

## FJB 파형을 이용한 SAR 영상 생성 기법 분석

### Analysis of SAR Processing Performances with FJB Waveforms

김은희 · 노지은\* · 박준용\* · 김수범\*\*

Eun-Hee Kim · Ji-Eun Roh\* · Joon-Yong Park\* · Soo-Bum Kim\*\*

#### 요 약

항공기 레이더에서는 고해상도 SAR 영상에서 지상의 이동 표적을 탐지하는 SAR-GMTI 모드의 운영이 점점 필수적으로 되고 있다. SAR는 고해상도 영상을 위하여 광대역 파형을 필요로 하는 반면, GMTI는 도플러 추출을 위하여 협대역의 파형을 필요로 하기 때문에 일반적인 LFM 파형은 사용에 어려움이 있다. 본 논문에서는 최근 들어 SAR-GMTI 모드의 파형으로 연구되고 있는 FJB(Frequency Jump Burst) 파형의 특성을 분석하였고, FJB 파형을 사용한 펄스압축과 SAR 영상 생성을 위한 방법들을 구현하였으며, 시뮬레이션을 통하여 펄스압축과 SAR 영상에서 단일 LFM을 사용할 경우와 성능에서 거의 차이가 없음을 보였다. FJB 파형은 SAR와 GMTI 처리를 동일한 파형으로 수행할 수 있기 때문에 본 결과를 적용하면 항공기 레이더에서 SAR-GMTI 모드의 처리를 보다 효율적으로 수행할 수 있다.

#### Abstract

Recently, the SAR-GMTI mode is becoming increasingly essential in airborne radar systems. While SAR requires wideband waveforms for high resolution imaging, GMTI requires narrowband waveforms for doppler processing, which makes general LFM waveforms difficult to use for SAR-GMTI. This paper analyses the FJB(Frequency Jump Burst) waveform, which is studied for the SAR-GMTI waveform, and presents the method for the pulse compression and SAR image formation using FJB waveforms. Simulation results show that there is little difference in performances between the FJB waveform and the LFM waveform.

Key words: Frequency Jump Burst(FJB), SAR, GMTI, Pulse Compression

#### I. 서 론

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 위성이나 항공기, 무인기 등의 탑재체에 장착되어 지표면의 2차원 영상을 생성하는 레이더 시스템이다. 한편, GMTI(Ground Moving Target Indication)는 항공기 등에서 차량이나 전차 등과

같이 지상에서 움직이는 물체를 레이더로 탐지하는 기법이다<sup>[1]</sup>. 최근 들어 전투기나 정찰기와 같은 항공기 레이더에서는 고해상도 SAR 영상에서 지상의 이동 표적을 탐지하여 속도와 위치 정보를 제공하는 SAR-GMTI 모드가 점점 더 필수적으로 운영되고 있으며, 이 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

「본 연구는 국방과학연구소의 연구지원을 받아 수행되었습니다(계약번호: UD150018FD).」

세종대학교 국방시스템공학과(Department of Defense System Engineering, Sejong University)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*\* (주)래드시스(Radsys Co., Ltd.)

· Manuscript received November 23, 2016 ; Revised January 10, 2017 ; Accepted February 25, 2017. (ID No. 20161123-122)

· Corresponding Author: Eun-Hee Kim (e-mail: eunheekim@sejong.ac.kr)

하지만 SAR는 정지 상태의 지표면에 대하여 수십 cm 이하의 고분해능의 영상을 얻기 위하여 수백 MHz나 그 이상의 대역폭을 갖는 광대역 파형(주로 Linear Frequency Modulation: LFM)을 사용하는 반면, GMTI는 클러스터 속에서 천천히 움직이는 물체의 도플러를 효과적으로 탐지하기 위하여 협대역의 높은 펄스반복주파수(Pulse Repetition Frequency: PRF)를 갖는 파형을 사용하므로 광대역 LFM 파형은 GMTI에 적합하지 않다. 따라서 SAR-GMTI 운영에서는 SAR 용의 광대역 파형과 GMTI 용의 협대역 파형을 다르게 선정하고, 이를 모드를 변경하여 송수신한 후, SAR 영상을 생성한 후에 GMTI 파형으로 처리한 결과를 영상 위에 표시하는 방법을 일반적으로 많이 사용한다.

SAR-GMTI 운영에서의 이러한 문제점을 개선하기 위하여 하나의 모드에서 하나의 파형으로 SAR와 GMTI를 동시에 수행하는 연구가 진행되어 왔으며, 최근에 LFM 파형이 아닌 Frequency Jump Burst(FJB) 파형을 사용하여 SAR-GMTI를 운영하는 기법이 많이 연구되고 있다<sup>[2]~[5]</sup>. FJB 파형은 광대역의 LFM 파형을 복수개의 협대역 파형으로 분리하여 사용하는 기법으로 synthetic wideband waveforms(SWW), stepped chirp signal, stepped frequency train 등의 이름으로도 불리고 있다<sup>[6]</sup>.

LFM 파형을 이용한 SAR 영상 생성 기법은 거리 방향으로 펄스압축을 수행한 후 방위 방향 압축을 수행하는 거리-도플러 알고리즘(Range-Doppler Algorithm: RDA)이 가장 기본적으로 사용되고 있으며<sup>[1],[7]</sup>, 이 외에도 여러 기법들이 이미 연구되어 있다. 하지만 FJB 파형을 이용하여 펄스압축과 SAR 영상 생성을 어떻게 효율적으로 처리할 것인지는 아직 연구가 진행 중에 있다. 본 논문에서는 기존의 FJB 파형을 이용한 펄스압축과 SAR 영상 생성 기법들을 분석하여 적합한 기법을 검토하고, 시뮬레이션을 통하여 실제로 그 기법을 구현하고, 성능을 검증한다. 이론적인 분석보다는 펄스압축과 SAR 영상 생성의 구현 측면에 보다 초점을 맞추어 설명한다. FJB 파형을 이용한 GMTI 기법으로는 STAP(Space-Time Adaptive Processing)<sup>[1]</sup> 등 일반적인 기법이 그대로 적용 가능하며, 참고문헌 [2]~[4]에서도 이에 대하여 분석이 이루어져 있으므로, 본 논문에서는 GMTI 기법에 대한 설명은 생략하고, 펄스압축과 SAR 영상 생성 기법을 중심으로 분석하도록 한다.

## II. FJB 파형의 구성과 특성

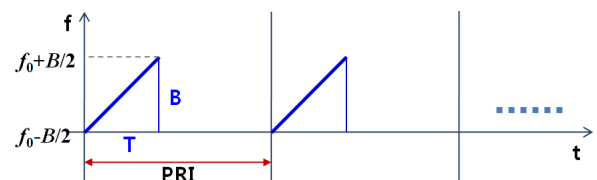
그림 1에는 LFM 파형과 FJB 파형의 기본적인 구성을 비교하였다. LFM 파형은 펄스폭  $T$  시간 동안 대역폭  $B$ 만큼 주파수를 선형으로 변조시키며, 이를 펄스반복시간( $PRI=1/PRF$ ) 간격으로 반복적으로 송신한다<sup>[7]</sup>. LFM 파형의 수식은 간단히 식 (1)과 같다.

$$f(t) = \text{rect}\frac{t}{T} \exp\left(j\frac{2\pi B}{T}t^2\right) \quad (1)$$

