

# DPCA 기법을 이용한 SAR-GMTI 시스템에서 지상 이동 표적 오차 보상 기법 및 성능 분석

## Ground Moving Target Displacement Compensation and Performance Analysis in the DPCA Based SAR-GMTI System

정재훈 · 정정수\* · 정철호\* · 곽영길\*

Jae-Hoon Jung · Jung-Soo Jung\* · Chul-Ho Jung\* · Young-Kil Kwag\*

### 요 약

SAR-GMTI는 고해상도 영상과 동시에 차량, 기차와 같은 지상의 이동 표적을 탐지하여 정보를 제공하는 시스템이다. 본 논문에서는 항공기 탑재 측면 관측 영상 레이다에서 지상 이동 표적을 탐지하는 DPCA 기법에 기반하여 지상 이동 표적의 도플러 특성에 따른 영상 내 심각한 위치 오차와 퍼짐 현상을 분석하였다. 그리고 표적의 속도를 거리와 방위 방향으로 나누어 영상에서 위치 오차와 퍼짐 현상을 보상하며, 추정된 표적 속도와 퍼짐의 양을 정량화하여 제안된 보상 기법의 성능을 검증한다.

### Abstract

The velocity and acceleration of the ground moving target can cause the target position to be displaced and defocused in the SAR image. In this paper, the displacement compensation scheme is presented to correct the displaced position and defocused moving target image in the DPCA based SAR-GMTI system. The influence of the ground moving target due to the velocity and acceleration is analyzed in range and azimuth directions, and its compensation method is presented with the simulation results. The performance of the proposed method is compared with respect to the estimated velocity and defocused quantity in both range and azimuth directions.

Key words : DPCA, Air-Borne SAR, GMTI, Compensation

### I. 서 론

SAR-GMTI(Synthetic Aperture Radar-Ground Moving Target Indication)은 고해상도 영상 레이다 영상에서 지상의 차량, 기차 등의 이동 표적을 탐지하여 속도와 위치 정보를 제공하는 SAR 응용 분야로써 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다<sup>[1]</sup>. 하지만, 지상 고정 클러터 대역폭 내에 존재하는 지상 이동 표적을 탐지하기 위해서는 특별한 탐지 기법이 필요로 할 뿐만 아니라 지상 이동 표적의 속도는 SAR 영상

내에 심각한 위치 오차와 퍼짐 현상을 야기한다<sup>[2]</sup>. 따라서 SAR 영상 내 이동 표적의 속도 및 가속도 성분 에 따른 위치 오차와 퍼짐 현상에 대한 체계적인 분석과 보상 방법이 필요하다. 본 논문에서는 지상 이동 표적이 미치는 영향을 거리 방향과 방위 방향의 측면에서 분석하고, 이에 대한 보상 알고리즘을 제시한다. 지상 고정 클러터를 제거하기 위해 DPCA(Displaced-Phase Center Antenna)를 적용한 SAR-GMTI의 기하학적 모델을 제시하고, DPCA에 대한 개념을 소개한다. 그리고 SAR 영상 내 위치 오차와 퍼짐

LIG Nex1 ISR 연구센터(ISR Research Center, LIG Nex1 Co., Ltd.)

\*한국항공대학교 항공전자공학과(Department of Avionics Engineering, Korea Aerospace University)

· 논문 번호 : 20090702-060

· 수정완료일자 : 2009년 10월 14일

현상을 거리와 방위각 방향에서 각각 분석하고, 이를 보상하기 위한 방법을 제시한다. 보상 알고리즘을 항공기 탑재 SAR 모델에 적용하여 시뮬레이션을 통하여 확인하고, SAR 영상 내 이동 표적의 추정 속도와 퍼짐을 정량화하여 검증한다.

