

태양, 달, 위성의 위치를 이용한 달의 방사조도 계산

서석배*, 송영주**

The Moon's Spectral Irradiance Computation using Relative Positions between the Sun, Moon, and the Satellite

Seok-Bae SEO* and Young-Joo SONG**

Abstract

The spectral irradiance of the Moon is used to monitor the performance of on-board satellite's visible channel detectors. This paper established a method to compute the spectral irradiance of the Moon using the relative positions between the Sun, Moon, and the COMS (Communication, Ocean, Meteorological Satellite), which is generated through the COMS FDS (Flight Dynamics Subsystem). The established computation method is applied to the algorithm which is developed to detect and compensate the degradations of COMS MI (Meteorological Imager) visible channel detectors.

초 록

달의 방사조도는 위성 가시채널 검출기의 성능을 감시하기 위해서 사용된다. 본 논문에서는 천리안위성 FDS (Flight Dynamics Subsystem)에서 생성한 태양, 달, 위성의 위치 정보를 이용하여 달의 방사조도를 계산하는 방법 및 결과를 설명한다. 계산 결과는 천리안위성 기상탐재체 가시채널 검출기의 성능저하를 검출하고 보상하기 위한 알고리즘에 적용되었다.

키워드 : 가시채널 검출기 (visible channel detectors), 성능저하 (performance degradation), 달의 방사조도 (Moon's spectral irradiance), 좌표변환 (coordinate transformation), MCMF 좌표계 (Moon Centered Moon Fixed Coordinate), ROLO 모델 (RObotic Lunar Observatory model)

1. 서 론

가시채널 검출기 (visible channel detectors)는 위성의 임무기간 동안 성능저하 (performance degradation)가 발생 (수%/년)한다^{[1][2]}. 천리안위성 기상탐재체 (COMS MI :

Communication Ocean Meteorological Satellite Meteorological Imager, 이하, 기상탐재체) 영상 전처리시스템 (IMPS : IMage Preprocessing Subsystem)에서는 가시채널 검출기의 성능저하를 검출 및 보상하기 위해서 달의 방사조도 (Moon's spectral irradiance)를 이용하고 있다^{[2][3]}.

접수일(2013년 5월 3일), 수정일(1차 : 2013년 6월 10일, 게재 확정일 : 2013년 7월 1일)

* 위성지상시스템개발팀/sbseo@kari.re.kr

** 위성지상시스템개발팀/dearyjs@kari.re.kr

달에는 대기효과가 존재하지 않고 정지궤도 위성의 위치에서 관측되는 부분이 일정하기 때문에, 주기적으로 달 관측 영상을 확보하면 기상탐재체 가시채널 검출기 (이하, 검출기)의 성능을 감시할 수 있다.

검출기의 성능저하를 검출 및 보상하기 위해 두 가지 방법으로 산출된 달의 방사조도를 서로 비교한다. 첫 번째는 가시채널 복사보정 결과에서 계산하는 달의 방사조도로, 검출기의 성능저하 특성을 내포하는 값이다^[2]. 두 번째는 본 연구에서 논의하고자 하는 태양/달/위성의 위치에 기반하여 산출하는 달의 방사조도로, 앞서 첫 번째 방법을 통하여 산출된 값과의 비교 대상이 되는 기준이다^[3].

태양/달/위성의 위치는 시간에 따라서 변동되며, 천리안위성에서는 FDS (Flight Dynamics Subsystem)에서 각 위치를 예측하여 Ephemerides file로 생성한다. Ephemerides file에는 태양/달의 경우 30초, 위성은 15초 간격의 위치가 저장되어있다. 따라서 기상탐재체가 취득한 달 영상에서 달 중심을 관측한 시각을 결정하면 Ephemerides file에서 태양/달/위성의 위치를 계산할 수 있다.

이미 기존의 논문에서 달의 방사조도를 계산하는 수식 및 결과를 기술하고 있지만 소프트웨어 구현 및 검증에 도움이 되는 중간과정의 수식에 대한 설명 및 결과가 생략되어 있는 실정이다^{[1][2]}. 또한 태양/달/위성의 위치를 이용한 달의 방사조도 계산에 요구되는 고유값은 해당 검출기의 과장응답 값 (위성 발사 전 지상에서 측정함) 뿐이며, 나머지 계수 및 수식은 정지궤도위성에 탑재된 기상탐재체에 공통적으로 적용할 수 있다는 특징을 갖는다. 이에 본 논문에서는 좌표계 변환 및 달의 방사조도 계산과 관련한 중간 과정의 계산수식 및 결과를 정리하여 기술함으로써, 현재 설계 중인 정지궤도복합위성의 기상탐재체 (AMI, Advanced Meteorological Imager) 지상국 개발을 포함한 향후의 연구개발에 활용하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제2장에서는 달의 방사조도를 계산하기 위한 좌표계 및

시간계를, 제3장에서는 태양/달/위성의 위치를 이용한 달의 방사조도 계산수식을 다루었으며, 제4장에서는 태양/달/위성의 위치에 기반한 달의 방사조도의 계산 및 실험 결과에 대하여 논하였다.

2. 시간계 및 좌표계의 개요

2.1 시간계의 정의 및 변환

달의 관측시각을 나타내기 위해 사용하는 기본 시간계는 UTC (Universal Time Coordinated)이다. 태양/달/위성의 위치를 효율적으로 계산하기 위해서는 Calendar Date 형태 (y, m, d, hh, mn, ss)로 표시된 UTC를 Julian Date (t_{JD}) 및 Julian Century (t) 형태의 시간으로 변환해 주어야 하며 그 변환식은 각각 식 (1) 및 (2)와 같다^{[4][5]}.

$$t_{JD} = [367y - INT \left\{ \frac{7(y + INT \left\{ \frac{(m+9)}{12} \right\})}{4} \right\} + INT \left\{ \frac{275m}{9} \right\} + d] + 1721013.5 + \left[\frac{hh}{24} + \frac{mn}{1440} + \frac{ss}{86400} \right] \quad (1)$$

$$t = \frac{INT \{ t_{JD} \} - (2451545.0 - 0.5)}{36525} \quad (2)$$

식 (1) 및 (2)에서 y, m, d, hh, mn, ss 는 UTC 기반의 Calendar Date 형태로 표시된 년, 월, 일, 시, 분, 초를 의미하며, $INT \{ \}$ 는 괄호 내 값의 정수 (integer) 변환을 의미한다.