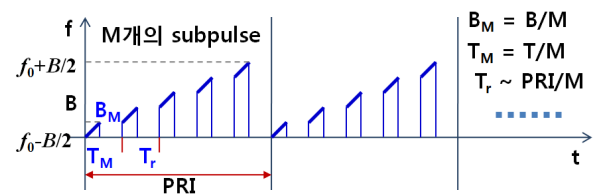
FJB 파형은 LFM 펄스를  $M$ 개의 부펄스(subpulse)로 분해하여 구성한다. LFM의 전체 대역폭을  $M$ 개로 등분하여  $B_M (= B/M)$ 의 대역폭과  $T_M (= T/M)$ 의 펄스폭을 갖는 협대역 LFM의 부펄스들로 등분한 뒤, 각 부펄스들을 PRI 내에서 시간적으로  $T_r$  만큼 분리시켜 놓은 형태를 갖는다. FJB 파형의 수식은 식 (2)와 같다<sup>[2],[3]</sup>. 여기서  $f_m(t)$ 는  $m$ 번째 부펄스 협대역 LFM으로서 식 (3)과 같다.

$$f_{FJB}(t) = \sum_{m=1}^M f_m(t - (m-1)T_r) \quad (2)$$

$$f_m(t) = \text{rect}\frac{t}{T_M} \exp\left(j\frac{2\pi B_M}{T_M}t^2\right) \exp(j\omega_m(t)) \quad (3)$$



(a) LFM 파형  
(a) LFM waveform



(b) FJB 파형  
(b) FJB waveform

그림 1. LFM 파형과 FJB 파형의 구성

Fig. 1. LFM waveform and FJB waveform.

$\omega_m$ 은  $m$ 번째 부펄스의 중심 주파수이며, LFM 중심 주파수  $f_0$ 를 중심으로  $B_M$  간격으로 떨어져서 존재한다.

$$\omega_m = 2\pi f_0 + 2\pi B_M \left( m - \frac{M+1}{2} \right) \quad (4)$$

FJB 부펄스들의 칩 경사도는 원래의 LFM 펄스의 칩 경사도와 동일하다.

$$\gamma_M = B_M / T_M = B / T = \gamma \quad (5)$$

SAR 영상 생성에서는 부펄스들을 모아서 대역폭  $B$ 의 광대역 처리를 수행하고, GMTI 처리에서는 각각의 부펄스들을 독립적으로 사용하여  $M$ 개의 협대역 파형으로 처리한다. 특히 전자적으로 빔을 생성하는 능동전자조향 레이더에서 GMTI에서 STAP 기법을 사용하는 경우에는 각 부펄스들은 서로 다른 빔으로 수신될 수 있다<sup>[2]~[4]</sup>.

레이더의 거리 분해능은 이론적으로  $c/2B$ ( $c$ 는 빛의 속도)이므로 대역폭이 클수록 거리 분해능이 향상된다. LFM 파형은 펄스압축 처리를 통하여 이론적인 거리 분해능을 얻을 수 있다<sup>[7]</sup>. 펄스압축은 정합 필터링 과정으로 수신 신호와 기준 LFM 신호의 convolution으로 정의되며, 실제 구현에서는 샘플링된 디지털 신호를 FFT(Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 변환)하여 주파수 영역에서의 압축 방법을 적용한다. LFM 파형의 수신 신호를  $r(t)$ , 기준 신호를  $h(t)$ 라고 하면 펄스압축 과정은 식 (6)과 같다. 식에서 ( $'$ )는 complex conjugate를 의미하며, IFFT는 Inverse FFT로서 주파수 영역에서 다시 시간 영역으로 역변환한다. 실제 FFT는 샘플링된 불연속 시간  $n$ 에서 수행되지만, 설명의 편의상 시간 변수를  $t$ 로 사용한다.

$$\begin{aligned} r(t) \otimes h(t) \\ = IFFT[FFT(r(t)) \cdot (FFT(h(t)))'] \end{aligned} \quad (6)$$

문제는 FJB 파형을 사용할 경우 LFM 파형을 사용하는 것과 동일한 수준의 분해능과 부엽 준위를 얻을 수 있는지와 이를 위하여 펄스압축과 SAR 영상 생성은 어떤 방식으로 처리해야 하는가이다.

FJB 파형을 이용한 펄스압축의 가장 기본적인 방법은 부펄스 합성 방법으로 그림 2와 같이 처리한다<sup>[3]</sup>. 송신 파형은 그림 1(b)에서와 동일한 형태로 송신을 한다. 수신시

에는 각각의 송신 부펄스에 대하여 수신한 신호들을 샘플링한 후, 각 부펄스에 대한 수신 디지털 신호들을  $(m-1)T_r$ 만큼 이동시켜 합성시켜서 하나의 LFM 수신 신호와 유사한 신호를 생성한다. 송신 부펄스  $f_m(t)$ 에 의하여 수신된 신호를  $r_m(t)$ 라고 하면 부펄스 합성 후에 생성된 수신 신호  $r_s(t)$ 는 식 (7)과 같다<sup>[3]</sup>.

$$r_s(t) = \sum_{m=1}^M r_m(t) \otimes \delta(t - (m-1)T_r) \quad (7)$$

합성된 신호에 대하여 이후의 펄스압축 과정은 동일하게 처리하며, 식 (8)과 같다. 송신 부펄스들을 동일한 방법으로 합성하여 기준 신호  $h_s(t)$ 를 생성하여 합성된 수신 신호  $r_s(t)$ 와 주파수 영역에서 펄스압축을 수행한다.

$$\begin{aligned} r_s(t) \otimes h_s(t) \\ = \left[ \sum_{m=1}^M r_m(t) \otimes \delta(t - (m-1)T_r) \right] \otimes \sum_{k=1}^M h_k(t) \\ = IFFT \left[ FFT \left( \sum_{m=1}^M r_m(t) \otimes \delta(t - (m-1)T_r) \right) \cdot \left( FFT \left( \sum_{k=1}^M h_k(t) \right) \right)' \right] \end{aligned} \quad (8)$$

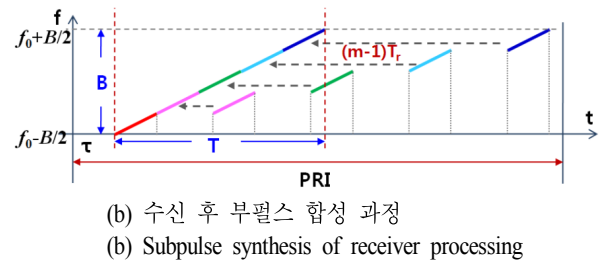
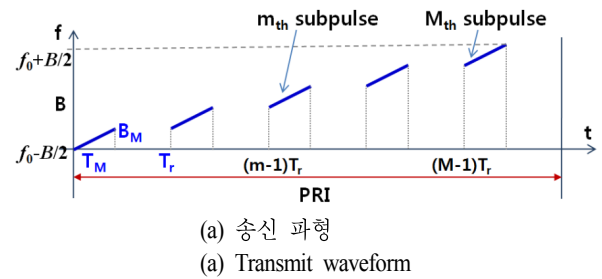


그림 2. FJB 파형의 부펄스 합성 처리

Fig. 2. Subpulse synthesis at receiver for FJB waveform.

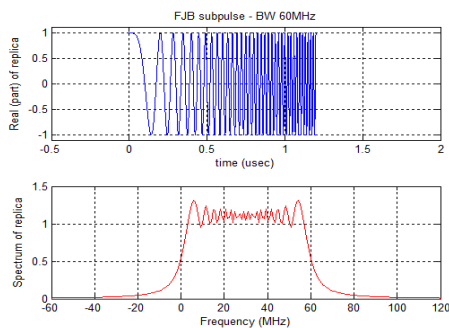
시뮬레이션을 통하여 FJB 파형의 특성과 부펄스 합성 처리 과정을 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 기본 LFM 파형은 대역폭 300 MHz, 펄스폭 6  $\mu$ s로 설정하였고, FJB 파형은 이를 5개의 부펄스로 나누었다.

