달 관측 영상을 이용한 천리안위성 기상탑재체 가시채널 검출기의 성능감쇄 분석

서석배*[†] · 진경욱**

*한국항공우주연구원 위성정보연구센터, **한국항공우주연구원 항공우주시스템연구소

Degradation Monitoring of Visible Channel Detectors on COMS MI Using Moon Observation Images

Seok-Bae Seo*[†] and Kyoung-Wook Jin**

*Satellite Information Research Center, Korea Aerospace Research Institute

**Aerospace Systems Laboratory, Korea Aerospace Research Institute

Abstract : The first geostationary satellite in Korea, COMS (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite), has been operating properly since its successful completion of the IOT (In Orbit Test). COMS MI (Meteorological Imager) acquires Earth observation images from visible and infrared channels. This paper describes a method to compute the degradation of the COMS visible detectors and the result of the degradation during the two years of the operation. The visible channel detectors' performance was determined based on the comparison between the instrument-based measurements and ROLO model-based values. The degradation rate of the visible channel detectors of COMS MI showed a normal condition.

Key Words : COMS, meteorological imager, radiometric calibration, visible channel detector, performance degradation, Moon image, irradiance

요약 : 천리안위성은 대한민국에서 개발한 최초의 정지궤도위성으로 궤도상 시험을 완료하고 통신, 해양, 기상업무에 대한 정상운영을 수행하고 있으며, 천리안위성의 기상탑재체는 지구 및 주변의 가시채널 및 적외채널 영상을 취득하고 있다.

본 논문에서는 천리안위성 가시채널 검출기의 성능 분석방법을 설명하고, 2년의 운영기간동안 성능 분석 결과를 설명한다. 가시채널 검출기의 성능은 검출기에서 취득한 결과 및 ROLO 모델 기반의 결과를 이용하여 계산할 수 있으며, 분석을 통해서 검출기의 성능은 정상임을 확인하였다.

1. 서론

천리안위성(COMS: Communication, Ocean, and

Meteorological Satellite)은 2010년 6월 27일에 발사하여, 약 7개월 간의 궤도상시험을 완료하고 2011년 4월 1일부터 정상운영 중에 있다. 천리안위성에는

접수일(2012년 11월 26일), 수정일(1차 : 2012년 12월 26일, 2차 : 1월 29일), 게재확정일(2013년 1월 30일).

[†] 교신저자: 서석배(sbseo@kari.re.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. The basic specification of COMS MI

No of channels	5 channels (1 visible,4 infrared)				
Observation period	Less than 27 minutes				
Channels’ Characteristics			Wavelength (μm)	Spatial Resolution(km)	Applications
	Visible		0.67	1	Weekly cloud images, Asian dust, forest fires, fog observation, atmospheric motion vector
	IR	Shortwave	3.7	4	Night fog & low-level clouds, forest fire detection, land surface temperature
		Water vapor	6.7	4	Observation of mid and upper atmospheric humidity & upper atmospheric motions
		Infrared1	10.8	4	Cloud information, sea surface temperature, Asian dust observation
		Infrared2	12.0	4	

통신/해양/기상탐재체가 장착되어 있으며, 이 중에서 해양 및 기상탐재체는 한반도를 포함한 지구의 대기 및 해양 관측을 위해서 개발되었다. 기상탐재체(MI: Meteorological Imager)는 미국 ITT사(현재의 ITT Exelis)에서 개발한 것으로, 유사한 성능의 탐재체가 천리안 위성 외에도 미국 GOES N-P, 일본 MTSAT-2 위성에 장착되어 운용 중이다. 천리안위성 기상탐재체의 주요 사양은 Table 1과 같다(NMSC, 2013).

본 논문에서는 천리안위성 기상탐재체의 가시채널 복사보정에 대해서 간략히 살펴보고(2장), 월 1회 관측하는 달 영상을 이용하여 검출기의 성능저하를 계산하는 방법(3장) 및 계산 결과(4장)를 설명한 후 결론(5장)을 기술하였다.

