

이동 표적에 의한 도플러 신호의 시간-주파수 분석

Time-Frequency Analysis of the Doppler Signals by Moving Targets

손 중 탁*
Son, Joong-Tak

이 승 훈**
Lee, Seung-Houn

박 길 흠***
Park, Kil-Houm

ABSTRACT

Instantaneous frequency of doppler signals is used to get the information of the relative velocity and the miss distance between a missile and a corresponding target. In this paper, we have performed time-frequency analysis and instantaneous frequency estimation with Short Time Fourier Transform(STFT), Wigner Ville Distribution(WVD) and Continuous Wavelet Transform(CWT) about the doppler signals generated by moving targets. Performance evaluation was performed using simulated doppler signals generated by a single moving target and two moving targets. From the results of the time-frequency analysis, we found that WVD method was the most efficient instantaneous frequency estimator among the three methods. But in case of two moving targets, WVD method got cross talks and CWT method got oscillation when two doppler frequencies were close to each other.

주제기술용어(주제어) : Instantaneous Frequency(순간 주파수), Doppler Signal(도플러 신호), Short Time Fourier Transform(단구간 푸리에 변환), Wigner Ville Distribution(위그너 빌 분포함수), Continuous Wavelet Transform(연속 웨이블릿 변환)

1. 서론

C. Doppler가 발견한 도플러 효과^[1,2]는 현재 광범위한 분야에서 널리 사용되고 있으며, 특히 2차 세계 대전 이후에는 항해, 미사일, 위성 추적, 레이더 등 군사적인 목적에 많이 응용되고 있다^[3,4]. 도플러 효과는 관측자(탄) 혹은 표적의 이동에 의해 전파가 송,

수신되는 과정에서 발생하는 주파수 천이를 의미한다. 안테나를 통하여 표적을 향해 전파를 송신하면 이 전파는 표적에 반사되어 안테나로 되돌아오는데, 이때 송신 신호와 수신 신호를 혼합하면 도플러 효과에 의한 도플러 신호가 나타난다. 도플러 신호의 순간 주파수는 관측자와 표적간의 상대속도(relative velocity)와 이격거리(miss distance) 등에 따라 결정되므로 획득한 도플러 신호를 시간-주파수 평면에서 분석하면 이러한 정보들을 얻을 수 있다.

시간-주파수 분석(time-frequency analysis)은 시간-주파수 평면상에 신호의 에너지 국부성을 나타내는 것으로 단구간 푸리에 변환(STFT : Short Time Fourier Transform), 위그너 빌 분포함수(WVD :

† 2005년 3월 21일 접수~2005년 6월 7일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 쓰리비 시스템(3B System Inc.)

*** 경북대학교(KNU)

주저자 이메일 : sjt7718@add.re.kr

Wigner Ville Distribution), 연속 웨이브릿 변환(CWT : Continuous Wavelet Transform) 등 여러 변환^[5]이 이용되고 있다.

STFT는 분석하고자 하는 신호에 창 함수(window function)를 적용한 후 푸리에 변환을 수행하는 방법으로, 이 방법은 시간 및 주파수의 영역에서 고정된 크기의 창을 가지므로 적용되는 창 함수의 크기가 작을 경우 좋은 시간 분해능을 얻을 수 있지만 나쁜 주파수 분해능이 얻어진다. 반대의 경우로 좋은 주파수 분해능을 얻기 위해서는 시간 분해능이 나빠짐을 역시 알 수 있다.

WVD는 시간에 따른 전력 스펙트럼(power spectrum)으로 분석하고자 하는 신호를 자기상관(auto correlation)한 후 이를 푸리에 변환한 것이다. 그러나 WVD는 이중선형 변환(bilinear transform)이기 때문에 여러 주파수 성분이 결합되어 있는 신호의 경우 혼신성분(cross talk)을 발생시킨다.

CWT는 분석하고자 하는 신호와 웨이브릿(wavelet)과의 내적(inner product)을 취하여 시간-스케일(주파수) 평면상에 신호의 에너지 국부성을 나타낸 것이다. CWT에 사용되는 웨이브릿들은 모 웨이브릿(mother wavelet)의 스케일링(scaling) 및 천이(translation)로 이루어진다. 웨이브릿은 스케일 변수에 비례하여 시간축을 따라 인장되는 특성을 가지므로 웨이브릿의 크기는 스케일에 비례하며, 주파수와는 반비례함을 알 수 있다. 즉, 웨이브릿 변환은 주파수에 반비례하는 창 함수의 크기를 갖는 스펙트로그램(spectrogram)으로 이해될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 군사 목적에 많이 응용되고 있는 도플러 신호에 대해 STFT, WVD, CWT 등의 3가지 방법에 기반한 시간-주파수 분석을 하고 또한 시간-주파수 분석으로부터 시간에 따른 순간 주파수를 추정하였다.

본 논문은 서론에 이어 2장에서 도플러 신호에 대한 이론적 고찰을 수행하였다. 3장에서 시간-주파수 분석 기법인 STFT, WVD 및 CWT에 관해 기술하였고, 4장에서 도플러 신호 시뮬레이션 및 시간-주파수 분석 결과에 대한 기술하였고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 도플러 신호

탄의 안테나를 통하여 움직이는 표적을 향해 전파를 송신하면 이 전파는 표적에 반사되어 안테나로 되 돌아오는데, 이때 수신된 신호와 송신 신호를 혼합하면 도플러 효과에 의해 도플러 신호가 나타난다. 도플러 효과는 파원(wave source)이 움직이면 움직이는 방향으로는 전파가 압축되고 반대 방향으로는 전파가 퍼지게 되는 현상을 의미하며 움직이는 표적에 의해 전파가 송, 수신되는 과정에서 수신 신호의 주파수가 식 (1)과 같이 천이되는 현상을 말한다.

