L-곡선 기반의 Modified Wiener Filter(MWF)를 이용한 위성 영상의 MTF 보상

전병일 · 김홍래 · 장영근[†]

한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

A MTF Compensation for Satellite Image Using L-curve-based Modified Wiener Filter

Byung-Il Jeon, Hongrae Kim and Young Keun Chang[†]

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Aerospace University

Abstract : The MTF(Modulation Transfer Function) is one of quality assesment factors to evaluate the performance of satellite images. Image restoration is needed for MTF compensation, but it is an ill-posed problem and doesn't have a certain solution. Lots of filters were suggested to solve this problem, such as Inverse Filter(IF), Pseudo Inverse Filter(PIF) and Wiener Filter(WF). The most commonly used filter is a WF, but it has a limitation on distinguishing signal and noise. The L-curve-based Modified Wiener Filter(MWF) is a solution technique using a Tikhonov regularization method. The L-curve is used for estimating an optimal regularization parameter. The image restoration was performed with Dubaisat-1 images for PIF, WF, and MWF. It is found that the image restored with MWF results in more improved MTF by 20.93% and 10.85% than PIF and WF, respectively.

Key Words : MTF, MTF Compensation, WF(Wiener Filter), MWF(Modified Wiener Filter), Fermi Function, L-curve, Regularization

요약 : 변조전달함수(MTF; Modulation Transfer Function)는 광학영상의 성능을 평가하는 중요한 품질 요소 중 하나이다. 영상의 MTF 증진을 위해 영상 복원이 필요하나, 이 과정은 대표적인 부적합문제(ill-posed problem)의 하나로 특정한 해를 갖지 않는다. 영상 복원을 위한 필터에는 역 필터(IF; Inverse Filter), 의사 역 필터(PIF; Pseudo Inverse Filter), Wiener Filter(WF) 등이 있다. 이들 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 WF는 촬영된 영상 내에서 영상과 잡음을 정확히 구분하기 어렵다는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 Modified Wiener Filter(MWF)를 사용하여 부적절 문제를 풀 수 있도록 문제를 정규화 하였으며, 정규화 변수(regularization parameter)의 값을 찾기 위한 방법으로 L-곡선(L-curve)을 사용하였다. MWF의 검증을 위해 Dubaisat-1 위성의 영상을 의사 역 필터(PIF), Wiener Filter(WF), MWF로 영상 복원을 수행하였다. 복원 결과, MWF를 사용했을 때가 PIF를 사용했을 때의 결과에 비해 20.93%, WF를 사용했을 때의 결과에 비해 10.85% 더 향상된 MTF를 얻을 수 있었다.

접수일(2012년 8월 29일), 수정일(1차 : 2012년 10월 12일), 게재확정일(2012년 10월 13일).

[†] 교신저자: 장영근(ykchang@kau.ac.kr)

1. 서론

위성 영상은 광학 시스템의 변위나 CCD 센서의 성능 저하, 위성 자세의 떨림, 위성궤도의 변화, 대기의 반사효과 등의 다양한 원인에 의해 영상의 품질이 저하된다. 따라서 영상을 활용하기 위해서는 사전에 이러한 품질저하 원인요소들을 제거 또는 최소화하는 과정이 필요하다. 이를 전처리 과정이라고 하며 이는 방사보정과 기하보정 단계로 구분되어 진행된다. 전처리 과정을 거친 후에야 비로소 위성 영상으로써 활용할 수 있게 되며 위성 영상의 품질을 평가하는 요소의 하나로써 MTF(Modulation Transfer Function)를 사용한다. 위성 영상의 MTF는 설계단계에서부터 요구조건으로 정의되어 관리되며 MTF가 높을수록 영상의 선명도(sharpness)가 높음을 의미한다.

