

고속 Chirplet 분리기법을 이용한 VHF 대역 레이더 표적신호 모델링 및 해석

박지훈^{*,1)} · 김시호¹⁾ · 채대영¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

Modeling and Analysis of Radar Target Signatures in the VHF-Band Using Fast Chirplet Decomposition

Ji-hoon Park^{*,1)} · Si-ho Kim¹⁾ · Dae-Young Chae¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency of Defense Development, Korea

(Received 4 April 2019 / Revised 10 May 2019 / Accepted 7 June 2019)

ABSTRACT

Although radar target signatures(RTS), such as range profiles have played an important role for target recognition in the X-band radar, they would be less effective when a target is designed to have low radar cross section(RCS). Recently, a number of research groups have conducted the studies on the RTS in the VHF-band where such targets can be better detected than in the X-band. However, there is a lack of work carried out on the mathematical description of the VHF-band RTS. In this paper, chirplet decomposition is employed for modeling of the VHF-band RTS and its performance is compared with that of existing scattering center model generally used for the X-band. In addition, the discriminative signal analysis is performed by chirplet parameterization of range profiles from in an ISAR image. Because the chirplet decomposition takes long computation time, its fast form is further proposed for enhanced practicality.

Key Words : Radar Target Signature(레이더 표적신호), VHF-Band(초단파 대역), Range Profile(1차원 표적 거리 프로파일), Inverse Synthetic Aperture Radar Image(표적 레이더 영상), Fast Chirplet Decomposition(고속 Chirplet 분리기법)

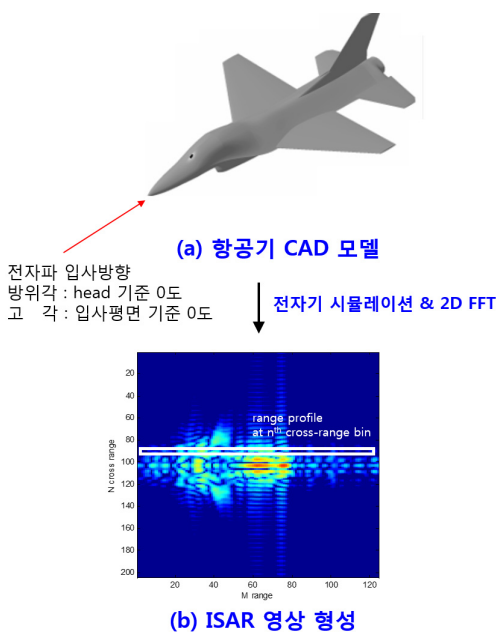
1. 서론

표적의 탐지 및 추적을 위한 X대역 레이더에서 획

득되는 1차원 표적 거리 프로파일(range profile) 및 2차원 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)영상과 같은 레이더 표적신호(Radar Target Signature, RTS)는 레이더 표적인식 분야에서 중요한 표적정보 제공 수단으로 활용되어 왔다^[1]. 그러나 최근 발전된 레이더 단면적(Radar Cross Section, RCS) 감소기술이 적용된 표적

* Corresponding author, E-mail: dydynoel@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

의 경우 X대역에서는 위와 같은 레이더 표적인식 수단을 효과적으로 활용하기 어렵게 된다. 이에 최근에는 저 RCS 표적에 대한 탐지 가능성이 높은 것으로 알려진 VHF대역(30 MHz ~ 300 MHz)에서의 레이더 시스템 및 표적신호에 관한 연구도 수행되고 있다^[2-4]. 그러나 VHF대역에서의 레이더 표적신호를 효과적으로 분석하기 위한 수학적 모델에 대한 연구사례는 매우 찾아보기 어렵다. 레이더 표적신호가 주로 연구되던 X대역에서는 고주파 산란점(scattering center)모델이 주로 활용되어 왔으나, VHF대역에서는 전자파 파장이 X대역에 비해 10배 가량 길어 상대적으로 직진성이 약하므로 X대역과는 다른 모델로 표적신호를 기술해야 함을 예측할 수 있다.



고주파 산란점 (HF SC) 모델

$$s_n(r) = \sum_k A_k h_k(r - r_k)$$

$$h_k(r) = \exp\left(j \frac{4\pi f_c}{c} r\right) \left(\frac{BW_{kr}}{\pi}\right) \text{sinc}\left(\frac{BW_{kr}}{\pi} r\right)$$

chirplet 모델 : 식 (1), (2)

$$s_n(r) = \sum_k A_k g_k(r)$$

$$g_k(r) = \frac{1}{\sqrt[4]{2\pi\sigma_k^2}} \exp\left[-\left(\frac{r-r_k}{2\sigma_k}\right)^2\right] \times \exp\left[j\left(2\pi f_k(r-r_k) + \frac{\beta_k}{2}(r-r_k)^2\right)\right]$$