## II. SAR-GMTI 기하학적 모델

### 2-1 항공기 탑재 SAR 수신 신호 모델

항공기 탑재 측면 관측 영상 레이다의 기하학적 모델은 그림 1과 같다. 여기서 방위 방향은 플랫폼의 진행 방향, 거리 방향은 플랫폼의 진행 방향에 수직으로 정의하고, 지구 좌표가 평평하다고 가정한다. 항공기가  $H$ 의 고도에서  $V_p$ 의 일정한 속도로 이동하며, 제시된 기하학적 모델에서 플랫폼이 이동하는 시간, 즉 방위 방향 시간을  $\eta$ , 표적과 각 채널 간의 거리는  $R_{ch1}$ 과  $R_{ch2}$ , 두 채널간의 거리는  $d$ 로 정의한다. 그리고 이동 점표적은 거리 방향 속도  $V_r$ , 거리 방향 가속도  $A_r$ , 방위 방향 속도  $V_a$ , 방위 방향 가속도  $A_a$ 로  $\eta=0$ 일 때  $R_0$ 의 경사 거리를 가진다. 임의의 방위시간  $\eta$ 에서의 표적과 채널간의 거리 방정식은 테일러 시리스로 근사화하여 식 (1)로 표현할 수 있으며, 따라서 두 번째 안테나와 표적간의 왕복 거리는 식 (2)로 표현된다<sup>[3]</sup>.

$$R(\eta) \approx R_0 + V_r \eta + \frac{1}{2R_0} \{ (V_p - V_a)^2 + R_0 A_r \} \eta^2 + \frac{1}{2R_0} \{ (V_a - V_p) A_a \} \eta^3 \quad (1)$$

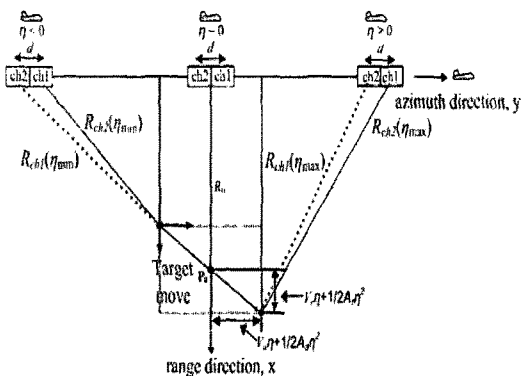


그림 1. 항공기 SAR-GMTI 시스템 기하도  
Fig. 1. The geometry of airborne SAR system.

$$R_{ch2}^{2-way}(\eta) = 2R_{ch1}^{1-way}(\eta) + d \left( \frac{(V_p - V_a)\eta}{R_0} \right) \quad (2)$$

### 2-2 DPCA 기법

일반적으로, SAR-GMTI 시스템은 지상 고정 클러터 제거를 위해 다중 채널을 사용한다. DPCA는 두 개 채널에서 수신된 복소수 SAR 신호를 각각 거리 압축한 후, 두 수신 신호의 차이를 이용하여 지상 고정 클러터를 제거하는 SAR-GMTI 기법 중 하나이다. 지상 고정 클러터의 경우 두 개의 채널에서 동일한 신호 응답을 지니는 반면 이동 표적은 두 채널간의 거리  $d$ 에 의해 수신 신호의 위상 변이가 발생한다. DPCA에서 영상 레이다의 PRF는 항공기 속도와 두 채널 간의 거리에 의해서 결정된다. DPCA 처리 후 신호 크기는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$DPCA(\tau, \eta) = 2A_0 | P_r \{ \tau - 2R_{ch1}^{1-way}(\eta)/c \} \times w_a(\eta - \eta_c) | \times \left| \sin \left( \pi \frac{f_0 g(\eta)}{c} \right) \right| \quad (3)$$

여기서,  $P_r$ 은 거리 압축 후 포락선,  $f_0$ 는 중심 주파수,  $g(\eta)$ 는 PRI 간격으로 두 개의 채널에 각각 수신된 신호의 위상 차이를 나타낸다. 고정 클러터의 경우 사인 부분이 0값을 가지나, 이동 표적의 경우 DPCA 처리 후에도 잔여 값이 존재한다.

## III. 지상이동 표적 영향

고정 클러터의 도플러 주파수는 오직 플랫폼 속도에 의해 결정된다. 하지만 지상 이동 표적의 도플러 주파수는 플랫폼 속도뿐만 아니라 표적의 도플러 성분이 추가적인 도플러 변이를 발생시켜 SAR 영상 내 이동 표적의 위치 오차와 퍼짐 현상을 유발한다. 레이다 플랫폼에 수신되는 이동 표적의 도플러 주파수는 식 (4)로 나타난다.

