

주파수 변조 단속 지속파를 이용하는 고해상도 밀리미터파 탐색기의 스푸리어스 제거를 위한 스펙트럼 분석 기법

Spectral Analysis Method to Eliminate Spurious in FMICW HRR Millimeter-Wave Seeker

양 희 성 · 전 주 환 · 송 성 찬*

Heeseong Yang · Joohwan Chun · Sung-Chan Song*

요 약

본 논문에서는 주파수 변조 단속 지속파(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave: FMICW) 시스템을 기반으로 한 고해상도(HRR: High Range Resolution) 레이더 탐색기에서 발생하는 스푸리어스(Spurious)를 제거하기 위한 스펙트럼 분석 기법에 대해서 연구하고 새로운 제거 기법을 제안한다. 주파수 변조 지속파(Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW)를 기반으로 하는 고해상도 레이더 시스템과 다르게 FMICW를 사용한 시스템은 주기적으로 나타나는 비연속적 IF(Intermediate Frequency) 신호에 의해 스펙트럼 상에서 스푸리어스가 생기게 된다. 이러한 스푸리어스를 제거하기 위해서 대역 통과 필터(band pass filter)를 사용하면 FMICW 시스템의 정확도가 이전 추정된 거리 값에 의존적이 되고 random interrupted sequence를 사용하면 noise floor가 증가하며, staggering process를 사용하면 중복된 정보를 위해 여러 개의 파형을 송신해야 되는 단점이 있다. 최근 소개된 IAA(Iterative Adaptive Approach) 또는 SPICE(SemiParametric Iterative Covariance-based Estimation method)와 같은 스펙트럼 분석 기법을 이용하면 이러한 단점 없이 FMICW 시스템에서의 스푸리어스를 효과적으로 제거할 수 있다. IAA 또는 SPICE를 사용하기 위해서는 신뢰할 수 있는 데이터(reliable data)와 신뢰할 수 없는 데이터(unreliable data)를 구분하고, 신뢰할 수 있는 데이터만 이용하여야 하는데, 이를 위해서 STFT(Short Time Fourier Transform)가 적용된다.

Abstract

In this thesis, we develop a spectral analysis scheme to eliminate the spurious peaks generated in HRR Millimeter-wave Seeker based on FMICW system. In contrast to FMCW system, FMICW system generates spurious peaks in the spectrum of its IF signal, caused by the periodic discontinuity of the signal. These peaks make the accuracy of the system depend on the previously estimated range if a band pass filter is utilized to eliminate them and noise floor go to high level if random interrupted sequence is utilized and in case of using staggering process, we must transmit several waveforms to obtain overlapped information. Using the spectral analysis one of the schemes such as IAA(Iterative Adaptive Approach) and SPICE(SemiParametric Iterative Covariance-based Estimation method) which were introduced recently, the spurious peaks can be eliminated effectively. In order to utilize IAA and SPICE, since we must distinguish between reliable data and unreliable data and only use reliable data, STFT(Short Time Fourier Transform) is applied to the distinguishment process.

Key words : Iterative Adaptive Approach, SemiParametric Iterative Covariance-Based Estimation Method, Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave, High Resolution Radar, Short Time Fourier Transform

한국과학기술원 전기및전자공학과(Department of Electrical Engineering, KAIST)

*삼성탈레스(주)(Samsung Thales Co., Ltd.)

· 논문 번호 : 20111024-133

· 교신저자 : 양희성(e-mail : hsyang@sclab.kaist.ac.kr)

· 심사일자 : 2011년 12월 22일 · 수정완료일자 : 2012년 1월 4일

I. 서 론

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 시스템은 펄스 도플러 레이더 시스템과 비교해서 동일한 거리 해상도 성능을 만족시키기 위해 요구되는 첨두 전력(peak power)이 작기 때문에 고해상도 레이더 시스템에 많이 적용되고 있다. FMCW가 사용된 고해상도 레이더 시스템의 주된 단점은 단일 안테나를 사용할 때, 송신기와 수신기를 차폐시키는 것이 어려워 송수신 신호 간에 leakage가 항상 존재한다는 것이다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 써큘레이터(circulator)를 이용한 송수신기 차폐 시스템^[1]과 T/R(transmit/receive) 스위치를 이용한 송수신기 차폐 시스템^[2]이 제안된 바 있다. 전자를 사용한 경우, 레이더의 운용거리가 짧아져서 주로 근거리 레이더 시스템에서만 사용이 가능하고, 후자를 사용한 경우는 FMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) 시스템이라고 널리 알려져 있으며, 운용거리를 늘릴 수 있기 때문에 장거리 레이더 시스템에도 사용이 가능하다^[3].

그림 1은 FMICW 시스템의 간략화된 블록 다이어그램을 나타낸다. 스위치 1과 스위치 2는 한 쪽이 닫히면 한쪽이 열리면서 상호 보완적으로 송신기와 수신기를 차폐하는 역할을 하고, 국부 발진기(local oscillator)는 수신 신호를 송신 신호의 주파수 대역에 맞게 믹싱 프로세스(mixing process)함으로써 IF(Intermediate Frequency) 신호로 다운 컨버전(down conversion)하는 역할을 한다. 특히 국부 발진기를 사용하여 상대적으로 낮은 주파수 대역의 IF 신호를 처리하는 프로세스를 stretch process^[4]라고 하는데, 이는 광대역 수신기(wideband receiver)를 사용하는 것에 비해 적은 비용과 낮은 복잡도로 다음과 같은 Ray-