MTF 보상은 영상의 MTF를 증진시키는 것으로, MTF의 측정과 영상 복원의 두 단계로 진행된다. MTF 보상을 위해서는 MTF의 정확한 측정이 선행되어야 한다. MTF는 영상의 입력 신호에 따라 에지(edge) 방법과 펄스(pulse) 방법을 사용해서 측정한다. 에지 방법은 영상에서 대비가 분명하게 구분되는 곳을 기준으로 영상 내의 경계선을 찾고, 경계선에 대한 시스템의 응답인 ESF(Edge Spread Function)를 통해 MTF를 추정하는 방법이다. 이 때 잡음으로 인한 오차를 줄이고 정확한 ESF의 측정을 위해 ESF에 대해 곡선 접합을 수행하여 사용한다. ESF의 곡선접합 모델로는 Cauchy, Gumbel, Hyperbolic, Fermi(or Logistic), Gauss 등이 있으며 Fermi 모델이 일반적으로 가장 좋은 성능을 보인다(Li *et al.*, 2009). 펄스 방법은 영상 내의 한 펄스를 시스템 입력으로 하여 그 입력에 대한 시스템 응답인 PSF(Point Spread Function)를 통해 MTF를 추정하는 방법이다.

영상 복원은 촬영된 영상을 바탕으로 원 영상을 역으로 추적해 가는 방법이다. 영상 복원 과정은 대표적인 역문제(Inverse problem)의 하나로 부적합문제(ill-posed problem)이다. 영상을 촬영할 당시의 대기 상태나 위성의 상태, 잡음의 정도에 따라 복원 영상이 다르게 나타나며 따라서 하나의 특정한 해를 가지지 않는다. 영상 복원 영상 복원은 영상의 잡음을 제거하고 영상 내 경계를 명확하게 한다. 영상 복원을 위한 필터로는 IF

(Inverse Filter), PIF(Pseudo Inverse Filter), WF(Wiener Filter), MWF(Modified Wiener Filter) 등이 있다(Gulati and Kaushik, 2011). WF의 경우 영상의 잡음을 추정하기 위한 방법으로 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 사용한다. 하지만 위성 영상 내에서 원래의 영상과 잡음을 정확히 구분하기는 매우 어렵다. 따라서 WF의 이러한 약점을 보완하기 위해 Demers and Stein(1990)은 WF의 SNR에 시행착오를 통해 얻은(trial and error) 특정 상수를 곱해서 사용했으며, Saripan *et al.*(2005)은 WF와 LPF(Low Pass Filter)를 동시에 사용했다. 국내에서는 다목적 실용위성 1호 EOC영상에 대한 IF, PIF, WF에 대한 비교연구(Kang and Choi, 2003)로 WF보다 PIF가 더 좋은 성능을 보임을 확인하였으며 DubaiSat-1호의 영상에 WF와 Butterworth Filter를 이용한 영상복원 연구(Hwang *et al.*, 2011) 등이 수행되었다. 하지만 MWF에 대한 연구는 아직 충분히 이루어지지 못하고 있다. 본 논문에서는 L-곡선 기반의 MWF(WANG *et al.*, 2008)를 사용하였으며, 그 결과를 PIF와 WF의 복원 결과와 비교 분석하였다.

2. 위성 영상의 MTF 측정

1) 에지 방법(Edge Method)

MTF는 영상의 입력 신호에 대한 출력 신호의 반응의 절대 값을 나타내는 것으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 입력 신호를 어떤 형태를 사용하느냐에 따라 MTF의 측정 방법이 달라진다.

$$MTF = \frac{|output\ signal|}{|input\ signal|} \quad (1)$$

에지 방법은 위성 영상 내에서 명확하게 대비되는 에지를 입력신호로 하고 그에 대한 영상 시스템의 반응을 통해 MTF를 측정하는 방법으로, 펄스 방법에 비해 비교적 입력 신호로 사용할 대상을 정하기 쉽다는 장점이 있다. 에지 방법을 이용한 MTF의 측정과정은 Fig. 1에 나타나있다.

에지 방법은 위성 영상 내에서 에지를 검출할 영역(ROI, Region of Interest)을 선택하는 것으로 시작한다. 이 때 최대한 에지를 기준으로 양 쪽 영역이 균일하

Fig. 1. MTF estimation process with edge method.

Fig. 2. (a) The Original image for edge method and (b) Least squared line fitting.