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} V_r - \frac{2}{\lambda} \frac{1}{R_0} \{ (V_p - V_a)^2 + R_0 A_r \} \eta - \frac{1}{\lambda} \frac{3}{R_0} \{ (V_a - V_p) A_a \} \eta^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 첫 번째 항은 거리 방향 속도에 의한 부분으로 거리 방향 압축 후 매 방위시간마다 표적

의 위치가 변하는, 즉, 마치 표적이 걸어가는 것과 같은 거리 이동 현상이 나타난다. 이 거리 이동 현상은 방위 압축 후 거리 방향과 방위 방향으로의 심각한 퍼짐 현상으로 나타난다. 또한 첫 번째 항은 주파수 측면에서 보면 도플러 변이로 나타나므로, 방위 방향의 위치 오차를 유발한다. 방위 방향 속도는 식 (4)에서 두 번째, 세 번째 항으로  $\eta$ 에 따라 도플러가 변하는 방위 FM울의 변화를 유발하므로, 방위 압축 후 표적이 방위 방향으로 퍼지게 된다. 가속도 성분 역시 방위 FM울을 변화시켜, 표적 영상의 방위 퍼짐을 유발하지만 속도 성분에 비해 그 영향이 미약하므로, 본 논문에서는 속도 성분에 중점을 두어 보상 기법을 제안한다.

#### IV. 보상 기법

##### 4-1 거리 방향 속도 보상

이동 표적의 거리 방향 속도로 인한 위상 변위는 두 개의 채널에 수신된 이동 표적 영상의 인터페로메트릭 위상으로 나타난다. 두 개의 채널에 수신된 인터페로메트릭 위상은 식 (5)로 표현된다.

$$s_{ch1} s_{ch2} = |s_{ch1}| |s_{ch2}| \exp\{j(\phi_{ch1} - \phi_{ch2})\} \quad (5)$$

인터페로메트릭 위상은 표적의 속도 성분에 의한 함수이므로 거리 방향 속도를 추정하는데 사용 가능하다<sup>4)</sup>. 고정 표적의 인터페로메트릭 위상은 채널간의 수신 신호가 동일하여 위상 차이가 없지만, 이동 표적의 인터페로메트릭 위상은 수신 신호의 위상 차이가 존재한다. 2-채널에 수신된 이동 표적의 위상 차이는 식 (6)과 같이 표현되므로 표적의 거리 방향 속도  $V_r$ 을 추정할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{d}{V_p} V_r \sin\theta \quad (6)$$

여기서,  $\theta$ 는 레이더의 입사각이다.

거리 방향 속도에 의한 각 방위시간에서의 거리 이동 양은 식 (7)과 같다.

$$\Delta R(\eta) = V_r \eta \quad (7)$$

거리 이동 현상 보상 단계는 그림 2에 제시되어 있다. (a)는 이동 표적의 거리 방향 압축 후 거리 이동

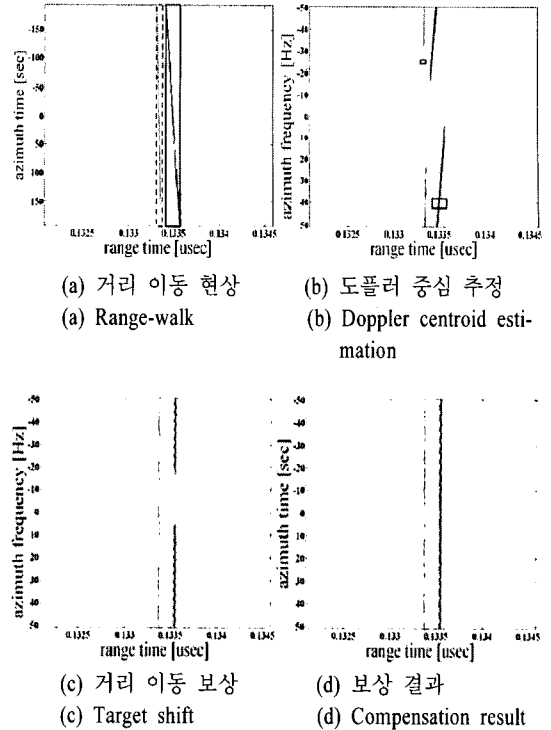


그림 2. 거리 이동 보상 단계

Fig. 2. Compensation step of range walk phenomenon.