2. 천리안위성 기상탐재체 가시채널 복사보정

천리안위성 기상탐재체 가시채널(이하, 가시채널)의 복사보정은 8개로 구성된 검출기가 북쪽에서 남쪽으로 동서방향 스캔을 반복하여 취득한 영상을 입력값으로 하여 식 (1) 및 (2)를 이용해서 계산한다(Astrium, 2011).

$$R = mX + b \text{ (W/m}^2\text{sr m)} \quad (1)$$

R : 복사보정 결과

m : 기울기(위성 발사 전 지상에서 결정)

X : 지구관측 값

b : 절편

$$b = -mX_{sp} \text{ (W/m}^2\text{sr m)} \quad (2)$$

b : 절편

m : 기울기

X_{sp} : 우주관측 값

식 (1)과 (2)에서 X 및 X_{sp} 는 가시채널 검출기(visible channel detector)에서 취득한 값으로, 디지털 숫자(digital number)로 표시된다.

3. 가시채널 검출기의 성능 분석 알고리즘

1) 입력데이터 및 알고리즘 개요

가시채널 검출기는 위성의 임무기간 동안, 1년에 수% 성능 저하가 발생한다(Kiffer, 2005). 가시채널 검출기 성능 분석을 위해서 필요한 주요 입력 데이터 및 정보는 다음의 여섯 가지이다.

- 1) 기상탐재체에서 취득한 가시채널 달 영상
- 2) 가시채널 복사보정을 위한 기울기(궤도상시험에서 결정된 값)
- 3) 달 관측 시각: 달의 중심을 관측한 UTC (Universal Time Coordinate)
- 4) 태양/달/위성의 위치
- 5) 각 파장별 가시채널 검출기의 스펙트럼 응답
- 6) 각 파장별 태양의 방사조도(irradiance)

가시채널 달 영상과 기울기를 이용해서 달 영상에 대한 복사보정 결과를 생성하며, 이를 입력으로 가시채널 검출기의 성능 특성을 포함하는 천리안위성 기상탐재체에 기반한 방사조도($I_{instrument}$)를 계산한다.

달 관측시각은 달 영상에서 달 중앙을 취득한 시각으로 정의하며, 해당 시각에서 태양/달/위성의 위치는

위성관제시스템에서 생성하는 ephemeris 파일을 이용해서 결정할 수 있다. 각 파장별 가시채널 검출기의 스펙트럼 응답은 위성 발사 전 지상에서 측정한 값을 사용하며, 태양의 방사조도는 Labs & Neckels의 modified '84 solar data를 이용한다(Kiffer, 2005). 달 관측시각에서의 태양/달/위성의 위치, 가시채널 검출기의 스펙트럼 응답, 태양의 방사조도를 입력으로 비교의 기준이 되는 달의 방사조도(I_{ref})를 계산할 수 있다.

가시채널 검출기의 성능 특성은 달 영상 복사보정 결과에서 계산하는 달의 방사조도($I_{instrument}$, 3.2절)와 태양/달/위성의 위치를 바탕으로 ROLO (RObotic Lunar Observatory) 모델에 기반한 달의 방사조도(I_{ref} , 3.3절)의 비율($P(t)$, 3.4절)로 계산할 수 있다.

2) 복사보정 영상에서 계산하는 달의 방사조도 ($I_{instrument}$)

가시채널 검출기의 관측값에 기반한 복사보정 영상에서 계산하는 달의 방사조도($I_{instrument}$)는 달 영역의 복사보정 결과(radiance, R_p)의 합에 취득 영상 (Level 1A)의 가로/세로 비율($16/28$) 및 각 화소의 입체각(solid angle, Ω)을 곱해서 계산할 수 있으며, 식 (3)과 같다 (Astrium, 2011).

$$I_{instrument} = \frac{16}{28} \sum_{p=1}^{N_p} R_p \times \Omega \quad (W/m^2 sr) \quad (3)$$

$\frac{16}{28}$: 복사보정 영상의 가로 over-sampling에 대한 비율

N_p : 달 영역의 화소 개수

R_p : 달 영역의 복사보정 결과($W/m^2 sr m$)

Ω : 각 화소에 대한 입체각(sr)

가시채널의 각 화소에 대한 입체각 (Ω)은 IFOV (Instantaneous Field Of View) 값을 이용해서 식 (4)와 같이 $7.84 \times 10^{-10} sr$ 로 결정할 수 있다.