FJB 파형에서의 개별 부펄스 파형은 그림 3(a)와 같으며, 이는 단순히 60 MHz 대역폭과 1.2  $\mu$ s의 펄스폭을 갖는 LFM 펄스와 동일하다. 전체 FJB 파형은 이와 같은 기본형의 부펄스들이 서로 다른 중심 주파수를 갖고 같은 시간 간격으로 떨어져서 송신될 것이다. 그림 3(b)는 비교를 위하여 300 MHz 대역폭의 LFM 펄스를 나타내었다.

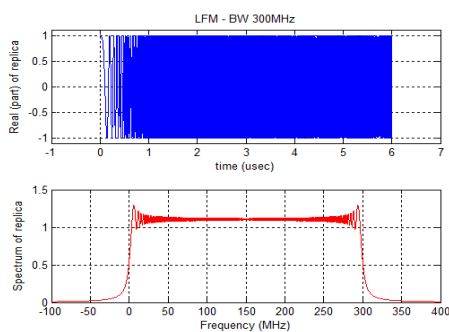
그림 4(a)는 시뮬레이션된 FJB 송신 파형이다. 송신 듀티비를 10 %라고 한다면 펄스폭 1.2  $\mu$ s의 5개의 부펄스들이 최소 12  $\mu$ s 이상의 간격으로 배치되어 송신되므로 PRI는 60  $\mu$ s 이상이 되어야 한다. 실제 부펄스 간격은 전

체 PRI를  $M$ 등분하는 것이 좋다. 기본 LFM과 동일한 PRI 내에서  $M$ 개의 부펄스를 사용할 경우에 각 부펄스에 대해서는 실제 PRI가  $1/M$  이하로 줄어들게 된다. SAR나 GMTI 등에서 PRI는 모호성이 없는 최대 관측 거리폭(swath)과 관계가 있으므로, PRI가 작아지게 되면 swath 폭도 작아지게 되어 관측 영역이 좁아진다. 따라서 PRI를  $M$ 등분할 때 각 부펄스에 대하여 관측 swath 폭이 작아지는 영향이 최소화된다. 그림 4(a) 아래 주파수 특성에서는 각 부펄스들이 서로 다른 중심 주파수를 갖는 것을 보인다. 전체 300 MHz 대역폭을 60 MHz 대역폭의 부펄스 신호들이 중심 주파수 60 MHz 간격으로 배치되어 있다.

그림 4(b)는 수신 처리에서 부펄스 합성한 결과이다.



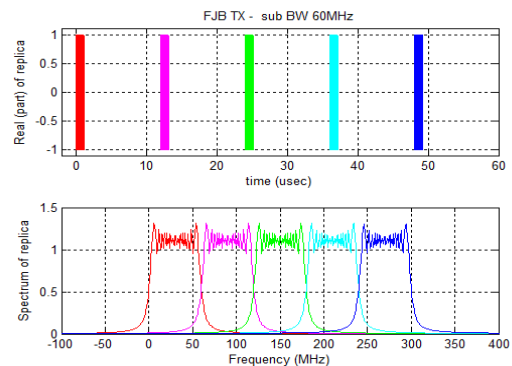
(a) FJB 부펄스(60 MHz)  
(a) FJB subpulse(60 MHz)



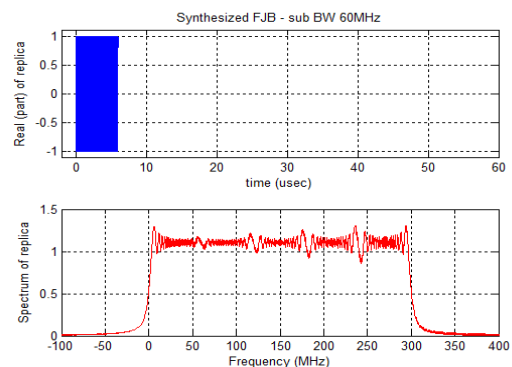
(b) LFM 펄스(300 MHz)  
(b) LFM pulse(300 MHz)

그림 3. 시뮬레이션을 위한 FJB 부펄스와 LFM 펄스 파형 (각 그림의 위 시간 영역, 아래 주파수 영역)

Fig. 3. FJB subpulse waveform for simulation(time domain and frequency domain).



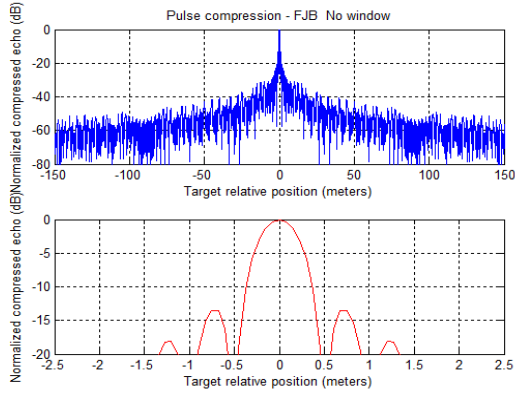
(a) 송신 파형  
(a) Transmit waveform



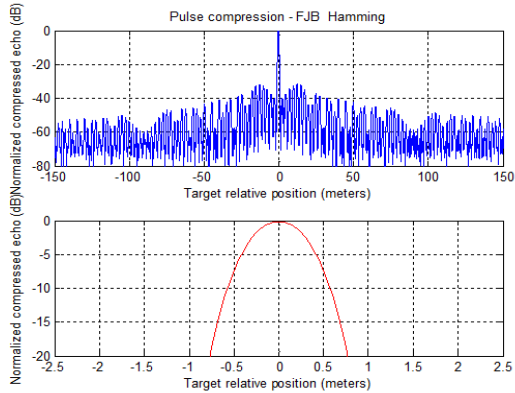
(b) 수신 부펄스 합성 결과  
(b) Subpulse synthesis result

그림 4. FJB 파형의 송수신 시뮬레이션(각 그림의 위 시간 영역, 아래 주파수 영역)

Fig. 4. FJB waveform simulation at transmit and receive (time domain and frequency domain).



(a) 윈도우 미적용  
(a) No window

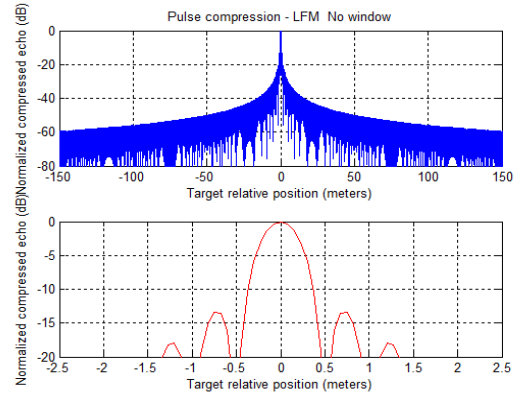


(b) Hamming 윈도우 적용  
(b) Hamming window

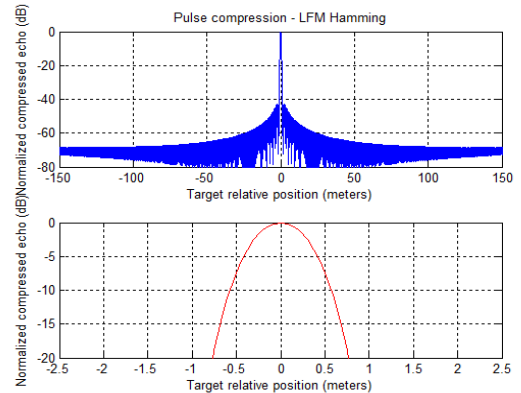
그림 5. 합성된 FJB 파형의 펄스압축 결과(각 그림의 아래는 확대된 그림)

Fig. 5. Pulse compression of FJB synthesis waveform(red: magnification of blue figure).