현상을 나타낸다. 여기서 박스는 하나의 표적에 대한 정보를 모두 포함할 수 있는 최소 범위로, 왼쪽은 5 m/s로 이동하는 표적, 오른쪽은 20 m/s에 대한 표적을 나타낸다. 각 방위시간마다의 거리 이동양은 식 (7)에서 추정된다. 거리 이동 보상은 이동 표적의 실제 위치를 중심으로 수행되어야 한다. 각 표적의 방위 방향 위치는 도플러 센트로이드로 추정할 수 있다. 도플러 센트로이드를 추정하기 위하여 방위 FFT를 수행한 결과를 (b)에 나타내었다. 여기서, 작은 박스는 각 이동 표적의 도플러 센트로이드에 해당하는 방위 셀을 나타낸다. (c)는 도플러 센트로이드에 기반하여 각 방위 셀의 거리 이동양을 보상한 결과이며, 방위 방향 IFFT를 수행하여 (d)에 제시된 시간 도메인에서의 데이터를 얻을 수 있다.

거리 방향 속도에 의한 또 다른 영향인 방위 방향 위치 오차는 사전에 준비된 데이터베이스를 이용한다. 즉, 표적의 속도에 따른 방위 위치 오차량을 데이터베이스로 구축하고, 추정된 거리 방향 속도에 해당하는 오차량만큼 표적을 이동시킨다.

### 4-2 방위 방향 속도 보상

이동 표적의 방위 방향 속도 성분은 레이다 플랫폼과 표적간의 상대 속도 오차를 유발하여 수신 신호의 FM율을 변화시키므로 SAR 영상의 퍼짐 현상의 주 원인이 된다. 따라서 정합 필터 बैं크를 통하여 변화된 FM율을 추정하여 방위 방향 속도에 대한 영향을 보상한다<sup>5)</sup>.

이동 표적의 FM율 추정은 다양한 방위 FM율로 방위 압축을 수행하여, 정합율이 가장 높은 FM율을 찾아낸다. 고정 표적은 기존 방위 FM율에 대하여 정합율이 가장 좋지만, 이동 표적의 경우 최대 압축에너지를 가지게 하는 FM율이 다르므로 이동 표적의 FM율을 추정할 수 있다. 그림 3은 정합 필터 बैं크를 사용하여 5 m/s와 20 m/s로 이동하는 표적의 FM율을 추정한 결과를 나타낸다. 여기서, x축과 y축은 방위 방향 위치와 FM율을 나타내며, 필터 बैं크는 0.5284 MHz/sec의 대역폭을 가진 60개의 정합 필터로 구성되었다. 여기서 두 개의 이동 표적에 대한 최대 압축 에너지를 방위 -50 m, FM율 32 Hz/sec에서 그리고 방위 60 m, FM율 37 Hz/sec에서 확인할 수 있다. 방위 FM율의 변화는 이동 표적의 방위 방향 속도에 따라 결정되므로 추정된 이동 표적의 방위 FM율 이용하여 방위 방향 속도를 추정할 수 있다. 추정된 방위 방향 속도  $V_{a,est}$ 는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$V_{a,est} = V_p - \{1 - (K_{a,est}/K_a)^{1/2}\} \quad (8)$$

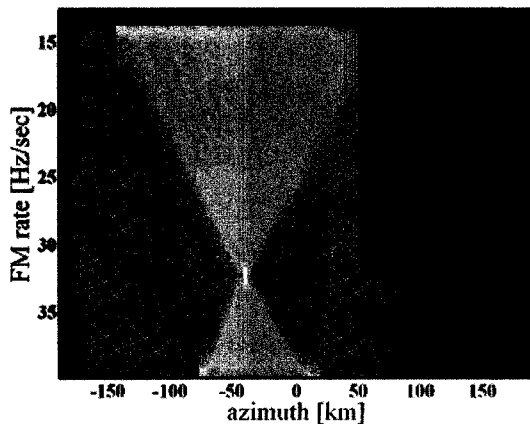


그림 3. 이동 표적 방위 FM율 추정  
Fig. 3. FM-azimuth slice for moving target.

여기서  $V_p$ 는 레이다 플랫폼 속도,  $K_a$ 는 SAR 영상의 방위 FM율을 나타낸다.