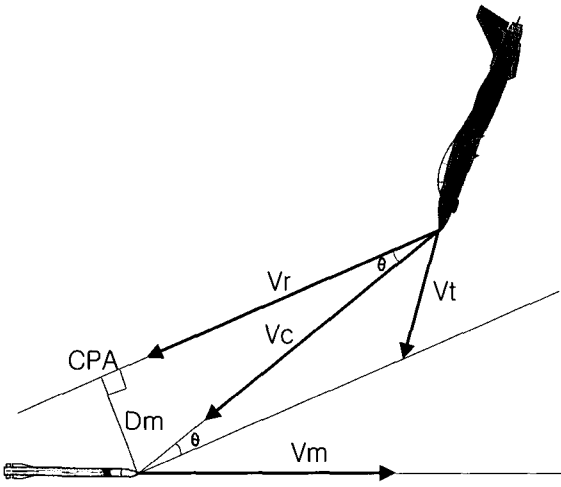
$$f_r = f_t \cdot \frac{C \pm \vec{V}_r}{C \mp \vec{V}_t} \tag{1}$$

여기서, f_t 와 f_r 은 각각 송신 및 수신 주파수를 의미하며, C 는 광속(3×10^8 m/s), \vec{V}_r 은 안테나와 표적간의 상대속도 벡터, \pm 는 안테나와 표적간의 방향을 나타낸다. 따라서 표적이 안테나 쪽으로 움직인다면 도플러 주파수 f_d 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f_d &= f_r - f_t = f_t \cdot \frac{2\vec{V}_r/C}{1 - \vec{V}_r/C} \\ &\equiv 2f_t \cdot \frac{\vec{V}_r}{C} \quad (C \gg V_r) \\ &= \frac{2V_r \cdot \cos\theta}{\lambda} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, λ 는 송신 주파수의 파장, θ 는 안테나와 표적간의 가시광선(line of sight)과 상대속도 벡터 사이의 각을 의미한다.

그림 1은 탄과 표적간의 조우의 한 예를 나타낸 것이다. 여기서 V_m 은 탄 속도, V_t 는 표적속도, V_r 은 상대속도, V_c 는 접근속도, D_m 은 이격거리이다. 상대속도 V_r 은 탄과 표적간의 속도에 의해 결정되며, 식 (2)의 도플러 주파수로부터 유도될 수 있다. 접근속도 V_c 는 상대속도의 $\cos\theta$ 성분으로 탄과 표적간의 가시선상의 속도이다. 이 접근속도는 탄과 표적과의 거리가 먼 경우에는 상대속도와 같지만 서로 근접할 경우



[그림 1] 탄과 표적과의 조우 계략도(예)

는 점차 줄어들면서 최근접점(CPA : closest point of approach)에 도착하면 0이 된다. 따라서 도플러 주파수를 탄과 표적과의 조우상태에 따라 분석하면 상대속도, 접근속도 및 이격거리 등의 파라미터 값을 구해 낼 수 있다.

3. 시간-주파수 분석

가. 단구간 푸리에 변환(STFT)

푸리에 변환은 분석하고자 하는 신호와 무한 주기를 가지는 정현파 기저함수의 내적을 통해 수행된다. 그러므로 신호가 정상(stationary) 신호일 경우 푸리에 변환을 통해 신호를 쉽게 해석할 수 있으나 신호가 비정상(non-stationary) 신호인 경우 주파수 성분은 전 주파수 대역에 나타나게 되어 푸리에 변환을 이용한 시간에 따른 신호 해석은 어렵게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Gabor는 일정한 크기의 창을 움직이면서 푸리에 변환을 수행^[6]하는 즉, 국부 주파수(local frequency)를 고려한 식 (3)과 같은 STFT를 제안하였다.

$$STFT(t, w) = \int s(\tau) \cdot g(\tau - t) \cdot e^{-jw\tau} \cdot d\tau \quad (3)$$

분석하고자 하는 신호가 이산적인 경우 식 (3)은

식 (4)로 표현^[5]된다.

$$STFT[k, n] = \sum_{i=0}^{L-1} s[i] \cdot g[i - k] \cdot W_L^{-ni} \quad (4)$$

여기서, $s[i]$ 는 분석하고자 하는 신호, $g[i - k]$ 는 창 함수, W_L 은 $\exp(j2\pi/L)$, t 는 $k \cdot \Delta t$, w 는 $2\pi n / (L \cdot \Delta t)$, Δt 는 샘플링 시간, L 은 창 함수의 샘플링 개수이다.

STFT에서 시간 영역의 해상도 Δt 와 주파수 영역의 해상도 Δw 는 uncertainty inequality($\Delta t \cdot \Delta w \geq 1/2$)를 만족해야 하는 제약이 따른다. STFT는 시간 및 주파수의 모든 영역에서 동일한 창을 가지는 특징을 가지며, 창의 크기에 따라 시간 및 주파수 영역에서의 해상도가 결정된다. 시간-주파수 평면에서 신호의 에너지를 나타내는 스펙트로그램은 STFT의 제곱으로 정의된다.

나. 위그너 빌 분포 함수(WVD)

Wigner가 Wigner Distribution^[7]을 제안한 이후 Ville이 처음으로 신호 분석에 적용^[8]한 이후 WVD는 음향학, 광학, 영상 처리, 양자역학 등 여러 분야에 적용되어 왔다. 정상 신호의 자기 상관함수는 시간지연만의 함수로 표현되는 반면에 비정상 신호의 자기 상관함수는 식 (5)와 같이 시간지연 뿐만 아니라 절대시간의 함수로 표현이 가능하다.

$$r(t, \tau) = s(t + \tau/2) \cdot s^*(t - \tau/2) \quad (5)$$

여기서, t , τ 는 각각 절대시간과 시간지연을 나타내며, $s(t)$ 는 신호, 위첨자 *는 공액 복소수를 나타낸다.

