



Received: 2026/08/13
Revised: 2026/08/31
Accepted: 2026/09/20
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Sunghyun Park
Tel: +82-31-326-9013
E-mail: sunghyun.park@ligdna.com

Abstract

본 논문에서는 검출기의 적분시간(integration time)에 따른 불균일 보정(non-uniformity correction) 계수 활용 방안을 연구하였다. 적외선 검출기는 적분시간에 따라 반응도 및 출력 특성이 변화하므로, 적분시간에 맞는 불균일 보정 계수를 적용해야 한다. 영상 품질 향상을 위해서는 많은 수의 보정 계수가 필요하다. 그러나 메모리 용량이 제한되어 있어 저장 가능한 보정 계수의 수가 제한될 수밖에 없다. 이에 본 논문에서는 다양한 적분시간에서 특정 적분시간에 대해 획득한 불균일 보정 계수를 다른 적분시간에 활용하는 방안을 제안하였다.

This study investigates a method for utilizing non-uniformity correction (NUC) coefficients of an infrared detector according to its integration time. Since the responsivity and output characteristics of infrared detectors vary based on integration time, different NUC coefficients are generally required for each integration time. However, memory capacity is limited, which restricts the number of NUC coefficients that can be stored and utilized. This study proposes a method for applying NUC coefficients obtained at a specific integration time to other integration time ranges.

Keywords

검출기(Detector),
NUC(Non-Uniformity Correction),
적외선 시스템(Infrared System), 메모리(Memory),
등가잡음온도차(NETD)

Acknowledgement

이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.

적외선 검출기 적분시간에 따른 불균일 보정 계수 활용 방안

Utilization of Non-Uniformity Correction Coefficients According to the Integration Time of a Detector

박성현^{1*}, 유연덕¹, 박정우¹, 박진호², 하창수³

¹LIG D&A 선임연구원

²LIG D&A 수석연구원

³국방과학연구소 선임연구원

Sunghyun Park^{1*}, Yeondeok Yoo¹, Jeongwoo Park¹, Jin-Ho Park², Chang-Soo Ha³

¹Research engineer, LIG D&A

²Chief research engineer, LIG D&A

³Senior researcher, Agency for Defense Development

1. 서론

적외선 검출기는 온도 및 열에 반응하여 그 차이를 전기적인 신호로 변환해주는 센서이다[1]. 적외선 검출기가 온도에 따라 선형적인 출력을 해주면 좋지만 대부분 그러지 못한 경우가 많다. 이에 적외선 검출기 출력 시 불균일 보정(non-uniformity correction)의 과정을 거친다[2]. 적외선 센서 시스템은 목적과 활용되는 환경에 따라 보정 방식이 다르다. 최근에는 영상 개선을 위한 노력이 꾸준히 이루어지고 있다. 이는 적외선 영상이 출력된 이후 개선하는 방식도 있으나 본질적으로 적외선 영상 자체가 노이즈 없는 영상으로 출력되는 것이 가장 바람직하다[3]. 적외선 검출기는 출력이 선형적이지 않고 온도에 민감하기에 보드 온도, 주변 온도 등에 영향을 많이 받는다. 이를 위해 검출기 출력을 일정하게 유지하게 해주는 냉각형 검출기를 활용하는 방안도 있으나 불균일 보정 방식을 통해 영상을 개선하기 위한 연구와 노력이 꾸준히 이루어지고 있다. 영상의 균일도를 개선하기 위해서는 보정 요소를 많이 할수록 영상은 개선된다. 하지만 불균일 보정이 많아질수록 리소스뿐 아니라 메모리도 많이 필요하다.

이번 논문에서는 여러 불균일 보정 계수를 적용하되 여러 적분

시간에 대해 특정 불균일 보정 계수를 동일하게 적용하여 영상의 품질 및 노이즈를 확인하여 불균일 보정 계수 및 메모리를 효율적으로 활용하는 방안에 대해 제시하고자 한다[4].

2. 검출기 및 영상 출력

본 연구를 위해서 활용한 검출기 특성, 정보 및 적외선 시스템 기능도는 아래와 같으며 자세한 스펙은 보안상 비식별 처리하였다.