### V. 모의시험 및 분석

보상 기법의 검증은 그림 4에 제시된 모의시험 단계에 따라 표 1의 파라미터로 수행하였다. 먼저, 시스템 파라미터와 표적 정보로부터 각 채널의 수신 신호를 형성하고, 거리 방향 압축을 수행한다. 그리고 DPCA 알고리즘을 적용하여 고정 표적을 제거한 후, 두 채널에서 수신되는 신호의 인터메로메트릭 위상으로부터 이동 표적의 거리 방향 속도를 추정하여 거리 이동 현상을 보상하고 정합 필터 बैं크로부터 방위 FM율을 추정한다. 거리 압축된 이동 표적의 SAR 영상은 추정된 방위 FM율로 압축하고 위치 오차를 보상하여 최종 영상을 형성한다. 본 논문에서는 C-밴드 항공기 SAR-GMTI 시스템을 모델로, 고정 표적의 거리 및 방위 방향 위치는 각각 20,000 m와 0 m의 픽셀에 위치하며, 이동 표적은 20,000 m와 30 m, 20,030 m, 0 m의 위치에서 이동한다고 가정하였다.

SAR-GMTI의 모의시험 결과는 그림 5에 나타났다. 그림 5(a)는 보상 알고리즘을 적용하지 않은 이동 표적의 SAR 영상으로 표적의 속도 성분으로 인한 위치 오차와 퍼짐 현상이 나타난다. (b)는 고정 표적과 이동 표적의 거리 방향 압축 결과를 나타내며, (c)는 DPCA 처리 후 이동 표적의 거리 압축 결과를 보여준다. (d)는 이동 표적의 거리 방향 속도를 추정하여 이를 보상한 이동 표적의 거리 압축 결과이며, (e)는 정합필터 बैं크를 사용하여 추정된 방위 FM율을 적용하여 방위 방향 압축된 결과를 나타낸다.

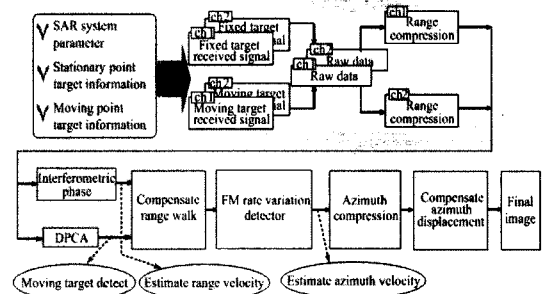
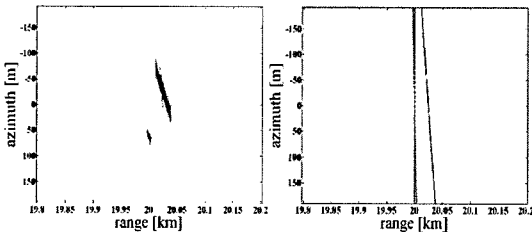


그림 4. SAR-GMTI 모의시험 단계  
Fig. 4. Simulation flow for SAR-GMTI.

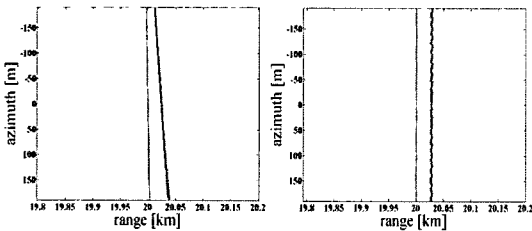
표 1. 모의시험 파라미터

Table 1. Simulation parameter.

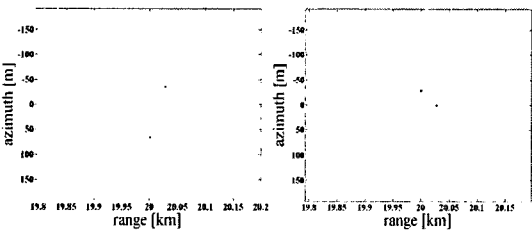
파라미터	값
운용주파수	5.3 [GHz]
거리 FM 율	$20 \cdot 10^{12}$ [Hz/sec]
PRF	100 [Hz]
안테나 길이	1 [m]
플랫폼 속도	150 [m/s]
고정 표적 위치(거리/방위)	20,000 [m] / 0 [m]
이동 표적 1 위치(거리/방위)	20,000 [m] / 30 [m]
이동 표적 2 위치(거리/방위)	20,030 [m] / 0 [m]
이동 표적 1 속도(거리/방위)	5 [m/s] / 5 [m/s]
이동 표적 2 속도(거리/방위)	20 [m/s] / 20 [m/s]



