

MTF 성능이 반영된 가상 영상 제작 방법

김희섭*, 정대원**, 김규선***

Method of Generating Satellite Simulated Image in the Point of MTF

Hee-Seob Kim*, Dae-Won Chung**, Gyu-Sun Kim***

Abstract

Satellite performance can be evaluated by satellite product. When satellite development technology is in developing, most of efforts focus on success of satellite operation and safety. But, more and more efforts are focused on satellite performance and mission success. Especially quality of the image which is delivered to user is very important factor. In this paper, generating method for simulated image in the point of MTF is described.

초 록

위성의 성능은 위성 생산물에 의해 평가될 수 있다. 위성 기술 수준이 진입 단계인 경우 대부분의 노력이 위성 작동 및 안전성에 집중되지만, 위성 기술이 적정 수준 이상으로 확보된 이후에는 위성 성능 및 임무 성공에 개발 노력이 집중된다. 특히 광학 위성의 경우 사용자에게 전달되는 위성 영상 품질이 임무 성공 여부와 직접적으로 관련되어 있다. 본 논문은 위성 설계 단계에서 위성 영상 품질 평가에 사용될 수 있는 MTF가 반영된 가상 영상을 제작하는 방법을 제시하는 것을 내용으로 한다.

키워드 : 영상 (Image), 성능(Performance), MTF(Modulation Transfer Function), 위성(Satellite)

1. 서 론

광학 위성의 성능은 최종적으로 사용자에게 제공되는 위성 영상에 의해 평가된다. 국내 위성 개발 기술 수준이 향상됨에 따라 임무 수행 및 성능 향상에 많은 관심이 모아지고 있다.

위성 영상의 품질 지표로 GSD(Ground Sample Distance), MTF(Modulation Transfer Function), SNR(Signal to Noise Ratio) 등이 있다. 이들 지표는 대상을 검출하고 식별하는데 사용된다. 이들 값은 주로 위성 설계 및 제작에 의해 영향을 받으며, 관측 및 운영 환경 등에 의해서도 영향을 받는다.

* 다목적3호체계팀/askhs@kari.re.kr

** 다목적3호체계팀/dwchung@kari.re.kr

*** 다목적3호체계팀/gskim@kari.re.kr

본 논문에서는 위성 설계 단계에서 위성 영상 품질을 평가할 수 있는 가상 영상을 제작하는 방법을 제시하는 것을 내용으로 한다. 특히 MTF를 중심으로 MTF 구성 요소에 대한 분석과 이를 이용하여 가상 영상을 만드는 방법을 기술하였다. 본 논문에서 제시된 가상 영상 생성 기법은 위성 시스템 수준의 설계시 trade off에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 본 론

2.1 GSD 분석

위성 영상의 GSD는 탑재체 설계 및 관측 조건에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 광학 탑재체 설계는 탑재체가 직하점을 관측하는 경우를 기준으로 설계가 수행되며, 위성 탑재체가 직하점을 지향하지 않는 경우에는 GSD 성능이 저하된다.

● 직하점을 관측하는 경우

탑재체의 픽셀 크기를 P , 위성 고도를 H , 탑재체 유효 초점 거리를 EFL 이라고 하는 경우 GSD는 다음과 같이 표현된다.

$$GSD_r = \frac{P \times H}{EFL} \quad (1)$$

● 직하점을 관측하지 않는 경우

위성이 직하점이 아닌 다른 지점을 관측하는 경우 GSD는 위성 자세의 함수로 표현될 수 있다. GSD는 탑재체 시선벡터를 이용하여 탑재체 픽셀을 지구 표면에 투영한 경우 투영 영상의 크기로 정의된다[2]. 기하학적인 방법을 이용하면 근사적으로 다음과 같다.