(c) ISAR 영상을 구성하는 1차원 range profile 모델링

Fig. 1. Overall RTS modeling process

본 논문에서는 고속 chirplet 분리기법을 제안하여 VHF대역 표적신호를 모델링하고 해석한다. chirplet은 chirp 형태의 기저함수로서, 다양한 레이더 표적신호 해석에 활용된 바 있다^[5-7]. chirplet 모델은 기존의 산란점 모델에 비해 다양한 매개변수로 신호를 기술하므로 보다 효과적으로 VHF 표적신호를 모델링할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 최적화 기법으로 chirplet 매개변수를 추정하는 과정에서 많은 계산시간이 소요되어 실용성이 떨어진다^[8]. 본 논문에서는 근사적 최대 우도법(Approximate Maximum Likelihood Estimation, AMLE)^[9]으로 chirplet 매개변수의 초기 값을 결정하고, 커브피팅 해석 식(analytic equation) 기반 매개변수 추정기법(Curve Fitting Refinement, CFR)^[10]으로 최종 매개변수를 도출하는 방식으로 신호로부터의 고속 chirplet 분리가 가능하도록 하였다. Fig. 1에는 본 논문에서 수행할 VHF 표적신호 모델링 및 해석의 개념도를 나타내었다. 먼저 항공기 표적 모델에 대한 VHF대역 전자기 시뮬레이션을 수행하여(a) 2차원 표적 ISAR영상을 형성한 후(b), 이를 구성하는 각각의 1차원 거리 프로필에 고주파 산란점 모델 및 chirplet 모델을 적용하여(c) 모델링 성능 및 계산시간 등을 비교한다. 또한 ISAR영상을 구성하는 모든 거리 프로필 각각으로부터 chirplet 매개변수 특성 별로 신호성분을 분리하는 분별적 분석(discriminative analysis)을 통해 VHF 표적신호를 직관적으로 해석한다.

2. 고속 chirplet 분리기법

2.1 chirplet 분리기법 개요

Chirplet 분리기법으로 거리 r 에 따른 표적의 거리 프로필 $s(r)$ 을 K 개 chirplet의 가중합으로 표현한다.

$$s(r) = \sum_{k=1}^K A_k g_k(r) \tag{1}$$

여기서 $g_k(r)$, A_k 는 k 번째 chirplet 및 해당 가중치이다. chirplet은 chirp신호의 조각으로서 다음과 같다.

$$g_k(r) = \frac{1}{\sqrt[4]{2\pi\sigma_k^2}} e^{-\left(\frac{r-r_k}{2\sigma_k}\right)^2} e^{j\left[2\pi f_k(r-r_k) + \frac{\beta_k}{2}(r-r_k)^2\right]} \tag{2}$$

$$= g_{r_k, f_k, \sigma_k, \beta_k}(r)$$

식 (2)에서 chirplet은 거리(range) 중심 r_k , 거리 주파수 (range spatial frequency) f_k , 길이(duration) σ_k , 거리 주파수 변화율(chirp rate) β_k 등 4개의 매개변수로 구성되어 있다. chirplet 분리 시, $s(r)$ 로부터 반복적으로 $s_{k+1}(r) = s_k(r) - A_k g_k(r)$ 와 같이 수행하며, A_k 는 k 회차 $s_k(r)$ 와 $g_k(r)$ 간 내적 $\langle s_k(r), g_k(r) \rangle$ 으로 산출한다. chirplet 매개변수는 다음과 같은 4변수 정합추적 (matching pursuit)을 최적화 기법으로 추정한다.

$$[r_k, f_k, \sigma_k, \beta_k] = \arg \max_{g_k} |\langle s_k(r), g_k(r) \rangle|^2 \quad (3)$$

2.2 chirplet의 특성

Fig. 2에는 길이 σ_k 와 주파수 변화율 β_k 에 따른 chirplet의 1차원 실수, 허수부 파형 및 2차원 거리-거리 주파수 파형을 나타내었다. Fig. 2(a)와 2(b)는 σ_k 가 짧고 β_k 가 작고 클 때의 파형이다. 주파수 변화율에 따라 2차원 파형의 기울기가 달라지나, 신호의 존재 구간이 짧으므로 sinc 형태의 고주파 산란점 모델과 유사하다. Fig. 2(c)와 2(d)는 σ_k 가 길고 β_k 가 작고 클 때의 파형이다. 이들은 짧은 구간에 존재하는 고주파 산란점 모델로는 표현할 수 없는 신호의 특성을 표현하고 있으며, 주파수 변화율에 따른 파형도 상이하다. 이렇게 chirplet은 고주파 산란점 모델에 없는 매개변수를 이용하여 신호를 모델링할 수 있다.

2.3 커브피팅 해석식 기반 매개변수 추정(CFR)

식 (3)의 최적화 기반 4변수 추정은 많은 계산시간이 소요되어 레이더 표적신호의 모델링에 적용하기에 실용성이 떨어지므로, 여기서는 최적화 기법 대신 해석적 수식으로 초기 값에서 매개변수 추정이 가능한 CFR(Curve Fitting Refinement)^[10]을 이용한다. CFR의 절차는 다음과 같다.

1) $s_k(r)$ 로부터 추정할 매개변수 $(r_k, f_k, \sigma_k, \beta_k)$ 의 초기 값 세트 $(r_{k,n}, f_{k,m}, \sigma_{k,0}, \beta_{k,0})$ 를 정한다. 이 때 $n = 0, 1$ 이고 $m = 0, 1, 2$ 이며, $(n, m) = (0, 0)$ 인 초기 값 세트에서 $r_{k,n} = r_{k,0} + n\Delta r$ 및 $f_{k,m} = f_{k,0} + (m-1)\Delta f$ 로 총 6개의 인접 세트(기준점)를 만든다. 이 때 Δr 및 Δf 은 거리 및 거리 주파수 방향 미소 값이며, 다차원 최적화를 해석식 문제로 변환하기 위해 후술할 커브피팅 관계함수 값의 변화가 단조증가 혹은 단조