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(\eta)) = 7.84 \times 10^{-10} (sr)$$

$$\eta = \tan\left(\frac{\sqrt{\tan^2(IFOV^2)}}{\pi}\right) \quad (4)$$

$$IFOV = 28(\mu rad)$$

3) 태양/달/위성의 위치 및 ROLO 모델을 기반으로 계산하는 달의 방사조도(I_{ref})

태양/달/위성 위치 기반의 달의 방사조도인 I_{ref} 계산에는, 각 파장별 가시채널 검출기의 스펙트럼 응답(이하, 스펙트럼 응답) 및 각 파장별 태양의 방사조도(이하, 태양의 방사조도), 그리고 달 중양을 관측하는 시각 및 해당 시각에서 태양/달/위성의 위치에 대한 정보가 필요하다(Seo, 2012). 여기에서 스펙트럼 응답 및 태양의 방사조도는 모든 달 관측에 적용할 수 있는 값이므로, 결과를 미리 계산하여 저장한 다음 각 관측에 공통적으로 적용하면 된다.

(1) 각 파장별 스펙트럼 응답 및 태양의 방사조도

스펙트럼 응답($\phi(\lambda)$)은 위성 발사 전 지상에서 측정한 값으로 Fig. 1과 같으며, 가시채널의 유효파장(550 ~ 800 nm)에서 가시채널 스펙트럼 응답의 적분값은 $203.162308 W/m^2 sr m$ 이다.

태양의 방사조도($E_{SUN}(\lambda)$)는 Labs & Neckels의 modified '84 solar data를 이용하는데, 가시채널의 유효파장 구간에 해당하는 데이터를 1 nm 간격으로 내삽(interpolation)하여 적용한다. Fig. 2는 본 연구에서 사용

Fig. 1. Detector's spectral response ($\phi(\lambda)$) of COMS MI visible channel.

Fig. 2. Solar spectral radiance ($E_{SUN}(\lambda)$).

한 태양의 방사조도에 대한 그래프이다.

- (2) 달 관측시각 및 달 관측시각에서 태양/달/위성의 위치

태양/달/위성의 위치 계산은 천리안위성 위성관제시스템의 FDS (Flight Dynamics Subsystem)에서 생성된 위치를 이용한다. 계산과정에서 태양 및 달의 위치는 ECEF (Earth Centered Earth Fixed) 좌표계이지만, 위성의 위치는 위성좌표계를 이용하므로 이를 ECEF 좌표계로 변환하는 과정이 필요하다. 달 영상과 해당 영상의 관측시각을 이용하여 달의 중심을 관측한 시각을 계산하고, 해당 시각에서의 태양/달/위성의 위치에 대한 ECEF 및 MCMF (Moon Centered Moon Fixed) 좌표계를 결정한다. 결정된 ECEF 및 MCMF 위치는 이후 디스크 등가 반사도($A(\lambda)$) 및 태양/달/위성의 위치를 기반으로 계산하는 달의 방사조도(I_{ref}) 계산에 사용된다(Seo, 2012).

- (3) 표준거리에 대해 ROLO 모델을 이용해서 계산하는 달의 방사조도(I_{ROLO})

태양/달/위성에 대한 표준거리(standard distance)에서 ROLO 모델을 이용해서 계산하는 달의 방사조도(I_{ROLO})는 가시채널의 파장(λ)에 대한 방사조도와 검출기 파장응답을 이용해서 계산하며 식 (5)와 같다.

$$I_{ROLO} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \times \phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (W/m^2 sr m) \quad (5)$$

λ : 파장(nm)

$I(\lambda)$: 방사조도($W/m^2 sr m$)

$\phi(\lambda)$: 검출기 파장응답($W/m^2 sr m$)

식 (5)에서 방사조도($I(\lambda)$)는 식 (6)으로 계산되며, 여

기서 디스크 등가 반사도($A(\lambda)$)는 달 관측시각에서 달의 절대 위상각 및 태양/달/위성의 위치 등을 이용해서 계산되는 값이다(Seo, 2012).