WVD는 식 (6)과 같이 시간종속 자기상관 함수(time dependent auto correlation function)의 시간지연에 대한 푸리에 변환으로 정의되며, 이산적인 신호에 대해서는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$WVD(t, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t + \tau/2) \cdot s^*(t - \tau/2) \cdot e^{-jw\tau} \cdot d\tau \quad (6)$$

$$WVD[m\Delta t, k\Delta w] = 2\Delta t \sum_{n=0}^{2L-1} s[(m+n)\Delta t] \cdot s^*[(m-n)\Delta t] \cdot e^{-j2\pi nk/2L} \quad (7)$$

여기서 Δt 는 샘플링 시간, Δw 는 $\pi/(2L\Delta t)$ 이다.

WVD는 창 함수를 사용하지 않는 장점이 있으며 또한 스펙트로그램에 비해 고해상도를 얻을 수 있다. 하지만 여러 주파수 성분이 결합된 신호의 경우 성분들 사이의 상호 작용에 의한 혼신성분(cross talk)을 발생시킨다. WVD에서 혼신성분의 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 WVD의 스무딩(smoothing) 방법이 있으나, 스무딩에 의해 혼신성분의 감소를 가져올 수는 있지만 신호의 시간과 주파수 분해능은 떨어지게 된다.

다. 연속 웨이브릿 변환(CWT)

웨이브릿 변환은 1984년 Grossman과 Morlet에 의해 처음 소개^[9]되었으며, 1988년 Daubechies가 dyadic 웨이브릿^[10]을 발견한 이후 영상 신호처리, 음성 신호처리, 데이터 압축, 부대역 부호화(subband coding) 등 여러 분야에 다양하게 적용되고 있다.

CWT는 식 (8)과 같이 분석하고자 하는 신호와 웨이브릿 함수와의 내적으로 정의된다.

$$CWT = \langle s(t), \psi(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi(t) dt \quad (8)$$

여기서, $\psi(t)$ 는 모 웨이브릿(mother wavelet)이다.

CWT에 적용되는 기저함수는 식 (9)와 같이 모 웨이브릿의 스케일(a)과 천이(b)로 이루어진다. 만약에 $\psi(t)$ 가 $t=0$ 에 중심이 있고 주파수가 w_0 로 가정하면 스케일 및 천이된 $\psi(\frac{t-b}{a})$ 의 중심은 $t=b$ 이며 주파수는 w_0/a 가 된다. 즉, $s(t)$ 와 $\psi(\frac{t-b}{a})$ 의 내적인 $CWT(a, b)$ 는 시간-주파수 평면으로 보면 $(b, w_0/a)$ 가 되므로 $CWT(a, b)$ 는 식 (10)과 같이 시간과 주파수의 함수로 생각 할 수 있다.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (9)$$

$$CWT(a, b) |_{a=w_0/w, b=t} = T \cdot F(w_0/w, t) \quad (10)$$

CWT는 고정된 창을 사용하는 STFT와는 달리 높은 주파수 영역에서는 스케일 계수의 수치를 작게 하여 좁은 창을, 낮은 주파수 영역에서는 스케일 계수의 수치를 크게 하여 넓은 창을 변화하여 사용하므로 시간에 따른 주파수의 변화가 큰 신호들에 대해서 뛰어난 순간 주파수 추정 능력을 보인다.

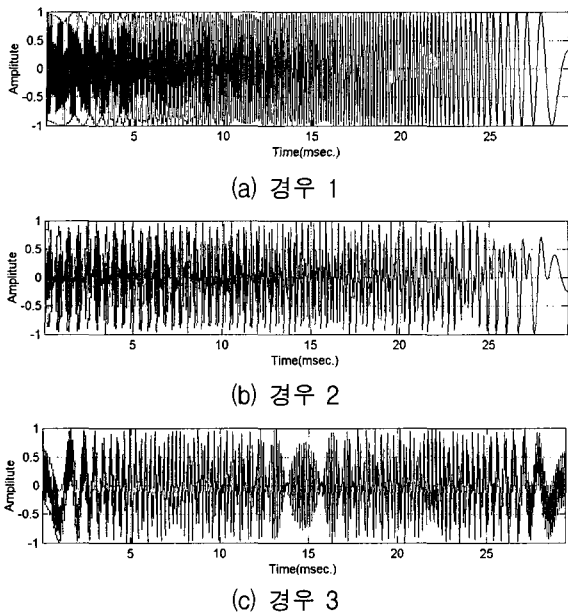
4. 실험 및 결과 분석

가. 도플러 신호의 획득

본 논문에서는 표적의 이동에 의해 나타나는 도플러 신호의 시간-주파수 분석을 위해 다음의 3가지 경우에 대해서 시뮬레이션을 통해 도플러 신호를 발생시켰다. 이때 표적의 속도는 유도탄의 속도와 유사한 170m/s 및 340m/s로 설정하였다.

- (1) 경우 1 : 1개의 표적이 일정한 속도와 이격거리로 관측자(안테나) 쪽으로 접근하는 경우
- (2) 경우 2 : 2개의 표적이 동일한 속도를 가지면서 서로 다른 이격거리로 관측자 쪽으로 동시에 접근하는 경우
- (3) 경우 3 : 동일한 속도와 이격거리로 1개의 표적은 관측자 쪽으로 접근하고 나머지 1개의 표적은 관측자에서 멀어지는 경우

그림 2는 위 3가지 각각의 경우에 대해서 식 (2)를 사용하여 획득한 도플러 신호이다. 그림 2(a)는 이격거리를 3m로 하고 표적이 안테나로부터 5m 떨어진 거리에서 속도를 170m/s로 하여 안테나 쪽으로 접근한다고 가정하였을 때 획득한 도플러 신호를 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 2개의 표적이 각각 170m/s의 일정한 속도를 가지면서 1개의 표적은 이격거리가 2m, 다른 1개의 표적은 이격거리가 4m로 하여 안테나 쪽으로 동시에 접근하는 경우의 도플러 신호를 나타낸 것이며, 그림 2(c)는 2개의 표적이 각각 170m/s의 동



[그림 2] 시뮬레이션에 의해 획득된 도플러 신호

일한 속도와 이격거리를 3m로 하여 1개의 표적은 안테나 쪽으로 접근하고 나머지 1개의 표적은 안테나에서 멀어지는 경우의 도플러 신호를 나타낸 것이다. 이때 도플러 모듈의 송신 주파수는 10.26GHz, 도플러 신호의 샘플링 주파수는 50kHz, 진폭은 최대값 1로 정규화 하였다.

