

# Time Delay and Integration(TDI)을 사용하는 위성 영상 기기의 고도 및 촬영각 변화에 대한 성능 특성

조영민

한국항공우주연구원 위성응용연구그룹

## Performance Characteristics for the Variation of Altitude and Tilt Angle in the Satellite Imager Using Time Delay and Integration(TDI)

Young-Min Cho

Satellite Application Group, Korea Aerospace Research Institute

**Abstract :** The performance characteristics of a satellite imager using a Time Delay and Integration(TDI) Charge Coupled Device (CCD) with fixed integration time is investigated for the variation of satellite altitude and tilt angle. In consequence of the investigation TDI synchronization using tilt imaging is proposed as a solution to compensate geometric performance degradation due to altitude decrease. The tilt angle optimized for the TDI synchronization at decreased altitude is presented. This result can be used for a TDI CCD imager with variable integration time in a certain range as well.

**Key Words :** Time Delay and Integration, TDI Synchronization, Satellite, Imager, Altitude, Tilt Angle, Ground Sample Distance.

**요약 :** 고정 검출 시간(Integration Time)을 갖고 Time Delay and Integration(TDI) Charge Coupled Device (CCD) 검출기를 사용하는 위성 영상 기기에서 위성의 고도 및 촬영각의 변화에 대한 영상 기기의 기하 성능 특성을 TDI 불일치와 관련하여 분석하였다. 본 분석을 통하여 고도 저하에 따른 기하 성능 저하를 보완할 수 있는 방법으로서 경사 촬영을 통한 TDI 불일치 제거를 제안하였고 저하된 고도에서 TDI 일치로 최적 성능을 줄 수 있는 최적 경사 촬영각을 구하였다. 본 결과는 임의의 범위의 가변 검출 시간을 갖는 TDI CCD 위성 영상 기기에도 적용 가능하다.

### 1. 서론

고해상도 위성 영상 기기에서 신호대 잡음비 (Signal to Noise Ratio) 향상을 위해 흔히 Time

Delay and Integration(TDI) Charge Coupled Device (CCD) 검출기를 사용한다. TDI는 임의의 속도로 지상을 주사할 때 일련의 여러 CCD 소자들로 지상의 동일 화소의 신호를 여러 번 검출하고 시간

지연을 통해 각 소자 검출 신호를 합하는 기법으로 TDI 각 소자 검출 신호의 시간 지연이 두 인접 소자 사이 거리와 잘 일치하여야 한다(Larson and Wertz, 1991). TDI의 각 소자가 지상의 동일 화소를 바라보지 못하는 것을 TDI 불일치라 한다. TDI에 사용되는 CCD 소자 수를 TDI 수라고 하며 TDI 수가 클수록 신호대 잡음비가 증가하지만 TDI 불일치 효과 또한 증폭된다. 실제적으로 여러 가지 원인에 의해 TDI 불일치가 발생할 수 있으며 그로 인해 출력 신호가 번지는 현상이 발생하고 영상의 선명도가 저하된다(Yong *et al.*, 2001). 위성 영상의 선명도와 관련된 위성 영상 기기의 성능은 Modulation Transfer Function(MTF)으로 표현되며 TDI 불일치로 인한 선명도 저하에 대해 일반적 MTF 표현은 잘 알려져 있다(ELOP, 2000).

일반적으로 원활한 임무 수행을 위해 위성의 지상 촬영각을 자주 변경하게 되며, 필요시 위성의 운영 고도를 변경하거나 예기치 않은 원인으로 위성이 설계 고도에서 벗어났을 경우가 있을 수 있다(Lee and Ryoo, 2000). 위성의 고도 및 촬영각의 변화는 지상화소거리(Ground Sample Distance: GSD)의 변화 뿐 만아니라 검출 시간(Integration Time)이 고정된 위성 영상 기기에 대해 TDI 불일치를 초래하게 된다. 즉, 위성의 고도 및 촬영각의

변화는 위성 영상의 품질을 결정하는 위성 영상 기기의 성능에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 고정 검출 시간을 갖고 TDI CCD 검출기를 사용하는 위성 영상 기기의 기하학적 성능 특성을 위성의 고도 및 촬영각의 변화에 대해 살펴보고자 한다. 특히, 고도 저하에 따른 기하 성능 저하를 보완할 수 있는 방법으로서 경사 촬영을 제안하고 각 고도에서 최적 성능을 줄 수 있는 최적 경사 촬영각을 구하고자 한다.