Table 1. Specification of detector

Pixels	000 × 000
Wavelength	MWIR
Operation	≥ 99 %
Output Channel	O Channel

검출기는 O 채널 수의 아날로그로 출력이 되며 이는 ADC를 통해 디지털 값으로 변환 후 FPGA를 통해 불균일 보정 계수를 적용하였다. 검출기는 각 픽셀에 따라 출력 및 특성이 다르기 때문에 각 픽셀의 출력에 맞는 불균일 보정 계수를 적용해야 한다. 이에 픽셀 수가 많은 검출기일수록 용량이 큰 메모리가 필요하다.

3. 적용 불균일 보정 계수

검출기 출력은 피사체로부터의 복사에너지, 내부 온도에 의한 에너지 등으로 구성된다.

$$L_{sys} = L_{scene}(\lambda, T_{scene}) \cdot \Gamma_{optics} + L_{BB}(\lambda, T_{BB}) \quad (1)$$

이를 통해 검출기 출력 전압은 아래와 같이 나타낼 수 있으며 다음 식 (2), (3)을 통해 적분시간에 따라 검출기 출력이 변하는 것을 알 수 있다. 이에 적분시간에 맞는 불균일 보정 계수로 영상을 보정해 주어야 한다.

$$\Phi(T) = \left[\int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} L_{sys}(\lambda, T) \cdot d\lambda \right] \cdot \frac{\pi \cdot \tau_{DET} \cdot \tau_{OPTICS}}{1 + 4 \cdot F/\#^2} \cdot A_d \quad (2)$$

$$V = \frac{\Phi(T) \cdot \rho^* \cdot q^* \cdot T_{int}}{C_{int}} \quad (3)$$

여러 적분시간에 동일한 NUC 계수를 적용하는 연구는 꾸준히 이루어지고 있다[5].

본 논문에서는 적분시간 2개 이상일 때 6종 보정 계수를 개별적으로 적용하여 계수별 적분시간에 따른 노이즈 및 메모리 절감 가능성을 위해 불균일 보정 활용을 검증하였다. 적분시간 2는 적분시간 1의 60%로 설정하였으며 각 적분시간에 대한 피사체에 의한 출력을 보정하기 위한 계수로 00 bit를 할당하였다. 그 외 다른 요인에 의한 보정을 위해서 00 bit를 할당하였으며 1픽셀 당 000 bit의 불균일 보정 계수를 적용하였다. 적분시간 1개 당 각 보정 계수는 총 6개이며 비선형 보정계수, 이득, 오프셋1, 오프셋2, 온도보상, 고도보정 계수이다. 보안상 계수는 A~F로 명시하였다. 불균일 보정 계수 적용 위치는 아래와 같다.

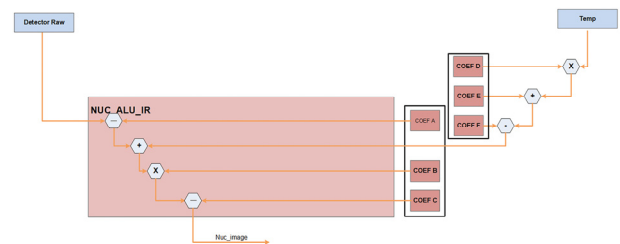


Fig. 1. Non-uniformity correction coefficient application flow chart

4. 불균일 보정 수행을 위한 하드웨어 구성

실시간 불균일 보정 수행을 위해 SRAM을 적용하였으며 총 00 MB으로 구성하였다. 용량은 보드 내 SRAM이 배치 가능한 선에서 계산하였다. 총 픽셀에 대한 불균일 보정 계수 용량을 계산하면 아래와 같다.

Table 2. Non-uniformity correction coefficient capacity

1 Pixel	000 bit
1 Frame	000 bit × 000 (row) × 000 (column) = 0.00 MB

이는 1개의 적분시간에 대한 전체 픽셀의 불균일 보정 계수 용량이다. 본 논문에서는 SRAM 용량을 초과하기 위해 적분시간을 2개 이상 적용하였다. 적분시간에 따른 보정 계수는 Table 3와 같다.

A1~F1과 A2~F2 계수의 합은 SRAM 용량 00 MB 보다 크기 때문에 아래 Table 3와 같은 예시로 계수를 적용하여 SRAM 용량 00 MB보다 적도록 적용하였다.