나. 결과 분석

1) 분석 방법

STFT를 기반으로 한 도플러 신호의 시간-주파수 분석에서는 식 (11)의 Hanning 함수를 적용하여 시간-주파수를 분석하였다. 본 논문에서는 Hamming 함수, Blackman 함수 등의 다른 창 함수를 적용해 보았는데, 그 결과 창 함수에 따른 시간-주파수 분석 결과는 거의 유사함을 알 수 있었다. 시간에 따른 순간 주파수 추정을 위해서는 스펙트로그램으로부터 시간에 따른 최대값^[11]을 적용하였다. 적용한 창 함수의 길이(L)는 64로 하였다.

$$g(n) = 0.5(1 - \cos(\frac{2\pi n}{L-1})) \tag{11}$$

여기서, $0 \leq n < L-1$ 이다.

WVD에 기반한 도플러 신호의 시간-주파수 분석에서는 먼저 도플러 신호를 힐버트 변환(Hilbert Transform)을 하여 해석 신호(analytical signal)로 변환한 후 시간-주파수 분석을 하였다. 도플러 신호를 해석 신호로 변환한 이유는 실제 신호(real signal)를 그대로 사용할 경우 음의 주파수 성분으로 말미암아 발생하는 상호 간섭을 배제시키기 위함이다. 시간에 따른 순간 주파수 추정을 위해서는 단일 표적일 경우는 STFT 방법과 마찬가지로 시간에 따른 최대값을 적용하였으며, 2개의 표적일 경우는 2개의 도플러 신호 사이의 상호 작용에 의한 혼신성분으로 인해 임계값(threshold value)을 적용하였다.

CWT에 기반한 도플러 신호의 시간-스케일(주파수) 분석에서는 스케일 적용 방법이 중요하다. 즉, 스케일의 개수가 많을 경우 많은 연산시간이 소요되며, 반대로 스케일의 개수가 적을 경우 신호의 특성을 적절하게 표현할 수 없게 된다. 따라서 CWT에 기반한 신호의 시간-스케일(주파수) 분석에서는 신호의 특성을 최대한 표현하는 스케일의 샘플링 방법들이 다양하게 연구^[12]되고 있다.

본 논문에서 적용한 CWT에 기반한 도플러 신호의 시간-스케일(주파수) 분석은 식 (12)와 같은 Gabor 웨이브릿을 사용하였으며, 모 웨이브릿의 중심 스펙트럼을 1에 위치하도록 하였다.

$$\psi(t) = \frac{1}{(\sigma^2\pi)^{1/4}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{j2\pi f_0 t} \tag{12}$$

여기서, σ 는 Gabor 웨이브릿의 형상 계수로서 웨이브릿의 크기를 조정하며, f_0 는 모 웨이브릿의 고유 주파수이다. 웨이브릿의 스케일(a)은 식 (13)과 같이 세분 이산화 하는 기법을 적용하여 웨이브릿 모듈러스(modulus)를 구하였다.

$$a = 2^{-j\alpha}, \alpha^* = -\log_2(a_{\min}/a_{\max})/k \tag{13}$$

$$a_{\max} = n \times \Delta t, a_{\min} = 2 \times \Delta t$$

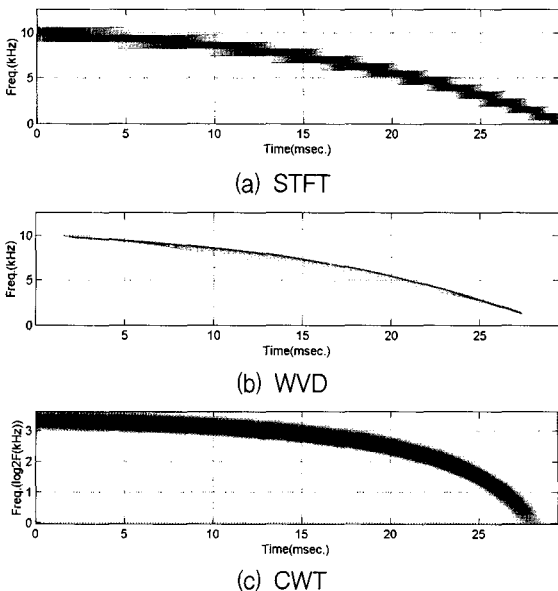
여기서, $j = 1, 2, 3, \dots, k$ 는 스케일 축으로의 샘플

플링 수, n 은 신호의 샘플링 수, Δt 는 샘플링 시간이다. 시간에 따른 순간 주파수 추정을 위해서는 STFT 방법과 마찬가지로 시간에 따른 최대값을 적용하였다. 스케일 축을 주파수 축으로의 변환은 $f = a^{-1}$ 을 이용하였으며, y축은 스케일을 세분 이산화(식 (13) 참조)하여 분석하였기 때문에 $\log_2(f)$ 로 나타내었다.