계 분포되어 있는 영역을 선택한다. 영역을 선택한 후 각 행별로 미분하여 절대 값의 크기가 가장 크게 나타나는 점을 그 행의 에지로 선택한다. 그 후 각 행의 에지를 바탕으로 최소자승법을 통해 하나의 직선으로 된 에지를 얻는다. Fig. 2의 (a)는 에지 방법에 사용된 원 영상으로 2012년 1월 4일 인천을 촬영한 Dubaisat-1의 영상이며 (b)는 각 행의 에지의 위치와 최소자승법으로 검출된 에지의 영상이다. 검출된 에지를 기준으로 각 점들을 지나는 수선을 따라서 ESF를 획득한다. 이 때 ESF는 각 점의 개수만큼 나오게 되며 이들의 평균값을 사용한다. 하지만 이렇게 획득한 ESF에는 잡음이 포함되어 있으며 특히 ESF를 미분하여 LSF(Line Spread Function)를 얻는 과정에서 잡음이 증폭된다. 이렇게 증폭된 잡음은 결국 LSF를 푸리에 변환(Fourier Transform)하여 얻게 되는 MTF의 측정에도 악영향을 초래한다. 따라서 ESF를 곡선적합하여 사용해야 한다. ESF의 곡선적합 모델에 대한 연구는 꾸준히 진행되었다. Elisa and Smith(2006)의 연구에서는 ESF의 곡선적합을 위해 모델로는 입력 신호의 형상에 따라 Square pulse, Triangular pulse, Raised cosine, Gaussian,

Cauchy 등의 모델을 사용할 수 있다고 기술하였다. 또한 이밖에도 Yin *et al.*(1990)은 정규 분포함수와 지수함수의 합을 이용해서 곡선적합을 수행했으며 Tzannes *et al.*(1995)은 ESF의 곡선적합을 위해 Fermi 함수를 사용하였다. Li *et al.*(2009)의 연구에서는 Fermi 함수가 ESF 곡선적합을 하는데 있어 가장 오차가 적은 모델로 평가하였다. 본 논문에서는 Li *et al.*(2009)의 연구를 바탕으로 하여 ESF 곡선적합을 위하여 Fermi 함수를 사용하였다. Fermi 함수 모델은 아래의 식 (2)와 같다.

$$\bar{n} = \frac{A}{\left(\frac{x - x_c}{C} + 1 \right)} \quad (2)$$

$\bar{n}$ 은 확률분포 함수이며, A와 C는 미지수, x_c 는 ESF의 중심점을 의미한다. LSF는 ESF를 식 (3)과 같이 미분함으로써 얻을 수 있다.

$$LSF(n) = ESF(n) - ESF(n - 1) \quad (3)$$

영상의 해상도를 평가하는 요소의 하나로써 반치전 폭(FWHM; Full Width Half Maximum)이 사용된다.

Fig. 3. Full width half maximum.

반치전폭이란 시스템 응답함수의 최대 크기의 절반에 해당하는 지점의 폭을 의미한다. 정규화된 LSF나 PSF의 크기가 0.5인 점에서의 폭을 계산함으로써 구할 수 있다. 일반적으로 영상 시스템의 열화함수를 가우시안 (Gaussian) 분포 함수로써 사용하는데 반치전폭을 이용해서 열화함수의 표준편차를 예측할 수 있다. Fig. 3과 식 (4)와 식 (5)는 불연속적인 시스템에서 반치전폭을 계산하는 방법이다. x_s 와 x_e 는 각각 그래프의 크기가 0.5인 지점을 지날 때의 x 값이며 식 (4)는 비연속적인 데이터에서 선형보간법을 사용해 이를 계산하는 식이다. 식 (7)은 Gaussian 분포 함수가 식 (6)과 같이 주어졌을 때 반치전폭을 이용해 표준편차를 계산하는 방법이다. 반치전폭의 크기가 작을수록 더 높은 해상도를 갖는다.

MTF는 LSF를 푸리에 변환함으로써 얻는다. MTF는 주파수 영역에서 다루지며 일반적으로 영상의 품질 요소 중 하나로 사용되는 MTF의 값은 Nyquist 주파수에서의 MTF 값을 의미한다. Nyquist 주파수는 영상 시스템 차단 주파수의 절반에 해당하며 식 (8)을 통해 계산한다.