## 2. 고도 변화에 대한 성능 특성

CCD 검출기를 사용하는 위성 영상 기기의 지상화소거리(GSD)는 연직하방(Nadir) 관측시 다음과 같다.

$$GSD = \frac{H}{EFL} p \quad (1)$$

여기서  $H$ 는 위성 고도,  $EFL$ 은 위성 영상 기기의 유효초점거리(Effective Focal Length),  $p$ 는 CCD 화소 간격이다. 연직하방(Nadir) 관측시 위성의 고도 변화에 대한 지상화소거리(GSD) 변화를 기하적으로 Fig. 1에 나타내었다.

위성의 지상 경로 속도는 연직하방 관측시 다음과 같다.

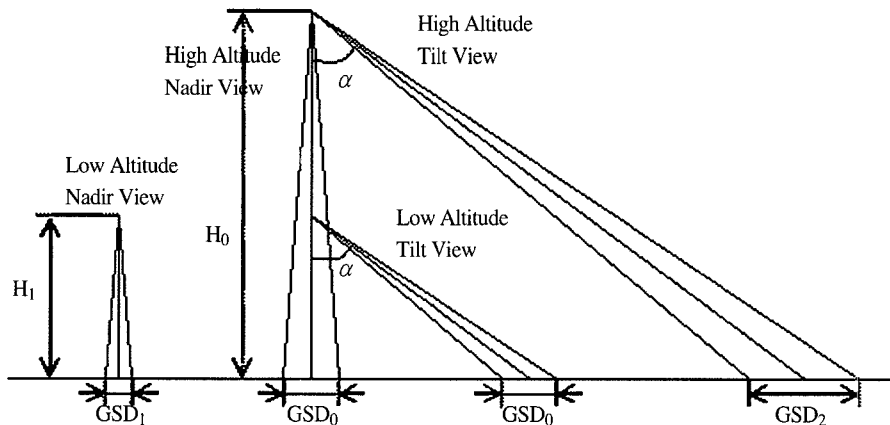


Fig. 1. Geometry of Ground Sample Distance(GSD) for variation of altitude(H) and tilt angle( $\alpha$ ).

$$V = \frac{R_E^2 \sqrt{g}}{(R_E + H)^{3/2}} \quad (2)$$

여기서  $g$ 는 중력 가속도,  $R_E$ 는 지구 반경,  $H$ 는 위성 고도이다.

위성 고도가 변하면 지상화소거리와 지상 경로 속도가 바뀌게 된다. 위성 고도가 낮아지게 되면 지상화소거리는 같은 비율로 작아지지만 지상 경로 속도는 아주 적은 비율로 오히려 증가하게 되어 TDI 불일치가 발생한다. 이러한 TDI 불일치를 해소하기 위해서는 고도가 낮아짐에 따라 CCD 검출 시간을 줄여야 한다. 즉 저고도에서는 빠른 속도의 지상 주사를 지원하는 빠른 영상 신호 처리, 전송, 저장이 필요하다. 이것은 지상해상도 1m급 이상의 고해상도 위성 영상 기기의 개발에 있어서 큰 부담이 될 수 있다. 이러한 부담으로 인해 정해진 임무 고도의 범위에 맞게 지상 주사 속도 또는 CCD 검출 시간이 정해진다.

발사후 필요시 위성의 운영 고도를 변경하거나 예기치 않은 원인으로 위성이 설계 임무 고도 범위에서 벗어날 경우가 있을 수 있다. 가변 CCD 검출 시간의 TDI 위성 영상 기기라하더라도 실제 위성 고도가 설계 고도 범위를 벗어날 경우에는 CCD 검출 시간이 고정된 TDI 위성영상기기의 고도가 변하는 경우와 마찬가지로 위성영상 품질 저하가 발생할 수 있다.