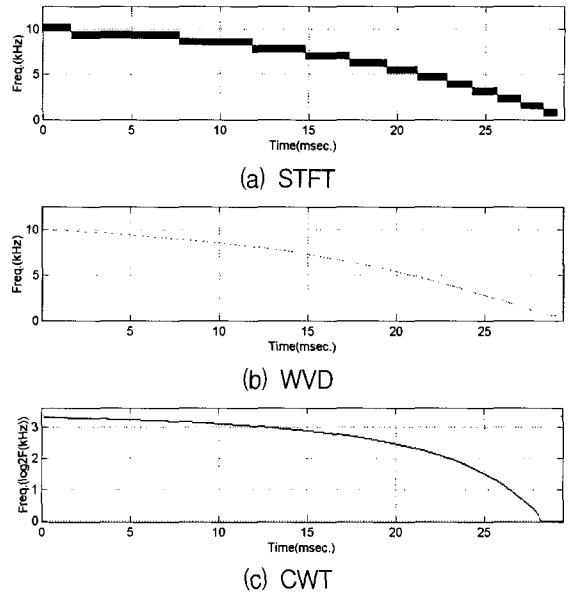
2) 결과 분석

그림 3은 “경우 1”에 해당되는 것으로서 이격거리를 3m로 하여 표적이 안테나로부터 5m 떨어진 거리에서 속도를 170m/s로 하여 안테나 쪽으로 접근하는 경우를 가정하여 획득한 도플러 신호에 대해 각각 STFT, WVD, CWT를 기반으로 한 시간-주파수 분석 결과이다. 여기서 그림 3(a), 3(b)의 y축은 선형 스케일이며, 그림 3(c)의 y축은 log 스케일이다. 그림 3(c)의 CWT 방법에서는 식 (13)과 같이 스케일을 세분 이산화 하였기 때문에 효율적으로 나타내기 위함이다.

그림 4는 그림 3의 시간-주파수 분석 결과로부터 시간에 따른 계수의 최대값을 적용하여 나타낸 순간 주파수 추정 결과이며, 표 1은 그림 4의 결과로부터



[그림 3] “경우 1”의 시간-주파수 분석 결과



[그림 4] “경우 1”의 순간 주파수 추정

[표 1] 순간 주파수 비교($V=170\text{m/s}$, $d_m=3\text{m}$)

시간 [ms]	실제 주파수 [kHz]	STFT [kHz]	WVD [kHz]	CWT [kHz]
5	9.4	9.4(0)	9.4(0)	9.5(+0.1)
10	8.6	8.6(0)	8.6(0)	8.6(0)
15	7.4	7.5(+0.1)	7.3(-0.1)	7.3(-0.1)
20	5.5	5.4(-0.1)	5.4(-0.1)	5.5(0)
25	2.8	3.3(+0.5)	2.8(0)	2.9(+0.1)

시간대별로 순간 주파수를 추정한 결과를 실제 주파수와 비교한 표이다. 이때 각각의 괄호안의 값은 실제 주파수와 추정한 순간 주파수와의 오차(Δf)를 나타낸다. 표 1에서 보면 STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 실제 주파수와의 오차의 최대치(Δf_{\max})가 +0.5kHz, -0.1kHz로 나타났고, WVD에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{\max})가 0kHz, -0.1kHz로 나타났으며, CWT에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{\max})가 +0.1kHz, -0.1kHz로 나타났다.

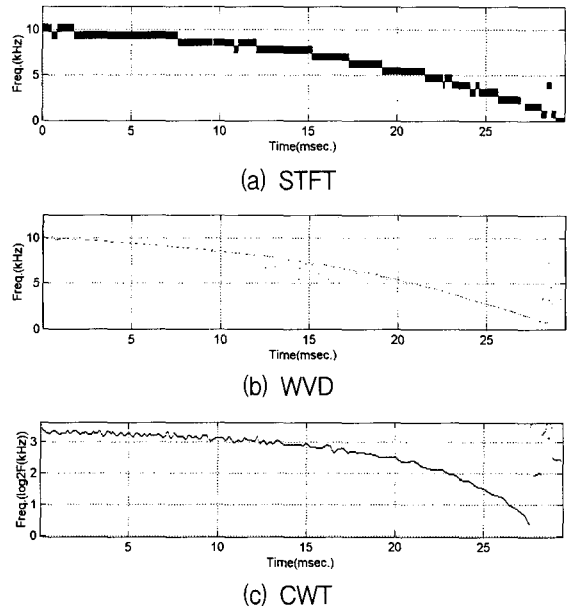
위와 동일한 조건에서 표적 속도를 340m/s로 접근

할 경우를 가정하여 획득한 도플러 신호에 대해 각각 STFT, WVD, CWT를 기반으로 하여 시간대별로 순간 주파수를 추정한 결과를 보면 STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 실제 주파수와의 오차의 최대치 (Δf_{max})가 +1.6kHz, -0.3kHz로 나타났고, WVD에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.1kHz, -0.2kHz로 나타났으며, CWT에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.4kHz, -0.2kHz로 나타났다.

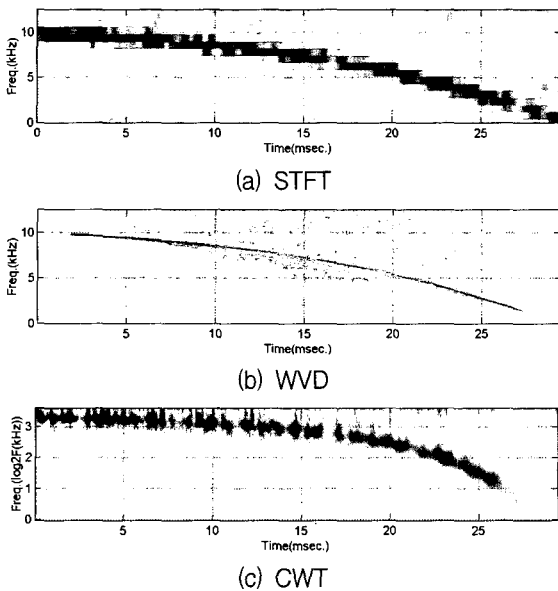
그림 5와 그림 6은 각각 이격 거리가 3m, 표적의 속도가 170m/s일 때 획득한 도플러 신호(그림 2(a))에 신호대잡음비(SNR)가 0dB가 되도록 백색 가우시안 잡음을 첨가한 후 잡음이 첨가된 도플러 신호에 대해 시간-주파수를 분석한 결과와 시간에 따른 순간 주파수를 추정한 결과이다. 본 논문에서는 SNR이 10dB, 5dB, 0dB인 도플러 신호에 대해서 각각 분석을 하였는데, 분석결과 3가지 방법 모두 잡음이 없는 도플러 신호에 대한 분석 결과와 거의 동일(표 1 참조)함을 확인하였다. 그러나 CWT를 기반으로 하는 순간 주파수의 추정(그림 6(c) 참조)은 잡음의 영향으로 약간의 발진현상이 발생함을 알 수 있으며 순간 주파수 추정을 위해서는 curve fitting 등의 방법이

요구됨을 알 수 있다.