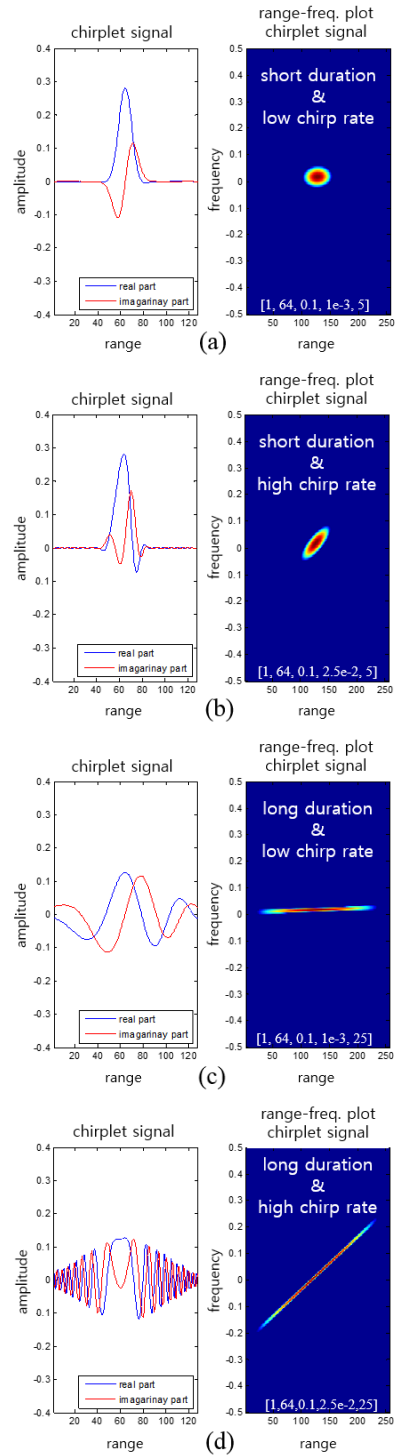


Fig. 2. Chirplet 1D/2D waveform with different durations and chirp rates

감소가 되도록 부여되어야 한다. 본 논문에서는 Δr 를 거리 전체길이(124)의 0.1 %로, Δf 를 정규화 된 거리 주파수 범위(-1~+1)의 1 %로 부여하였으며, 이들의 중심 값에 관련하여 부여해도 무방하다.

2) 매개변수의 초기 값 세트를 이용하여 다음과 같은 수식으로 연립방정식을 구성한다.

$$p(r_k, f_k, \sigma_k, \beta_k; r_{k,n}, f_{k,m}, \sigma_{k,0}, \beta_{k,0}) = |\langle s_k(r), g_{r_{k,n}, f_{k,m}, \sigma_{k,0}, \beta_{k,0}}(r) \rangle| \quad (4)$$

식 (4)에서 함수 p 는 4차원 커브피팅 이론에서 정의된 매개변수의 초기 값 및 최종 값 간 관계함수이다.

3) 식 (4)로 표현되는 6개의 연립 방정식을 이용하여 $s_k(r)$ 로부터 최종 $(r_k, f_k, \sigma_k, \beta_k)$ 값을 구한다.

chirplet 매개변수가 초기 값으로부터 위와 같이 커브피팅 해석식에 의해 도출될 수 있다는 가정은 오로지 초기 값이 $(r_k, f_k, \sigma_k, \beta_k)$ 와 매우 근접하게 주어지면 성립할 수 있다. 즉 고속 chirplet 분리를 위한 CFR을 위해서는 초기 값의 정확도가 매우 중요하다.

2.4 근사적 최대 우도법(AMLE)에 의한 초기 값

CFR을 효과적으로 적용하기 위해 본 논문에서는 AMLE를 이용하여 chirplet 매개변수의 초기값을 구한다. AMLE이란 식 (3)을 4변수 문제로 한꺼번에 풀지 않고, 여러 개의 1~2변수 문제로 쪼개서 순차적으로 푸는 방식이다. 주요절차는 다음과 같다^[9].

1) 주파수 변화율 초기 값 $\beta_{k,0}$ 의 전역(global) 추정

k 회 차 $s_k(r)$ 에 β 의 chirp을 부여한 신호의 주파수 응답을 구하고, 주파수 범위 첨두치(peak)가 강화된 4 제곱 전력(power)이 최대가 되는 $\beta_{k,0}$ 를 정한다.

$$\beta_{k,0} = \arg \max_{\beta} \int \left| \int s_k(r) e^{-j\beta t^2/2} e^{-j\omega r} dr \right|^4 d\omega \quad (5)$$

2) 길이 초기 값 $\sigma_{k,0}$ 의 전역(global) 추정

$\beta_{k,0}$ 가 결정되면, $s_k(r)$ 에 $\beta_{k,0}$ 의 chirp을 부여한 신호 $x_k(r) = s_k(r) \exp(-j\beta_{k,0} t^2/2)$ 의 자기상관도 r_x 를 구하고, σ 에 의해서만 결정되는 chirplet $g_{0,0,\sigma,0}(r)$ 과의 최대 유사도(내적)를 도출하는 σ 를 구한다.

$$\sigma_{k,0} = \arg \max_{\sigma} \langle |r_x|^2, g_{0,0,\sigma,0}(r) \rangle \quad (6)$$

3) 거리 및 거리주파수 중심 초기 값 $r_{k,0}, f_{k,0}$ 추정
거리 및 거리 주파수 중심의 초기 값은 다음과 같이 2차원 스펙트로그램(spectrogram)에서 구한다.

$$[r_{k,0}, f_{k,0}] = \arg \max_{r,f} SP_k(r,f; g_{r,f,\sigma_{k,0},\beta_{k,0}}(r)) \quad (7)$$

식 (7)에서 $SP_k(r,f;g)$ 는 $s_k(r)$ 에 윈도우 g 로 짧은 시간 푸리에 변환(short-time fourier transform)을 계산한 스펙트로그램이다.