고도 685km에 대해 최적 설계된 고해상도 위성 영상기기에서 고도 변화와 관련된 주요 기하 성능 변화를 살펴보자. 지상화소거리(GSD)가 고도에

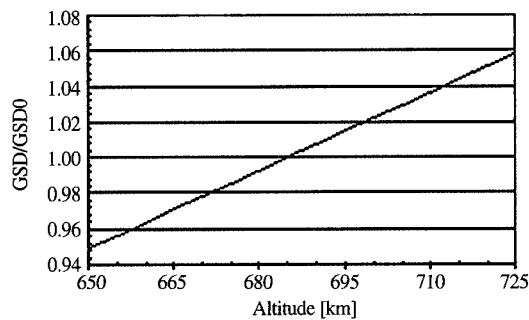


Fig. 2. GSD vs. Altitude (GSD0: GSD at 685km).

대해 선형적으로 변하며 설계 고도 685km로부터 30km의 고도 변화에 대해 지상화소거리(GSD)는 5% 이내에서 변하는 것을 Fig. 2에서 볼 수 있다. 각 고도의 Nyquist 공간주파수에서 TDI 불일치 MTF 값을 Fig. 2의 고도 변화에 대해 계산한 결과, MTF 값은 설계 고도 685km로부터 30km의 고도 변화에 대해 TDI 수 16에서 약 20~30%의 감소를 TDI 수 32에서 약 70~80%의 감소를 보이고 있어 성능 감소가 현저하다(Fig. 3). 대부분의 고해상도 영상기기에서 TDI 수 32를 사용하는 경우가 많은 것을 고려한다면 이런 성능 감소는 설계 해상도 구현을 매우 어렵게 만들 수 있다. 특히, 이런 현저한 성능 감소가 고도 저하에 의해 발생한 경우에 대한 대비는 앞서 언급한 대로 위성 영상 기기 설계 한계 문제에 직결된다.

### 3. 경사 촬영에 대한 성능 특성

위성의 연직 하방 이외의 지역을 관측하기 위해서는 지상을 향한 위성의 시선(Line Of Sight)을 연직 하방으로부터 지상 경로의 전후 또는 좌우 방향으로 변경하여야한다. 위성의 시선 변경은 위성체의 주사경을 이용하거나 위성체 회전을 통해 실행될 수 있다. 위성의 시선 방향은 연직 하방에 대해 임의의 지상 점을 바라보는 각도 즉 경사 촬영각으로 표현할 수 있다. 위성이 연직 하방

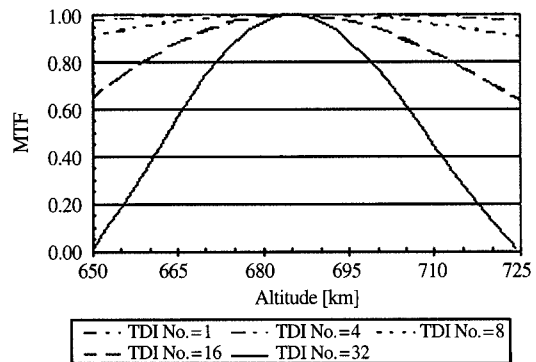


Fig. 3. TDI mismatch MTF vs. Altitude.

을 바라볼 경우 경사 촬영각은 0°이다.

일반적으로 위성 영상의 결상을 기하광학적으로 고려할 때 위성이 바라보는 지상을 평면으로 고려하는 경우가 많고(Campana, 1993), 지상을 평면으로 가정하는 것은 크지 않은 경사 촬영각에 대해 비교적 오차가 작으면서 문제 해법의 단순화를 꾀할 수 있으므로 본 연구에서는 지상을 평면으로 가정하고 경사 촬영을 고려하였다. 지상을 평면으로 가정할 경우 경사 촬영각에 따라 지상 경로 속도는 변하지 않지만 지상화소거리는 바뀌게 된다. 경사 촬영각이 커질수록 지상화소거리도 커지게 되는 것을 Fig. 1에서 볼 수 있다. 평면 지상 위의 일정한 고도에서 수행되는 경사 촬영에 대한 특성을 다음 두 가지 경우에 대해 고려하였다.

**1) 지상 경로 좌우 방향의 경사 촬영(위성체 Roll Tilt)**

이 경사 촬영은 위성체의 진행 방향을 회전축

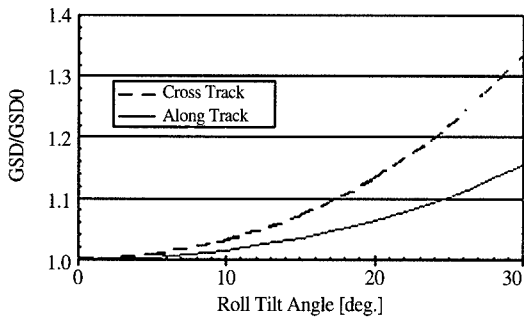


Fig. 4. GSD vs. Roll Tilt Angle(GSD0: GSD at tilt angle 0°).