Table 3. Coefficient utilization according to integration time

Basis	Int1 Coefficient	A1	B1	C1	D1	E1	F1
	Int2 Coefficient	A2	B2	C2	D2	E2	F2
Test 1	Int2 Coefficient	A2	B2	C2	D1	E2	F2
Test 2	Int2 Coefficient	A2	B2	C1	D2	E2	F2
Test 3	Int2 Coefficient	A2	B1	C2	D2	E2	F2

5. 불균일 보정 계수 획득 및 표준편차 측정

적외선 검출기, 렌즈 및 14-bit ADC를 통해 시스템을 구성하여 적분시간 1, 2에 대해 각각의 불균일 보정 계수를 획득했다. 적분시간에 맞는 계수를 적용했으며 불균일 보정 계수의 R^2 은 0.99999 이상을 만족하였다. 획득한 불균일보정 계수를 적분시간 별 검출기 raw 데이터에 Table 3와 같이 계수를 적용하여 시뮬레이션하였다. 상온 상태에서 흑체를 바라보는 영상을 통해 적분시간 2에 대한 영상 표준편차, 적분시간 1의 계수를 적분시간 2의 계수에 활용한 시험 1, 시험 2, 시험 3 시험조건에 대한 영상 표준편차를 확인하였다. 그리고 흑체 온도를 25°C로 설정하고 주변 온도를 변화시키며 확인하였다. 흑체 온도 별 영상 표준편차는 아래 Table 4와 같으며, 주변 온도 별 영상 표준편차는 Table 5와 같다. 등가잡음온도차(NETD) 성능은 흑체 25, 30°C의 50회 누적된 데이터를 적용하여 아래의 계산식 (4)를 통해 Table 6와 같은 결과를 확인했다. 해당 값은 데드 픽셀 보정을 적용 후 획득한 값이다.

$$NETD = \frac{\Delta T}{SNR}, SNR = \frac{\Delta V}{\sqrt{TN^2 + SN^2}} \quad (4)$$

Table 4. Standard deviation results from the NUC coefficient utilization (room temp, unit: gray, 50 frame avg)

BB Temp [°C]	Int 2	Test 1	Test 2	Test 3
10	1.86	1.88	2.11	3.37
25	1.72	1.74	2.14	3.27
30	1.66	1.71	2.40	3.33
40	1.91	2.08	2.74	3.67

Table 5. Standard deviation results from the NUC coefficient utilization (BB = 25°C, unit: gray, 50 frame avg)

Chamber Temp [°C]	Int 2	Test 1	Test 2	Test 3
10	1.06	1.21	2.94	4.62
20	1.13	1.54	2.76	4.56
30	1.40	2.27	3.36	4.77
40	1.02	2.95	3.43	4.65

Table 6. NETD results from the NUC coefficient utilization (BB = 25, 30°C, 50 frame avg)

	Int 2	Test 1	Test 2	Test 3
NETD [mK]	97.2706	97.9135	102.489	124.777

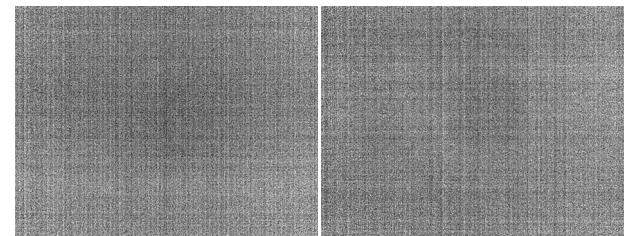


Fig. 2. Scene of integration time 2 (gray = 1360, BB = 40°C, room temp)

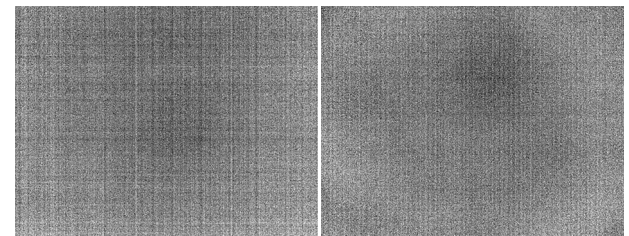


Fig. 3. Scene of test 1 (gray = 1380, BB = 40°C, room temp)

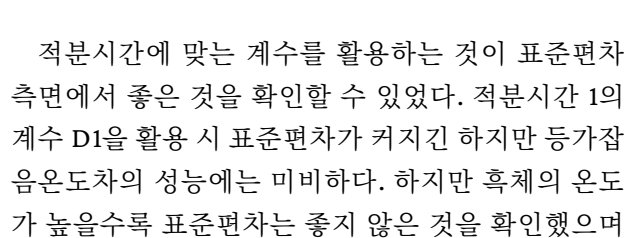


Fig. 4. Scene of test 2 (gray = 1315, BB = 40°C, room temp)

