی CCD نیز وارد می‌شود. در صورتی‌که به نسبت سیگنال به نویز مطلوب نرسیم، ابتدا سعی در اصلاح این مدارها می‌کنیم. در صورتی‌که مشکل را همچنان در نویزهای CCD تشخیص دهیم، مطابق الگوریتم، مجدداً در صورت امکان و تأثیرگذاری، دما و فرکانس اصلاح می‌شود.

قدم ششم: در نهایت اگر تمامی این روش‌ها مؤثر واقع نشد، CCD برای رسیدن به مشخصات بهتر، مطابق جدول (۳) تعویض می‌شود.

انجام یک طراحی نمونه به کمک الگوریتم

به منظور ارزیابی الگوریتم ارائه شده در این مقاله، مقدار عددی پارامترهای یک سیستم خواندن CCD برای یک CCD نوعی با پارامترهای جدول (۴) [۱۱]، توسط این الگوریتم محاسبه شده و در جدول (۵) آورده شده است.

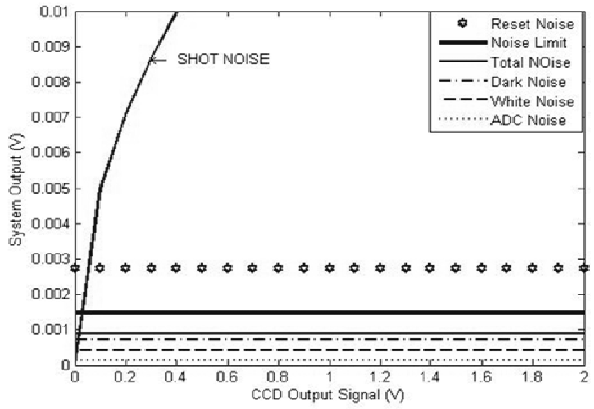
جدول ۴- پارامترهای یک CCD نوعی

Parameter	Value	Parameter	Value
A	$15\times15\times10^{-8}$ cm^2	I_d	50 nA/cm^2
V_{sat}	2 v	Reset Noise	2×10^{-3} v
C_{sense}	10^{-12} F	White Noise	6×10^{-5} v
CVF	5×10^{-6} v/e		

جدول ۵- نتایج طراحی پارامترهای یک مدار خواندن CCD

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{cc}	10 v	N	15
T	278.16 °k	C_{tot}	10^{-13} F
f	7 MHz	$Gain_{CDS}$	5
t_{int}	4×10^{-3} sec		

شکل (۲) پارامترها و نویزهای یک سیستم طراحی شده با این الگوریتم را که با متلب محاسبه شده نشان می‌دهد (Noise Limit = حداکثر مقدار مجاز مجموع نویزها یعنی همان مقدار محاسبه شده در رابطهٔ (۱۹) است). همان‌طورکه دیده می‌شود، نویز ریست همچنان به صورت غالب باقی مانده است. برای کاهش یا حذف این نویز باید روش دیگری را اتخاذ کرد.

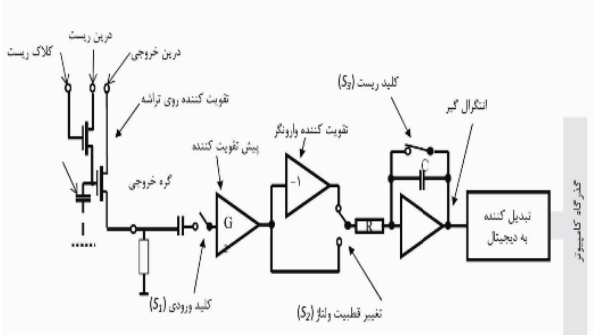


شکل ۲- شبیه‌سازی کارایی الگوریتم ارائه شده با متلب

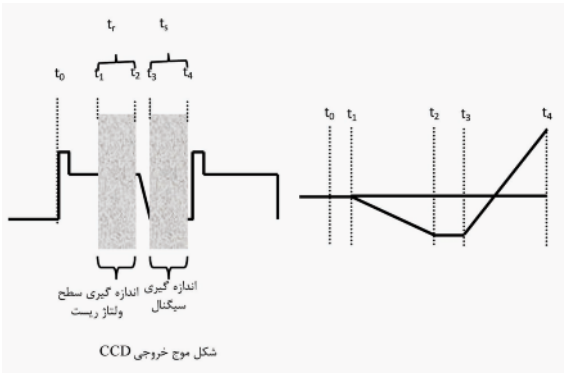
حذف نویز ریست (قدم هفتم)

می‌توان با افزایش اندازهٔ خازن گرهٔ حسگر CCD، این نویز را کاهش داد. اما این کار، فاکتور تبدیل CCD را نیز کم می‌کند. راه حل دیگر، کاهش دمای CCD است که به دلیل محدودیت‌های ماهواره نمی‌توان به میزان دلخواه آن را کاهش داد. یک روش بسیار مؤثر در حذف نویز ریست، نمونه‌برداری مضاعف همبسته (CDS) [۷] است. شکل کلی این مدار از گرهٔ خروجی CCD تا انتهای ساخت داده دیجیتال در شکل (۳) آمده است. در این روش مطابق شکل (۴) در حالت ریست ولتاژ خروجی CCD در زمان t_r در یک خازن ذخیره می‌شود. این ولتاژ در زمانی اندازه‌گیری می‌شود که هنوز بارها به آمپلی فایر خروجی CCD منتقل نشده‌اند. مقدار ولتاژ ذخیره شده در این خازن در زمان t_r از طریق رابطهٔ (۲۰) محاسبه می‌شود. $Gain_{CDS}$ مقدار بهرهٔ مدار نمونه‌برداری است.