2.2 좌표계의 정의 및 변환

2.2.1 좌표계 개요

본 논문에서 사용된 좌표계 (coordinate system)는 EME2000 (Earth Mean Equator and Equinox of J2000), ECEF (Earth Centered Earth Fixed), MCMF (Moon Centered Moon Fixed) 좌표계이다. 우선 EME2000 좌표계는 지구 중심을 중심점으로 하며, x축은 2000년 1월

1일 12시 (terrestrial time 기준)의 춘분점 (vernal equinox)을 향하는 좌표축으로 정의한다. 또한 z축은 지구의 평균 북극축을 기준축으로 정의하고 이와 동시에 기준평면은 지구의 평균 적도 (mean equator)로 정의한다. 마지막으로 y축은 앞서 정의된 x축과 z축에 직교하는 축으로 정의한다. EME2000 좌표계는 흔히 ECI (Earth Centered Inertial) 좌표계로 정의하기도 한다. ECEF 좌표계는 EME2000 좌표계와 기준평면 및 모든 축의 정의가 동일하나, 기준축인 x축의 방향이 춘분점이 아닌 지구 자전과 함께 변화되는 본초자오선 (prime meridian) 축으로 정의한다. MCMF 좌표계는 그 중심이 달의 중심이며, x축은 정의된 달의 본초자오선, z축은 달의 평균 북극축, 기준 평면은 달의 평균적도면으로 정의하며 y축은 앞서 정의된 x축과 z축에 직교하는 축으로 정의한다.

Ephemerides file에서 태양/달/위성의 위치좌표는 ECEF 좌표계를 기반으로 표현한다. 이에 일련의 좌표계 변환행렬을 통하여 ECEF 좌표계에서 표현된 각각의 위치좌표들은 EME2000 좌표계 및 MCMF 좌표계로 변환할 수 있다.

2.2.2 ECEF to EME2000 좌표계 변환

Ephemerides file에서 천리안위성의 위치좌표는, ECEF 좌표계 기반의 구면좌표형식 (spherical coordinate form)이다. 위성의 거리 (r), 경도 (λ_{COMS}), 위도 (φ_{COMS})로 표현된 구면좌표형식의 값은 식 (3)을 통하여 직교좌표형식 (cartesian coordinate form)으로 변환이 가능하다^[6].

$$\mathbf{r}_{COMS}^{ECEF} = \begin{bmatrix} r \cos(\varphi_{COMS}) \cos(\lambda_{COMS}) \\ r \cos(\varphi_{COMS}) \sin(\lambda_{COMS}) \\ r \sin(\varphi_{COMS}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ECEF 좌표계에서 표현된 위성의 위치좌표 (\mathbf{r}_{COMS}^{ECEF})는 식 (4)를 통하여 EME2000 좌표 ($\mathbf{r}_{COMS}^{EME2000}$)로 변환이 가능하다^[7].

$$\mathbf{r}_{COMS}^{EME2000} = PR \times \mathbf{r}_{COMS}^{ECEF} \quad (4)$$

여기서 PR 은 EME2000 좌표계로의 변환을 위한 좌표계 변환행렬이며, 전치세차행렬 (transposed precession matrix) P 와 항성시행렬 (sidereal time matrix) R 로 구성된다. 실제로 ECEF 좌표계를 EME2000 좌표계로 변환할 때는 각기 다른 네 개의 변환행렬 (P, N, R, W)이 필요한데, 두 개의 행렬 (N, W)의 값이 단위행렬과 유사하므로 본 논문에서는 PR 행렬 (P, R)을 이용하여 좌표계 변환을 수행하였다^[7]. 식 (4)의 PR 행렬을 이용하면, 위성 뿐만 아니라 ECEF 좌표계에서 표현된 태양 (\mathbf{r}_{Sun}^{ECEF}) 및 달 (\mathbf{r}_{Moon}^{ECEF})에 대한 위치좌표를 EME2000 좌표계 기준으로 변환 ($\mathbf{r}_{Sun}^{EME2000}, \mathbf{r}_{Moon}^{EME2000}$)이 가능하다. 식 (5)에서는 식 (4)에서 정의된 PR 행렬의 성분을 구체적으로 보여주고 있다.

$$\mathbf{r}_{COMS}^{EME2000} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \mathbf{r}_{COMS}^{ECEF} \quad (5)$$

식 (5)에서 P 행렬의 자세한 계산수식은 표 1에 기술하였다.

표 1. 전치세차행렬 (P)의 계산수식

변수	계산수식 또는 값
P	$p_{11} = \cos(z_A + \zeta_A) - 2\sin^2(\frac{\theta_A}{2}) \cos(z_A) \cos(\zeta_A)$ $p_{12} = \sin(z_A + \zeta_A) - 2\sin^2(\frac{\theta_A}{2}) \sin(z_A) \cos(\zeta_A)$ $p_{13} = \cos(\zeta_A) \sin(\theta_A)$ $p_{21} = -\sin(z_A + \zeta_A) + 2\sin^2(\frac{\theta_A}{2}) \cos(z_A) \sin(\zeta_A)$ $p_{22} = \cos(z_A + \zeta_A) + 2\sin^2(\frac{\theta_A}{2}) \sin(z_A) \sin(\zeta_A)$ $p_{23} = -\sin(\zeta_A) \sin(\theta_A)$ $p_{31} = -\cos(z_A) \sin(\theta_A)$ $p_{32} = -\sin(z_A) \sin(\theta_A)$ $p_{33} = \cos(\theta_A)$
ζ_A	$\zeta_A = \zeta_1 t + \zeta_2 t^2 + \zeta_3 t^3$
z_A	$z_A = z_1 t + z_2 t^2 + z_3 t^3$
θ_A	$\theta_A = \theta_1 t + \theta_2 t^2 + \theta_3 t^3$
ζ_1	$\zeta_1 = 1.118086038020000 \times 10^{-2} \text{ (rad/Julian Century)}$
ζ_2	$\zeta_2 = 1.464331200000000 \times 10^{-6} \text{ (rad/Julian Century}^2)$
ζ_3	$\zeta_3 = 8.726650000000000 \times 10^{-8} \text{ (rad/Julian Century}^3)$
z_1	$z_1 = 1.118086038020000 \times 10^{-2} \text{ (rad/Julian Century)}$
z_2	$z_2 = 5.307546300000000 \times 10^{-6} \text{ (rad/Julian Century}^2)$
z_3	$z_3 = 8.901180000000001 \times 10^{-8} \text{ (rad/Julian Century}^3)$
θ_1	$\theta_1 = 9.717173940000001 \times 10^{-3} \text{ (rad/Julian Century)}$
θ_2	$\theta_2 = -2.068215200000000 \times 10^{-6} \text{ (rad/Julian Century}^2)$
θ_3	$\theta_3 = -2.024582000000000 \times 10^{-7} \text{ (rad/Julian Century}^3)$