Fig. 4는 본 논문에서 사용한 DubaiSat-1의 영상에 대해 곡선적합을 하지 않았을 때와 했을 때의 ESF와 LSF, MTF의 차이를 보여준다. (a)는 곡선적합 ESF이며, (b)는 LSF, (c)는 MTF 차트이다. 그림에서 볼 수 있듯이 영상 내 잡음에 의해 MTF가 감소하는 것을 알 수 있다.

(a) Edge Spread Function

(b) Line Spread Function

(c) MTF Chart

Fig. 4. Difference in ESF, LSF and MTF with and without Fitting.

$$x_s = (0.5 - y_1) \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} + x_1 \quad (4)$$

$$x_e = (0.5 - y_4) \frac{x_5 - x_4}{y_5 - y_4} + x_4$$

$$FWHM = x_e - x_s \quad (5)$$

Fig. 5. MTF estimation process with Pulse method.

Fig. 6. Pulse input.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma \approx 2.3548200\sigma \quad (7)$$

$$Nyquist\ Frequency = \frac{(whole\ data\ size \times resolution)}{2} + 1 \quad (8)$$

2) 펄스 방법(Pulse Method)

펄스 방법을 이용한 MTF의 측정 과정도 에지 방법의 과정과 유사하다. 에지 방법에서 ESF를 획득하고 이를 미분하여 LSF 구하는 대신, 펄스 입력을 통해 바로 PSF를 획득하고 이를 푸리에 변환하여 MTF 차트를 획득하게 된다. Fig. 5는 펄스 방법을 이용해 MTF를 측정하는 과정이다.

본 논문에서는 Fig. 6과 같이 인천 앞바다에 위치한 인천 대교를 펄스 입력으로 선정하였다. 일반적으로 바다나 호수에 위치한 다리는 주변 색에 비해 명백히 밝은 색을 나타내며 형태 또한 분명한 직선의 형태를 갖는다. 따라서 바다의 색이 균일한 지역에 있는 다리는 펄스 입

Fig. 7. Curve Fitted PSF.

력으로써 사용될 수 있다(Blonski, 2006). 에지 방법과 마찬가지로 영상을 각 행별로 미분하여 그 행에서의 펄스를 검출하고, 각 라인의 펄스를 기준으로 최소자승법을 이용해서 전체 영역의 펄스를 검출한다.

검출된 펄스를 기준으로 영상의 PSF를 획득한다. ESF의 획득과 마찬가지로 각 점들에서 펄스의 방향에 수직인 값들을 사용하며, 점들의 개수만큼 얻어지는

PSF를 평균 내어 사용한다. PSF도 에지 방법과 마찬가지로 잡음으로 인해 PSF를 푸리에 변환하여 획득하는 MTF의 값이 오차가 발생할 수 있다. 따라서 아래의 식 (9)와 같이 중첩된 Fermi 함수 모델을 사용하여 곡선접합을 한 후 사용하였다.

$$\bar{n} = \frac{A}{\left(\frac{x-x_L}{C} + 1\right)} - \frac{A}{\left(\frac{x-x_R}{C} + 1\right)} \quad (9)$$

$\bar{n}$ 은 확률 분포 함수이며, A와 C는 미지수, x_L , x_R 은 각각 펄스의 상승 에지와 하강 에지의 중심점을 의미한다. 이렇게 구해진 PSF를 푸리에 변환해서 MTF 차트를 획득하고 Nyquist 주파수에서의 값을 확인하는 것으로 MTF를 측정한다. Fig. 7은 곡선 접합을 수행한 PSF의 모습이다.

3. 위성 영상의 복원

1) 영상 복원 방법

영상 복원의 목적은 열화된 촬영 영상에서 잡음을 제거하고 열화 함수의 추정을 통해 원래의 영상을 역으로 찾는 것이다. 일반적인 영상의 열화 모델은 식 (10)과 같이 표현되며 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다(Kim *et al.*, 2003). $f(x, y)$ 는 열화가 발생하기 전의 원 영상을 의미하며 $h(x, y)$ 는 열화 함수, $g(x, y)$ 는 촬영된 영상, $n(x, y)$ 는 잡음을 의미한다.

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (10)$$

위성 영상의 복원 방법에는 여러 가지가 있으며 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법들로 IF, PIF, WF

등이 있다.