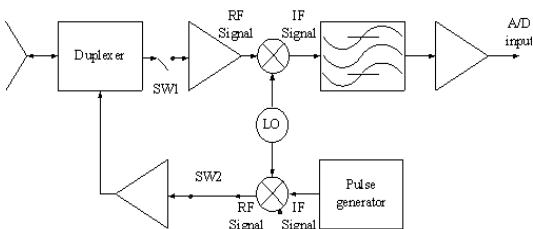


그림 1. FMICW 시스템
Fig. 1. FMICW system.

leigh criterion을 만족시킬 수 있어서 레이더 시스템에 널리 채택되고 있다.

$$\Delta R = c/2B, \tag{1}$$

여기서 ΔR 은 거리 해상도(range resolution), c 는 빛의 속도, B 는 송신 신호의 대역폭이다. 식 1에서 알 수 있듯이 신호를 수신하여 얻을 수 있는 최대 거리 해상도는 송신 신호의 대역폭에 반비례하므로 고해상도를 얻기 위해서는 송신 신호의 대역폭을 늘려야 한다. 넓은 대역폭의 송신 신호를 수신하기 위해 광대역 수신기를 사용할 경우 최소 $2B$ 의 샘플링 주파수가 필요하나, stretch process를 사용할 경우 $2B$ 보다 낮은 샘플링 주파수를 이용하여 신호를 수신할 수 있다. 일반 펄스 도플러 레이더 시스템의 신호 처리과정과는 다르게 FMICW 시스템의 stretch process를 이용할 경우 IF 신호의 주파수에 목표물의 거리 정보가 포함되므로 스펙트럼 분석을 통한 목표물 거리 추정이 이루어져야 한다.

그림 2는 FMICW 시스템의 송신 신호와 수신 신호를 시간-주파수 다이어그램으로 나타낸 것이다. 여기서 f_0 는 초기 반송파 주파수(initial carrier frequency), f_b 는 비트 주파수(beat frequency)이고, τ_0 는 수신 신호의 왕복시간(round-trip delay), R_0 은 목표물과 레이더 사이의 거리, T_c 는 주파수 변조 시간, B/T_c 는 chirp rate이다. T_1 는 그림 1에서 SW1가 닫히고 SW2가 열려 있는 시간, T_2 는 SW2가 닫히고 SW1가 열려 있는 시간을 의미하며, T_1 와 T_2 는 보통 주파수 변조

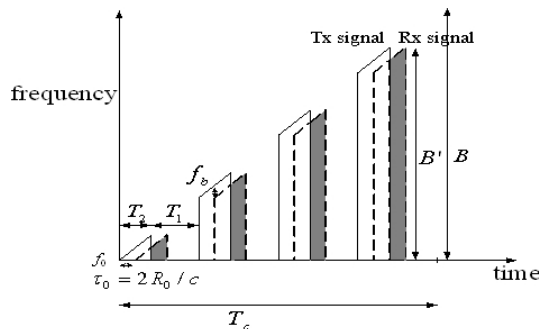


그림 2. FMICW 송신 신호와 수신 신호의 시간-주파수 다이어그램
Fig. 2. The time-frequency diagram of the transmitted and received FMICW.

시간 동안 일정하게 유지된다. 그림 2의 음영 부분은 스위칭 프로세스에 따라 차폐된 신호를 제외하고 실제 믹싱 프로세스 후에 얻게 되는 데이터 부분을 나타내며, 이 데이터는 주기적인 비연속성을 가진다는 것을 알 수 있다. FMCW 시스템의 경우 이러한 주기적 비연속성 없이 연속적인 데이터를 가지게 되는데, 데이터의 주기적 비연속성의 유무는 스펙트럼 상에서 스푸리어스의 존재 유무를 결정한다^[5]. 결과적으로 FMCW 시스템에서 IF 신호의 스펙트럼을 분석하면 나타나지 않던 스푸리어스가 FMCW 시스템에서는 $T_1 + T_2$ (switching period)의 역수 간격으로 생기게 된다. 스푸리어스가 생기게 되면 목표물로부터 반사된 신호의 세기가 약할 때나 다중 목표물의 경우, IF 신호의 주파수 성분 탐지를 방해할 수 있으므로 거리 정보를 얻는 성능을 높이기 위해서는 이 스푸리어스를 제거해야 된다. 제거하기 위해 단순히 예리한 대역 통과 필터(band pass filter)를 사용하여 이전에 추정된 거리로부터 구한 예상 비트 주파수 범위를 필터링하고, 정확한 신호 성분만 추출함으로써 나머지 스푸리어스를 제거할 수 있겠으나, 이 경우 레이더 시스템의 성능이 이전에 추정된 거리 정보에 의존적이 되기 때문에 추정 오차가 생기게 되면 계속적으로 오차의 전파(propagation of error)가 발생할 수 있다.