표 1에서 변수 ζ_A , z_A , θ_A 는 기준 평균 시스탬의 기산 (epoch) 시점과 현재 기산 시점 사이의 세차 변수들을 다항식 형태로 근사화하여 표현한 변수이다^[7]. 또한 표 1에서의 시간 t 는 식 (2)를 통해서 정의한 Julian Century이다.

식 (5)의 두 번째 행렬에서 θ 는 그리니치 진항성시 (Greenwich true sidereal time)를 의미한다. θ 에 대한 자세한 계산수식은 표 2에 정리하였다^[7].

표 2. 그리니치 진 항성시 (θ)의 계산수식

변수	계산수식 또는 값
θ	$\theta = \bar{\theta} + \Delta\psi \cos(\epsilon_A)$
$\bar{\theta}$	$\bar{\theta} = \bar{\theta}_0 - INT\{\bar{\theta}_0/2\pi\} \times 2\pi$ $\bar{\theta}_0 = \frac{2\pi}{86400}[\theta_0 + \theta_1 t + \theta_2 t^2 + \theta_3 t^3]$ $+ \Omega_N[86400 \times (t_{JD} - 0.5 - INT\{t_{JD}\})]$ $\theta_0 = 24110.54841 \text{ (sec)}$ $\theta_1 = 8640184.812866 \text{ (sec/Julian Century)}$ $\theta_2 = 0.093104 \text{ (sec/Julian Century}^2\text{)}$ $\theta_3 = -0.0000062 \text{ (sec/Julian Century}^3\text{)}$
Ω_N	$\Omega_N = 7.292115822413922 \times 10^5 \text{ (rad/sec)}$
$\Delta\psi$	$\Delta\psi = \Delta\psi_1 \sin(\Omega_m) + \Delta\psi_2 \sin(2\Omega_m) + \Delta\psi_3 \sin(2\lambda_s)$ $+ \Delta\psi_4 \sin(M_s) + \Delta\psi_5 \sin(2\lambda_m) + \Delta\psi_6 \sin(M_m)$ $\Delta\psi_1 = -8.338795320000000 \times 10^{-7} \text{ (rad)}$ $\Delta\psi_2 = 9.987162000000000 \times 10^{-7} \text{ (rad)}$ $\Delta\psi_3 = -6.394692500000000 \times 10^{-6} \text{ (rad)}$ $\Delta\psi_4 = 6.932836000000000 \times 10^{-7} \text{ (rad)}$ $\Delta\psi_5 = -1.100527100000000 \times 10^{-6} \text{ (rad)}$ $\Delta\psi_6 = 3.442177000000000 \times 10^{-7} \text{ (rad)}$
Ω_m	$\Omega_m = 2.18244696315630 - 33.7570413813530 t$
λ_m	$\lambda_m = 3.81033300978390 + 8399.70910754630 t$
λ_s	$\lambda_s = 4.89505513989840 + 628.331969753200 t$
M_m	$M_m = 2.35554871836910 + 8328.69141593650 t$
M_s	$M_s = 6.2400407680703 + 628.301950090060 t$
ϵ_A	$\epsilon_A = \epsilon_0 + \epsilon_1 t + \epsilon_2 t^2 + \epsilon_3 t^3$ $\epsilon_0 = 0.4090928022831 \text{ (rad)}$ $\epsilon_1 = -2.269661066 \times 10^{-4} \text{ (rad/Julian Century)}$ $\epsilon_2 = -2.7925 \times 10^{-9} \text{ (rad/Julian Century}^2\text{)}$ $\epsilon_3 = 8.7965 \times 10^{-9} \text{ (rad/Julian Century}^3\text{)}$

표 2에서 변수들을 정리하면 다음과 같다. Greenwich true sidereal time θ , Greenwich

mean sidereal time $\bar{\theta}$, Earth's angular rate Ω_N (rad/sec), simplified Moon's longitude $\Delta\psi$ (rad), Moon's ascending node longitude from current mean equinox Ω_m (rad), Moon's mean geocentric longitude from mean equinox λ_m (rad), Sun's mean geocentric longitude from mean equinox λ_s (rad), Moon's mean anomaly M_m (rad), Sun's mean anomaly M_s (rad), current mean obliquity ϵ_A (rad)를 각각 의미한다. 또한 시간 t 는 식 (2)에서 정의한 Julian Century이다.

2.2.3 EME2000 to MCMF 좌표계 변환

EME2000 좌표계를 기준으로 표현된 위성의 위치좌표 ($r_{COMS}^{EME2000}$)는 식 (6)을 이용하여 MCMF 좌표계 (r_{COMS}^{MCMF})로 변환이 가능하다^[7].

$$r_{COMS}^{MCMF} = M \times (r_{COMS}^{EME2000} - r_{Moon}^{EME2000}) \quad (6)$$

식 (6)에서 M 은 EME2000 좌표계에서 MCMF 좌표계로의 변환행렬이며, $r_{COMS}^{EME2000}$ 와 $r_{Moon}^{EME2000}$ 는 각각 EME2000 좌표계를 기준으로 표현된 위성과 달의 위치, r_{COMS}^{MCMF} 는 MCMF 좌표계로 표현된 위성의 위치이다. EME2000 좌표계에서 표현된 태양의 위치 ($r_{Sun}^{EME2000}$) 역시 식 (6)을 이용하여 MCMF 좌표계로 변환 (r_{Sun}^{MCMF})할 수 있다. 좌표계 변환행렬 M 의 성분은 식 (7)과 같으며, 상세한 계산수식은 표 3에 정리하였다^[7]. 표 3에서 α , δ , w 는 MCMF 좌표계로의 변환을 위한 계수들이며, d 는 J2000을 기준으로 한 Julian Century이다.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