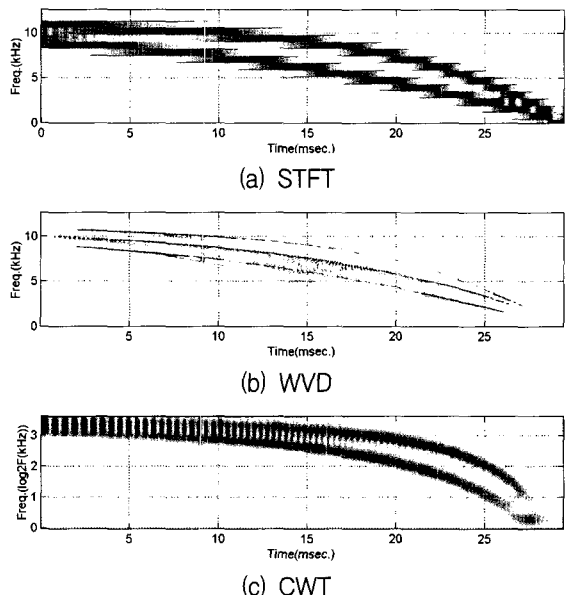
그림 7은 “경우 2”에 해당되는 것으로서 2개의 표적이 각각 170m/s의 동일한 속도를 가지면서 1개의



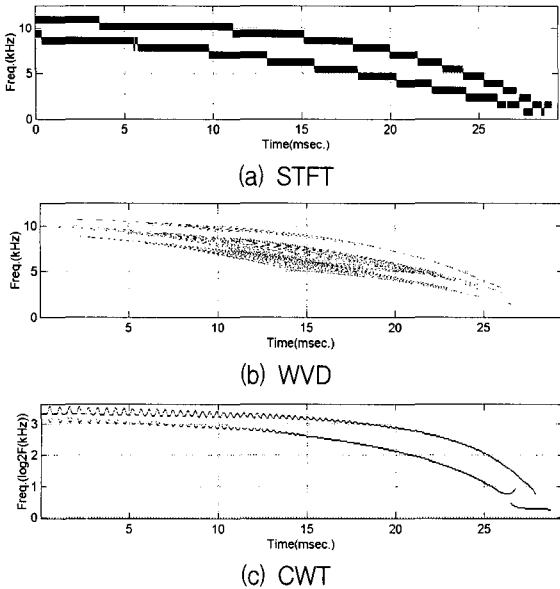
[그림 6] 잡음이 첨가된 도플러 신호의 순간 주파수 추정



[그림 5] 잡음이 첨가된 도플러 신호의 시간-주파수 분석 결과



[그림 7] “경우 2”의 시간-주파수 분석 결과



[그림 8] “경우 2”의 순간 주파수 추정

[표 2] 순간 주파수 비교($V=170\text{m/s}$, $d_m=2, 4\text{m}$)

시간 [ms]	실제 주파수 [kHz]	STFT [kHz]	WVD [kHz]	CWT [kHz]
5	10.5/ 8.4	10.2(-0.3)/ 8.6(+0.2)	10.5(0)/ 8.4(0)	10.2(-0.3)/ 8.3(-0.1)
10	10.0/ 7.4	10.2(+0.2)/ 7.0(-0.4)	9.9(-0.1)/ 7.4(0)	9.7(-0.3)/ 7.4(0)
15	9.0/ 6.1	9.4(+0.4)/ 6.2(+0.1)	8.9(-0.1)/ 6.0(-0.1)	9.0(0)/ 6.0(-0.1)
20	7.3/ 4.3	7.5(+0.2)/ 4.7(+0.4)	7.2(-0.1)/ 4.3(0)	7.4(+0.1)/ 4.3(0)
25	4.1/ 2.2	4.7(+0.6)/ 2.4(+0.2)	4.1(0)/ 2.1(-0.1)	4.1(0)/ 2.2(0)

표적은 이격거리가 2m, 다른 1개의 표적은 이격거리가 4m로 하여 안테나 쪽으로 동시에 접근하는 경우의 도플러 신호를 각각 STFT, WVD, CWT를 기반으로 하여 시간-주파수 분석을 한 결과이다. 그림 8은 그림 7의 시간-주파수 분석 결과로부터 시간에 따른 계수의 최대값 혹은 임계값 이상을 적용하여 나타

낸 순간 주파수 추정 결과이다. 그림 7(b)의 WVD에 기반한 시간-주파수 분석 결과를 보면 2개의 도플러 신호 사이의 상호작용에 의한 혼신성분이 나타남을 알 수 있다. 그림 8(c)의 CWT에 기반한 순간 주파수 추정에서는 2개의 주파수가 인접할 경우에 순간 주파수는 발진현상이 발생함을 알 수 있으며 2개의 주파수가 가까워질수록 발진현상이 심해짐을 알 수 있다.

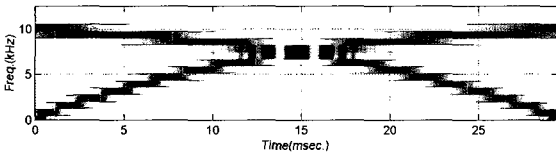
표 2는 그림 8의 결과로부터 시간대별로 2개의 순간 주파수를 추정한 결과를 실제 주파수와 비교한 표이며, 괄호안의 값은 실제 주파수와 추정한 순간 주파수와의 오차(Δf)를 나타낸다. 표 2에서 보면 STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 실제 주파수와의 오차의 최대치(Δf_{\max})가 +0.6kHz, -0.3kHz로 나타났고, WVD에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{\max})가 0kHz, -0.1kHz로 나타났으며, CWT에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{\max})가 0kHz, -0.3kHz로 나타났다.