전체 5개의 부펄스들을 합성한 결과는 하나의  $6 \mu s$  펄스 폭과 300 MHz 대역폭의 LFM과 유사한 시간 특성과 주파수 특성을 갖는다. 다만, 주파수 영역에서 부펄스들이 합쳐지는 부분에서 다소의 불연속적인 모습을 보인다. 이는 각 부펄스들이 합성되는 부분에서 위상이 연속적이지 않아서 발생하는 현상이다. 이로 인하여 그림 4(a)의 60 MHz의 각 부펄스 스펙트럼을 더한 것과 유사한 형태가 그림 4(b)의 합성 스펙트럼이 된다. 이는 LFM의 스펙트럼과 차이를 보이며, 펄스압축 결과에 영향을 미치게 된다. 식 (9)는 합성된 FJB 펄스의 스펙트럼을 나타낸다.



(a) 윈도우 미적용  
(a) No window



(b) Hamming 윈도우 적용  
(b) Hamming window

그림 6. LFM 파형의 펄스압축 결과(각 그림의 아래는 확대된 그림)

Fig. 6. Pulse compression of LFM waveform(red: magnification of blue figure).

$$H_s(f) = FFT\left(\sum_{k=1}^M h_k(t)\right) = \sum_{m=1}^M H_k(f) \quad (9)$$

이렇게 합성된 FJB 펄스를 사용하여 펄스압축을 수행한 결과를 그림 5에 보인다. 펄스압축은 앞에서 설명한 것과 같이 수신 신호와 기준 신호를 주파수 영역에서 처리하는 방법을 사용하였다<sup>[7]</sup>. 기준 신호는 송신 부펄스의 합성 신호를 사용하였다. 비교를 위하여 그림 6에 단일 LFM을 사용하여 펄스압축을 수행한 결과를 보인다.

펄스압축 결과는 대체로 단일 300 MHz LFM 펄스를 사용하였을 때와 비슷한 결과를 보인다. 분해능은 이론과

같이 300 MHz 대역폭일 때의 0.5 m로 나오며, 첫 번째 부엽 준위도 주엽 대비 약 -13 dB가 된다. 문제는 펄스압축 중심에서 멀어질수록 부엽들이 단일 LFM의 경우에 비하여 크게 나타나고 있다는 점이다. 이는 부펄스들을 합성하는 과정에서 각 부펄스의 60 MHz 특성이 완전히 제거되지 않고 남아 있어서 60 MHz 펄스에 의한 부엽 성분이 전체 압축 결과에 포함되어 있는 모양을 나타낸다.

그림 5, 6의 (b)는 펄스압축에서 부엽을 줄이기 위하여 윈도우를 사용한 결과이다. 윈도우에는 여러 가지 종류가 있는데, 여기에서는 간단한 Hamming 윈도우를 사용하였다. Hamming 윈도우의 수식은 식 (10)과 같다. 윈도우의 길이는  $N$ 으로 양의 정수이며, 윈도우를 적용하고자 하는 LFM 기준 신호의 샘플 수와 동일하게 설정한다.

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N-1}\right), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (10)$$

LFM 파형은 윈도우를 사용할 경우에 분해능은 저하되어도 부엽은 크게 감소하는 것을 볼 수 있지만, FJB 파형의 경우에는 윈도우를 사용하더라도 주엽의 분해능만 저하될 뿐 주변 부엽들의 크기가 작아지지 않아서 윈도우의 효과가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

참고문헌 [3]에서는 FJB 파형의 특성에 대하여 모호성 함수(Ambiguity Function: AF)를 이용한 분석 결과를 제시하였고, 도플러가 없는 경우에는 FJB 파형의 모호성 함수의 특성은 이론적으로 단일 LFM과 차이가 없으며, 펄스압축 결과도 동일해야 함을 보이고 있다. 하지만 앞에서의 결과는 LFM에 비하여 성능이 저하된 결과를 보인다. 따라서 이와 같은 펄스압축 구현 방법은 적합하지 않으며, 개선된 방법을 필요로 하게 된다.

### III. FJB 파형의 개선된 펄스압축

앞에서 살펴보았듯이, FJB 파형을 사용할 경우 단순히 부펄스들을 합성하여 일반적인 펄스압축 방법으로 처리할 경우에는 LFM의 경우보다 부엽 준위의 성능이 좋지 않으며, 이는 레이더의 성능에 문제를 발생시킨다. 이를 개선하기 위하여 부펄스들을 합성하지 않고, 개별 부펄스들을 각각 독립적으로 처리한 뒤, 최종단에서 합성하는

기법들이 연구되었다<sup>[5],[6]</sup>. 본 논문에서는 기존의 연구 결과들을 분석하여 향상된 성능을 낼 수 있는 기법과 이를 실제로 구현할 수 있는 방법을 검토하였다.

펄스압축은 앞에서와 같이 수신 신호  $r(t)$ 와 기준 신호  $h(t)$ 의 convolution으로 처리된다. 수신 신호  $r(t)$ 와 기준 신호  $h(t)$ 가 전체 대역폭  $B$ 의 LFM 신호라고 하고, 이를 각 부펄스들( $r_1(t)$ ,  $r_2(t)$ , ...,  $r_M(t)$ ,  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$ , ...,  $h_M(t)$ )의 선형 합으로 가정할 경우 식 (11)과 같은 분해가 가능하다.

$$\begin{aligned} r(t) \otimes h(t) &= (r_1(t) + r_2(t) + \dots + r_M(t)) \\ &\quad \otimes (h_1(t) + h_2(t) + \dots + h_M(t)) \\ &= (r_1(t) \otimes h_1(t) + r_1(t) \otimes h_2(t) + \dots + r_1(t) \otimes h_M(t)) \\ &\quad + (r_2(t) \otimes h_1(t) + r_2(t) \otimes h_2(t) + \dots + r_2(t) \otimes h_M(t)) \\ &\quad \dots \\ &\quad + (r_M(t) \otimes h_1(t) + r_M(t) \otimes h_2(t) + \dots + r_M(t) \otimes h_M(t)) \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M r_m(t) \otimes h_k(t) \end{aligned} \quad (11)$$

그림 7에 이 과정을 개념적으로 나타내었다. 그림 7의 (a)는 LFM의 펄스압축 과정이고, (b)는 FJB의 개선된 펄스압축 과정이다. 즉, 수신 처리에서 부펄스 합성 과정을 수

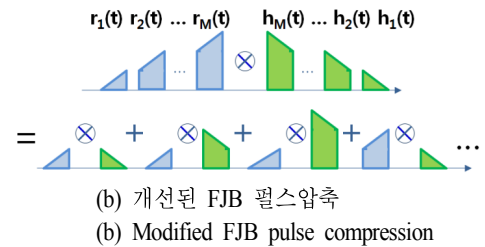
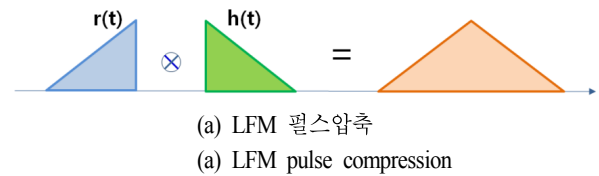


그림 7. 개선된 FJB 펄스압축의 개념  
Fig. 7. Concept of a modified FJB pulse compression.