- 탑재체 시선벡터에 수직인 방향

$$GSD_x = GSD_r \times \frac{S}{H} \quad (2)$$

- 탑재체 시선벡터 방향

$$GSD_y = GSD_r \times \frac{S}{H} \times \frac{1}{\cos(\theta + \phi)} \quad (3)$$

여기서 S 는 위성이 지상 관측을 위해 Nadir 방향으로부터 θ 도 회전한 경우 위성과 관측 지

점 사이의 거리이고, ϕ 는 지구 중심에서 위성과 관측지점이 이루는 각도이고, R 은 지구 반지름이다. S 와 ϕ 는 다음식을 이용하여 계산될 수 있다.

$$S = (H+R)\cos(\theta) - \sqrt{((H+R)^2\cos^2(\theta) - H^2 - 2H \times R)} \quad (4)$$

$$R+H = S\cos(\theta) + R\cos(\phi) \quad (5)$$

$$R\sin(\phi) = S\sin(\theta) \quad (6)$$

GSD의 기하학적인 평균은 다음과 같이 정의하여 사용할 수 있다.

$$GSD = \sqrt{GSD_x \times GSD_y \times \sin(\alpha)} \quad (7)$$

여기서 α 는 두변의 사이각이다.

2.2 MTF 분류

MTF 성능은 탑재체 설계 및 제작에 의해 영향을 주로 받으며, 부분적으로 위성 본체 성능 및 관측 조건에 의해 영향을 받는다. MTF 성능에 영향을 미치는 인자를 분류하면 다음과 같다.

- 1: System
- 2: Satellite
 - 3: Payload
 - 4: Detector
 - 5: Sampling
 - 5: Diffusion
 - 5: Discrete Charge Transfer
 - 5: Charge Transfer Inefficiency
 - 4: Optics
 - 5: Perfect Optics
 - 5: Defocus
 - 5: Aberration
 - 5: Degradation
 - 3: Spacecraft Bus
 - 4: Random Motion
 - 4: Velocity Mismatch
 - 4: Angle Mismatch
 - 3: Atmosphere
 - 4: Turbulence
 - 4: Aerosols
- 2: Image Processing

- 3: Compression
- 3: MTF Compensation
- 3: Resampling

2.3 MTF 구성

2.3.1 검출기

검출기에 의한 MTF 성능 저하는 구조적인 열화 요인과 동작 특성 요인으로 구분할 수 있다. 검출기 MTF는 Sampling, Diffusion, Discrete Charge Transfer, Charge Transfer Inefficiency MTF에 의해 표현된다. 각 요소에 의한 MTF 성능 저하는 다음과 같다.

- Sampling

검출기에 사용되는 픽셀 크기 제한으로 인하여 MTF 성능 저하가 발생된다.

$$MTF = \sin(\pi \times P \times f) / (\pi \times P \times f) \quad (8)$$

여기서 f 는 spatial frequency이다.

- Diffusion

$$\alpha(cm^{-1}) = \frac{1.94861 \times 0.1^{15}}{(\lambda \times 0.1^3)^{5.71374}} \quad (9)$$

$$L(cm) = \frac{L_0}{\sqrt{1 + 4 \times \pi^2 \times (L_0 \times 10/100)^2 \times (f/100)^2}} \quad (10)$$

$$A = 1 - \frac{(1 + \alpha \times L)}{e^{\alpha \times L_{dep}}} \quad (11)$$

$$B = 1 - \frac{(1 + \alpha \times L_0)}{e^{\alpha \times L_{dep}}} \quad (12)$$

$$MTF = A/B \quad (13)$$

여기서 λ 는 파장으로 단위는 mm이고 L_0 는 diffusion 길이로 보통 30에서 120 μm 이고, L_{dep} 는 depletion width로 보통 4.5에서 20 μm 이다.

- Discrete Charge Transfer

$$MTF = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{f}{f_n} \times \frac{1}{n_\phi}\right)}{\frac{\pi}{2} \times \frac{f}{f_n} \times \frac{1}{n_\phi}} \quad (14)$$

여기서 f_n 은 Nyquist Frequency로 $\frac{1}{2 \times P}$ 이고, n_ϕ 는 각 단에서 phase 개수이다.

f 가 f_n 인 경우 Discrete Charge Transfer에 의한 MTF는 다음과 같다.

$$MTF = 0.900 \text{ for } n_\phi = 2$$

$$MTF = 0.955 \text{ for } n_\phi = 3$$

$$MTF = 0.974 \text{ for } n_\phi = 4$$

- Charge Transfer Inefficiency

$$MTF = \frac{1.0}{N \times (a^2 + b^2)} \times \sqrt{(c^2 + d^2)} \quad (15)$$

여기서

$$a = CTI \times (1 - \cos(\pi \times f / f_n)) \quad (16)$$

$$b = CTI \times \sin(\pi \times f / f_n) \quad (17)$$

$$c = a - e^{-N \times a} \times [a \times \cos(N \times b) - b \times \sin(N \times b)] \quad (18)$$

$$d = b - e^{-N \times a} \times [a \times \sin(N \times b) + b \times \cos(N \times b)] \quad (19)$$

여기서 CTI 는 Charge Transfer Inefficiency계수이고, N 은 charge transfer 수이다.