(a) 보상 전 영상 (b) 거리 압축 결과  
(a) Image before compensation (b) Range compression



(c) DPCA 수행 결과 (d) 거리 이동 보상 결과  
(c) DPCA processing (d) Compensation of range walk



(e) 방위 압축 결과 (f) 최종 영상  
(e) Azimuth compressing (f) Final image

그림 5. 모의 시험 결과  
Fig. 5. Simulation results.

다. 그리고 최종적으로 문턱 전압을 식 (9)와 같이 설정하여 표적을 탐지한다.

$$10 \log_{10} | \text{Signal} | > 2 \text{ dB} \quad (9)$$

방위 위치 오차 보상 후의 SAR 영상 내 이동 표적의 최종 영상은 그림 5의 (f)에 나타내었다. 약 20 m 정도의 방위 위치 에러가 나타나고 있다.

이동 표적의 거리 및 방위 방향의 속도 변화에 따른 추정 속도 오차는 그림 6에 나타내었다. 여기서, 실선과 점선은 각각 이동 표적의 추정된 거리 방향 속도와 추정된 방위 방향 속도를 나타낸다. 각 방향에서 추정된 속도는 시뮬레이션에 적용된 실제 표적의 속도와 매우 근접함을 알 수 있다.

그림 7은 이동 표적의 거리 및 방위 방향 속도 변화에 따른 영상 퍼짐양을 나타내었다. 보상 전후의 거리 방향 퍼짐 현상은 원과 삼각형 모양의 선으로 각각 나타내었으며, 방위 방향의 경우는 사각형과 점 모양의 선으로 표현되었다. 각각의 방향에서 보상 후 퍼짐 현상의 개선을 확인할 수 있다.

이동 표적의 거리 및 방위 방향의 속도 변화에 따른 추정 속도와 퍼짐 현상은 표 2에 제시되었다. 거리와 방위 방향 추정 속도의 최대 오차는 각각 1 m/s 와 2 m/s로서 매우 높은 성능을 나타내었다. 보상 알고리즘 적용 후, 이동 표적의 거리 방향 퍼짐 현상은 최대 2 m의 퍼짐 현상이 0.6 m로 감소하였으며, 방위 방향 퍼짐 현상 또한 보상되었다.

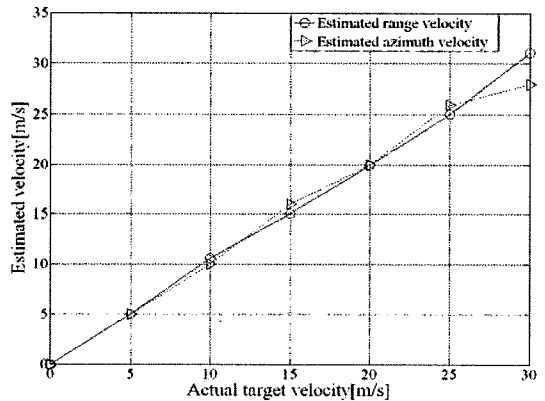


그림 6. 추정 속도 오차  
Fig. 6. Estimated velocity in range and azimuth direction.

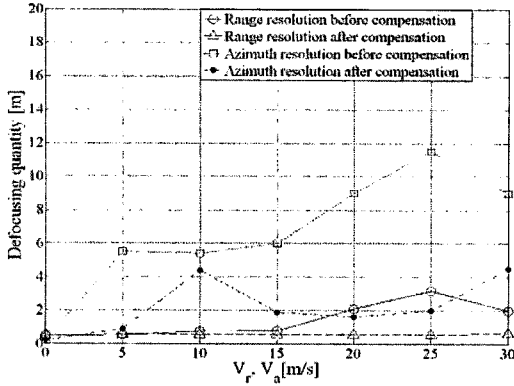


그림 7. 퍼짐 현상 보상  
Fig. 7. Defocusing quantity.

표 2. 보상 성능  
Table 2. Compensation performance.