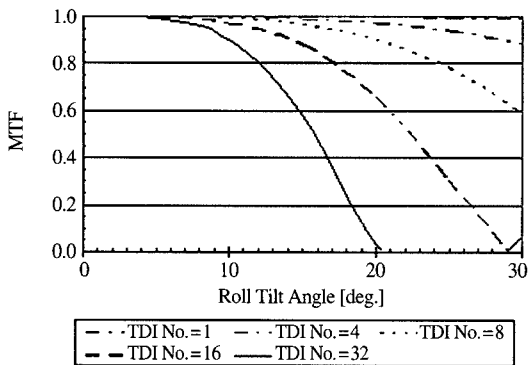


Fig. 5. TDI Mismatch MTF vs. Roll Tilt Angle.

으로 하여 위성의 시선을 진행 방향의 오른쪽 또는 왼쪽으로 돌려서 위성 지상 경로의 오른쪽 또는 왼쪽의 지상 물체를 위성이 바라보게 되는 경우이다. 이 경우에는 경로 방향(Along Track)보다 경로 수직 방향(Cross Track)의 지상화소거리가 더 크다(Fig. 4). 30° 경사 촬영각에서 경로 방향 지상화소거리는 연직 하방 관측보다 약 15% 증가한다. 촬영각 각각의 Nyquist 공간주파수에서 TDI 불일치 MTF 값은 촬영각 10° 이내에서는 큰 감소가 없으나, 촬영각 10° 이상부터는 큰 TDI 수에 대해 급격한 감소가 일어나기 시작하여 TDI 수 16일 때 촬영각 30° 에서, TDI 수 32일 때 촬영각 20° 에서 거의 0에 근접하고 있어 성능 감소가 현저하다(Fig. 5).

**2) 지상 경로 전후 방향의 경사 촬영(위성체 Pitch Tilt)**

이 경사 촬영은 위성체의 진행 방향과 연직 방향에 모두 수직인 방향을 회전축으로 하여 위성의 시선을 진행 방향의 앞쪽 또는 뒤쪽으로 돌려서 위성 지상 경로의 앞쪽 또는 뒤쪽의 지상 물체를 위성이 바라보게 되는 경우이다. 이 경우에는 경로 방향보다 경로 수직 방향의 지상화소거리가 더 작다(Fig. 6). 30° 경사 촬영각에서 경로 방향 지상화소거리는 연직 하방 관측보다 약 33% 증가한다. 촬영각 각각의 Nyquist 공간주파수에서 TDI 불일치 MTF 값은 촬영각 6° 이내에서는 큰 감소가 없으나, 촬영각 6° 이상부터는 큰 TDI 수에 대

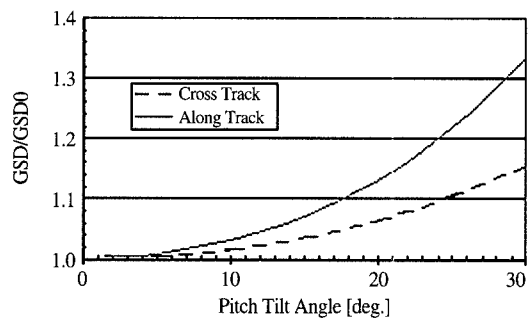


Fig. 6. GSD vs. Pitch Tilt Angle(GSD0: GSD at tilt angle 0°).

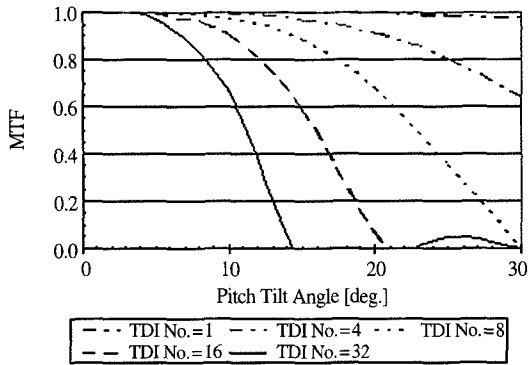


Fig. 7. TDI Mismatch MTF vs. Pitch Tilt Angle.