(1) 역 필터(IF)

IF는 식 (10)의 열화모델에서 잡음이 0이라고 가정하고 해를 구하는 방법이다. 잡음이 없다고 한다면 위 식은 아래의 식 (11)과 식 (12)와 같이 다시 쓸 수 있으며, 열화함수의 역함수를 구함으로써 원 영상을 추정할 수 있다.

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \Rightarrow f(x, y) = h^{-1}(x, y) * g(x, y) \quad (11)$$

$$H^{-1}(v_1, v_2) = \frac{1}{H(v_1, v_2)} \quad (12)$$

IF는 필터들 중 가장 간단하게 계산할 수 있는 기본적인 방법이지만, 열화 함수의 크기가 0의 값을 가질 때는 IF의 값이 무한대로 발산하여 IF를 구성할 수 없으며 잡음이 존재할 경우 잡음을 증폭시킬 수 있다는 단점이 있다.

(2) 의사 역 필터(PIF)

PIF는 역 필터의 단점을 해결한 방법으로 식 (13)으로 표현할 수 있다(Jain, 1989).

$$H^{-1}(v_1, v_2) = \frac{1}{H(v_1, v_2)}, H > T$$

$$= 0, H \leq T \quad (13)$$

T 는 임의로 정한 임계값으로 이 값을 기준으로 위의 두 경우를 결정한다. 적절한 임계값을 정하기 위해서는 수차례의 반복적인 작업이 필요하다.

(3) Wiener Filter(WF)

WF는 최소자승법을 이용하여 원 영상과의 차이를 최소로 하는 복원 영상을 찾는 방법이다. 일반적으로 필터링의 과정은 주파수 영역에서 행해지며 식 (14)와 같

Fig. 8. Image degradation model in frequency domain.

다. $W(v_1, v_2)$ 는 WF를 의미하며, $H(v_1, v_2)$ 는 열화 함수를, $S_n(v_1, v_2)$ 와 $S_f(v_1, v_2)$ 는 각각 잡음과 원 영상의 파워 스펙트럼을 의미한다.

$$W(v_1, v_2) = \frac{1}{H(v_1, v_2)} \frac{|H(v_1, v_2)|^2}{|H(v_1, v_2)|^2 + \frac{S_n(v_1, v_2)}{S_f(v_1, v_2)}} \quad (14)$$

$$A = \frac{1}{H(v_1, v_2)}$$

$$B = \frac{|H(v_1, v_2)|^2}{|H(v_1, v_2)|^2 + \frac{S_n(v_1, v_2)}{S_f(v_1, v_2)}}$$

위 식은 크게 두 부분으로 구분된다. 앞의 A는 고역 통과필터(HPF, High Pass Filter)로 영상의 경계를 더 명확히 하는 역할을 하며, 뒤의 B는 저역통과필터(LPF)로 영상 내 잡음을 제거해 주는 역할을 한다. 하지만 WF를 적용하는데 있어 촬영된 영상에서 정확한 원 영상과 잡음의 파워 스펙트럼을 구하기는 매우 어려우며, 일반적으로 $\frac{S_n(v_1, v_2)}{S_f(v_1, v_2)}$ 대신 SNR의 역수를 사용한다. 따라서 위의 WF 식은 식 (15)와 같이 다시 쓸 수 있으며 SNR은 영상 내 균일한 지역에 대해 식 (16)으로 구할 수 있다. μ 는 신호의 평균값이며 σ 는 표준편차이다.

$$W(v_1, v_2) = \frac{1}{H(v_1, v_2)} \frac{|H(v_1, v_2)|^2}{|H(v_1, v_2)|^2 + \frac{1}{SNR}} \quad (15)$$

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{\mu}{\sigma} \right) \quad (16)$$

(4) L-곡선 기반의 Modified Wiener Filter(MWF)

MWF는 WF의 약점을 보완하기 위한 방법으로써, 잡음의 파워 스펙트럼과 원 영상의 파워 스펙트럼의 비가 SNR의 역수에 비례한다는 가정을 시작으로 제안된 방법이다(Wong, 2010). 이를 식으로 나타내면 식 (17)과 같고 이 때 λ 는 정규화 변수를 의미한다.

$$W(v_1, v_2) = \frac{1}{H(v_1, v_2)} \frac{|H(v_1, v_2)|^2}{|H(v_1, v_2)|^2 + \frac{\lambda}{SNR}} \quad (17)$$