스푸리어스를 제거하기 위한 다른 해결책으로 random interrupted sequence를 이용한 기법^[6]이 제안되었다. 이 기법은 switching period를 한 주파수 변조 시간동안 계속해서 랜덤하게 변화시켜 주는 방법으로 스푸리어스의 파워를 전체 주파수 대역으로 균등하게 분산시켜 피크를 제거할 순 있으나, 전체적인 noise floor가 증가하게 되는 단점이 있다. 또한 staggering process^[3]도 제안되었는데, 이는 서로 다른 switching period(한 파형에 대해서는 T_1 과 T_2 를 일정하게 유지함).를 지닌 파형을 여러 번 송수신하고 만들어진 거리 정보를 서로 비교하여 각 스펙트럼의 cell 별로 최소값을 취하는 방법이다. Staggering process를 이용하면 noise floor 증가 없이 스푸리어스를 제거할 수 있지만, 여러 개의 파형을 중복된 정보를 얻기 위해 송수신해야 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 위에서 언급된 스푸리어스 제거 기법의 단점을 보완하기 위해 최근 발표된 스펙트럼

분석 기법인 IAA(Iterative Adaptive Approach)^[7] 또는 SPICE(SemiParametric Iterative Covariance-based Estimation method)^[8]와 STFT(Short Time Fourier Transform)^[9]을 결합한 FMCW 수신 신호 분석 기법을 제안하였다. IAA와 SPICE는 신호성분이 존재하는 신뢰할 수 있는 데이터(reliable data)만을 사용하기 때문에, 시간대별로 특정 주파수 대역의 신호들을 검출하기 위해서 STFT를 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 IAA와 SPICE의 특징과 알고리즘을 소개하고, 이와 STFT를 결합한 새로운 FMCW 수신 신호 분석 기법을 제안한다. III 장에서는 성능 분석을 위해서, 모의실험을 통해 1) 일반적인 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 FMCW 시스템의 IF 신호 스펙트럼, 2) 제안된 기법으로 처리된 FMCW 시스템의 IF 신호 스펙트럼, 그리고 3) leakage가 발생되지 않는다고 가정된 상태에서 일반적인 FFT를 이용한 이상적인 FMCW 시스템의 IF 신호 스펙트럼을 서로 비교하고, IV 장에서는 결론을 맺는다.

II. FMCW 수신 신호 분석 기법

2-1 신호 모델

FMCW 신호는 FMCW의 신호 모델과 유사하지만, 송수신 신호 차폐에 의한 조건식이 추가된 형태로 기술될 수 있다. 수식 전개상 수퍼 헤테로다인 송수신 시스템의 up-sweep 신호를 가정한다. 그림 2를 참고하며, 송신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Tx(t) &= \cos(2\pi P_1(t)) \\ P_1(t) &= f_0 t + \frac{K}{2} t^2 \\ nT_r &\leq t \leq nT_r + T_2, \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 n 은 음이 아닌 정수, K 는 chirp rate, T_r (= $T_1 + T_2$)은 switching period이다. 거리 R_0 만큼 떨어진 정지된 목표물에 대해서 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Rx(t) &= \beta \cos(2\pi P_2(t)) \\ P_2(t) &= f_0(t - \tau_0) + \frac{K}{2}(t - \tau_0)^2 \\ nT_r + \tau_0 &\leq t \leq \min(nT_r + T_2 + \tau_0, T_c), \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 β 는 목표물로부터 송신 신호가 반사될 때 목표물의 RCS에 따른 신호 감쇄와 랜덤 위상이 고려된 랜덤 계수이다. 믹싱 프로세스를 통과할 때 사용될 기준 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$rf(t) = \cos(2\pi P_3(t))$$

$$P_3(t) = f_{LO}t + \frac{K}{2}t^2$$

$$nT_r + T_2 \leq t \leq (n+1)T_r, \quad (4)$$

여기서 f_{LO} 는 국부발진기의 주파수이다. 수신 신호와 기준 신호를 믹싱 프로세스한 후 얻은 IF 신호의 고주파 성분을 제거한 AD 변환기 출력 신호는 다음과 같다.

$$O(k) = \frac{1}{2}\beta\cos(2\pi P_4(k))$$

$$P_4(k) = f_{IF}T_s k - f_0\tau_0 - \frac{K(T_s k - \tau_0)^2 - KT_s^2 k^2}{2}$$

$$nT_r + \tau_0 \leq kT_s \leq \min(nT_r + T_2 + \tau_0, T_c)$$

$$nT_r + T_2 \leq kT_s \leq (n+1)T_r, \quad (5)$$

여기서 $f_{IF}(=f_0 - f_{LO})$ 는 중간 주파수, T_s 는 샘플링 주기이다. 그림 2에서 나타난 음영부분은 식 5의 조건식에 의해서 표현된다.

2-2 IAA

IAA는 다음과 같은 신호 모델로부터 유도될 수 있다^{[7],[8]}.

$$\mathbf{y}_r = [y_{r_1} \cdots y_{r_N}]^T, \quad \mathbf{y}_u = [y_{u_1} \cdots y_{u_M}]^T$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{y}_r^T \quad \mathbf{y}_u^T]^T, \quad (6)$$

여기서 \mathbf{y}_r 은 신뢰할 수 있는 데이터 시퀀스, \mathbf{y}_u 는 신뢰할 수 없는 데이터 시퀀스, $\{t_n\}$ 은 신뢰할 수 있는 데이터 시퀀스의 샘플링 시간, $\{\bar{t}_n\}$ 은 신뢰할 수 없는 데이터 시퀀스의 샘플링 시간, $(\cdot)^T$ 는 행렬의 transpose이다. \mathbf{A} 를 \mathbf{y} 의 주파수 크기 성분이라고 정의하고, \mathbf{A} 를 discrete fourier transform matrix라고 가정하면,

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(w_1) \cdots \mathbf{a}(w_K)]$$

$$\mathbf{a}(w_k) = [\mathbf{a}_r^T(w_k) \quad \mathbf{a}_u^T(w_k)]^T$$

$$\mathbf{a}_r = [e^{jw_k t_1} \cdots e^{jw_k t_N}]^T$$

$$\mathbf{a}_u = [e^{jw_k \bar{t}_1} \cdots e^{jw_k \bar{t}_M}]^T$$

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \cdots \alpha_K]^T$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}, \quad (7)$$

여기서 일반적으로 $K \gg N$ 이고, \mathbf{n} 는 공분산 행렬이 $\text{diag}(\boldsymbol{\sigma})$ ($\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1 \cdots \sigma_{N+M}]^T$)인 노이즈 벡터를 의미한다. $\boldsymbol{\alpha}$ 는 매 iteration마다 주파수 성분들 간의 간섭(interference)을 최소화하고, 선택된 주파 성분은 그대로 유지시키는 필터 설계 방법에 의해서 추정된다.