표 3. EME2000 to MCMF 좌표계 변환행렬 (M)의 계산수식

변수	계산수식 또는 값
M	$m_{11} = -\cos(w) \sin(\alpha) - \sin(w) \cos(\alpha) \sin(\delta)$ $m_{12} = \cos(w) \cos(\alpha) - \sin(w) \sin(\alpha) \sin(\delta)$ $m_{13} = \sin(w) \cos(\delta)$ $m_{21} = \sin(w) \sin(\alpha) - \cos(w) \cos(\alpha) \sin(\delta)$ $m_{22} = -\sin(w) \cos(\alpha) - \cos(w) \sin(\alpha) \sin(\delta)$ $m_{23} = \cos(w) \cos(\delta)$ $m_{31} = \cos(\alpha) \cos(\delta)$ $m_{32} = \sin(\alpha) \cos(\delta)$ $m_{33} = \sin(\delta)$
α	$\alpha = [269.9949 + 0.0031t - 3.8787\sin(e_1)$ $- 0.1204\sin(e_2) + 0.0700\sin(e_3) - 0.0172\sin(e_4)$ $+ 0.0072\sin(e_6) - 0.0052\sin(e_{10})$ $+ 0.0043\sin(e_{13})] \times \pi/180$ $\delta = [66.5392 + 0.0130t + 1.5419\cos(e_1)$ $+ 0.0239\cos(e_2) - 0.0278\cos(e_3) + 0.0068\cos(e_4)$ $- 0.0029\cos(e_6) + 0.0009\cos(e_7) + 0.0008\cos(e_{10})$ $- 0.0009\cos(e_{13})] \times \pi/180$
δ	$w = w_0 - INT\{w_0/2\pi\} \times 2\pi$
w	$w_0 = [38.3213 + 13.17635815d - 1.4 \times 10^{-12}d^2$ $+ 3.5610\sin(e_1) + 0.1208\sin(e_2) - 0.0642\sin(e_3)$ $+ 0.0158\sin(e_4) + 0.0252\sin(e_5) - 0.0066\sin(e_6)$ $- 0.0047\sin(e_7) - 0.0046\sin(e_8) + 0.0028\sin(e_9)$ $+ 0.0052\sin(e_{10}) + 0.0040\sin(e_{11}) + 0.0019\sin(e_{12})$ $- 0.0044\sin(e_{13})] \times \pi/180$
e_1	$e_1 = (125.045 - 0.0529921d) \times \pi/180$
e_2	$e_2 = (250.089 - 0.1059842d) \times \pi/180$
e_3	$e_3 = (260.008 + 13.0120009d) \times \pi/180$
e_4	$e_4 = (176.625 + 13.3407154d) \times \pi/180$
e_5	$e_5 = (357.529 + 0.9856003d) \times \pi/180$
e_6	$e_6 = (311.589 + 26.4057084d) \times \pi/180$
e_7	$e_7 = (134.963 + 13.0649930d) \times \pi/180$
e_8	$e_8 = (276.617 + 0.3287146d) \times \pi/180$
e_9	$e_9 = (34.226 + 1.7484877d) \times \pi/180$
e_{10}	$e_{10} = (15.134 - 0.1589763d) \times \pi/180$
e_{11}	$e_{11} = (119.743 + 0.0036096d) \times \pi/180$
e_{12}	$e_{12} = (239.961 + 0.1643573d) \times \pi/180$
e_{13}	$e_{13} = (25.053 + 12.9590088d) \times \pi/180$
d	$d = 36525t$

3. 태양, 달, 위성의 위치를 이용한 달의 방사조도 계산수식

태양/달/위성의 위치를 이용해서 계산하는 달의 기준 (reference) 방사조도 (I_{ref})는 식 (8)과 같다^[3]. 식 (8)에서 I_{ROLO} 는 ROLO (RObotic Lunar Observatory) 모델을 이용하여 계산하는 달의 방사조도 ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$), d_{MC} 는 달과 위성 간 거리 (km), d_{MS} 는 달과 태양간 거리 (AU)

를 각각 의미한다.

$$I_{ref} = I_{ROLO} \times \left(\frac{384400}{d_{MC}}\right)^2 \left(\frac{1}{d_{MS}}\right)^2 \quad (8)$$

$$= I_{ROLO} \times \left(\frac{1}{\frac{d_{MC}}{384400}}\right)^2 \left(\frac{1}{d_{MS}}\right)^2$$

$$(Wm^{-2}\mu m^{-1})$$

3.1 ROLO 모델 달의 방사조도 : I_{ROLO}

ROLO 모델을 이용해서 계산한 방사조도 (I_{ROLO})의 계산수식은 식 (9)와 같다^[3]. 이때 λ 는 파장 (nm), $I(\lambda)$ 는 해당 파장에서 방사조도 ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$), $\phi(\lambda)$ 는 검출기의 파장 응답을 각각 의미한다.

$$I_{ROLO} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \times \phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda} (Wm^{-2}\mu m^{-1}) \quad (9)$$

3.1.1 검출기의 파장응답 : $\phi(\lambda)$

검출기의 파장 응답 ($\phi(\lambda)$)은 검출기의 고유한 값으로 위성 발사 전 탑재체의 지상시험에서 측정되며, 그림 1과 같은 특성을 갖는다^[8].