위와 동일한 조건에서 표적의 속도를 340m/s로 가정하여 획득한 도플러 신호에 대해 각각 STFT, WVD, CWT를 기반으로 하여 시간대별로 순간 주파수를 추정한 결과를 보면 STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 실제 주파수와의 오차의 최대치(Δf_{\max})가 +2.3kHz, -0.3kHz로 나타났고, WVD에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{\max})가 +0.4kHz, -0.4kHz로 나타났으며, CWT에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{\max})가 +1.1kHz, -0.5kHz로 나타났다.

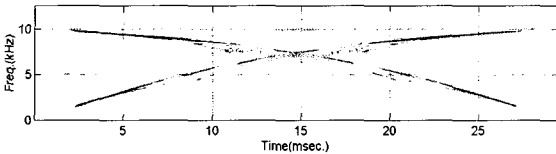
그림 9는 “경우 3”에 해당되는 것으로서 2개의 표적이 각각 170m/s의 동일한 속도와 이격거리를 3m로 하여 1개의 표적은 안테나 쪽으로 접근하고 나머지 1개의 표적은 안테나에서부터 멀어지는 경우의 도플러 신호를 각각 STFT, WVD, CWT를 기반으로 하여 시간-주파수 분석을 한 결과이며, 그림 10은 그림 9의 시간-주파수 분석 결과로부터 시간에 따른 계수의 최대값 혹은 임계값 이상을 적용하여 나타낸 순간 주파수 추정 결과이다. 그림 9(b)의 WVD에 기반한 시간-주파수 분석 결과를 보면 “경우 2”와 마찬가지로 2개의 도플러 신호 사이의 상호작용에 의한 혼신성분이 나타남을 알 수 있다. 그림 10(c)의 CWT

에 기반한 순간 주파수 추정에서도 2개의 주파수가 인접할 경우 순간 주파수는 발진현상이 발생함을 알 수 있다.

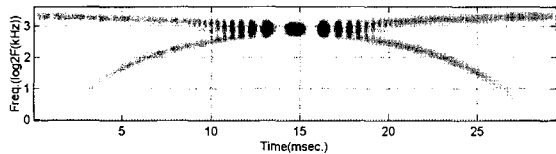
표 3은 그림 10의 결과로부터 시간대별로 2개의



(a) STFT

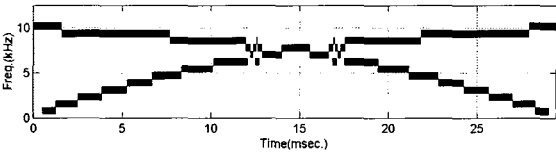


(b) WVD

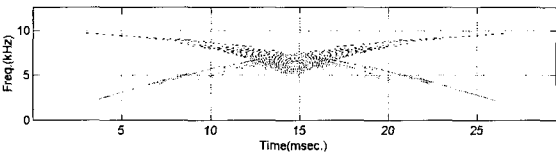


(c) CWT

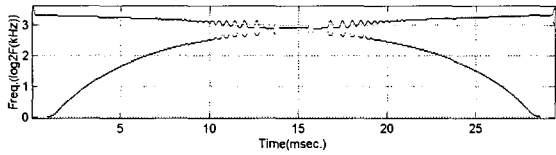
[그림 9] “경우 3”의 시간-주파수 분석 결과



(a) STFT



(b) WVD



(c) CWT

[그림 10] “경우 3”의 순간 주파수 추정

순간 주파수를 추정한 결과를 실제 주파수와 비교한 표이며, 괄호안의 값은 실제 주파수와 추정한 순간 주파수와의 오차(Δf)를 나타낸다.

표 3에서 보면 STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 실제 주파수와의 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.6kHz, -0.2kHz으로 나타났고, WVD에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.2kHz, -0.1kHz로 나타났으며, CWT에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.2kHz, -0.1kHz로 나타났다.

동일한 조건에서 표적의 속도를 340m/s로 가정하여 획득한 도플러 신호를 각각 STFT, WVD, CWT를 기반으로 하여 시간대별로 순간 주파수를 추정한 결과를 보면 STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 실제 주파수와의 오차의 최대치(Δf_{max})가 +2.0kHz, -0.5kHz으로 나타났고, WVD에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.1kHz, -0.4kHz로 나타났으며, CWT에 기반한 방법은 오차의 최대치(Δf_{max})가 +0.5kHz, -0.4kHz로 나타났다.

표 4는 본 논문에서 적용한 3가지 경우의 도플러 신호에 대해서 시간-주파수를 분석을 통한 순간 주파수 추정 결과를 종합한 것으로서, 순간 주파수 추정의 평균 오차와 표준 편차를 나타낸 것이다. 여기서 평균 오차는 각 시간대에서의 실제 주파수와 추정 주

[표 3] 순간 주파수 비교($V=170m/s$, $d_m=3m$)

시간 [ms]	실제 주파수 [kHz]	STFT [kHz]	WVD [kHz]	CWT [kHz]
5	9.4/ 3.2	9.4(0)/ 3.2(0)	9.4(0)/ 3.1(-0.1)	9.5(+0.1)/ 3.2(0)
10	8.6/ 5.7	8.6(0)/ 5.5(-0.2)	8.6(0)/ 5.7(0)	8.6(0)/ 5.7(0)
15	7.4/ 7.5	7.8(+0.4)/ 7.8(+0.3)	7.4(0)/ 7.4(-0.1)	7.5(+0.1)/ 7.5(0)
20	5.5/ 8.7	5.5(0)/ 8.6(-0.1)	5.5(0)/ 8.7(0)	5.4(-0.1)/ 8.6(-0.1)
25	2.6/ 9.5	3.2(+0.6)/ 9.4(-0.1)	2.8(+0.2)/ 9.5(0)	2.8(+0.2)/ 9.5(0)