IAA의 경우, 국소 수렴(local convergence)한다는 것이 알려져 있으나, 전역 수렴(global convergence)성질에 관해서는 알려져 있지 않다^[10]. IAA 알고리즘은 표 1과 같이 정리된다. 알고리즘에 쓰이는 신뢰할 수 있는 데이터의 공분산 행렬(covariance matrix)은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{R}_r = \sum_{k=1}^{K+N} P_k \mathbf{a}_r(w_k) \mathbf{a}_r(w_k)^H, \quad (8)$$

여기서 $P_k = |\alpha_k|^2$ 이다.

2-3 SPICE

SPICE는 결과의 형태상 IAA와 유사하지만 공분산 행렬 피팅(covariance matrix fitting) 방법을 이용하고 희소성(sparsity)이 야기된다는 면에서 차이가 있다^[8]. 결과적으로 SPICE 알고리즘은 다음과 같은 비용 함수(cost function)를 최소화한다.

$$\min_{P_k \geq 0} \mathbf{y}_r^H \mathbf{R}_r \mathbf{y}_r$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^{K+N} b_k P_k = 1, \quad (9)$$

여기서 $b_k = \|\mathbf{a}_r(w_k)\|^2 / \|\mathbf{y}_r\|^2$ 이고, 제한 조건은 비용 함수에 희소성을 부여한다. $\|\cdot\|$ 는 2-norm을 의미한다.

SPICE는 전역 수렴 성질을 만족한다고 알려져 있으며^[8], SPICE 알고리즘은 표 2와 같이 정리된다.

2-4 제안된 방법

IAA 또는 SPICE를 FMICW 레이더 시스템의 수신

표 1. IAA 알고리즘
Table 1. IAA algorithm.

| |
|--|
| <p><u>Initialization</u></p> $\hat{P}_k(0) = \mathbf{a}_r(w_k)^H \mathbf{y}_r ^2 / \ \mathbf{a}_r(w_k)\ ^4.$ |
| <p><u>Iteration</u></p> <p>at index i, update</p> $\mathbf{R}_r(i) = \sum_{k=1}^{K+N} P_k(i-1) \mathbf{a}_r(w_k) \mathbf{a}_r(w_k)^H$ $\hat{P}_k(i) = \frac{ \mathbf{a}_r(w_k)^H \mathbf{R}_r^{-1}(i) \mathbf{y}_r ^2}{ \mathbf{a}_r(w_k)^H \mathbf{R}_r^{-1}(i) \mathbf{a}_r(w_k) ^2}.$ |
| <p><u>Termination</u></p> <p>The maximum number of the iteration, I may be determined.</p> <p>The iteration may be terminated when the relative difference becomes $\frac{\ \boldsymbol{\alpha}(i) - \boldsymbol{\alpha}(i-1)\ }{\ \boldsymbol{\alpha}(i-1)\ } \approx 10^{-4}$.</p> |

기법에 적용하기 위해서는 먼저 수신 신호로부터 신뢰할 수 있는 데이터 구간과 신뢰할 수 없는 데이터 구간을 구분해야 한다. 송신기가 이상적인 선형 주파수 변조된 신호를 송신했다고 가정하자. 이 때, 목표물로부터 반사되어 돌아온 RF 신호를 믹싱 프로세스한 후에 얻게 되는 IF 신호는 일종의 주기적 비연속성을 가진 사인파(sine wave) 신호인데, 이 신호는 보통 신호 대 잡음비가 작기 때문에 단순히 시간에 따른 에너지 탐지로 신호의 존재 유무를 판단하기 어렵다. IF 신호가 사인파라는 점에 착안하여, 시간대별로 나누어 주파수 분석을 한다면, 신호가 존재하는 시간대를 좀 더 효과적으로 알아낼 수 있다. 시간대별 주파수 분석 기술은 웨이블릿(Wavelet)과 STFT을 이용한 방법이 쓰일 수 있으나, 그림 2에서 알 수 있듯이 FMICW 레이더 시스템은 수신 구간이 주기적으로 나타나고, 목표물이 빠르게 움직이더라도 각각의 수신 구간의 폭에 변화가 전체 송신 구간에 비해 크지 않기 때문에 시간축 해상도가 일정한 것이 유리하다(목표물이 정지 상태 또는 목표물과 레이더 플랫폼 간의 상대 운동에 의한 IF 신호의 비선형 왜곡성분이 완벽히 보상된 상태라고 가정한다). 따라서 그림 3에서 보이는 바와 같이 시간축 해상도가 주파수축의 해상도에 의존적인 웨이블릿보다는 시간축 해상도가 일정한 STFT가 FMICW 레이

표 2. SPICE 알고리즘
Table 2. SPICE algorithm.