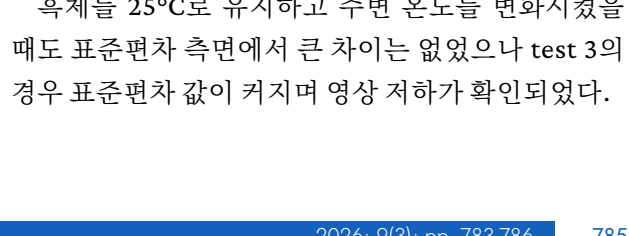


Fig. 5. Scene of test 3 (gray = 1280, BB = 40°C, room temp)

적분시간에 맞는 계수를 활용하는 것이 표준편차 측면에서 좋은 것을 확인할 수 있었다. 적분시간 1의 계수 D1을 활용 시 표준편차가 커지긴 하지만 등가잡음온도차의 성능에는 미비하다. 하지만 흑체의 온도가 높을수록 표준편차는 좋지 않은 것을 확인했으며 그에 따라 등가잡음온도차의 성능에도 영향을 주었다. 특히 영상의 세로줄이 두드러져 보이는 것을 확인할 수 있었다.

흑체를 25°C로 유지하고 주변 온도를 변화시켰을 때도 표준편차 측면에서 큰 차이는 없었으나 test 3의 경우 표준편차 값이 커지며 영상 저하가 확인되었다.

등가잡음온도차 성능을 비교했을 때 적분시간 1의 D 계수를 활용하면 큰 차이가 없었으나 적분시간 1의 B 계수를 활용했을 때는 다소 좋지 않았다.

적분시간 1의 D 계수를 활용 시 SRAM 용량을 약 14% 절감할 수 있으며 등가잡음온도차는 약 0.6% 정도 악화된다.

6. 결론

본 논문에서는 적분 시간에 따른 불균일 보정 계수 활용 방안에 대해 연구했다. 검출기는 적분시간에 따라 반응도 및 출력이 다르기 때문에 적분시간에 맞는 불균일 보정 계수를 적용해야 최적의 영상을 획득할 수 있다. 하지만 최근에는 보드 크기는 작아지고 보상 데이터는 많아지는 추세이다. 이에 저장할 수 있는 메모리 크기는 한계가 있고 불균일 보정 계수를 활용한다면 적분시간을 여러 개 가져갈 수 있는 장점이 있다. 보안상 본 논문에서 활용한 불균일 보정 계수의 의미를 설명할 수 없지만 몇 개의 불균일 보정 계수는 다른 적분 시간에도 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

A, B, E, F 보정 계수를 활용했을 때 불균일도 및 등가잡음온도차의 성능이 현저히 떨어져서 본 논문에서는 해당 시험 내용을 기술하지 않았다. 혹은 곱하는

상수 보상 값을 적용한 다음 불균일 보정 데이터를 획득한다면 그 외 계수에서 최적의 값을 얻을 수 있다.

이번 논문에서는 시뮬레이션을 통한 확인을 하였다. 추후에는 실제 보드에 불균일보정 계수를 올려 데이터를 획득하여 비교하고자 한다.

참고문헌

- [1] Seok-Min Hong, Hyun-Sook Kim, & Yong-Chan Park, 'Advanced LWIR Thermal Imaging Sight Design,' Korean Journal of Optics and Photonics, VOL. 16, NO. 3, 2005, pp. 209-216.
- [2] R. W. Helfrich, 'Programmable Compensation Technique for Staring Arrays,' in proceedings of SPIE, VOL. 178, 1979, pp. 110-121
- [3] Olivier Riou, Stephane Berrebi, & Pierre Bremond, 'Nonuniformity Correction and Thermal Drift Compensation of Thermal Infrared Camera,' Proceedings of the SPIE, VOL. 5405, 2004, pp.294-302.
- [4] Jin-Ho Park, 'A study on Non-Uniformity Correction for Infrared Cameras Robust to Focal Plane Arrays Temperature Variations,' Journal of the KNST, VOL. 8, NO. 2, 2025, pp.156-160.
- [5] Nan Chen, Jiqing Zhang, Shengyou Zhong, Zhongshun Ji & Libin Yao, 'Nonuniformity Correction for Variable-Integration-Time Infrared Camera,' IEEE Photonics Journal, VOL. 10, NO. 6, 2018, pp. 1-11.