2.3.2 광학

광학 카메라의 설계, 제작, 우주 환경 등의 영향에 의해 MTF 성능 저하가 발생할 수 있다.

- Diffraction

유한 크기의 렌즈가 가지고 있는 특성으로 인하여 MTF 성능 저하가 발생된다. Obscuration이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우로 분류하여 생각될 수 있다.

- Obscuration이 영보다 작은 경우

$$MTF = \frac{2}{\pi} \times [\cos^{-1}(\nu) - \nu \times \sqrt{1 - \nu^2}] \nu \leq 1 \quad (20)$$

여기서 ν 는 f 를 optical cutoff frequency (f_o)로 나눈 값이다.

$$f_o = \frac{1}{\lambda \times FN} = \frac{1}{\lambda \times \frac{FL}{D0}} \quad (21)$$

여기서 FN 은 f number이고, FL 은 카메라의 focal length이고, $D0$ 은 카메라의 aperture

diameter이다.

- Obscuration이 영보다 큰 경우

$$MTF = \frac{(A+B+C)}{(1-obs^2)} \quad (22)$$

$$A = \frac{2}{\pi} \times (\cos^{-1}(\nu) - \nu \times \sqrt{1-\nu^2}) \quad 0 \leq \nu < 1 \quad (23)$$

$$A = 0 \quad \nu \geq 1 \quad (24)$$

$$B = 0 \quad \nu/obs > 1 \quad (25)$$

$$B = 2 \times \frac{obs^2}{\pi} \times (\cos^{-1}(\frac{\nu}{obs}) - \frac{\nu}{obs} \times \sqrt{1-(\frac{\nu}{obs})^2}) \quad \nu/obs \leq 1 \quad (26)$$

$$C = 0 \quad \nu > (1+obs)/2 \quad (27)$$

$$C = -2 \times obs^2 \quad 0 \leq \nu < (1-obs)/2 \quad (28)$$

$$C = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1-obs)/2 < \nu < (1+obs)/2 \quad (29)$$

여기서 차단비 obs 는 차단 지름을 전체 지름으로 나눈 값이다.

$$T_1 = \frac{2 \times obs}{\pi} \times \sin(\phi) + \frac{(1+obs^2)}{\pi} \times \phi \quad (30)$$

$$T_2 = \frac{-2 \times (1-obs^2)}{\pi} \times \tan^{-1}[\frac{(1+obs)}{(1-obs)} \times \tan(\frac{\phi}{2})] \quad (31)$$

$$T_3 = -2 \times obs^2 \quad (32)$$

$$\phi = \cos^{-1}(\frac{1+obs^2-4 \times \nu^2}{2 \times obs}) \quad (33)$$

● Aberration MTF

과장에 따라 광축을 벗어나서 초점이 형성되어 영상 품질 저하가 발생된다. Wave front error(WFE)에 의한 MTF 성능 저하는 다음과 같다.

$$MTF = 1 - (\frac{WFE}{0.18})^2 \times (1 - 4 \times (\nu - \frac{1}{2})^2) \quad 0 \leq \nu < 1 \quad (34)$$

● Defocus MTF

관측 대상이 depth of field 밖에 있는 경우 광로 경로차(Optical Path Difference)에 의해 비초점 현상이 가중되어 영상 품질 저하가 발생된다.

$$MTF = 2.0 \times \frac{J_1(D_1)}{D_1} \quad D_1 > 1 \quad (35)$$

$$\approx 2.0 \times (1.0/2 - D_1^2/16 + D_1^4/384 - D_1^6/18432)$$

$$MTF = 1 \quad D_1 < 1 \quad (36)$$

$$D_1 = 8.0 \times \pi \times W_p \times \nu \times (1-\nu) \quad (37)$$

여기서 W_p 는 defocus wave length이고 J_1 은 first-order bessel function이다.