해 급격한 감소가 일어나기 시작하여 TDI 수 16 일 때 촬영각 20°에서, TDI 수 32일 때 촬영각 15°에서 거의 0에 근접하고 있어 성능 감소가 현저하다(Fig. 7).

#### 4. 고도별 최적 경사 촬영각

이상에서 고도 변화와 촬영각 변화에 대해 지상화소거리 변화가 위성 영상기기의 기하 성능 변화의 주요 요인이고 작은 지상화소거리 변화에 대해 영상의 선명도는 크게 저하될 수 있음을 알 수 있었다. 특히 고도가 낮아지면 지상화소거리가 작아지는 반면, 경사 촬영각이 커질수록 지상화소거리가 커지는 것도 알 수 있었다. 따라서 고도가 낮아질 경우 경사 촬영을 수행하면 고도 저하에 의한 지상화소거리 감소를 경사 촬영을 통해 상쇄시킬 수 있으므로 기하 성능의 현저한 저하를 막을 수 있다. 즉, 고도 저하 발생시 경사 촬영을 수행함으로써 고도 저하에 의한 TDI 불일치를 제거할 수 있으며 이 경우 TDI 불일치 MTF값은 1.0으로 유지되어 고도 저하에 의한 영상 선명도 저하를 막을 수 있다. Fig. 1의 저고도 경사 촬영이 이에 해당한다.

저하된 고도에서 TDI 불일치를 제거하여 최적 성능을 줄 수 있는 경사 촬영은 두 가지 방향으로 구현이 가능하다. 평면 지상에 대해 TDI 일치가

이루어지는 지상 경로 좌우 방향의 경사 촬영각(위성체 Roll Tilt Angle)  $\alpha_{TDI}$ 와 지상 경로 전후 방향의 경사 촬영각(위성체 Pitch Tilt Angle)  $\beta_{TDI}$ 는 각각 Fig. 1의 기하 및 식 (2)로부터 간단히 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$\alpha_{TDI} = \cos^{-1} \left( \frac{H(R_E + H)^{3/2}}{H_0(R_E + H_0)^{3/2}} \right) \quad (3)$$

$$\beta_{TDI} = \cos^{-1} \sqrt{\frac{H(R_E + H)^{3/2}}{H_0(R_E + H_0)^{3/2}}} \quad (4)$$

여기서  $H_0$ 는 연직하방 관측시 TDI 일치가 이루어지는 최적 설계 고도이고,  $H$ 는 저하된 고도이고,  $R_E$ 는 지구 반경이다.

TDI 불일치가 제거되는 식(3)과 (4)의 두 경사 촬영각을 고도별로 Fig. 8에 그려보았고 이 때의 지상화소거리들을 구하여 Fig. 9, 10에 제시하였다. 경로 전후 방향의 경사 촬영(위성체 Pitch Tilt)이 경로 좌우 방향의 경사 촬영보다 더 작은 각도에

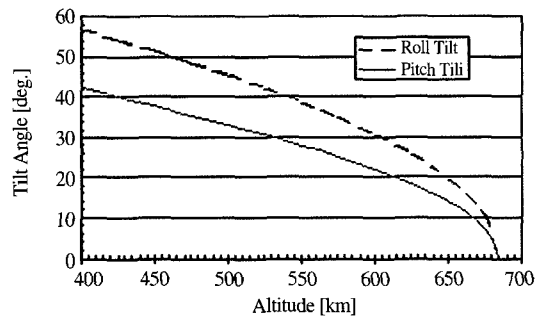


Fig. 8. Tilt Angles for TDI Match.

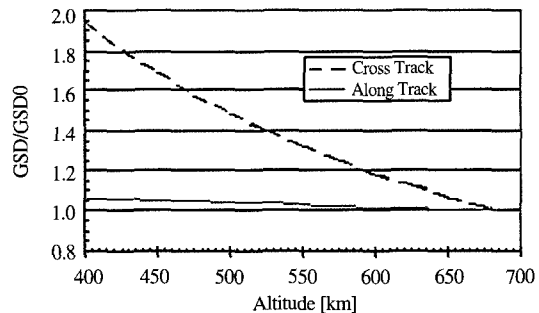


Fig. 9. GSD at the TDI Match Roll Tilt (GSD0: GSD at nadir view from altitude 685km).