4) 초기 값 $\beta_{k,0}$ 및 $\sigma_{k,0}$ 의 국부(local) 추정

k 회 차 거리 프로필 $s_k(r)$ 에서 chirplet 거리 중심의 초기 값 $r_{k,0}$ 을 3)에서 구하면, 이를 중심으로 거리 프로필을 일정 부분 잘라내어 샘플 개수를 줄인 $\tilde{s}_k(r)$ 에 식 (5)를 다시 적용하여 국부적으로 추정된 주파수 변화율 초기값 $\beta_{k,0}$ 을 구할 수 있다. 또한 앞서 추정된 $r_{k,0}, f_{k,0}$ 와 $\beta_{k,0}$ 를 이용하여 4변수 식 (3)을 1변수 탐색 식으로 다음과 같이 구성함으로써 국부적으로 추정된 chirplet 길이의 초기값 $\sigma_{k,0}$ 을 구할 수 있다.

$$\sigma_{k,0} = \arg \max_{\sigma} |\langle s_k(r), g_{r_{k,0}, f_{k,0}, \sigma, \beta_{k,0}}(r) \rangle|^2 \quad (8)$$

5) AMLE에 의한 초기 값의 정확도를 높이기 위해 1) 및 2)의 전역 추정과정 후 3) 및 4)의 과정을 수 회 반복하며, 이 반복횟수는 신호의 길이 및 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서 사용할 신호의 경우 환경 잡음이 포함되지 않은 전자기 시뮬레이션 해석결과이고 국부적인 신호에 대해서만 매개변수를 산출하고 있으므로 대부분 1~2회, 전체적으로는 3회 이내에 고정된 값으로 수렴한다. 본 논문에서는 일괄적으로 3회 반복하여 수행하였다. 전체 신호 길이를 N , 국부 신호 길이를 $M(\ll N)$ 이라 할 때, 3) 및 4) 과정에 필요한 연산은 $O(NM \log M)$ 및 $O(M^2 \log M)$ 으로서 국부신호의 매개변수 추정 연산량이 크지 않다.

3. 1차원 거리 프로필에 대한 모델링 및 성능비교

Fig. 1과 같이 항공기 CAD 모델에 전자기 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 대상은 X대역에서 전면 -20 dBsm 이하의 낮은 RCS 특성을 갖도록 설계된 임의의

항공기 CAD 모델로서, Fig. 1에는 과제 수행 특성상 개념적인 항공기 모델로 대체되었다. 중심 주파수는 225 MHz, 대역폭은 150 MHz으로서 거리 해상도가 1 m가 되도록 하였다. 이와 같은 중심주파수 및 대역폭은 통상적인 VHF 레이더 시스템에서 구현되는 것에 비해 매우 광대역인 조건으로서, VHF 대역에서의 유효한 거리 프로필을 획득하고 이에 대한 제시된 기법의 세부 모델링 형상을 관측하기 위해 본 논문에서 의도적으로 설정된 값이다. 최근에는 X대역보다 이동 표적 탐지 및 수풀(foliage) 투과 특성이 좋은 초광대역(ultra-wideband) VHF/UHF 합성 개구면 레이더에 대한 연구가 수행된 바 있다^[3,4].

방위각은 항공기의 앞부분을 기준으로 -25° 에서 $+25^\circ$ 까지(1° 간격), 고각은 0° 로 고정하였다. 이렇게 획득된 2차원 RCS 데이터에 2차원 푸리에 변환 및 4배 오버 샘플링을 적용하여 Fig. 3과 같은 VHF대역 표적 ISAR영상을 형성하였다. 해당 영상은 가로(거리) 방향 1차원 거리 프로필의 집합이며, 광각에 따른 보정은 프로필 값 보증을 위해 별도로 수행하지 않았다.

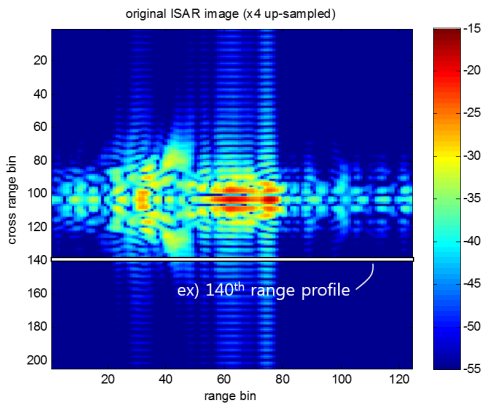


Fig. 3. ISAR image consisting of range profiles

다음으로 Fig. 3의 ISAR영상을 구성하는 204개의 1차원 거리 프로필을 고주파 산란점 및 chirplet을 이용하여 모델링한다. 고주파 산란점 모델을 이용한 거리 프로필은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(r) = \sum_{k=1}^K C_k e^{j\frac{4\pi}{\lambda}(r-r_k)} (\Delta f/\pi) \text{sinc}(\Delta f(r-r_k)/\pi) \quad (9)$$

위 식에서 r_k , C_k 는 k 번째 산란점이 존재하는 거리 중심 및 가중치이고 λ , Δf 는 중심주파수 파장과 대

역폭이다. chirplet 모델의 경우 본 논문에서 제시한 고속 분리기법과 함께 최적화 기반의 기존 분리기법도 적용하여 식 (9)의 고주파 산란점 모델과 함께 모델링 성능 및 계산시간 측면에서 비교한다. Fig. 4에는 ISAR영상을 구성하는 204개 거리 프로필을 모델링한 결과와 원 프로필 간의 상관계수를 모델 별 모델링 성능으로서 나타내었다. 이 때 모델링 과정에서는 20개의 산란점 및 chirplet이 사용되었다.