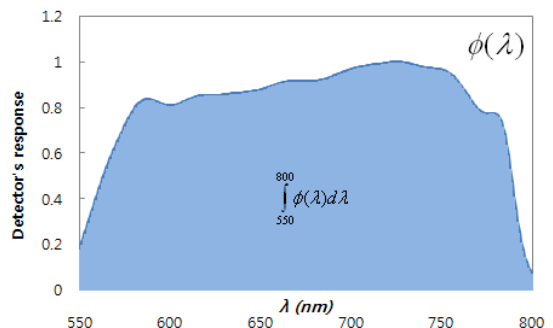


그림 1. 검출기의 파장응답 ($\phi(\lambda)$)

3.1.2 해당 파장에서 방사조도 : $I(\lambda)$

해당 파장에서 방사조도 ($I(\lambda)$)는 식 (10)으로 계산한다^[3]. 이때 $A(\lambda)$ 는 디스크 등가 반사

도 (disk equivalent reflectance), Ω_M 은 평균거리에서의 달의 입체각 6.4236×10^{-5} (sr), $E_{sun}(\lambda)$ 는 태양의 방사조도 ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)를 각각 의미한다.

$$I(\lambda) = A(\lambda) \times E_{SUN}(\lambda) \times \Omega_M / \pi \quad (10)$$

$$(Wm^{-2}\mu m^{-1})$$

3.1.2.1. 디스크 등가 반사도 : $A(\lambda)$

각 파장 (λ)에 대한 디스크 등가 반사도 $A(\lambda)$ 는 식 (11)으로 계산한다. $A(\lambda)$ 를 계산하기 위한 상세한 수식은 표 4~7에 정리하였다 [13].

$$A(\lambda) = e^{(\ln A(\lambda))} \quad (11)$$

표 4. 디스크 등가 반사도 ($A(\lambda)$)의 계산수식

변수	계산수식 또는 값
$\ln A(\lambda)$	$\ln A(\lambda) = \sum_{i=0}^3 a_i(\lambda) g^i + \sum_{i=1}^3 b_i(\lambda) \xi^{2i-1} + c_1 \psi + c_2 \phi + c_3 \psi \xi^o + c_4 \phi \xi^o + d_1(\lambda) e^{-g^o/p_1} + d_2(\lambda) e^{-g^o/p_2} + d_3(\lambda) \cos[2\pi(g^o - p_3)/p_4]$
g	$g = \arccos \left(\frac{(\mathbf{r}_{Moon}^{ECEF} - \mathbf{r}_{Sun}^{ECEF}) \cdot (\mathbf{r}_{Moon}^{ECEF} - \mathbf{r}_{COMS}^{ECEF})}{\ \mathbf{r}_{Moon}^{ECEF} - \mathbf{r}_{Sun}^{ECEF}\ \ \mathbf{r}_{Moon}^{ECEF} - \mathbf{r}_{COMS}^{ECEF}\ } \right)$
ξ	$\xi = \text{atan2}(\mathbf{r}_{Sun,y}^{MCMF}, \mathbf{r}_{Sun,x}^{MCMF})$
ψ	$\psi = \arcsin \left(\frac{\mathbf{r}_{COMS,z}^{MCMF}}{\sqrt{(\mathbf{r}_{COMS,x}^{MCMF})^2 + (\mathbf{r}_{COMS,y}^{MCMF})^2 + (\mathbf{r}_{COMS,z}^{MCMF})^2}} \right) \times 180/\pi$
ϕ	$\phi = \text{atan2}(\mathbf{r}_{COMS,y}^{MCMF}, \mathbf{r}_{COMS,x}^{MCMF}) \times 180/\pi$
c_1	$c_1 = 0.00034115$ (deg ⁻¹)
c_2	$c_2 = -0.0013425$ (deg ⁻¹)
c_3	$c_3 = 0.00095906$ (deg ⁻¹ rad ⁻¹)
c_4	$c_4 = 0.00066229$ (deg ⁻¹ rad ⁻¹)
p_1	$p_1 = 4.06054$ (deg)
p_2	$p_2 = 12.8802$ (deg)
p_3	$p_3 = -30.5858$ (deg)
p_4	$p_4 = 105.242097258197$ (deg)

표 4에서 변수들을 정리하면 다음과 같다. Absolute phase angle g (rad), absolute phase angle g^o (deg), Sun's Selenographic longitude ξ (rad), Sun's Selenographic longitude ξ^o (deg), COMS' Selenographic latitude ψ (deg),

COMS' Selenographic longitude ϕ (deg)를 각각 의미한다. 또한 태양/달/위성의 위치를 나타내는 위치좌표 (\mathbf{r})의 표현에 있어서 위첨자는 해당 위치좌표의 좌표계를 의미한다.

표 5~7에서는 $A(\lambda)$ 의 계산과정에서 요구되는 파장별 계수 ($a_i(\lambda)$, $b_j(\lambda)$, $d_j(\lambda)$, ($i=0,1,2,3$), ($j=1,2,3$)) 값을 보여주고 있으며 [1], 시물레이션을 위해 각 값은 1 (nm) 간격으로 선형보간 (interpolation)하여 사용하였다.

표 5. 디스크 등가 반사도 계산수식의 계수 ($a_i(\lambda)$, ($i=0,1,2,3$))

λ	$a_0(\lambda)$	$a_1(\lambda)$	$a_2(\lambda)$	$a_3(\lambda)$
549.1	-2.10782	-1.66736	0.41697	-0.22026
553.8	-2.12504	-1.6597	0.38409	-0.20655
665.1	-1.88914	-1.58096	0.30477	-0.17908
693.1	-1.8941	-1.58509	0.2808	-0.16427
703.6	-1.92103	-1.60151	0.36924	-0.20567
745.3	-1.86896	-1.57522	0.33712	-0.19415
763.7	-1.85258	-1.47181	0.14377	-0.11589
774.8	-1.80271	-1.59357	0.36351	-0.20326
865.3	-1.74561	-1.58482	0.35009	-0.19569

표 6. 디스크 등가 반사도 계산수식의 계수 ($b_j(\lambda)$, ($j=1,2,3$))

λ	$b_1(\lambda)$	$b_2(\lambda)$	$b_3(\lambda)$
549.1	0.03451	0.01452	-0.00517
553.8	0.04052	0.01009	-0.00388
665.1	0.04415	0.00983	-0.00389
693.1	0.04429	0.00914	-0.00351
703.6	0.04494	0.00987	-0.00386
745.3	0.03967	0.01318	-0.00464
763.7	0.04435	0.02	-0.00738
774.8	0.0471	0.01196	-0.00476
865.3	0.04142	0.01612	-0.0055

표 7. 디스크 등가 반사도 계산수식의 계수 ($d_j(\lambda)$, ($j=1,2,3$))