$$I(\lambda) = A(\lambda) E_{SUN}(\lambda) \Omega_M / \pi \quad (W/m^2 sr m) \quad (6)$$

$A(\lambda)$: 디스크 등가 반사도(Albedo)

Ω_M : 평균거리에서의 달의 입체각,

$$6.4236 \times 10^{-5} sr$$

$E_{SUN}(\lambda)$: 태양의 방사조도($W/m^2 sr m$)

- (4) 태양/달/위성의 위치를 기반으로 계산하는 달의 방사조도(I_{ref})

태양/달/위성의 위치를 기반으로 계산하는(distance-corrected) 달의 방사조도 I_{ref} 는 식 (7)로 계산한다.

$$I_{ref} = I_{ROLO} \left(\frac{384400}{d_{MC}} \right)^2 \left(\frac{1}{d_{MS}} \right)^2 \quad (W/m^2 sr m) \quad (7)$$

I_{ROLO} : ROLO 모델을 이용해서 계산한 달의 방사조도($W/m^2 sr m$)

d_{MC} : 달과 위성간 거리(km)

d_{MS} : 달과 태양간 거리(AU)

식 (7)에서 달과 위성간 거리(d_{MC}) 및 달과 태양간 거리(d_{MS})는 달 관측시각에서 태양/달/위성의 ECEF 위치($S^{ECEF}/M^{ECEF}/C^{ECEF}$)를 이용해서 계산하며, 각각 식 (8) 및 (9)에 나타내었다.

$$d_{MC} = \|M^{ECEF} - C^{ECEF}\| \quad (km) \quad (8)$$

$$d_{MS} = \frac{\|M^{ECEF} - S^{ECEF}\|}{d_{ES}} \quad (AU) \quad (9)$$

d_{ES} : 태양과 지구간의 거리,
 $1.49597870691 \times 10^{11} km$

- 4) 방사조도 비율($P(t)$)

가시채널 검출기의 성능저하 지표인 방사조도 비율 ($P(t)$)은 복사보정 영상에서 계산하는 달의 방사조도 ($I_{instrument}$)와 태양/달/위성의 위치를 바탕으로 ROLO 모델에 기반하여 계산하는 달의 방사조도(I_{ref})의 비율로 정의하며, 계산 방법은 식 (10)과 같다.

$$P(t) = \frac{I_{instrument}}{I_{ref}} \quad (10)$$

4. 계산 결과

2012년 3월 7일 2시 58분 43초 (UTC) 달 관측에 대해서 이상 설명한 계산을 수행한 결과를 Table 2에 정리하였다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 ROLO 모델을 이용해서 계산하는 달의 방사조도를 계산하는 과정에서 사용되는 해당 파장역역(550~800 nm)에서 ROLO 방사조도($I(\lambda)$) 및 디스크 등가 반사도($A(\lambda)$) 값을 표출한 결과이다(Seo, 2012).

Table 2. Computed result for Moon observation (2012.03.07 02:58:43 UTC)

Items	Description	Values	Equation
$P(t)$	Ratio of Moon's irradiance (VIS channel detector's characteristic), $P(t) = I_{instrument}/I_{ref}$	9.11938×10^{-1}	(10)
$I_{instrument}$	Moon's irradiance by radiometric corrected result ($W/m^2 sr m$)	2.216083×10^{-3}	(3)
N_P	Total number of pixels in the lunar disk image	121,392	(3)
$\sum_{p=1}^{N_P} R_P$	Radiometric sum value for Moon area	4,946,612.827071	(3)
Ω	Solid angle of a pixel (sr), corresponding to one visible detector	7.84×10^{-10}	(3)
$(\sum_{p=1}^{N_P} R_P)/N_P$	Radiometric average value for Moon area	40.749084	-
t_{MC}	Observation time for Moon center (UTC)	2012-03-07.02-58-43	-
I_{ref}	Moon's irradiance by Sun/Moon/Satellite positions ($W/m^2 sr m$)	2.430082×10^{-3}	(7)
I_{ROLO}	Moon's irradiance by ROLO model($W/m^2 sr m$)	2.761981×10^{-3}	(5)
d_{MC}	Moon-Satellite distance in km	4.119826×10^5	(7)
d_{MS}	Moon-Sun distance in AU	9.947280×10^{-1}	(7)
S^{ECEF}	Sun's ECEF position at t_{MC} (m)	-1.100124×10^{11} 9.878705×10^{10} -1.333289×10^{10}	(9)
M^{ECEF}	Moon's ECEF position at t_{MC} (m)	1.847778×10^8 -3.179755×10^8 4.469410×10^7	(8) (9)
C^{ECEF}	Satellite's ECEF position at t_{MC} (m)	-2.608984×10^7 3.311661×10^7 -1.498552×10^4	(8)