Fig. 4으로부터 chirplet 모델이 고주파 산란점 모델보다 VHF 표적신호를 정확하게 모델링한다는 것을 확인할 수 있다. 특히 산란점 모델이 거리 프로필에 따른 모델링 성능 편차가 큰 반면, chirplet 모델은 모든 거리 프로필에 대해 안정적인 성능을 보인다. Table 1에는 거리 프로필 모델링에 적용된 각각의 모델에 대한 상관계수의 평균 및 실질적인 항공기 폭에 해당하는 60~140번째 교차거리 셀(cross-range cell)에 해당하는 거리 프로필에 대해서만 계산된 상관계수 평균, 그리고 계산시간 평균을 나타내었다.

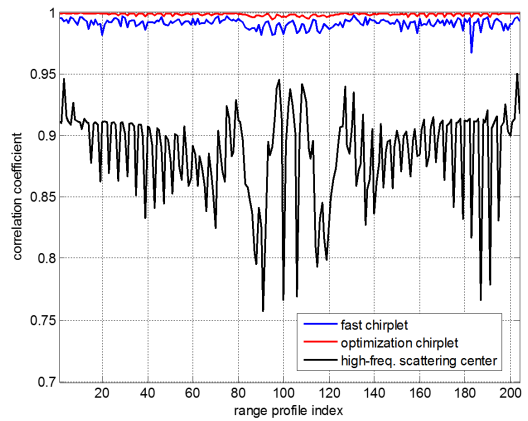


Fig. 4. Range profile modeling performance of different modeling methods

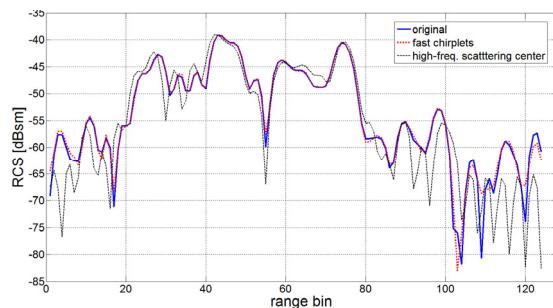
Table 1의 정보로부터 고주파 산란점과 chirplet 모델 간의 모델링 성능차이를 정량적으로 확인할 수 있다. 두 가지 chirplet 분리기법에 따른 모델링 결과를 보면, 본 논문에서 제안된 고속분리에 의한 chirplet 모델은 최적화 기반의 chirplet 모델에 비해 다소 모델링 성능이 낮으나 0.99 이상의 높은 상관도로 VHF 표적신호를 모델링할 수 있다. 무엇보다 모델링을 위한 계산시간이 약 1/100로 감소한다. Fig. 3의 ISAR영상을 구성하는 204개의 거리 프로필을 모델링하기 위해서

는 고속 분리기법으로는 2분 이내로 가능하나, 최적화 기반 기법으로는 3시간 이상 소요된다.

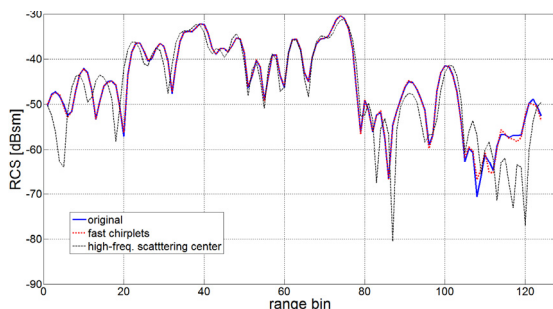
Table 1. Mean correlation coefficient and mean computation time of each modeling method

	고주파 산란점 모델	최적화 기반 chirplet 모델	고속 chirplet 모델
상관계수	0.8863	0.9984	0.9912
상관계수 (60~140 th)	0.8744	0.9980	0.9904
계산시간	1 ms	57 s	0.5 s