(14)의 WF 식에서 분모에 $\frac{S_n(v_1, v_2)}{S_f(v_1, v_2)}$ 의 항이 존재하는데, 고주파 영역에서는 $S_f(v_1, v_2)$ 가 $S_n(v_1, v_2)$ 보다 훨씬 큰 값을 지닌다. 따라서 $\frac{S_n(v_1, v_2)}{S_f(v_1, v_2)} \simeq 0$ 으로 생각

할 수 있으며 WF의 식은 다음 식 (18)과 같이 간단하게 표시된다.

$$W(v_1, v_2) = \frac{1}{H(v_1, v_2)} \quad (18)$$

그런데 이때 고주파 영역이므로 $|H(v_1, v_2)|$ 의 값 역시 거의 0에 가깝게 된다. 따라서 위 식은 무한대에 가까워지면서 부적합문제(ill-posed problem)가 된다. 부적합문제를 풀기 위해서는 해를 정규화 하는 방법이 주로 사용된다(Lavrent'ev et al., 1986).

Tikhonov 정규화는 부적합문제를 풀기 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법이다. Fig. 7처럼 표현되는 영상의 열화모델에서 Tikhonov 정규화는 식 (19)과 같이 정의되며, 이 식을 최소로 만드는 정규화 변수, λ 를 최적값으로 사용한다. $\|\cdot\|_2$ 은 유클리드 놈(norm) 혹은 2차 놈을 의미한다.

$$\|g - hf\|_2^2 + \lambda \|f\|_2^2 \quad (19)$$

L-곡선은 정규화 문제를 최적의 정규화 변수를 구하기 위한 그래픽적인 방법이다. 정규화된 해와 그 때의 잔차(residual)의 크기를 바탕으로 한 매개변수 그래프로써(P.C. Hansen, 1992) 일반적으로 L자 모양으로 그 그래프가 나타나기 때문에 L-곡선이라는 이름이 붙었다. L-곡선의 그래프는 Fig. 9와 같은 형태로 나타나며 그래프에서 모서리 부분이 최적의 해를 갖는 지점이다.

L-곡선을 그리기 위해서는 먼저 정규화 변수, λ 의 초기값을 선정한다. 이 때 λ 의 값이 너무 작으면 IF와 유

Fig. 9. L-curve.

사하게 열화함수의 크기가 작을 때 필터를 구성하기 어려우므로 적절한 값을 선정해야 한다. 본 논문에서는 초기값으로 0.001을 사용하였다. 초기 λ 의 값이 정해지면 해당 λ 를 식 (16)에 대입하고 residual norm, $\|r\|^2$ 와 solution norm $\|f_\lambda\|^2$ 를 각각 구한다. 각각의 값은 식 (20)~(22)을 이용해 계산할 수 있다.

$$\|f_\lambda\|^2 = \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} f_\lambda^2(x, y) \quad (20)$$

$$\|r\|^2 = \|g - hf_\lambda\|^2 = \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} r^2(x, y) \quad (21)$$

$$\text{where, } r^2(x, y) = \mathcal{J}^{-1} \left[\frac{\left[G(v_1, v_2) \frac{\lambda}{SNR} \right]^2}{\left[|H(v_1, v_2)|^2 + \frac{\lambda}{SNR} \right]^2} \right] \quad (22)$$

그 후 λ 를 서서히 증가시켜가며 $\|r\|^2$ 와 $\|f_\lambda\|^2$ 를 각각 구하고, $\|r\|^2$ 와 $\|f_\lambda\|^2$ 의 값을 log 스케일로 전환한 후 x축을 $\|r\|^2$ 로 하고 y축을 $\|f_\lambda\|^2$ 로 하는 log-log 스케일의 그래프를 그린다. L-곡선에서 모서리를 찾고 그 지점에서의 최적의 값을 선택하고 최적의 λ 를 다시 식 (17)에 대입하여 MWF를 완성시킨다. 본 논문에서는 최적의 λ 를 찾기 위한 방법으로 곡률을 이용한 방법을 사용하였다. 곡률을 이용한 방법은 L-곡선 위의 점에서 곡률이 최대가 되는 지점을 최적값으로 선정하는 방법이며(Wong, 2010), λ 의 초기값과 증가량에 따라 최적값이 다르게 나타날 수 있다. 본 논문에는 λ 의 초기값과

증가량을 변화시켜가며 복원 영상의 MTF가 최대가 되는 점을 찾아서 사용하였으며, 이 때 사용된 λ 의 값은 인천 영상에서 0.741이며 대전 영상에서 0.0801이다.