모의 속도 [m/s]		추정 속도 [m/s]		퍼짐 현상 [m]			
$V_r$	$V_a$	$V_r$	$V_a$	보상 전		보상 후	
$V_r$	$V_a$	$V_r$	$V_a$	거리	방위	거리	방위
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.3
1	1	1	1	0.5	1.3	0.5	0.3
2	2	2	2	0.5	2.4	0.5	0.5
5	5	5	5	0.6	5.5	0.6	0.9
10	10	10.5	10	0.8	5.4	0.6	4.4
20	20	20	20	2.2	9	0.6	1.6
30	30	31	28	2	9	0.6	4.5

## VI. 결 론

본 논문에서는 DPCA 기반의 SAR-GMTI 시스템에서 이동 표적이 영상 내에 미치는 영향을 분석하고, 표적의 속도 추정과 보상 방법을 제시하였다. 이동 표적의 거리 방향 속도는 각 채널에 수신되는 표적 신호의 위상 차이로 추정하고, 방위 방향 속도

는 다수의 FM율로 처리된 정합 필터 बैं크 영상을 통하여 추정하였다. 표적의 거리 이동과 방위 위치 오차는 거리 방향 속도를 추정하여 보상하였고, 퍼짐 현상은 이동 표적의 방위 FM율을 추정하여 개선되었다. 본 논문은 향후 고해상도 SAR 영상에서 지상 이동 표적의 탐지 성능을 향상시키는데 적용되어 지상 차량의 교통 감시 등에 활용 가능하다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. H. G. Ender, P. Berens, A. R. Brenner, L. Rossing, and U. Skupin, "Multi channel SAR/MTI system development at FGAN: from AER to PAMIR", *Proc. of IGARSS Conf.*, vol. 3, pp. 1697-1701, Jun. 2002.
- [2] R. K. Raney, "Synthetic aperture imaging radar and moving targets", *IEEE Trans. of Aerospace and Electronic System*, vol. 7, no. 3, pp. 499-505, May 1971.
- [3] J. J. Sharma, C. H. Gierull, and M. J. Collins, "The influence of target acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI", *IEEE Trans. of Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 1, pp. 134-147, Jan. 2006.
- [4] Z. S. Shou, B. D. Bates, and Y. Dong, "Development of a baseband signal ATI-SAR simulator for ground moving target indication", *Proc. of IGARSS Conf.*, pp. 4505-4508, Jul. 2007.
- [5] D. Wehling, S. Hinz, F. Meyer, A. Laika, and R. Bamler, "Detection of along-track ground moving targets in high resolution spaceborne SAR images", *ISPRS Trans. of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 61, no. 3-4, pp. 135-140, Dec. 2006.

정 재 훈



2006년 8월: 한국항공대학교 항공 전자 및 정보통신공학부 (공학사)  
2008년 8월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학석사)  
2008년~현재: LIG NEX1 연구원  
[주 관심분야] Radar Signal Processing, Radar Target Detection

정 철 호



2003년 2월: 금오공과대학교 전자 공학과 (공학사)  
2005년 2월: 금오공과대학교 전자 공학과 (공학석사)  
2006년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정  
[주 관심분야] SAR Image Formation Algorithm, Interferometry Processing

정 정 수



2006년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학사)  
2007년 2월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] Radar Signal Processing, Interference Analysis, Adaptive Array Signal Processing, GM-

TI

곽 영 길



1976년 2월: 한국항공대학교 항공 통신공학과 (공학사)  
1981년 2월: 한국과학기술원 전기 전자공학과 (공학석사)  
1987년 6월: 미국오하이오대학교 전기 전자공학과 (공학박사)  
1976년 3월~2001년 3월: 국방과학 연구소 책임연구원, 레이더 및 SAR 연구실장  
1997년 2월~1999년 2월: 영국 Matra Marconi Space 위성 SAR 프로젝트 책임자  
2001년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부 교수 및 대학부설 항공전자연구소 소장 역임  
2002년 4월~2008년 12월: 한국전자파학회 레이더연구회 위원장  
2007년 9월~2008년 8월: 영국 옥스퍼드대학교, Dept. of Engineering Science, 방문교수, UWB Radar 연구  
[주 관심분야] Radar System Design, Radar Signal Processing, Synthetic Aperture Radar Processing, UWB Antenna & UWB Radar Imaging