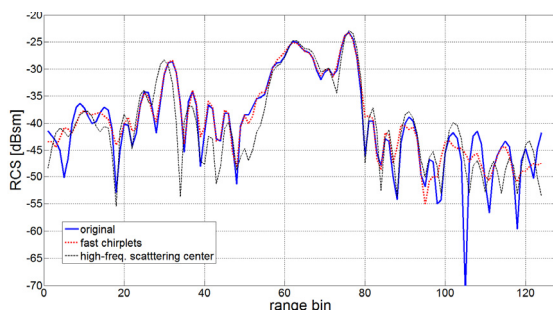
Fig. 5에는 70번째, 92번째, 101번째, 113번째 교차 거리 셀에서의 거리 프로파일(original)을 고속 분리에 의한 chirplet 모델링 결과(좌) 및 고주파 산란점 모델링 결과(우)를 비교하였다. Fig. 5(a) 좌측의 원 신호와 chirplet 모델링 결과에서는 -60 dBsm 미만의 낮은 신호 부분을 제외하고 일치도가 높음을 알 수 있다. 반면 우측의 산란점 모델링 비교결과에서는 거리 셀 (range bin) 70~80 부근에서는 일치도가 높으나, 나머지 부분에서 거리 위상 천이가 발생하여 일치도가 저하된다. 원 신호와의 상관계수는 각각 0.995, 0.825가 산출되었다. Fig. 5(b)에서도 상관계수 0.992인 chirplet 모델링 결과와는 달리 산란점 모델링 결과는 일부 위상 천이로 상관계수가 0.822에 그친다. Fig. 5(c) 및 Fig. 5(d)의 경우 원신호와 chirplet 모델링 결과와의 상관계수는 각각 0.989, 0.994이며 ISAR영상에서 주요 산란 부분을 구성하는 거리 셀에서의 일치도가 우수하다. 반면 산란점 모델링 결과와의 상관계수는 각각 0.893, 0.895로서 거리 셀 60~80 부근의 일치도가 높아 90 %에 근접한 상관계수가 산출되지만, 세부적인 일치도가 떨어지고, 그 외 셀에서는 위상 천이가 발생한다. 이렇게 산란점 모델링 결과의 일부 거리 셀에서 위상 천이가 발생하는 것은 VHF 표적신호를 구성하는 성분 중 긴 거리구간(duration)에 걸쳐 존재하는 성분이 있음을 의미한다. 특히 산란점의 개수를 기존의 20개에서 200개 혹은 2000개로 크게 늘려서 모델링을 수행해도 Fig. 5에서 관측된 거리 위상 천이에 의한 불일치 현상은 보정되지 않는다. 즉, 짧은 거리구간에 대해서만 존재하는 고주파 산란점 모델로는 VHF 표적신호를 모델링하는데 한계가 있는 것을 알 수 있다.



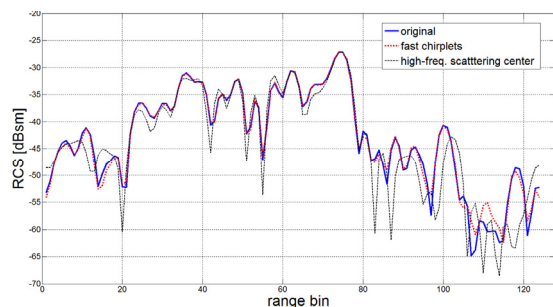
(a) Modeling of 70th range profile



(b) Modeling of 92th range profile



(c) Modeling of 101th range profile



(d) Modeling of 113th range profile

Fig. 5. Modeling of range profiles using proposed chirplet model and scattering center model

4. 2차원 ISAR영상에서 chirplet 신호성분 별 분석

2차원 ISAR영상에서 chirplet 성분 별로 분별 분석을 수행하기 위해, Fig. 3의 표적 VHF ISAR영상을 구성하는 각각의 거리 프로필을 chirplet 모델로 표현한 뒤, 산출된 매개변수의 특성에 따른 성분을 이용하여 선택적으로 복원하고, 이를 2차원으로 재합성하여 영상을 만든다. 2절 및 Fig. 2에서 확인한 바와 같이, 거리 중심 r_k 와 거리 주파수 f_k 는 chirplet이 존재하는 초기 위치(bias)에 관련된 값이고, 주로 길이 σ_k 와 거리 주파수 변화율 β_k 에 의해 chirplet 별 특징의 변별력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 매개변수 선택은 길이 및 주파수 변화율의 통계적 분포에 따라 경험적으로 다음과 같이 정하였다.

$$\sigma_k = \begin{cases} \sigma_{long}, & \sigma_k \geq \mu_1 - 0.75\epsilon_1 \\ \sigma_{short}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_k = \begin{cases} \beta_{fast}, & \beta_k \geq \mu_2 - 0.15\epsilon_2 \\ \beta_{slow}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

식 (10)은 chirplet 길이의 길고 짧음을 정하는 기준이며, μ_1 과 ϵ_1 은 산출된 모든 chirplet 매개변수 길이의 평균 및 표준편차이다. 식 (11)은 주파수 변화율의 빠르고 느림을 정하는 기준이며, μ_2 과 ϵ_2 은 전체 주파수 변화율의 평균 및 표준편차이다.

Fig. 6에는 ISAR영상의 모든 거리 프로필을 chirplet 모델로 나타낸 후, 모든 매개변수를 취하여 복원한 ISAR영상으로서 Fig. 3의 원 영상과의 상관계수는 0.99이다. 또한 항공기 모델의 구조와 대조하여 산란현상의 원인을 표시하였으며, 크게 항공기 전면(front part) 및 고정익(wing), 후면(tail part)에 의한 산란 신호로 구성된다. 그 외에도 항공기 동체(fuselage)로부터의 부엽(sidelobe)패턴이 관측되며, 항공기 외의 거리 범위에서 잔여신호(residual signal) 성분이 존재한다.

Fig. 7에는 영상의 모든 거리 프로필에서 식 (10)에 의해 chirplet 길이가 짧은(좌) 성분 및, 긴(우) 성분으로 각각 분리하여 합성한 영상을 나타내었다. 이로부터 고주파 산란점과 유사한 짧은 chirplet 성분은 표적의 주요 산란현상을 나타냄을 알 수 있으며, 표적영역 외의 잔여신호는 긴 chirplet 성분으로 표현됨을 알 수 있다. 표적 주변의 부엽패턴은 항공기 표적의 엔진 흡입구(inlet)에 해당되는 거리에서 일부 미약한 신호성