| |
|--|
| <p><u>Initialization</u></p> $\hat{P}_k(0) = \mathbf{a}_r(w_k)^H \mathbf{y}_r ^2 / \ \mathbf{a}_r(w_k)\ ^4.$ |
| <p><u>Iteration</u></p> <p>at index i, update</p> $\mathbf{R}_r(i) = \sum_{k=1}^{K+N} \hat{P}_k(i-1) \mathbf{a}_r(w_k) \mathbf{a}_r(w_k)^H$ $\mathbf{z} = \mathbf{R}_r^{-1}(i) \mathbf{y}_r$ $P_k(i) \leftarrow P_k(i) r_k / b_k^{1/2} \rho$ <p>where</p> $b_k^{1/2} = \ \mathbf{a}_r(w_k)\ / \ \mathbf{y}_r\ $ $r_k = \mathbf{a}_r(w_k)^H \mathbf{z} $ $\rho = \sum_{l=1}^{K+N} b_l^{1/2} P_l r_l$ |
| <p><u>Termination</u></p> <p>The iteration may be terminated when the relative difference becomes</p> $\frac{\sum_{k=1}^{K+N} P_k(i) - P_k(i-1) ^2}{\sum_{k=1}^{K+N} P_k(i-1) ^2} \approx 10^{-4}.$ |

더 시스템의 송수신 상황에 적합하다. STFT 식은 식 10과 같다.

$$Y(n, k) = \sum_{m=1}^{N+M} y_m h_{n-m} e^{j\omega_k m}$$

$$h_n = 0, \quad n < 0, n > L-1,$$

$$\neq 0, \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad (10)$$

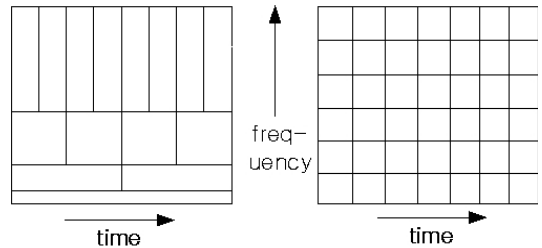


그림 3. 웨이블릿(좌) STFT(우)의 시간-주파수 해상도 관계
Fig. 3. The relationship between time resolution and frequency resolution in wavelet(left) and STFT (right).

먼저 STFT를 사용하여 신뢰할 수 있는 구간을 알아낸 후 IAA 또는 SPICE를 사용함으로써 스푸리어스를 효과적으로 제거할 수 있다.

III. 모의실험

본 장에서는 II 장에서의 제안한 방법의 타당성을 입증하기 위해 이상적인 FMCW 시스템의 IF 신호 스펙트럼과 제안된 방법이 적용된 FMICW 시스템의 IF 신호 스펙트럼 분석 결과를 보이도록 한다. 모의 실험 시에 레이더의 파라미터는 표 3과 같이 설정하였다.

설정된 레이더 파라미터에 따른 이론적인 거리 해상도는 1.499 m이며, 레이더와 목표물의 거리가 300 m일 때, 신호 대 잡음비가 15.3311 dB가 되도록 radar equation에 따른 파라미터를 설정하였다. 또한 각각 4개의 scattering point를 갖는 2개의 강체(rigid body)로 목표물을 설정하였다(목표물의 상대적 운동에 대한 정보는 보상이 이루어졌다고 가정한다.). 표 4는 실험 A에 설정된 파라미터 값을 정리한 표이고, 표 5는 실험 B에 설정된 파라미터 값을 정리한 표이다.

그림 4와 그림 5는 각각 실험 A와 실험 B에서 STFT를 이용하여 구한 이차원 스펙트로그램(spectrogram)을 시간축(초 단위)에 평행하게 누적한 그림이다. 각각의 피크는 한 switching period 내에서 어떤 주파수 성분의 세기가 커질 때 큰 값을 가지게 된다. 따라서 이 피크가 생긴 시간 전후에 신뢰할 수 있는 데이터가 존재할 가능성이 크기 때문에, 임계값(threshold value)을 설정하여 이 주위의 데이터를 선

표 3. FMICW 레이더 시스템 파라미터
Table 3. The parameters of the FMICW radar system.

| Parameter | Value |
|---------------------------|--------------|
| 초기 반송파 주파수(f_0) | 36 GHz |
| Switching period(T_r) | 0.00001 sec |
| T_2 | 0.000005 sec |
| IF 신호 주파수(f_{IF}) | 1 MHz |
| IF 신호 샘플링 주파수($1/T_s$) | 3 MHz |
| 주파수 변조 시간(T_c) | 0.0005 sec |
| 송신 신호 대역폭(B) | 100 MHz |

표 4. 실험 A의 파라미터
Table 4. The parameters of the simulation A.

| Parameter | Value |
|---|--|
| 목표물 1의 거리 (4개의 scattering point) | 300 m, 304 m, 306 m, 309 m |
| 목표물 2의 거리 (4개의 scattering point) | 550 m, 555 m, 557 m, 561 m |
| 목표물 1의 SNR (4개의 scattering point) | 15.3311 dB, 12.0903 dB, 14.9865 dB, 11.8064 dB |
| 목표물 2의 SNR (4개의 scattering point) | 1.7661 dB, 1.6084 dB, 4.5560 dB, 4.4313 dB |
| L | $\lfloor (T_2 + T_1)/(10T_s) \rfloor$ |
| 신뢰할 수 있는 데이터 구간 선택 조건 | 각 switching period마다 계산된 STFT의 값들 중에서 maximum 값 $\times 0.6$ 보다 큰 값에 대응되는 구간을 선택함. |
| IAA의 maximum iteration과 termination condition | 20, 0.0001 |
| SPICE의 maximum iteration과 termination condition | 50, 0.000001 |