λ	$d_1(\lambda)$	$d_2(\lambda)$	$d_3(\lambda)$
549.1	0.36814	-0.09815	0
553.8	0.37206	-0.10745	0.00347
665.1	0.37141	-0.13514	0.01248
693.1	0.39109	-0.17048	0.01754
703.6	0.37155	-0.13989	0.00412
745.3	0.36888	-0.14828	0.00958
763.7	0.39126	-0.16957	0.03053
774.8	0.36908	-0.16182	0.0083
865.3	0.392	-0.18837	0.00978

3.1.2.2. 태양의 방사조도 : $E_{sun}(\lambda)$

각 파장대 별 태양의 방사조도 ($E_{sun}(\lambda)$)는 1985년 Rossow가 최종적으로 정리한 값을 사용하였다^[8]. 표 8은 유효 파장에 대한 태양의 방사조도 값을 보여주고 있으며^{[1][8]}, 그림 2는 파장에 대한 태양의 방사조도를 표출한 결과로 시물레이션을 위해서 1 (nm) 간격으로 선형보간한 결과이다. 표 8에서 λ 는 파장 (nm)을, $E_{sun}(\lambda)$ 는 태양의 방사조도 ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)를 각각 의미한다.

표 8. 일부 파장에 대한 태양의 방사조도($E_{sun}(\lambda)$)

λ	$E_{sun}(\lambda)$	λ	$E_{sun}(\lambda)$	λ	$E_{sun}(\lambda)$	λ	$E_{sun}(\lambda)$
550	1878	615	1705	680	1490	745	1278
555	1857	620	1696	685	1475	750	1269
560	1844	625	1690	690	1456	755	1256
565	1847	630	1668	695	1439	760	1240
570	1846	635	1654	700	1410	765	1220
575	1842	640	1637	705	1399	770	1201
580	1848	645	1609	710	1386	775	1200
585	1815	650	1584	715	1365	780	1188
590	1785	655	1538	720	1345	785	1182
595	1792	660	1528	725	1342	790	1160
600	1772	665	1557	730	1327	795	1147
605	1759	670	1530	735	1311	800	1138
610	1736	675	1515	740	1285		

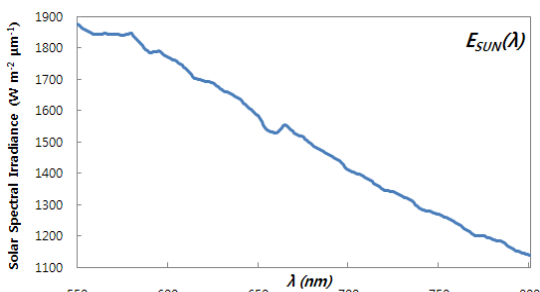


그림 2. 태양의 방사조도 ($E_{sun}(\lambda)$)

3.2 달과 위성 사이의 거리 : d_{MC}

달 (r_{Moon}^{ECEF})과 위성 (r_{COMS}^{ECEF})간의 거리 d_{MC} 는 식 (12)로 계산할 수 있다^[3].

$$d_{MC} = \frac{\|r_{Moon}^{ECEF} - r_{COMS}^{ECEF}\|}{1000} \text{ (km)} \quad (12)$$

3.3 달과 태양 사이의 거리 : d_{MS}

달 (r_{Moon}^{ECEF})과 태양 (r_{Sun}^{ECEF})간의 거리 d_{MS} 는 식 (13)으로 계산할 수 있다^[3]. 식 (13)에서 d_{ES} 는 AU (Astronomical Unit)으로의 변환을 위한 태양과 지구간의 거리 $1.49597870691 \times 10^{11}$ (km)이다.

$$d_{MS} = \frac{\|r_{Moon}^{ECEF} - r_{Sun}^{ECEF}\|}{d_{ES}} \text{ (AU)} \quad (13)$$

식 (12) 및 (13)에서 ECEF 좌표계로 표현된 태양/달/위성의 위치는, Ephemerides file에서 달 관측 시각을 기준으로 선형보간을 통하여 계산이 가능하다. 또한 앞서 설명하였듯이 천리안 위성의 위치는 Ephemerides file 내에서 구면좌표계 기준으로 제공됨으로, 식 (3)을 통하여 직교 좌표계로의 변환과정을 거쳐야 한다.

그림 3은 이상 기술한 달의 방사조도 계산에 대한 데이터 흐름을 정리한 것으로, Eq. (번호)는 본문 내에서 설명된 수식의 번호이며, Fig. 및 Table 번호는 각각 본문의 그림과 표의 번호이다.

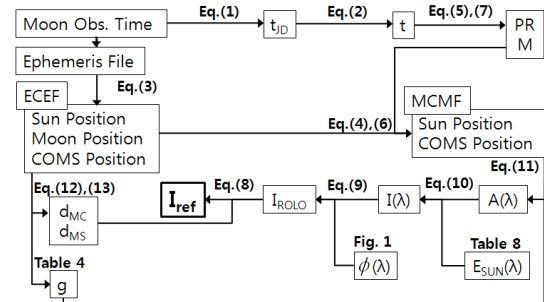


그림 3. 태양, 달, 위성의 상대 위치를 이용한 달의 방사조도 계산 흐름도

달의 방사조도를 계산하기 위해서는 우선 검출기의 파장응답 ($\phi(\lambda)$)과 태양의 방사조도

($E_{sun}(\lambda)$)를 사전에 확보하여야 하며, 달 관측 시각 (Moon observation time)을 이용해서 태양/달/위성의 ECEF 좌표계 위치를 결정하여야 한다. 그리고 결정된 ECEF 좌표계 태양/위성의 위치를 MCMF 좌표계로 변환하기 위하여, 좌표계 변환행렬 PR 및 M 의 계산을 선행해야 한다. 또한 태양/달/위성의 ECEF 좌표계 위치로부터 계산한 달과 위성, 달과 태양의 상호간 거리 (d_{MC} , d_{MS}) 및 달의 절대 위상각 (g)을 구하고, $A(\lambda)$, $I(\lambda)$, I_{ROLO} 의 계산을 통하여 최종 달의 방사조도인 I_{ref} 의 산출이 가능하다.