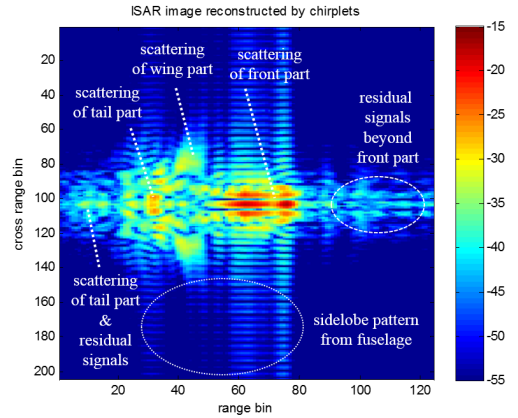
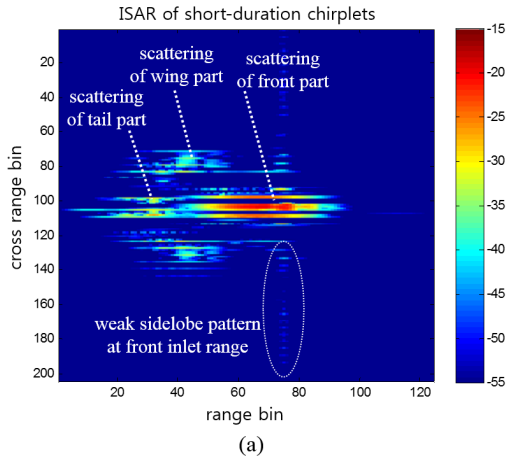
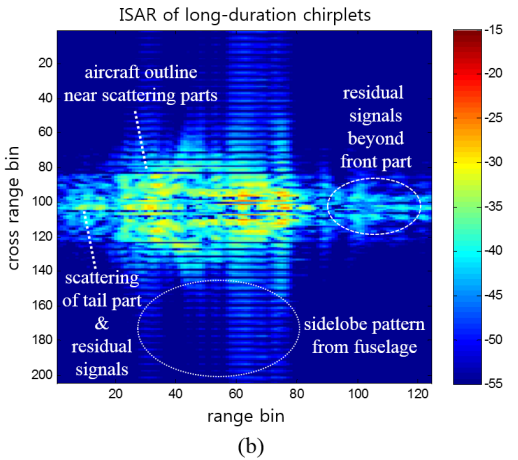


Fig. 6. ISAR image reconstructed by chirplets



(a)



(b)

Fig. 7. ISAR images selectively reconstructed by durations ((a) : short chirplets, (b) : long chirplets)

분이 짧은 chirplet에 의해 표현되나, 대부분 긴 chirplet 성분에서 기인한다. 신호성분 별 에너지를 살펴보면, 짧은 chirplet 성분의 에너지는 전체 신호 에너지의 22%를 차지하고, 나머지 78%를 긴 chirplet 성분의 에너지가 차지하므로 VHF대역 표적신호에서는 긴 chirplet의 비중이 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에는 짧은 chirplet으로 구성된 영상에서 다시 주파수 변화율이 빠른(좌) 성분과 느린(우) 성분으로 분리하여 신호성분 별 산란현상을 나타내었다. 이로부터 항공기 전면의 강한 산란은 고주파 산란점 특성과 매우 유사하고, 후면 산란은 보다 주파수 변화율이 큰 성분에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

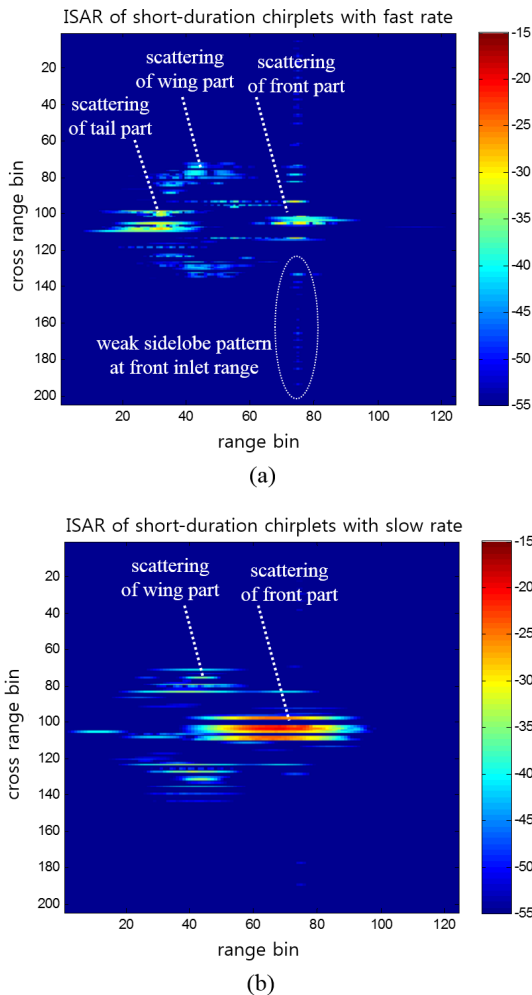


Fig. 8. ISAR images reconstructed by chirp rate((a) : short/fast chirplets, (b) : short/slow chirplets)

Fig. 9에는 긴 chirplet으로 구성된 영상에서 주파수 변화율이 빠른 성분과 느린 성분으로 분리하여 신호 성분 별 산란현상을 나타냈다. 특기할 사항은 X대역과 같은 고주파 표적 ISAR영상에서 관측이 어려운 잔여신호 성분이 전면 및 후면에서 모두 길이가 길고 주파수 변화율이 빠른 chirplet으로 기술된다는 점이다. 이는 앞서 언급한 고주파 산란점 모델로는 기술이 불가능한 특성이다. 또한 표적 외곽의 신호 및 부엽 패턴은 길이가 길고 주파수 변화율이 느린 chirplet으로 표현된다. 이러한 chirplet 매개변수에 따른 신호성분의 분별분석을 통해 표적 VHF ISAR영상은 여러 종류의 신호성분으로 구성되어 있음을 예측할 수 있다.