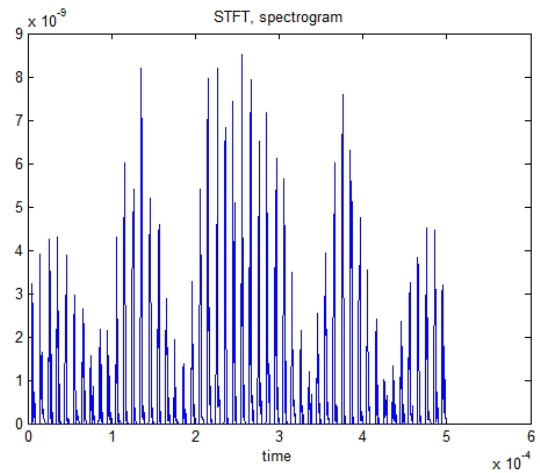


그림 4. 실험 A의 스펙트로그램
Fig. 4. The spectrogram in case of simulation A.

택하도록 한다. 본 모의실험에서는 실험 A와 실험 B 모두 3 dB 대역폭(스펙트럼 크기 최대치의 1/2가 되는 대역폭)을 고려하여 그보다 조금 높은 최대치의 3/5을 신뢰할 수 있는 구간의 임계값으로 설정하였다. 그림 6는 실험 A의 상황에서 IF 신호를 일반적인 FFT를 이용하여 스펙트럼 분석한 것으로써 I 장에

표 5. 실험 B의 파라미터

Table 5. The parameters of the simulation B.

| Parameter | Value |
|---|--|
| 목표물 1의 거리 (4개의 scattering point) | 350 m, 354 m, 356 m, 359 m |
| 목표물 2의 거리 (4개의 scattering point) | 370 m, 375 m, 377 m, 381 m |
| 목표물 1의 SNR (4개의 scattering point) | 12.6482 dB, 9.4401 dB, 12.3523 dB, 9.1960 dB |
| 목표물 2의 SNR (4개의 scattering point) | 8.6706 dB, 8.4369 dB, 11.3546 dB, 11.1708 dB |
| L | $\lfloor (T_2 + T_1)/(10T_s) \rfloor$ |
| 신뢰할 수 있는 데이터 구간 선택 조건 | 각 switching period마다 계산된 STFT의 값들 중에서 maximum 값 $\times 0.6$ 보다 큰 값에 대응 되는 구간을 선택함. |
| IAA의 maximum iteration과 termination condition | 20, 0.0001 |
| SPICE의 maximum iteration과 termination condition | 50, 0.000001 |

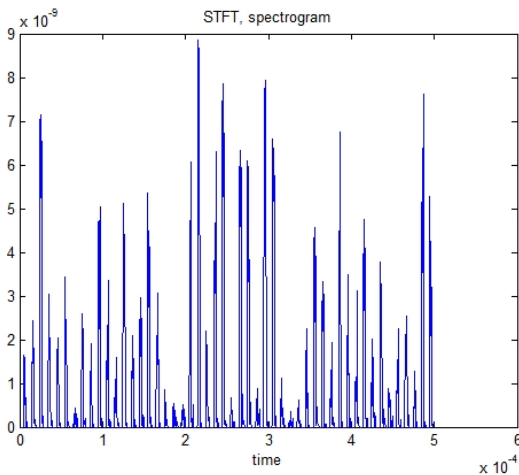


그림 5. 실험 B의 스펙트로그램

Fig. 5. The spectrogram in case of simulation B.

서 언급한 것과 같이, FMICW 시스템은 FMCW 시스템과 다르게 IF 신호 스펙트럼 상에 스푸리어스가 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 또한 2개의 목표물 중 피크가 낮은 신호는 피크가 큰 신호의 스푸리어스에 의해 완벽하게 묻혀버리는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)와 다르게 IAA와 SPICE를 이용하여 IF

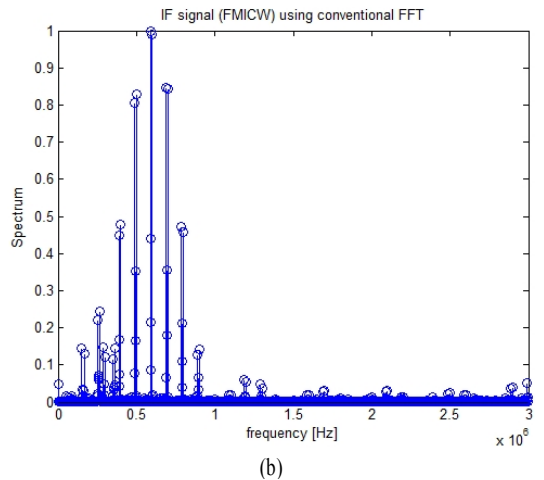
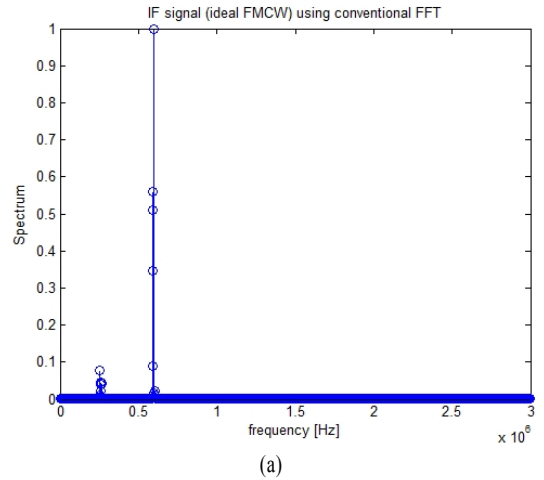