2) 영상 복원 결과

본 논문에서는 PIF와 WF, MWF를 이용하여 영상을 복원하였다. 복원에 사용된 원 영상은 2012년 1월 4일 촬영된 인천 지역과 2011년 1월 2일 촬영된 대전 지역의 Dubaisat-1호의 영상이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각 필터를 적용한 경우의 복원된 영상이다. (a)는 영상 복원에 사용된 원 영상이며 (b)는 의사 역 필터를 사용해서 복원한 결과이다. 식(13)의 PIF식에서 임계값으로 $T = 0.1$ 을 사용하였다. (c)는 WF를 사용해 영상을 복원한 결과이며 (d)는 (16)의 MWF를 이용해 복원된 영상이다. 이 때 인천 영상은 정규화 파라미터로써 $\lambda = 0.741$ 을, 대전 영상은 $\lambda = 0.0801$ 을 사용하였다. 각각의 복원된 영상을 육안으로 확인했을 때 PIF보다 WF와 MWF의 결과가 영상 내의 경계선이 더 뚜렷하게 나타났으며 WF와 MWF는 비슷한 정도의 선명도를 갖는 것을 확인하였다. 정량적인 결과비교를 위하여 복원된 영상의 MTF 값을 비교하였다. Fig. 12와 Table 1은 각각 결과 비교를 위한 MTF 차트와 결과 값이다. MTF의 측정은 일반적으로 사용되고 있는 예지 방법을 사용하였다. 원 영상의 MTF는 두 영상이 평균 11.78%였으며 PIF로 영상을 복원한 경우는 MTF가 평

Fig. 10. Original and restored Images of Incheon. (a) original image, (b) restored image with Pseudo Inverse Filter, (c) restored image with Wiener Filter, (d) restored image with Modified Wiener Filter.

(c)

(d)

Fig. 10. Continued

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 11. Original and restored images of Incheon. (a) original image, (b) restored image with Pseudo Inverse Filter, (c) restored image with Wiener Filter, (d) restored image with Modified Wiener Filter.

(a)

(b)

Fig. 12. (a) MTF chart of image in Incheon (b) MTF chart of image in Daejeon.

Table 1. Results of image restoration

MTF (%)	Original Image	Pseudo Inverse Filter(PIF)	Wiener Filter(WF)	Modified Wiener Filter (MWF)
Incheon	10.48	15.71	21.90	39.05
Daejeon	13.08	18.73	32.71	37.25

군 17.22%, WF를 사용 했을 때는 평균 27.31%, MWF로 복원된 영상은 평균 38.15%의 MTF를 보였다. 복원 결과 MWF를 사용했을 때의 결과가 PIF와 WF를 사용했을 때의 결과에 비해 MTF가 각각 20.93%, 10.85% 더 향상되는 것을 확인하였다.

이는 기존에 수행되었던 다목적 실용위성 1호 EOC에 대한 PIF와 WF의 비교연구(Kang and Choi, 2003)에서 PIF가 WF보다 좋은 결과를 보였던 것과는 반대되는 결과이다. 하지만 기존의 연구에서는 복원된 영상의 평가 방법에 대해 정량적인 평가기준을 제공하지 않고 눈으로만 확인, 비교하였다. 또한 PIF는 영상의 특성을 고려하지 못하고 모든 영상에 대해 같은 기준으로 영상 복원을 수행하므로, 경우에 따라서는 WF보다 좋은 결과를 보일 수는 있으나 이는 특정 상황에만 국한될 뿐 일반적으로 WF가 더 좋은 성능을 보이는 것이 타당하다.