행하지 않고, 각각의 부펄스 수신 신호  $r_m(t)$  ( $1 \leq m \leq M$ )에 대하여  $M$ 개의 부펄스 기준 신호  $h_k(t)$ 와 각각 정합 필터링을 수행한 후 이들을 합치게 된다. 개별 부펄스 수신 신호에 대하여 이렇게 처리된 결과를 다시 합치면 최종적으로 단일 LFM의 펄스압축과 동일한 결과가 생성된다. 개별 부펄스 신호에 대한 정합 필터링은 주파수 영역에서의 펄스압축 방법이 그대로 적용된다. 다만, 식 (8)에서는 부펄스 합성된 전체 신호에 대하여 FFT 처리를 한 반면, 개선된 방법에서는 각 부펄스에 대하여 FFT를 하여 주파수 영역 방법을 적용하여 식 (12)와 같이 처리한다.

$$r(t) \otimes h(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M IFFT[FFT(r_m(t)) \cdot (FFT(h_k(t)))'] \quad (12)$$

만약 윈도우를 사용하게 된다면 개선된 방법에 맞게 적용해야 하는데 이에 대한 설명은 4장에서 정리한다.

시뮬레이션을 통하여 이 과정을 검증하였다. 그림 8은 각 부펄스 수신 신호에 대하여 5개의 부펄스 기준 신호를

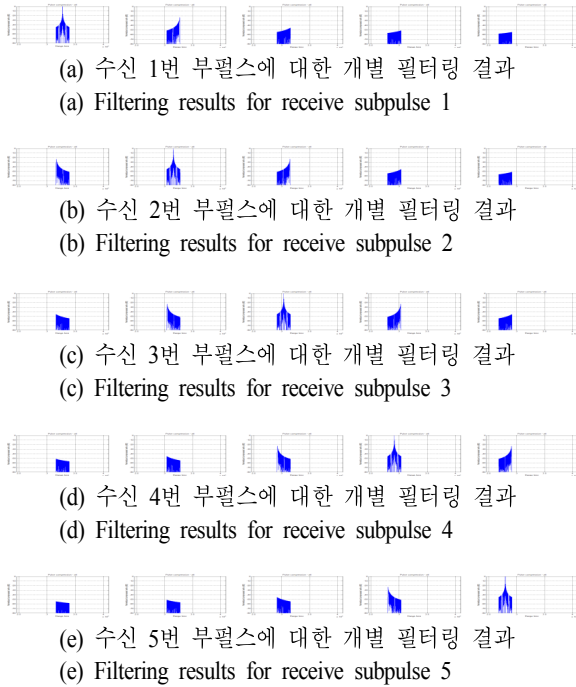


그림 8. 개별 부펄스에 대한 정합 필터링 결과  
Fig. 8. Matched filtering results for each FJB subpulse.

이용하여 개별적으로 필터링한 결과를 보인다. 수신 신호와 기준 신호의 인덱스( $m$ )가 같은 경우에는 협대역의 LFM 파형을 사용하여 펄스압축을 한 결과와 같은 모양이 나타난다.

그림 8에서의 각 개별 수신 신호에 대한 5개의 결과는 각각 기준 신호  $h_1(t)$ 에서부터  $h_5(t)$ 에 대한 필터링 결과이다. 이 5개의 필터링 결과를 합치면 그림 9와 같이 5개의 개별 부펄스 수신 신호에 대한 전체 필터링 결과를 얻는다. 이는 수신 신호는 부펄스에 대한 신호를 사용하고, 기준 신호는 광대역 LFM 신호를 사용하여 필터링한 것과 유사한 결과이다. 5개의 결과는 부엽에서의 약간의 차이는 있지만, 대체로 유사한 모습을 보인다. 분해능은 300 MHz가 아닌 60 MHz 대역폭에 대한 분해능인 2.5 m의 분해능을 보인다.

이들 5개의 부펄스 필터링 결과로부터 전체 FJB 파형에 대한 최종 펄스압축 결과를 얻을 수 있으며, 그 결과는 그림 10과 같다. 그림 10의 최종 결과는 그림 9의 5개의 개별 부펄스에 대한 결과들을 단순히 더한 것이다. 펄스압축 결과의 분해능은 300 MHz 대역폭에 대한 0.5 m의 분해능을 보인다. 또한, 부엽의 경우에도 그림 5에서의 부펄스 합성 처리보다 훨씬 향상된 모습을 보이며, 특히 주엽 근처의 부엽에서는 그림 6의 단일 LFM 파형에 대한

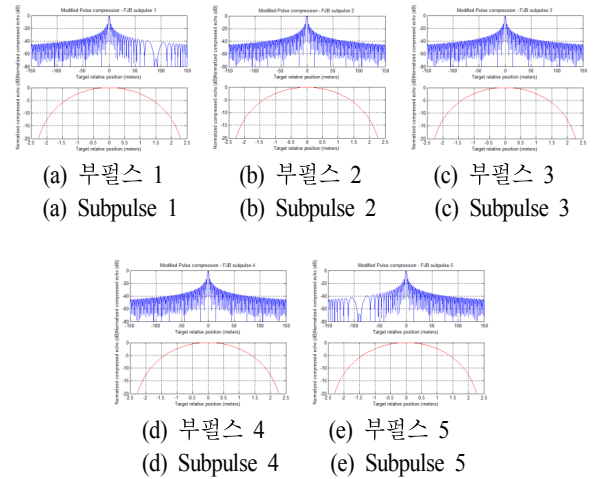
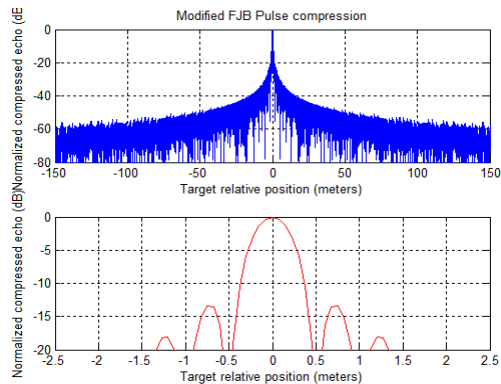
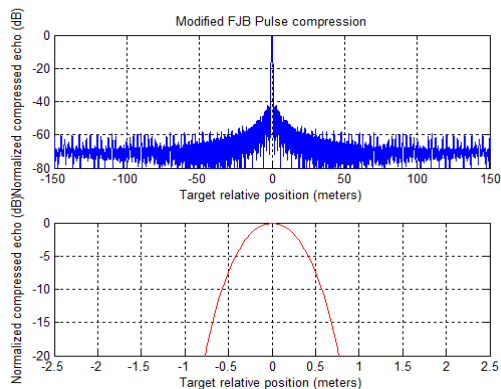


그림 9. 각 부펄스에 대한 개별 필터링의 합  
Fig. 9. Summation results of matched filtering results for each FJB subpulse.



(a) 윈도우 미적용  
(a) No window



(b) Hamming 윈도우 적용  
(b) Hamming window

그림 10. FJB 파형의 개선된 펄스압축 결과(각 그림의 아래는 확대된 그림)

Fig. 10. Modified pulse compression of FJB waveform(red: magnification of blue figure).

펄스압축 결과와 거의 동일한 부엽 형태를 보인다. 주엽에서 멀어지면 부엽이 약간 높아지는 경향을 보이는데, 이는 위상이 완전히 일치하지 않아 60 MHz의 영향이 다소 남아있기 때문이다. 이론적으로는 FJB 파형의 결과가 LFM 파형의 결과와 일치해야 하나, 실제 구현 결과는 다소의 오차를 보인다. 이는 식 (11)에서  $h(t)$ 를  $h_k(t)$ 의 합으로 분해할 때, 각 부펄스들의 위상이 선형적으로 연속적으로 변하는 것을 가정한 것이지만, 실제 구현에서는 부펄스들의 위상을 연속적으로 생성하기는 불가능하며, 이에 의한 영향으로 다소의 오차를 보인다. 그럼에도 앞에

표 1. FJB 펄스압축 방법의 부엽 성능 비교

Table 1. Sidelobe performances of FJB pulse compression.