2.3.3 위성 기동

위성 움직임에 의한 효과는 CCD 평면에서 관측 대상의 움직임과 유사한 효과를 나타낸다. 위성 기동은 Jitter와 같이 랜덤한 형태의 움직임과 Drift와 같이 방향성을 갖는 움직임으로 분류할 수 있다.

● Random Motion

$$MTF = e^{-2.0 \times \pi^2 \times Jitter^2 \times EFL^2 \times f^2} \quad (38)$$

여기서 $Jitter$ 는 RMS jitter 값으로 단위는 radians이다.

● Velocity Mismatch

위성의 선형 움직임은 동기 오차를 발생시킨다. 특히 TDI를 사용하는 위성의 경우 TDI Synchronization 오차를 발생시킨다.

$$MTF = \frac{\sin(\pi \times LOS_{DRIFT} \times N_{TDI} \times T_I \times EFL \times f)}{(\pi \times LOS_{DRIFT} \times N_{TDI} \times T_I \times EFL \times f)} \quad (39)$$

여기서 LOS_{DRIFT} 는 탑재체 시선벡터의 drift값으로 단위는 radians/sec이고, N_{TDI} 는 TDI 개수이고, T_I 는 적분 시간이다.

CCD 평면에서의 선형 운동에 의한 TDI Synchronization 오차는 동일한 원리가 적용 가능하다. TDI Synchronization 속도 오차 비율이 V_r 일 때 MTF 성능 저하는 다음과 같다.

$$MTF = \frac{\sin(\pi \times DAM \times N_{TDI} \times T_I \times EFL \times f)}{(\pi \times DAM \times N_{TDI} \times T_I \times EFL \times f)} \quad (40)$$

여기서 DAM 은 적분시간 동안의 각속도 오차로 단위는 radians/sec이다.

V_{LOS} 를 탑재체 시선벡터 지상 속도라 할 경우 DAM 은 근사적으로 다음과 같다.

$$DAM = V_r \frac{V_{LOS}}{S} \quad (41)$$

● Angle Mismatch

방향 오차는 TDI Synchronization 오차를 발생시킨다. 방향 오차에 의한 TDI 수직 방향의 MTF 성능 저하는 다음과 같다.

$$MTF = \frac{\sin(\pi/2 \times f/f_n \times \tan(AN) \times N_{TDI})}{(\pi/2 \times f/f_n \times \tan(AN) \times N_{TDI})} \quad (42)$$

AN 는 각오차이다.

2.4 가상 영상 생성 알고리즘

실제 위성 영상은 위성체 특성뿐만 아니라 촬영 조건에 의해 영향을 받지만 본 논문에서 제시한 가상 영상 생성 알고리즘은 MTF 성능을 반영하는 Point Spread Function (PSF) 함수를 이용하여 가상 영상을 생성한다. 원영상을 이용하여 가상 영상을 생성하는 과정은 다음과 같다.

2.4.1 주파수 행렬 설정

일반적으로 MTF 값은 위성 지상 궤적 진행 방향과 지상 궤적에 수직인 방향의 값이 다르다. 2차원 특성을 반영하기 위하여 2차원 주파수 행렬이 요구된다. 주파수 행렬의 특징은 중심 주파수가 영이고 중심에서 동일한 거리에 위치한 지점에서 주파수 값이 동일하다. 주파수 행렬의 최대값에 의해 관측 가능한 주파수 영역이 정의된다. 최대 주파수 값(f_{max})은 검출기 cutoff frequency보다 큰 수로 설정한다. 예를 들면 최대 주파수 값을 cutoff frequency 4.5배(nyquist frequency의 9배)로 설정하고 행렬의 크기는 729로 설정할 수 있다.

$$f_{one} = -\frac{(TN-1)}{2} : \frac{(TN-1)}{2} \quad (43)$$

$$f_{two}(i,j) = \frac{f_{max}}{(TN-1)} \times \sqrt{f_{one}(i)^2 + f_{one}(j)^2} \quad (44)$$

여기서 TN 은 주파수 행렬 크기이며, 홀수값을 갖는다.

2.4.2 MTF 계산

2.3절에서 기술된 MTF 계산식을 이용하여 각 주파수에서 MTF 값을 계산한다. MTF는 2차원

행렬 형태를 갖는다. 이를 계산하기 위해서는 탑재체 설계값, 위성체 설계값, 운영 조건 등이 입력되어야 한다.