추후 다른 정지궤도 위성 기상탐체제에서도 달의 방사조도를 계산할 때, 고유값인 해당 검출기의 파장응답과 태양/달/위성의 위치만 있으면 이상 설명한 방법으로 달의 방사조도를 계산할 수 있다.

4. 계산 및 실험 결과

본 장에서는 여러 달 관측 중 한 개를 선택하여, 달의 방사조도 계산 결과 (I_{ref})와 그 계산 과정에서 도출된 중간 결과값을 상세히 기술한다. 계산에 사용한 달 관측 영상은 그림 4와 같으며, 달 영상의 관측 시각과 달 중심을 관측한 시각은 다음과 같다.

- 달 영상 관측시각 : 2012.3.7 02:58:22 (UTC)
- 달 중심 관측시각 : 2012.3.7 02:58:43 (UTC)



그림 4. 달 관측 영상 (2012-03-07 02:58:22 UTC)

표 9는 최종 달의 방사조도 계산과정에서 도출되는 중간 결과값을 정리한 것이고, 그 중에서 파장 별로 계산되는 디스크 등가 반사도 ($A(\lambda)$)과 방사조도 ($I(\lambda)$)를 그림 5 및 6에 표

출하였다.

표 9. 달의 방사조도 계산의 중간 결과값

(2012-03-07 02:58:43 UTC)

변수	중간 결과값
t_{MC}	2012-03-07 02:58:43
t	0.12179329
t_{JD}	2455993.62410880
r_{Moon}^{ECEF}	1.847778×10^8 -3.179755×10^8 4.469410×10^7
r_{Sun}^{ECEF}	-1.100124×10^{11} 9.878705×10^{10} -1.333289×10^{10}
r_{COMS}^{ECEF}	-2.608984×10^7 3.311661×10^7 -1.498552×10^4
r	4.215910×10^7
φ_{COMS}	2.238065
λ_{COMS}	-3.554516×10^{-4}
$r_{Moon}^{EME2000}$	-3.181964×10^8 1.843053×10^8 4.507100×10^7
$r_{Sun}^{EME2000}$	1.445234×10^{11} -3.114467×10^{10} -1.350398×10^{10}
$r_{COMS}^{EME2000}$	3.908764×10^7 -1.579690×10^7 -6.126946×10^4
r_{Sun}^{MCMF}	1.447249×10^{11} 3.439635×10^{10} 3.969865×10^9
r_{COMS}^{MCMF}	4.085661×10^8 -2.017495×10^7 4.895305×10^7
PR	-8.680878×10^{-1} , 4.964093×10^{-1} , 1.183454×10^{-3} -4.964096×10^{-1} , -8.680884×10^{-1} , -1.611574×10^{-6} 1.026543×10^{-3} , -5.888771×10^{-4} , 9.999993×10^{-1}
P	9.999956×10^{-1} , 2.723560×10^{-3} , 1.183454×10^{-3} -2.723560×10^{-3} , 9.999963×10^{-1} , -1.611574×10^{-6} -1.183454×10^{-3} , -1.611642×10^{-6} , 9.999993×10^{-1}
R	-8.667332×10^{-1} , 4.987721×10^{-1} , 0.000000 -4.987721×10^{-1} , -8.667332×10^{-1} , 0.000000 0.000000 , 0.000000 , 1.000000
M	8.936094×10^{-1} , -4.005659×10^{-1} , -2.025072×10^{-1} 4.481452×10^{-1} , 8.214367×10^{-1} , 3.527146×10^{-1} 2.506141×10^{-2} , -4.059418×10^{-1} , 9.135553×10^{-1}
θ	3.663774
$\bar{\theta}$	3.663698
g	2.965883×10^{-1}
ξ	2.333380×10^{-1}
ψ	6.824184
ϕ	-2.826962

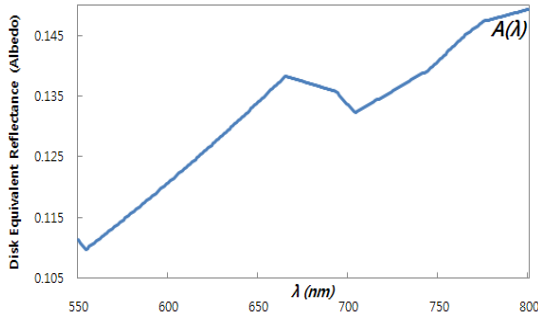


그림 5. 디스크 등가 반사도 ($A(\lambda)$)

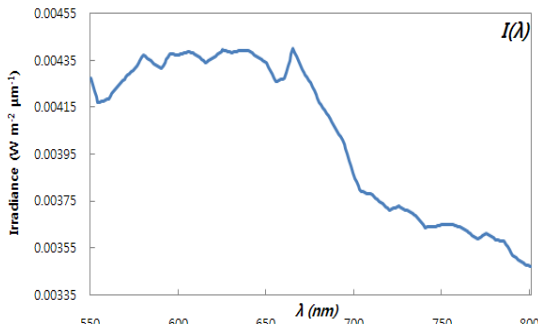


그림 6. 방사조도 ($I(\lambda)$)

표 9에서 변수들을 정리하면 다음과 같다. UTC Moon observation time t_{MC} , Julian Century Moon observation time t , Julian Date Moon observation time t_{JD} , the Moon's position at ECEF coordinate \mathbf{r}_{Moon}^{ECEF} (m), Sun's position at ECEF coordinate \mathbf{r}_{Sun}^{ECEF} (m), COMS' position at ECEF coordinate \mathbf{r}_{COMS}^{ECEF} (m), COMS' range in ECEF coordinate r (m), COMS' longitude in ECEF coordinate φ_{COMS} (rad), COMS' latitude in ECEF coordinate λ_{COMS} (rad), Moon's position in EME2000 coordinate $\mathbf{r}_{Moon}^{EME2000}$ (m), Sun's position in EME2000 coordinate $\mathbf{r}_{Sun}^{EME2000}$ (m), COMS' position in EME2000 coordinate $\mathbf{r}_{COMS}^{EME2000}$ (m), Sun's position in MCMF coordinate \mathbf{r}_{Sun}^{MCMF} (m), COMS' position in MCMF coordinate

\mathbf{r}_{COMS}^{MCMF} (m), conversion matrix from ECEF to EME2000 PR , transposed precession matrix P , transposed nutation matrix R , conversion matrix from EME2000 to MCMF M , Greenwich true sidereal time θ , Greenwich mean sidereal time $\bar{\theta}$, absolute phase angle g (rad), Selenographic longitude of the Sun ξ (rad), Selenographic latitude of COMS ψ (deg), Selenographic longitude of COMS ϕ (deg)를 각각 의미한다.