		LFM	FJB 부펄스 합성	FJB 개선된 방법
No window	PSLR(dB)	-13.28	-13.29	-13.28
	ISLR(dB)	-5.92	-5.77	-5.92
Hamming window	PSLR(dB)	-42.68	-40.92	-42.94
	ISLR(dB)	-5.88	-5.70	-5.87

서의 부펄스 합성 방법과는 달리 본 방법의 결과는 오차가 크지 않음을 볼 수 있다. 윈도우를 사용했을 경우에는 부엽은 더욱 억제되고, 주엽의 폭은 약간 커지는 효과를 보인다.

이상과 같은 시뮬레이션을 통하여 FJB 파형에 대하여 개선된 펄스압축을 수행할 경우에 단일 LFM을 사용한 경우와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 이상의 결과에 대하여 PSLR(Peak to Sidelobe Ratio)과 ISLR(Integrated Sidelobe Ratio)을 계산하면 표 1과 같다. 표에서 보듯이 PSLR은 세 가지 경우가 거의 비슷하지만, ISLR은 부펄스 합성 방법이 좋지 않은 반면, 개선된 방법은 단일 LFM을 사용할 경우와 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

#### IV. FJB 파형을 이용한 SAR 영상 생성

본 장에서는 FJB 파형에 대하여 개선된 펄스압축 방법을 확장 적용하여 SAR 영상을 생성하는 과정과 그 결과를 보인다. SAR 영상 생성 기법은 기본적으로 앞에서 기술한 RDA 기법을 적용하였으며, RDA 기법의 자세한 내용은 관련 문헌을 참조한다<sup>[1],[6]</sup>.

FJB 파형을 사용하여 SAR 영상을 생성하는 과정은 그림 11과 같다<sup>[5],[6]</sup>. SAR 영상 생성 시 개별 수신 부펄스들에 대하여 각각 독립적으로 거리 압축과 방위 압축을 수행하여  $M$ 개의 부펄스 SAR 영상을 생성하고, 이를 다시 더하게 되면 최종 SAR 영상을 얻을 수 있다. RDA 기법에서 발생하는 range migration을 보상하기 위하여 사용되지는 RCMC(Range Cell Migration Compensation) 보상도 개별 부펄스 별로 처리한다.

SAR 영상 생성 시 개별 부펄스들에 대한 거리 압축은



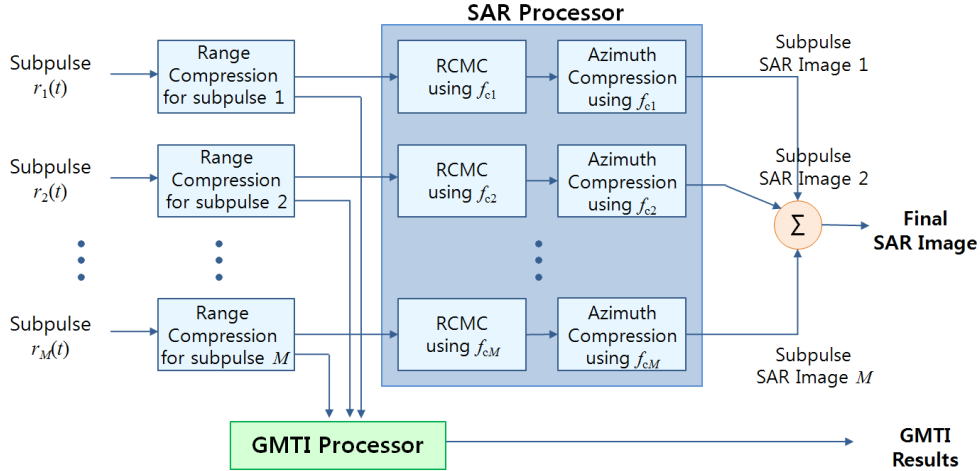


그림 11. FJB 파형을 이용한 SAR 영상 생성 과정  
Fig. 11. Diagram of SAR processing of FJB waveform.

앞에서의 개선된 FJB 펄스압축 과정과 동일하다. 단, SAR 영상을 생성할 시에는 개별 부펄스들의 압축 결과들을 미리 더하지 않고 각각에 대하여 독립적으로 방위 압축까지 수행한 뒤, 각각의 부펄스 SAR 영상들을 마지막에 더하게 된다.

방위 압축 시 유의할 점은 개별 부펄스들의 중심 주파수가 다르고, 하나의 PRI 내에서 부펄스들의 송신 시점이 다르므로 방위 도플러 특성에서 부펄스마다 약간의 차이가 있게 된다. 따라서 개별 부펄스들에 대하여 각각의 중심 주파수를 기준으로 RCMC 보상 신호와 방위 기준 신호를 생성하여 방위 압축을 처리하게 된다.

SAR 영상 생성 시의 개별 부펄스에 대한 거리 압축 과정은 그림 12와 같다. 부펄스  $r_m(t)$ 에 대하여  $M$ 개의 기준

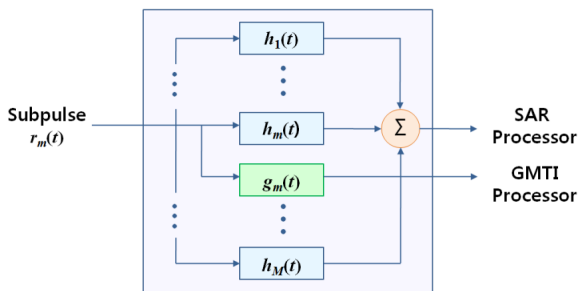


그림 12. FJB 파형 SAR 영상 생성 시의 거리 압축  
Fig. 12. Range compression for each FJB subpulse.

신호  $h_k(t)$ 를 이용한 필터링 결과를 더하여 거리 압축을 수행한 후, SAR 처리를 수행한다. 또한, 개별 부펄스 펄스압축 결과는 GMTI 처리에도 사용된다. GMTI 용으로는 수신 부펄스와 동일한 인덱스( $m$ )를 갖는 기준 신호에 대한 펄스압축 결과가 사용된다. 즉, GMTI용으로는 대역폭  $B$ 의 펄스압축 결과가 사용되는 것이 아니라, 대역폭  $B/M$ 의 협대역 LFM에 대한 펄스압축 결과가 사용된다.

따라서 하나의 FJB 파형으로 SAR 영상 생성과 GMTI 처리가 동시에 가능하다. 또한, GMTI 용으로는  $M$ 채널의 부펄스 LFM이 사용되므로, 보다 정밀한 처리가 가능하다. GMTI 기법으로는 STAP<sup>[1]</sup> 등 일반적인 기법이 그대로 적용 가능하므로, 본 논문에서는 GMTI 기법에 대한 설명은 생략하고, SAR 영상 생성 기법만을 설명하도록 한다.

그림 12에서 펄스압축 시에 윈도우를 사용할 경우에는 SAR 처리용과 GMTI 용으로 사용되는 윈도우가 다르므로 GMTI 용으로는 별도의 윈도우를 사용한 기준 신호  $g_m(t)$ 를 이용한 펄스압축 결과를 사용한다.