$$V(r)=\text{Reset Noise}.\ t_r\ .\ Gain_{CDS} \qquad (۲۰)$$



شکل ۳- مدار نمونه‌برداری مضاعف همبسته



شکل ۴- نمونه‌برداری از ولتاژها در CDS

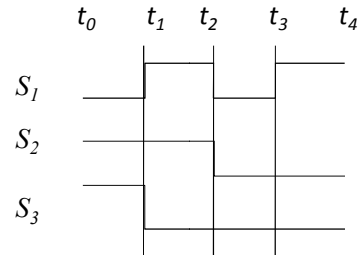
در مرحلهٔ بعدی، زمانی که بارها بر روی آمپلی‌فایر CCD قرار می‌گیرند، مطابق شکل (۴) مقدار ولتاژی با قطبیت معکوس در زمان t_s در خازن ذخیره می شود. مقدار این ولتاژ از رابطهٔ (۲۱) محاسبه می‌شود. V در این رابطه ولتاژ ناشی از بارهای CCD است.

$$V(s)=(V+\text{Reset Noise}).\ t_s\ .\ Gain_{CDS} \qquad (۲۱)$$

به علت قطبیت مخالف هم در اندازه‌گیری، این دو ولتاژ از یکدیگر کم می‌شوند. در نهایت، ولتاژ ذخیره شده در خازن، از رابطهٔ (۲۲) به دست می‌آید (زمان‌های t_r و t_s باید با یکدیگر مساوی باشند).

$$V_{final}=V.t.\ Gain_{CDS} \qquad (۲۲)$$

شکل موج‌های لازم کلیدهای شکل (۳) در شکل (۵) آمده است.



شکل ۵- شکل موج‌های مورد نیاز کلیدهای شکل ۳

قدم هشتم: همانگونه که مشاهده می‌شود، ولتاژ نویز ریست کاملاً حذف شده است. با توجه به اینکه پس از این مرحله این ولتاژ باید به صورت دیجیتال در آید، به منظور عملکرد بهینه‌تر مبدل آنالوگ به دیجیتال، بهتر است که حداکثر ولتاژ تولیدی در این مرحله، یعنی ولتاژ نمونه‌برداری مضاعف در زمان اشباع CCD، برابر ولتاژ تغذیه شود. لذا بهره نمونه‌برداری و ولتاژ منبع تغذیه (V_{cc}) باید طبق رابطهٔ (۲۳) محاسبه شوند.

$$V_{sat}.t.Gain_{CDS}=V_{cc} \qquad (۲۳)$$

در ادامه الگوریتم، Vcc و گین نمونه‌برداری با رابطهٔ (۲۳) محاسبه می‌شود. نکته‌ای که در اینجا جالب توجه است این است که با انجام نمونه‌برداری مضاعف همبسته علاوه بر حذف نویز ریست، نویز فلیکر نیز کاهش می‌یابد[۸].

نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور کاهش سیگنال به نویز مدارهای خواندن CCD الگوریتمی برای محاسبهٔ سرراست پارامترهای طراحی، شامل: ولتاژ منبع تغذیه، دما، فرکانس کاری مدار، زمان انتگرال‌گیری، تعداد بیت دیجیتال‌کردن، خازن ورودی مدار، گین CDS ارائه شده است. با طراحی مناسب پارامترها با لحاظ محدودیت‌ها، سیستمی برای دریافت اطلاعات از CCD به دست آمد که دارای نویز بهینه است.

مراجع

[1] Howell, S. B., *Handbook of CCD Astronomy*, 2nd ed., Cambridge Observing Handbooks for Research Astronomers, 2000.

[2] Fang, W and Tian-ze, L., "Research on CCD De-noising Technology," *2nd International Congress on Image and Signal Processing*, 2009, pp. 1-4.

[3] Holst, G. C., *CCD Arays, Cameras, and Displays,* SPIE Optical Engineering Press, Bellingham WA, ETATS-UNIS, 1998.

[4] Ortiz, A. and Oliver, G., "Radiometric Calibration of CCD Sensors: Dark Current and Fixed Pattern Noise Estimation," *Department of Mathematics and Computer Science, Proceeding International Conference on Robotics and Automation*, 2004, pp 4730-4735.

[5] Hopkinson, G. R. and Lumb, D. H., "Noise Reduction Techniques for CCD Image Sensors," *Journal Physics, E: Scientific Instruments*, Vol. 15, No.11, 1982, pp.1214-1221.

[6] Hynecek, J., "Spectral Analysis of Reset Noise Observed in CCD Charge-Detection Circuits," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 37, No. 3, March 1990, pp.640-647.

[7] Wey, H. M. and Guggenbühl, W., "An Improved Correlated Double Sampling Circuit for Low Noise Charge-Coupled Devices," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 37, No. 12, 1990, pp. 1559-1565.

[8] Kansy R. J., "Response of a Correlated Double Sampling Circuit to 1/f Noise [Generated in CCD Arrays]," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 373- 375.

[9] Berry, R. and Burnell, J., *The Handbook of Astronomical Image Processing Computers*, 2nd edition, Willmann-Bell, 2005, 684 p.

[10] Carlton M. C., "Quantum Limits on Noise in Linear Amplifiers," Physical Review D., *The American Physical Society*, Vol. 26, No. 8, 1982, pp. 130-133.

[11] CCD 442A, 2048 x 2048 Element, Full Frame Image Sensor, Fairchild Imaging, Inc., 1801 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035.