2.4.3 PSF 계산

앞에서 계산된 MTF 행렬에 대하여 inverse FFT를 수행하면 PSF행렬이 계산된다. 일반적으로 inverse FFT를 수행할 경우 첫 항을 제외한 값들은 좌우 대칭 형태이다. Circular Shift를 수행하면 중앙에 대하여 대칭인 PSF 행렬을 구할 수 있다.

일반적으로 최대 주파수 값은 Nyquist 주파수보다 큰 값으로 PSF 행렬이 의미하는 GSD는 Nyquist 주파수에 해당하는 GSD보다 작은 값을 갖는다. 원 영상의 GSD와 PSF 행렬의 GSD를 일치시키기 위하여 PSF 행렬의 그리드와 원영상의 그리드를 일치시킨다. 이를 위해 PSF 행렬에서 여러 개의 점을 하나의 점으로 대응시킨다. 예를 들면 최대 주파수가 Nyquist 주파수보다 9배 크면 9x9 크기의 픽셀을 하나의 점에 대응시킨다. IDL에서 사용되는 REBIN 함수를 이용하여 이를 처리할 수 있다.

관측지점이 위성 직하점에 있지 않는 경우 위성은 Nadir이 아닌 자세를 갖게 되는데 이때 영상의 GSD 변경이 발생된다. 앞에서 계산된 PSF 행렬은 Nadir에 대한 값이므로 GSD 변화를 고려하여 PSF 함수를 변경할 필요가 있다. 원 영상의 GSD는 일정하므로 위성 자세 변화에 의해 GSD가 변경된 경우 이에 대응하여 PSF 행렬의 크기도 변경된다. IDL에서는 CONGRID 함수를 이용하여 이를 처리할 수 있다.

2.4.4 MTF 반영한 영상 생성

앞에서 계산된 PSF 함수와 원 영상을 2차원 convolution 하여 설계와 동일한 MTF 값을 갖는 영상을 생성할 수 있다. 계산 시간을 최소화하기 위하여 PSF 행렬에서 무시할 정도의 작은 값을 가지고 있는 부분을 삭제한다. 이때, MTF 성능 저하 효과만을 확인하기 위해서는 높은 SNR 값

을 갖는 원영상을 이용하여야 한다.

3. 수치 시뮬레이션

그림 1과 같은 원 영상을 이용하여 MTF 8.3% SNR 100 특성을 갖는 가상 영상을 생성한 결과는 그림 2와 같다. MTF 값에 의해 고주파수 성분이 작아졌음을 확인할 수 있다. 인위적인 막대 형태의 영상에 대해 적용한 결과는 그림 3과 같다. 간격이 작은 부분에서는 경계가 흐려짐을 확인할 수 있다.



그림 1. 원 영상

4. 결 론

본 논문에서는 관측 위성의 주요 성능 인자 중 하나인 MTF 성능을 반영한 가상 영상을 만드는 기법을 설명하였다. 논문에서 기술된 MTF를 이용한 가상 영상 생성 기법은 위성 설계시 위성 영상 품질을 확인하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 위성 궤도 및 자세 기동에 의한 태양 에너지 입사 효과, SNR 변화, GSD 변화 등이 고려될 경우 보다 유용한 설계 도구로 사용될 수 있을 것으로 예측된다.



그림 2. 성능 저하된 영상

참 고 문 헌

1. 신재민, 임정흠, 이상률, "MTF 모델링을 이용한 위성 영상 품질 분석", 한국항공우주학회 추계학술대회, 2003.11.
2. 김희섭, 관측 위성의 해상도 및 관측폭 계산, 한국항공우주연구원, 2000.
3. Werner Hupfer, KOMPSAT-2 CW-SYS-1, Astrium, 2001.
4. Ceral C. Holst, Electro-Optical Imaging System Performance, SPIE Optical Engineering Press, 2002.

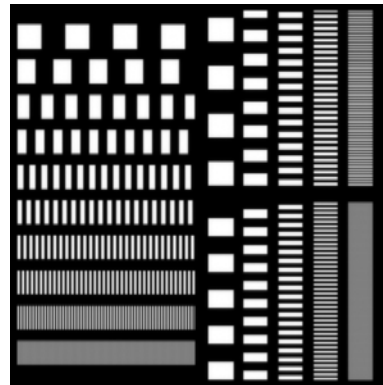


그림 3. 성능 저하된 가상 영상