그림 13에는 펄스압축 기준 신호에 윈도우를 사용할 경우의 형태를 보인다. 그림 13(a)에서 entire window는 SAR 용의 광대역 LFM 신호에 대하여 곱해지는 윈도우이다. FJB 파형은 LFM을 시간적으로  $M$ 등분하는 것과 같으므로, 윈도우도 시간적으로  $M$  등분하여  $M$ 개의 partial window를 생성한다. 이 partial window들을 각각의 기준

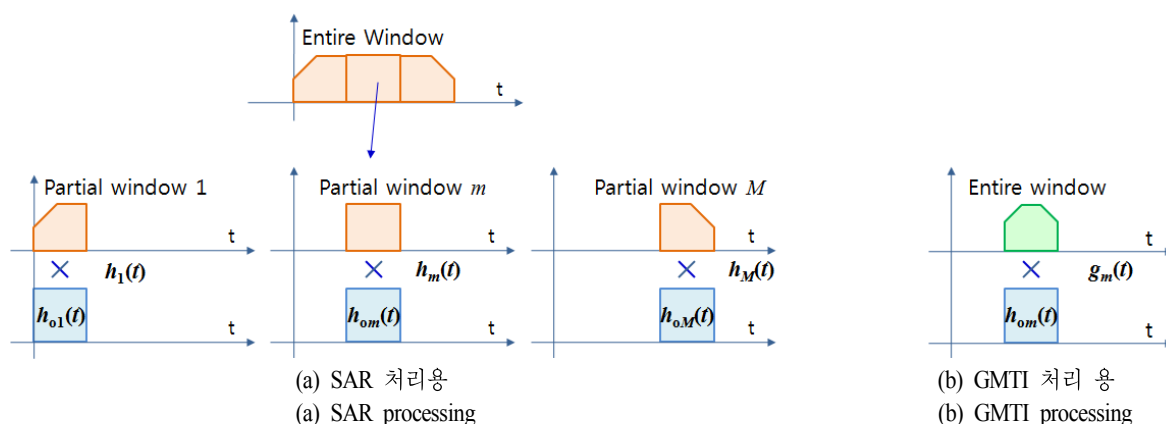


그림 13. FJB 파형을 이용한 펄스압축 시의 윈도우

Fig. 13. Windowing method of a modified pulse compression for FJB waveform.

신호들과 곱하여 사용하면 전체 결과는 entire window를 사용한 것과 같은 효과를 얻는다. 앞에서의 펄스압축 시뮬레이션 시에 이러한 방법을 적용하여 구현하였다. 윈도우를 곱하지 않는 기준 신호를  $h_{om}(t)$ 라 하면 윈도우를 곱한 신호는  $h_m(t)$ 이다. GMTI 용으로는 그림 13(b)와 같이  $m$  번째 기준 신호를 사용하므로 윈도우는 이 기준 신호의 협대역 펄스폭에 해당하는 길이로 생성하여 곱하여 사용하면 된다. 이렇게 생성된 기준 신호가  $g_m(t)$ 가 된다. 윈도우를 사용하지 않으면  $h_{om}(t)$ ,  $h_m(t)$ ,  $g_m(t)$ 는 동일하다.

펄스압축 시의 윈도우는 시간 영역에서 윈도우를 생성하여 곱하여 처리하기도 하고, 주파수 영역에서 윈도우를 생성하여 곱하여 처리하기도 한다. 윈도우 자체가 시간 영역과 주파수 영역의 특성이 비슷하도록 설계되어 있어 어느 경우에도 유사한 결과를 보인다. 참고문헌 [6]에서는 FJB 파형의 각 부펄스에 대하여 주파수 영역에서 partial window를 적용하였으나, 주파수 영역에서는 윈도우를 분할하기가 쉽지 않기 때문에 본 논문에서는 시간 영역에서 기준 신호를  $M$  등분하고, 각각에 대하여  $M$ 개의 partial window를 곱하는 방법을 적용하였다.

다음에 FJB 파형을 이용하여 SAR 영상을 생성한 결과를 보인다. SAR 영상 생성 파라미터는 표 2와 같다.

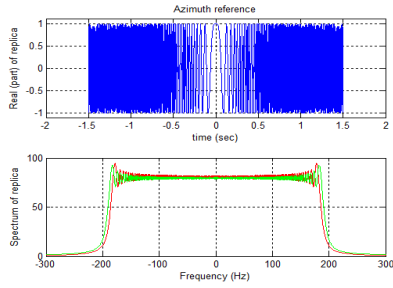
그림 14는 FJB 파형에 대한 방위 기준 신호와 압축 결과이다. 그림 14(a)의 방위 기준 신호의 주파수 특성에서 적색은 1번 부펄스, 녹색은 5번 부펄스에 대한 기준 신호

표 2. FJB 파형의 SAR 영상 생성 시뮬레이션 파라미터  
Table 2. Parameters of SAR simulation for FJB waveform.

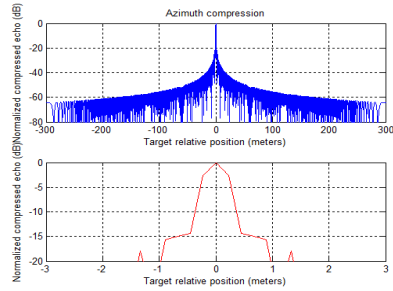
파라미터	값
PRF	900 Hz
플랫폼 속도	200 m/s
안테나 방위 빔폭	1.7 deg
비행 시간(비행 거리)	3초(600 m)
점표적 거리	20 km
중심 주파수	9.5 GHz
LFM 대역폭( $B$ )	300 MHz
FJB 부펄스 개수( $M$ )	5개

이며, 주파수 특성에서 약간의 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 5번 부펄스의 중심 주파수가 높아 파장이 짧기 때문에 1번 부펄스보다 도플러 대역폭이 약간 크게 된다. 그림 14(b)의 방위 압축 결과는 1번 부펄스에 대한 것이다. SAR에서의 방위 분해능은  $\lambda/2\theta_{ac}$  ( $\lambda$  파장,  $\theta_{ac}$  방위 빔폭)이므로 방위 압축 결과는 FJB 파형과 단일 광대역 LFM을 사용할 경우, 모두 약 0.53 m로 거의 동일하다. 나머지 부펄스들의 방위 압축 결과도 거의 동일하다.

그림 15(a)~(e)는 5개 각각의 수신 부펄스 신호에 대하여 개별적으로 점표적에 대한 SAR 영상을 생성한 결과이다. 5개의 결과가 거의 동일한 모습을 보인다. SAR 영상에서의 점표적은 거리 방향(그림의 가로축)으로는 20 km 위치에서 부펄스 대역폭 60 MHz에 해당하는 2.5 m의 분



(a) 방위 기준 신호  
(a) Azimuth reference



(b) 방위 압축 결과  
(b) Azimuth compression

그림 14. FJB 파형의 방위 기준 신호와 압축 결과(각 그림의 위 시간 영역, 아래 주파수 영역)

Fig. 14. Azimuth reference and compression result(time domain and frequency domain).

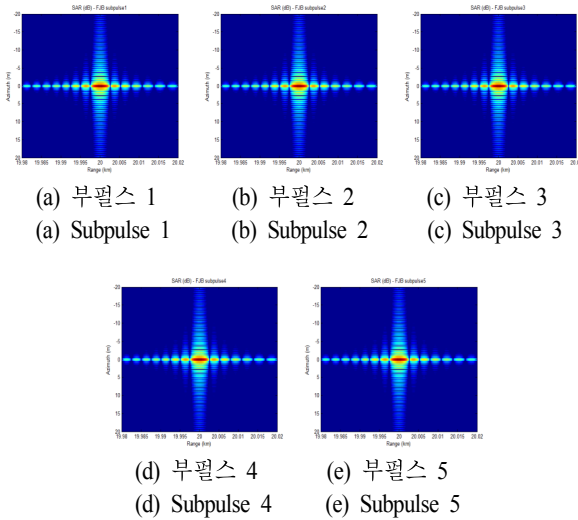


그림 15. FJB 파형의 개별 부펄스에 대한 SAR 영상  
Fig. 15. SAR images of each FJB subpulse.

해능을 갖는 반면, 방위 방향(그림의 세로축)으로는 분해능은 대역폭과 상관없이 이론적인 0.53 m를 보인다.