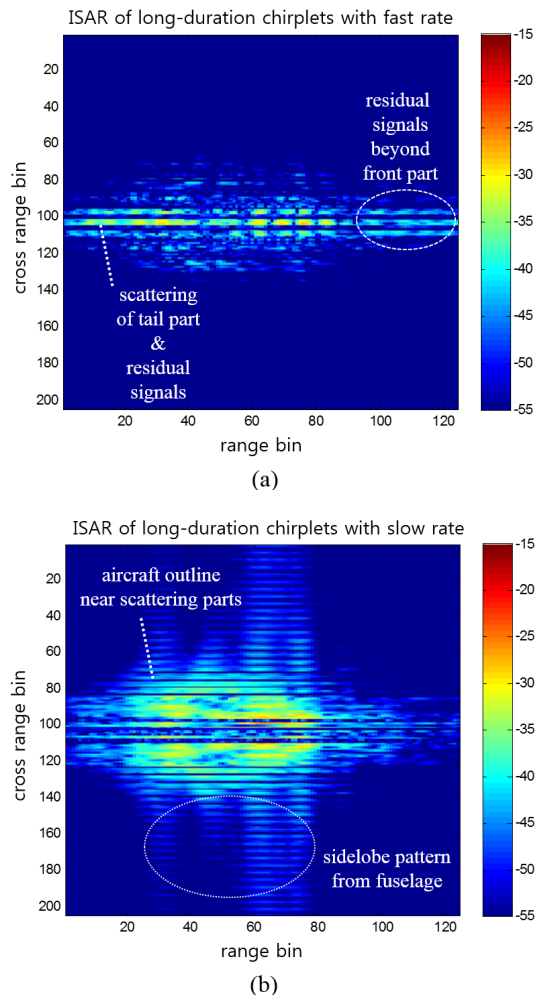


Fig. 9. ISAR images reconstructed by chirp rate((a) : long/fast chirplets, (b) : long/slow chirplets)

5. 결론

본 논문에서는 근사적 최대우도법에 의한 초기 값으로부터 커브피팅 해석식으로 최종 매개변수를 추정하는 고속 chirplet 분리기법을 제안하였으며, 이를 VHF 대역에서 해석된 표적신호의 모델링 및 신호성분에 따른 분별적인 분석에 적용하였다. VHF대역 표적 ISAR영상을 구성하는 거리 프로필을 모델링한 결과, 고주파 대역에서 주로 사용되는 산란점 모델에 비해 본 논문에서 채택된 chirplet 모델의 모델링 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 특히 제안된 고속 chirplet 분리기법으로 chirplet 매개변수 추정의 정확도를 크게 저하시키지 않으면서 계산시간을 획기적으로 줄임으로써 레이더 표적신호 모델링으로의 적용 가능성을 높였다. 또한 VHF대역 2차원 표적 ISAR영상에 대해 chirplet 성분의 특성에 따른 분별적인 분석을 수행함으로써 VHF 표적신호 특성에 대한 직관력을 제공하였다. 향후에는 보다 일반적인 협대역 VHF 레이더 표적신호 및 실측신호에 대해 본 논문에서 제시된 기법을 적용하여 VHF대역 표적신호 특성을 보다 심도 있게 해석할 계획이다.

References

- [1] P. Tait, "Introduction to Radar Target Recognition," The Institution of Engineering and Technology, London United Kingdom, pp. 105-181, 2005.
- [2] K. Zikidis, A. Skondras and C. Tokas, "Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies," Journal of Computations and Modelling, Vol. 4, No. 1, pp. 129-165, 2014.
- [3] L. M. H. Ulander, et. al., "Development of the Ultra-Wideband LORA SAR Operating in the VHF/UHF-Band," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003.
- [4] L. M. H. Ulander, et. al., "Bistatic Experiment with Ultra-Wideband VHF-Band Synthetic Aperture Radar," 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2008.
- [5] J. Li and H. Ling, "Application of Adaptive Chirplet Representation for ISAR Feature Extraction from Targets with Rotating Parts," IEE Proc. Radar Sonar Navig., Vol. 150, No. 4, pp. 284-291, 2003.
- [6] F. Millioz and M. Davies, "Sparse Detection in the Chirplet Transform: Application to FMCW Radar Signals," IEEE Trans. Signal. Process., Vol. 60, No. 6, pp. 2800-2813, 2012.
- [7] O. Yeste-Ojeda, J. Grajal and G. Lopez-Risueno, "Atomic Decomposition for Radar Applications," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 44, No. 1, pp. 187-200, 2008.
- [8] A. Bultan, "A Four-Parameter Atomic Decomposition of Chirplets," IEEE Trans. Signal. Process., Vol. 47, No. 3, pp. 731-745, 1999.
- [9] J. C. O'Neill, P. Flandrin and W. C. Carl, "Sparse Representation with Chirplets via Maximum Likelihood Estimation," 2000. Paper available at <http://tfd.sourceforge.net/Papers/chirp.pdf>.
- [10] Q. Yin, S. Qian and F. Aigang, "A Fast Refinement for Adaptive Gaussian Chirplet Decomposition," IEEE Trans. Signal Process., Vol. 50, No. 6, pp. 1298-1306, 2002.