Fig. 3. Disk equivalent reflectance ($A(\lambda)$).

Fig. 4. ROLO irradiance ($I(\lambda)$).Table 3. Irradiance ratio ($P(t)$) and it's intermediate results

Moon Observation	t_{MC}	I_{ref}	$(\sum_{p=1}^{N_p} R_p)/N_p$	N_p	$I_{instrument}$	$P(t)$
2010-07-28.04-15-23	04-16-06	1.65772×10^{-3}	37.07418	100,560	1.67022×10^{-3}	1.00754
2010-08-24.02-22-08	02-23-12	2.45401×10^{-3}	51.134734	106,185	2.43252×10^{-3}	9.91243×10^{-1}
2010-09-23.03-45-19	03-45-41	2.91793×10^{-3}	58.697824	107,810	2.83504×10^{-3}	9.71594×10^{-1}
2010-11-18.00-43-13	00-43-34	1.18348×10^{-3}	30.42958	81,282	1.10807×10^{-3}	9.36282×10^{-1}
2010-12-25.07-28-22	07-28-46	9.93840×10^{-4}	24.477102	83,852	9.19499×10^{-4}	9.25198×10^{-1}
2011-02-18.03-58-21	03-58-42	3.67402×10^{-3}	59.339236	133,356	3.54513×10^{-3}	9.64920×10^{-1}
2011-03-20.04-28-23	04-28-44	3.24058×10^{-3}	51.364267	135,342	3.11438×10^{-3}	9.61058×10^{-1}
2011-04-17.01-43-13	01-43-34	2.54362×10^{-3}	40.94645	129,819	2.38140×10^{-3}	9.36227×10^{-1}
2011-05-14.00-43-14	00-43-34	1.22985×10^{-3}	27.303836	89,836	1.09889×10^{-3}	8.93508×10^{-1}
2011-06-20.07-43-12	07-43-33	7.67264×10^{-4}	21.383388	73,930	7.08232×10^{-4}	9.23061×10^{-1}
2011-07-18.05-13-12	05-13-33	1.29395×10^{-3}	29.606477	93,733	1.24325×10^{-3}	9.60817×10^{-1}
2011-08-14.03-13-13	03-13-34	2.70016×10^{-3}	52.154459	110,673	2.58590×10^{-3}	9.57684×10^{-1}
2011-09-11.01-43-13	01-43-34	2.06113×10^{-3}	41.445425	106,201	1.97189×10^{-3}	9.56707×10^{-1}
2011-10-11.01-43-12	01-43-34	2.22181×10^{-3}	44.713648	105,806	2.11948×10^{-3}	9.53941×10^{-1}
2011-11-03.21-43-12	21-43-33	5.05260×10^{-4}	18.889235	56,393	4.77219×10^{-4}	9.44501×10^{-1}
2011-12-04.22-28-21	22-28-42	7.11824×10^{-4}	23.533979	63,061	6.64866×10^{-4}	9.34032×10^{-1}
2012-01-12.06-28-22	06-28-43	1.39711×10^{-3}	29.378579	98,084	1.29094×10^{-3}	9.24007×10^{-1}
2012-02-08.03-58-22	03-58-43	3.16609×10^{-3}	54.017663	122,512	2.96478×10^{-3}	9.36417×10^{-1}
2012-03-07.02-58-22	02-58-43	2.43008×10^{-3}	40.749084	121,392	2.21608×10^{-3}	9.11938×10^{-1}
2012-04-06.02-13-13	02-13-33	2.84349×10^{-3}	45.363059	130,049	2.64294×10^{-3}	9.29471×10^{-1}
2012-05-04.01-58-23	01-58-44	1.88432×10^{-3}	33.638486	115,337	1.73813×10^{-3}	9.22421×10^{-1}
2012-06-09.08-13-12	08-13-33	6.18084×10^{-4}	19.219405	66,523	5.72783×10^{-4}	9.26707×10^{-1}
2012-07-10.08-13-12	08-13-33	3.67494×10^{-4}	16.507726	42,695	3.15749×10^{-4}	8.59195×10^{-1}
2012-08-03.03-43-14	03-43-35	2.33808×10^{-3}	41.965845	118,466	2.22724×10^{-3}	9.52596×10^{-1}
2012-09-03.05-43-14	05-43-35	1.40760×10^{-3}	30.773399	96,513	1.33058×10^{-3}	9.45278×10^{-1}