그림 16은 이 5개의 FJB 부펄스 SAR 영상을 더하여 최종적으로 생성된 SAR 영상이다. 비교를 위하여 그림 17에는 300 MHz 대역폭을 갖는 단일 LFM을 사용하여 동일한 파라미터로 SAR 영상을 생성한 결과를 보였다. 두 그림의 (a)와 (c)는 윈도우를 사용하지 않은 결과이고, (b)와 (d)는 Hamming 윈도우를 사용한 결과이다.

FJB 파형을 사용하여 개선된 방법으로 생성한 SAR 영상은 단일 광대역 LFM을 사용한 결과와 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 거리 분해능과 방위 분해능은 0.5 m 정도로 이론값과 동일하며, 부엽의 특성도 큰 차이가 없는 것을 보인다. 다만 FJB 파형의 경우, 거리 방향으로 2.5 m 간격으로 약간의 큰 부엽이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 10의 펄스압축 결과에서 부펄스 간의 위상의 불연속에 의하여 발생한 부엽의 특성이 SAR 영상에서도 거리 방향으로 그대로 나타난 결과이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 항공기 레이더에서 SAR-GMTI 모드의 파형으로 연구되고 있는 FJB(Frequency Jump Burst) 파형의 특성을 분석하였고, FJB 파형을 사용한 펄스압축과 SAR 영상 생성을 위한 방법들을 검토하여, 실제 그 방법들을 구현하고, 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다.

FJB 파형의 펄스압축 성능은 이론적으로는 LFM 파형의 성능과 동일하나, 실제 구현에 있어서는 적용 방법에 따라 생성되는 결과는 이론보다 저하된 성능을 보일 수 있다. 본 논문에서 제시한 개선된 방법을 적용하면 다소의 오차는 있으나, 펄스압축과 SAR 영상에서 이론적인 결과와 유사한 결과가 생성되는 것을 볼 수 있으며, 실제 항공기 레이더에 적용 가능한 방법이 될 수 있다. 다만 개별 부펄스에 대하여 전체  $M^2$ 번의 펄스압축을 수행하게 되어 단일 LFM이나 부펄스 합성 방법에 비하여 계산량이 증가할 수 있다. 하지만 전체 광대역 신호가 아니라, 각 부펄스의 협대역 신호에 대하여 작은 크기의 FFT를 수행하므로 FFT 측면에서는 계산량이 감소할 수도 있다. 이는 전체 대역폭, 부펄스 대역폭 등의 요소에 좌우되므로 실제

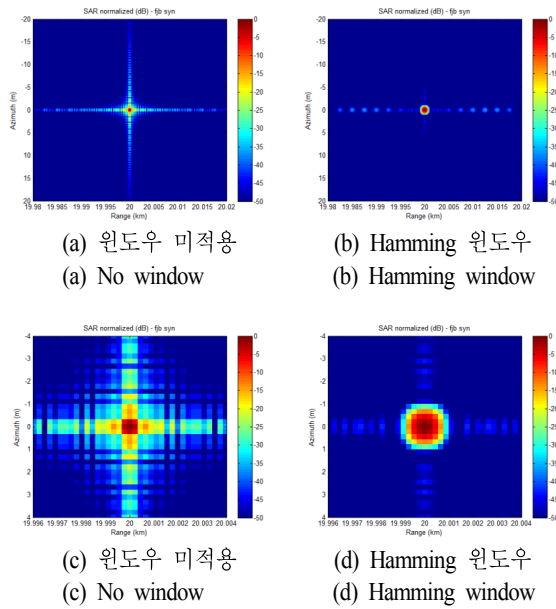


그림 16. FJB 파형에 대한 최종 SAR 영상 생성 결과((c), (d)는 각각 (a), (b)의 확대된 그림)

Fig. 16. Final SAR images of FJB waveform((c), (d): magnifications of (a), (b)).

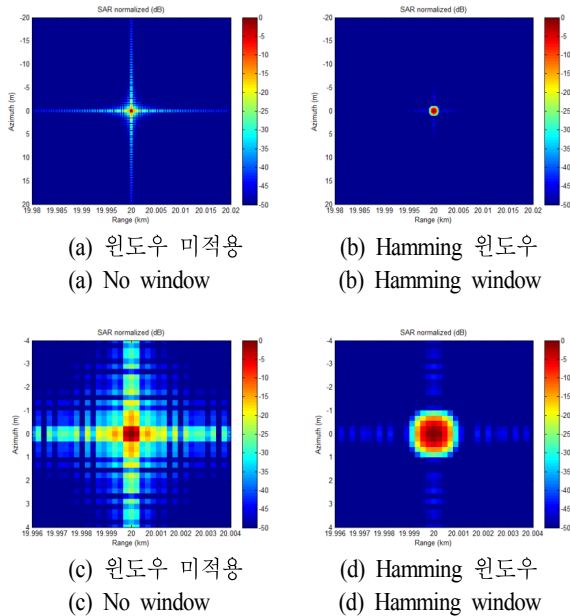


그림 17. LFM(300 MHz) 파형의 SAR 영상 생성 결과((c), (d)는 각각 (a), (b)의 확대된 그림)

Fig. 17. Final SAR images of LFM waveform((c), (d): magnifications of (a), (b)).

시스템에 적용할 시에는 계산량을 줄일 수 있는 방향으로 파라미터를 분석하여 설계에 적용해야 할 것이다.

FJB 파형은 SAR 영상 생성과 GMTI 처리를 동일한 파형으로 수행할 수 있기 때문에 항공기 레이더에서 점점 사용이 확대될 것으로 예상되므로, 본 논문의 결과를 적용하면 FJB 파형을 사용하여 SAR-GMTI 모드의 처리를 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것이다.

## References

- [1] 전주환, "SAR-GMTI 기술의 원리", 한국전자과학회지 전자파기술, 22(6), pp. 68-79, 2011년 11월.
- [2] M. E. Davis, R. M. Kapfer, and R. E. Bozek, "Common waveform for simultaneous SAR and GMTI", *IEEE Radar Conference, 2011.*, pp. 282-287, May 2011.
- [3] V. Murthy, U. Pillai, and M. E. Davis, "Waveforms for simultaneous SAR and GMTI", *IEEE Radar Conference, 2012.*, pp. 51-56, May 2012.
- [4] M. E. Davis, "Quest for a simultaneous SAR/GMTI waveform", *IEEE International Conference on Radar*, pp. 134-139, Sep. 2013.
- [5] K. Li, V. Murthy, F. Uysal, and U. Pillai, "Wideband waveform synthesis using frequency jump burst-type waveforms", Patent no. US 2015/0130660 A1, May 14 2015.
- [6] Byoung-Gyun Lim, Jea-Choon Woo, Hee-Young Lee, and Young-Soo Kim, "A modified subpulse SAR processing procedure based on the range-Doppler algorithm for synthetic wideband waveforms", *Sensors*, vol. 8, no. 12, pp. 8224-8236, 2008.
- [7] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems, 3rd Ed.*, McGraw Hill, New York, 2001.

## 김 은 희



1997년 3월: 한국과학기술원 정밀공학과 (공학석사)  
 2004년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)  
 2013년 8월: LIG넥스원 ISR 연구센터 수석연구원  
 2013년 9월~현재: 세종대학교 국방시스

템공학과 조교수

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 능동위상배열 레이더 시스템

## 박 준 용



2014년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공 전자공학과 (공학사)  
 2016년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2016년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 표적 식별, 전자파 이론 등

## 노 지 은



2002년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)  
 2006년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)  
 2006년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 통제 알

고리즘 등

## 김 수 범



2002년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 2005년 9월: 한국전자통신연구원 이동통신연구단 선임연구원  
 2009년 10월: LIG넥스원 ISR연구센터 책임연구원

2014년 12월: (주)디지털트론 수석연구원

2015년 2월~현재: (주)레드시스 대표이사

[주 관심분야] 레이더/SAR 시스템 설계 및 신호처리