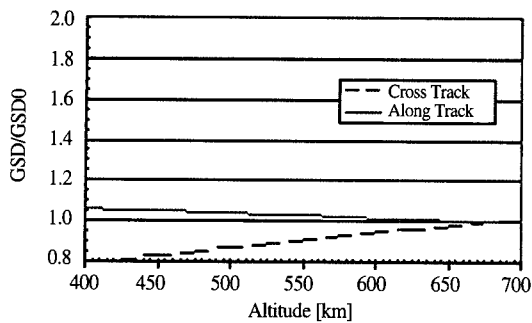


Fig. 10. GSD at the TDI Match Pitch Tilt (GSD0: GSD at nadir view from altitude 685km).

서 TDI 불일치를 제거할 수 있고(Fig. 8), 더 작은 지상화소거리를 가지므로(Fig. 9, 10), 고도 저하의 경우 경로 전후 방향의 경사 촬영을 사용하여 TDI 불일치를 제거하는 것이 더 효율적이고 바람직하다. 특히, 경로 전후 방향의 경사 촬영의 경우 지상화소거리가 설계 값으로부터 크게 저하되지 않고, 경로 좌우 방향의 경사 촬영을 병행하면 촬영 지역 선정도 어느 정도 원활히 수행 할 수 있는 장점이 있다. 단, 경로 좌우 방향의 경사 촬영 병행은 TDI 불일치가 추가로 발생할 수 있으므로 위성 영상 품질 규격을 벗어나지 않는 촬영 각도 이내에서 수행되어야 할 것이다. 설계 고도 685km로부터 530km까지 고도가 저하되더라도 30° 각도의 경로 전후 방향의 경사 촬영을 수행하면, 설계 고도 연직하방 지상화소거리 대비 최대 5% 이내의 지상화소거리 증가에서 TDI 불일치를 제거할 수 있고 TDI 불일치 MTF값을 1.0으로 유지시킬 수 있어 영상 선명도 저하를 막을 수 있다.

### 5. 결 론

고정 검출 시간(Integration Time)을 갖고 TDI CCD 검출기를 사용하는 위성 영상 기기에서 위성의 고도 및 촬영각의 변화에 대하여 지상화소거리(GSD)와 TDI 불일치에 의한 영상 선명도 저하 성능 특성을 분석하였다.

필요시 위성의 운영 고도를 변경하거나 예기치

않은 원인으로 위성이 설계 고도에서 벗어났을 경우가 있을 수 있다. 본 연구에서는 고도 저하에 따른 기하 성능 저하를 보완할 수 있는 방법으로 경사 촬영을 통한 TDI 불일치 제거를 제안하였고 저하된 고도에서 최적 성능을 줄 수 있는 최적 경사 촬영각을 구하였다. 예를 들면, 설계 고도 685km로부터 530km까지 고도가 저하되더라도 30° 각도의 경로 전후 방향의 경사 촬영을 수행하면 설계 고도 연직하방 지상화소거리 대비 최대 5% 이내의 지상화소거리 증가에서 TDI 불일치를 제거할 수 있고 영상 선명도 저하를 막을 수 있다.

본 연구 결과는 임의의 범위의 가변 검출 시간을 갖는 TDI CCD 위성 영상 기기에도 적용 가능하므로 대부분의 TDI CCD 위성 영상 기기의 체계 설계 및 운영 개념 확립에 활용될 수 있으리라 기대한다.

### 참고문헌

- Campana, S. B., 1993. *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Vol. 5, SPIE Press, WA, USA, Chap. 1.
- ELOP, 2000. *Gasiel-Excel Operation & Performance Manuals*, Israel.
- Larson, W. J. and J. R. Wertz, 1991. *Space Mission Analysis and Design*, Microcosm, CA, USA, p.265.
- Lee, S. S. and J. S. Ryoo, 2000. Conceptual Design of the KOMPSAT-2 System, Proc. of 22nd International Symposium on Space Technology and Science, Morioka, Japan, May 28 - Jun. 4, 2000, p. 1.
- Yong, S. S., J. P. Kong, H. P. Heo, Y. S. Kim, and H. Y. Paik, 2001. The Analysis of MSC(Multi-Spectral Camera) Operational Parameter, Proceedings of International Symposium on Remote Sensing, Seogwipo, Korea, Oct. 31 - Nov. 2, 2001, p.198.