그림 6. (a) 일반적인 FFT를 이용한 정규화된 이상적인 FMCW IF 신호 스펙트럼, 실험 A, (b) 일반적인 FFT를 이용한 정규화된 FMICW IF 신호 스펙트럼, 실험 A

Fig. 6. (a) The normalized spectrum of the IF signal in an ideal FMCW system using conventional FFT in case of simulation A, (b) The normalized spectrum of the IF signal in an FMICW system using conventional FFT in case of simulation A.

신호 스펙트럼 분석한 그림 7(a), (b)는 피크가 큰 신호의 스푸리어스가 효과적으로 제거되어 작은 피크 부분이 나타났다. 여기서 주목할 점은 IAA를 사용한 경우, 목표물 2의 신호 대 잡음비가 낮아 추정된 목표물로부터 반사된 신호 성분의 IF 신호 스펙트럼 피크 값 또한 작아지게 되므로 완벽히 제거되지 못한 스푸리어스가 남아 있다는 것이다. 이와 대조적

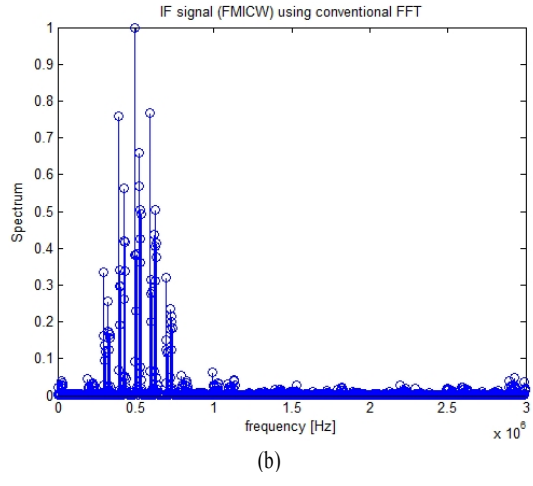
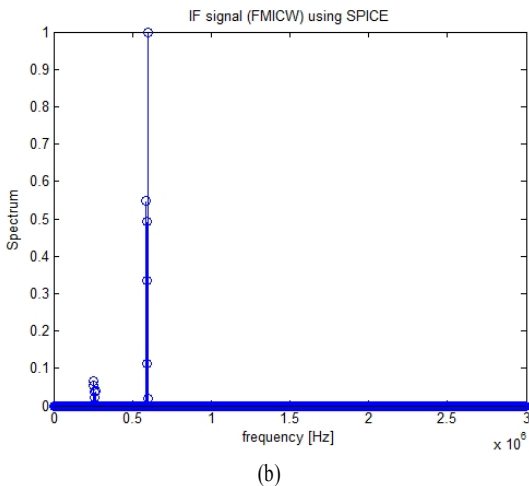
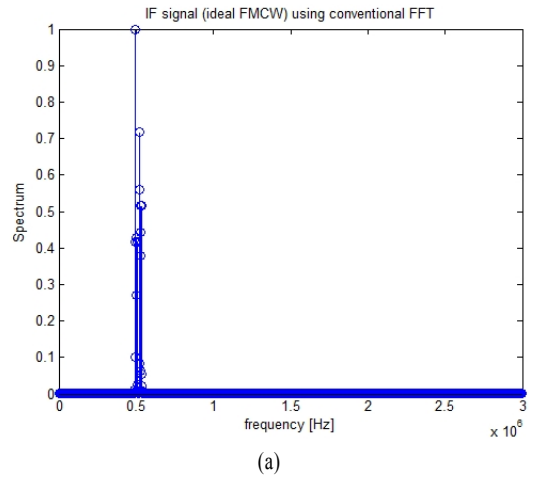
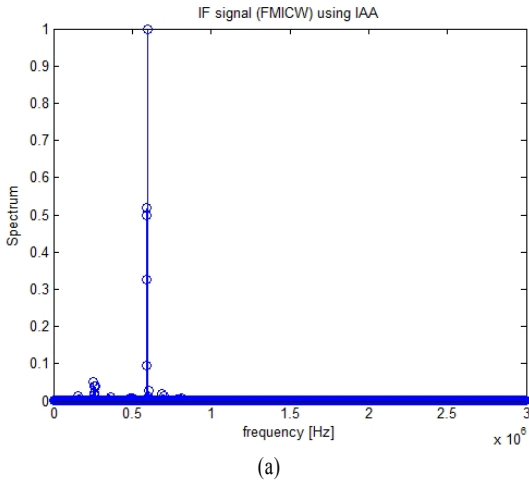


그림 7. (a) IAA 이용한 정규화된 FMCW IF 신호 스펙트럼, 실험 A, (b) SPICE를 이용한 정규화된 FMCW IF 신호 스펙트럼, 실험 A

Fig. 7. (a) The normalized spectrum of the IF signal in an FMCW system using IAA in case of simulation A, (b) The normalized spectrum of the IF signal in an FMCW system using SPICE in case of simulation A.