2012.3.7 02:58:43 (UTC) 태양/달/위성 위치에 기반하여 계산한 최종 달의 방사조도 I_{ref} 및 이때의 I_{ROLO} , d_{MC} , d_{MS} 값은 다음과 같다.

- I_{ref} : 2.583908×10^{-3} ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
- I_{ROLO} : 2.936817×10^{-3} ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
- d_{MC} : 4.119826×10^5 (km)
- d_{MS} : 9.947280×10^{-1} (AU)

그림 7은 AGI (Anlytical Graphics Inc.)사의 STK (Satellite Took Kit)을 이용하여, 2010년부터 2013년까지 4년 동안 매일 00:00:00 (UTC) 일때의 태양/달/위성의 위치좌표 (ECEF 좌표계 기준)를 생성하여 최종 달의 방사조도 (I_{ref}) 및 절대위상각 (g)을 계산한 결과이고, 그림 8은 2010년 1월부터 3월까지를 확대해서 표출한 결과이다. 이때 태양/달의 위치좌표는 JPL (Jet Propulsion Laboratory)의 DE405 정밀천체력을 이용하여 산출 되었으며, 천리안위성의 위치좌표는 궤도 조정을 위한 어떠한 기동 (maneuver)도 없는 것으로 전제한 뒤, 2체문제로 간략화된 운동방정식으로 계산하였다.

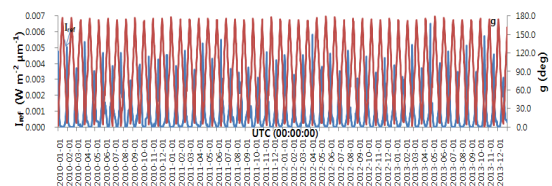


그림 7. 달의 방사조도 및 절대위상각 : 2010년~2013년

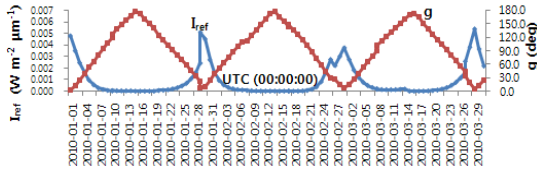


그림 8. 달의 방사조도 및 절대위상각 :
2010년, 1월~3월

그림 8에서 최종 달의 방사조도가 최대일 때 절대위상각이 최소이고, 두 값의 변동에 주기성이 있음을 확인할 수 있었으며, 절대위상각이 대략 5도에서 60도 사이에서 최종 달의 방사조도가 지수함수의 형태로 변화함을 볼 수 있었다.

여기에서 달의 방사조도가 지수함수의 형태로 변화되는 절대위상각의 범위는, Astrium이 권고한 달의 유효 절대위상각^[9]과 일치함을 확인하였다. 아울러 본 계산결과는 기상탑재체 검출기의 성능감쇄 분석에 직접 활용되었으며, 계산결과의 유효성 확인을 통하여 이미 검증을 완료하였다^[2].

5. 결 론

본 논문에서는 태양, 달, 위성의 위치를 이용하여 달의 방사조도를 계산하는 수식을 설명하고, 하나의 관측에 대한 달의 방사조도 및 중간계산결과를 제시하였다. 태양, 달, 위성의 위치는 FDS가 생성하는 Ephemerides file의 값을 선택해 보간하여 결정하였으며, 각 파장에 대한 검출기의 파장응답 계수 및 태양의 방사조도를 미리 계산한 다음 위치정보를 이용하여 최종적인 달의 방사조도 계산을 수행하였다.

검출기의 파장응답은 천리안위성 기상탑재체의 고유한 특성이며 (천리안위성 기상탑재체 가시채널의 유효파장, 550~800 nm), 나머지 수식 및 값은 다른 정지궤도위성 기상탑재체의 가시채널 검출기에 공통적으로 적용이 가능하다. 따라서 정지궤도복합위성 기상탑재체의 경우에도 가시채널 검출기의 파장응답 데이터만 확보한다

면, 이상 설명한 달의 방사조도 계산수식으로 해당 검출기의 성능저하를 감시하기 위한 기준 값인 달의 방사조도를 계산할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. Kieffer HH, Stone TC, "The spectral irradiance of the Moon", *Astronomical Journal*, Vol. 129, 2005, pp.2887-2901.
2. 서석배, 진경욱, "달 관측 영상을 이용한 천리안위성 기상탑재체 가시채널 검출기의 성능감쇄 분석", *대한원격탐사학회논문지*, 29권 1호, 2013, pp.115-121.
3. Ledez C (Astrium), "MI radiometric model", KARI and Astrium proprietary Doc., COMS.TN.00116.DP.T.ASTR, 2011, pp.30-31.
4. Vallado DA, Seago JH, Seidelmann PK, "Implementation issues surrounding the new IAU reference systems for astrodynamics", 16th American Astronautical Society/American Institute of Aeronautics and Astronautics (AAS/AIAA) Space Flight Mechanics Conference, 06-134, 2006, p.8.
5. Astronomical Applications Department of the U. S. Naval Observatory, "Julian Date Converter", <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/JulianDate.php>, 2013.
6. Philippe M (Astrium), "SGCS-INRSM interface control document", KARI and Astrium proprietary Doc., COMS.ICD.00009.DP.T.ASTR, 2008, pp.9-10.
7. Cayeux P (Astrium), "Computation of Selenographic coordinates", KARI and Astrium proprietary Doc., GNC_T.TCN.737140.ASTR, 2009, pp.3-11.
8. ITT Space System Division, "Commercial advance GEO-imager calibration and

alignment handbook", Doc.No. 8216505,
2008, p.6-14.

9. Joel D (Astrium), Ground segment manager
at Astrium, Private communication, Oct.
2012.