천리안위성 발사 후 최초의 달 관측(2010년 7월)부터 2012년 9월 달 관측까지, 가시채널 검출기의 성능인 방사조도 비율($P(t)$) 및 중간 계산 결과를 Table 3에 정리하였다.

Table 3에서 최종 관측(2012-09-03 05:43:14, UTC)이 25번째 이므로, Fig. 5와 같이 1차식으로 근사한 $P(t)$ 값은 0.9143 ($P(t) = -0.0022 \times 25 + 0.9693$)이다. 따라서 가시채널 검출기에는 초기특성($P(t) = 1.0$) 대비 약 8.57%

Fig. 5. Computed result of detector's performance degradation ($P(t)$).

의 성능저하가 발생했음을 알 수 있다.

Fig. 5에서 $P(t)$ 의 변화에 사이클이 있는 이유는, 달의 방사조도가 달의 절대 위상각(Moon's absolute phase angle)에 따라서 오차를 수반하기 때문이다(Kiffer, 2005). 따라서 달의 절대 위상각의 변화에 따른 오차를 근사화 계산에 배제시키는 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 달 관측영상을 이용한 가시채널 검출기의 성능저하 계산 알고리즘을 설명하고, 위성 발사 후 최초의 달 관측부터 2012년 9월까지 달 영상을 분석하였다. 천리안위성 발사 직후부터 2년 2개월 기간에 대한 달 영상 분석결과를 통하여, 가시채널 검출기에 857%의 성능저하가 발생했음을 확인하였다.

가시채널 검출기는 일반적으로 연간 수% 성능저하가 발생하므로(미국 GOES 위성의 경우 약 5%), 2년 이상의 기간에 10% 미만의 성능저하가 발생한 천리안위성 가시채널 검출기의 성능은 일반적인 수준으로 판단된다.

추후 연구는 달의 방사조도 계산의 정확도에 영향을 주는 달의 절대 위상각을 고려하여 분석 대상 데이터를 한정시키고, 2차 근사식을 적용하여 보다 정확한 성능저하 정도를 계산하는 것이다. 또한 도출한 성능저하 결과를 가시채널 복사보정식의 기율기에 직접

반영함으로써, 천리안위성의 임무기간동안 가시채널 복사보정 결과의 정확도를 기준 요구조건 내로 유지할 예정이다.

참고문헌

- Astrium (Ledez, C.), 2011. MI radiometric model, *Astrium and KARI Proprietary Information*, COMS.TN.00116.DP.T.ASTR: 30-45.
- Kieffer, H.H. and T.C. Stone, 2005. The spectral irradiance of the Moon, *Astronomical Journal*, 129: 2887-2901.
- National Meteorological Satellite Center, 2013. Introduction to COMS, National Meteorological Satellite Center's website, http://nmsc.kma.go.kr/html/homepage/en/chollian/choll_info.do.
- Seo, S.B., 2012. A slope compensation algorithm for COMS MI visible channel radiometric calibration using Moon observation data, *Korea Aerospace Research Institute Technical Note*, KARI-GDT-TM-2012-011: 1-19 (in Korean with English abstract).