[표 4] 순간 주파수 추정 평균 오차 및 표준 편차

		평균 오차[kHz]			표준 편차[kHz]		
		STFT	WVD	CWT	STFT	WVD	CWT
경우 1	170m/s	0.14	0.04	0.06	0.21	0.05	0.05
	340m/s	0.53	0.10	0.19	0.60	0.08	0.11
경우 2	170m/s	0.30	0.05	0.09	0.15	0.05	0.12
	340m/s	0.55	0.15	0.27	0.62	0.13	0.29
경우 3	170m/s	0.17	0.04	0.06	0.21	0.70	0.07
	340m/s	0.50	0.13	0.22	0.57	0.11	0.29

파수간의 오차의 절대값을 평균한 값이다. 표 4에서 보면 표적이 1개일 경우(“경우 1”)나 표적이 2개일 경우(“경우 2”, “경우 3”)에도 WVD에 기반한 순간 주파수 추정방법이 실제 주파수에 가장 근접하게 나타남을 확인할 수 있었고, 다음으로 CWT에 기반한 방법임을 알 수 있었다. 속도 측면에서 보면 표적의 속도가 빠른(340m/s) 경우가 느린(170m/s) 경우 보다 3가지 방법 모두 순간 주파수 추정 오차가 커짐을 알 수 있었다. 특히, STFT에 기반한 순간 주파수 추정은 표적이 안테나와 가까워 질수록 (주파수의 변화가 상대적으로 큰 구간) 순간 주파수 추정 성능이 WVD, CWT에 기반한 방법보다 현저히 저하됨을 알 수 있었고 또한 표적의 속도가 빠를수록 순간 주파수의 추정 오차가 다른 방법보다 보다 더 커짐을 알 수 있었다. STFT에서 이러한 순간 주파수의 추정 오차를 줄이기 위해서 Δt 를 보다 작게 설정하면, 이 경우는 상대적으로 주파수의 변화가 적은 즉, 안테나와 표적간의 거리가 먼 경우의 순간 주파수 추정 오차가 커지게 됨을 알 수 있었다. 결론적으로 고정된 창을 이용하는 STFT는 주파수가 급격하게 변화하는 신호에 대한 순간 주파수의 추정 능력이 다른 2가지 방법보다 떨어짐을 알 수 있었다. 표적이 2개인 경우 WVD에 기반한 시간-주파수 분석 결과를 보면 2개의 표적에 의해 나타나는 도플러 신호가 서로 상호작용을 일으켜 혼신성분이 나타남을 알 수 있었으며 또한 CWT에 기반한 시간-주파수 분석에서는 2개의 주파수가 인접할 경우 순간 주파수는 발

진현상이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 발진현상을 줄이기 위한 방법으로 식 (12)의 웨이브릿 형상계수 (σ)를 크게 하면 가능하였으나 이때는 STFT에 기반한 방법과 같이 주파수의 변화가 상대적으로 큰 구간에서의 순간 주파수 추정에서 오차가 커짐을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 표적의 이동에 의해 나타나는 도플러 신호를 STFT, WVD, CWT 등 3가지 방법에 따라 시간-주파수 분석을 하고 또한 시간-주파수 분석으로부터 순간 주파수를 추정하였다. 성능평가를 위해서 1개의 표적이 움직이는 경우와 2개의 표적이 같은 방향 혹은 서로 다른 방향으로 움직이는 경우에 대해서 시뮬레이션한 도플러 신호를 사용하여 이루어졌다. 분석결과 WVD에 기반한 순간 주파수 추정방법이 실제 주파수에 가장 근접하게 나타남을 확인할 수 있고 다음으로 CWT에 기반한 방법임을 알 수 있었다. 그러나 표적이 2개인 경우 WVD에 기반한 시간-주파수 분석에서는 2개의 도플러 신호가 서로 상호작용을 일으켜 혼신성분의 크기가 순간 주파수 성분보다 크게 나타남을 알 수 있었으며, 또한 CWT에 기반한 순간 주파수 추정에서는 2개의 주파수가 인접한 경우 순간 주파수 추정 파형이 발진함을 알 수 있었다. 추후 연구할 사항으로는 실제 환경에서 순간 주파수를 검출하기 위한 하드웨어 설계를 비롯하여 다중 표적일 경우에 나타나는 혼신성분을 줄일 수 있는 방법과 CWT에서 나타나는 발진현상을 줄이기 위한 모 웨이브릿의 설계 등이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Skolnik, “Introduction to radar systems”, 2nd edition, McGraw-Hill, 1980.
- [2] K. Toman, “Doppler and The Doppler Effect”, AD-A143240, NTIS, Rome air development center Air force systems command, 1984.

- [3] C. P. Whetton, "Industrial and scientific applications of doppler radar", Microwave Journal, 1975, pp.39~42.
- [4] S. Noel, H. Szu, "Proximity sensing with wavelet generated video", Journal of Electronic Imaging, 1998. 10.
- [5] S. Qian and D. Chen, "Joint time-frequency analysis", Prentice Hall PTR Prentice Hall, 1996.
- [6] D. Gabor, "Theory of communication", IEEE Proc, Vol. 93, 1946, pp.429~441.
- [7] E. Wigner, "On the Quantum Correction for Thermodynamic Equilibrium", Physical Review, Vol. 40, 1932, pp.749~759.
- [8] J. Ville, "Theorie et applications de la notion de signal analytique", (in French) Cables et transmission, Vol. 2, 1948, pp.61~74.
- [9] A. Grossman and J. Morlet, "Decomposition of Hardy Functions into square integrable wavelets of constant shape", SIAM J. Appl. Math., Vol 15, 1984, pp.723~736.
- [10] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets", Commun. Pure Appl. Math., Vol. 41, 1988, 11, pp.909~996.
- [11] B. Boashash, "Estimating and interpreting the instantaneous frequency of signal", Proc. of IEEE, Vol 80, 1992, pp.520~568.
- [12] A. Munoz, R. Ertle, M. Unser "Continuous wavelet transform with arbitrary scales and $O(N)$ complexity", Signal Processing, Vol 82, No. 5, 2002. pp.749~757.