4. 결 론

위성 영상을 복원하기 위한 필터로써 다양한 방법들이 사용된다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되고 있는 PIF와 WF, MWF를 이용해 영상을 복원하고 각각의 결

과를 비교 분석하였다. MWF는 WF에서 정확한 잡음의 측정에 대한 약점을 극복하고자 제안된 방법으로써 정규화 변수를 이용해 복원된 영상과 실제 영상의 차이를 최소로 만드는 최적의 해를 찾는 방법이다. 본 논문에서는 L-곡선을 기반으로 최대의 곡률을 갖는 지점을 최적점으로 선정하였으며 사용된 정규화 변수 값은 영상에 따라 인천 영상에서 0.741, 대전 영상에서 0.0801을 사용하였다.

DubaiSat-1호의 영상에 대한 각 필터의 적용 결과, MWF, WF, PIF의 순으로 좋은 성능을 보였다. 이는 기존에 수행되었던 다목적 실용위성 1호 EOC에 대한 PIF와 WF의 비교연구(Kang and Choi, 2003)에서 PIF가 WF보다 좋은 결과를 보였던 것과는 반대되는 결과지만 일반적인 상황에 있어서 영상의 특성을 고려할 수 있는 WF가 더 좋은 성능을 보이는 것이 타당하다.

본 연구를 통해 PIF와 WF, MWF를 사용한 결과 MWF가 가장 뛰어난 효과를 보이는 것을 확인함으로써 위성 영상의 품질 향상에 기여할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의

일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Blonski, S., 2006. Spatial Resolution Characterization for AWiFs Multispectral Images, *JACIE Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop*, Mar. 14-16.
- Demers, D.D. and R.A. Stein, 1990. A Modified Wiener Filter for Restoration of Gated Nuclear Cardiac Images, *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Nov. 1-Nov. 4, vol. 12, pp. 156-157.
- Elisa, H. and B. Smith, 2006. PSF estimation by gradient descent fit to the ESF, *Proc. SPIE 6059 - Image Quality and System Performance III*, Jan. 15, vol. 6059, p. 60590E.
- Er.Neha, G. and K. Er.Ajay, 2012. Remote Sensing Image Restoration Using Various Techniques: A Review, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(1): 1-6.
- Hansen, P.C., 1992. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, December, 34(4): 561-580.
- Hwang, H., W. Park, and S. Kwak, 2011. MTF Assessment and Image Restoration Technique for Post-Launch Calibration of DubaiSat-1, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(5): 573-586.
- Jain, A.K., 1989. *Fundamentals of Digital Image Processing*, London Prentice-Hall International, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Kang, C.-H. and H.-J. Choi, 2003. MTF Compensation for KOMPSAT-1 EOC Images, *Spring Academic Conference Paper Collection 2003 of KAGIS*, pp. 22-25.
- Kim, S., J. Shin, and J. Park, 2003. Real-time iterative framework of regularized image restoration and its application to video enhancement, *Real-Time Imaging*, 9(1): 61-72.
- Lavrent'ev, M.M., V.G. Romanov, and S.P. Shishat. Ski, 1986. *Ill-posed problems of mathematical physics and analysis*, American Mathematical Society, Providence, RI, USA.
- Li, T., H. Feng, Z. Xu, X. Li, Z. Cen, and Q. Li, 2009. Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting, *Proceeding of the SPIE*, vol. 7498, pp. 74981H-1-74981H-8.
- Saripan, M.I., M. Petrou, and K. Wells, 2005. A Comparative Study on Improving Image Resolution of the Multihole Collimator Gamma Camera modelled by the MCNPX code using the Wiener Filtering Technique, *Proceedings of the 1st International Conference on Computers, Communications and Signal Processing*, 14-16(1): 34-37.
- Tzannes, A.P. and J.M. Mooney, 1995. Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras, *Optical Engineering*, 34(06): 1808-1817.
- Wang, H.-Z., S. Zhao, and L.-W. LV., 2008. Super-Resolution Image Restoration with L-curve, *2008 Congress on Image and Signal Processing*, May 27-30, vol. 3, pp. 597-601.
- Wong, S.M., 2010. Modulation Transfer Function Compensation Through a Modified Wiener Filter for Spatial Image Quality Improvement, School of Computer Sciences, Malaysia.
- Yin, F., M.L. Giger, and K. Doi, 1990. Measurement of the presampling modulation transfer function of film digitizers using a curve fitting technique, *Medical Physics*, 17(6): 962-966.