그림 8. (a) 일반적인 FFT를 이용한 정규화된 이상적인 FMCW IF 신호 스펙트럼, 실험 B, (b) 일반적인 FFT를 이용한 정규화된 FMCW IF 신호 스펙트럼, 실험 B

Fig. 8. (a) The normalized spectrum of the IF signal in an ideal FMCW system using conventional FFT in case of simulation B, (b) The normalized spectrum of the IF signal in an FMCW system using conventional FFT in case of simulation B.

으로 SPICE의 경우, 희소성이 야기되기 때문에 신호가 없는 구간의 스펙트럼 값은 0으로 제한된다.

실험 B는 표 5에서 보이는 바와 같이 두 목표물이 근접해 있을 상황을 설정한 실험이다(두 목표물의 최단 거리는 11 m이다). 실험 A와 달리 실험 B에서는 목표물들로부터 반사되어 돌아온 신호가 프로세싱 후 IF 신호가 되었을 때, 10 dB 전후의 신호 대 잡음비를 갖는다. 그림 6에서와 마찬가지로 그림 8

에서도 FMCW 시스템을 이용하면 스푸어리스가 생긴다는 것을 알 수 있다. 그림 9(a)을 보면 수신된 신호의 IF 신호가 낮지 않은 신호 대 잡음비(약 10 dB)이기 때문에, 완벽히 제거되지 않은 스푸어스에 비해 그 스펙트럼의 크기가 매우 크다. 또한 그림 9(b)의 경우, 희소성이 야기되어 신호가 없는 경우 스펙트럼 값이 0으로 제한된다. 그림 10은 그림 8(a)

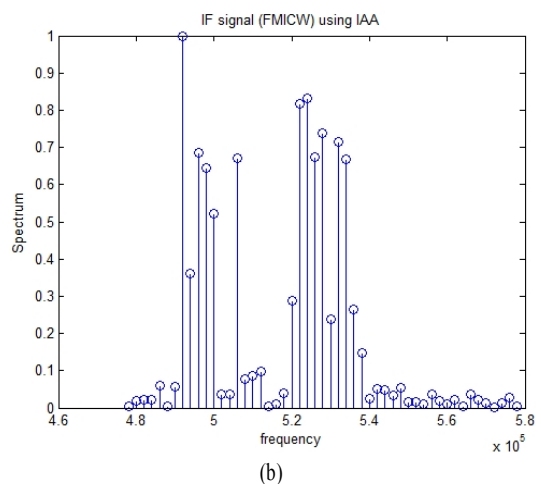
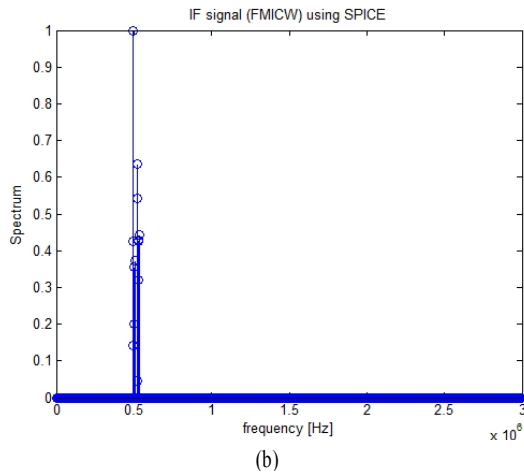
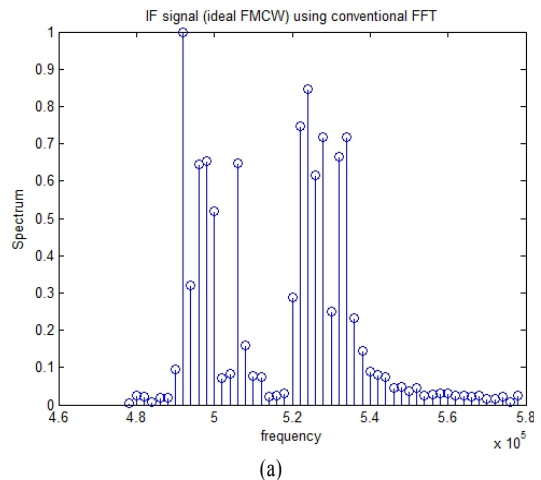
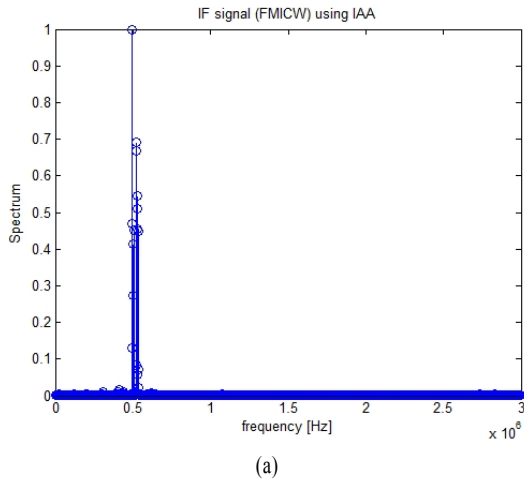


그림 9. (a) IAA 이용한 정규화된 FMICW IF 신호 스펙트럼, 실험 B, (b) SPICE를 이용한 정규화된 FMICW IF 신호 스펙트럼, 실험 B

Fig. 9. (a) The normalized spectrum of the IF signal in an FMICW system using IAA in case of simulation B, (b) The normalized spectrum of the IF signal in an FMICW system using SPICE in case of simulation B.

와 그림 9에서 가장 큰 피크값 주변을 확대한 그림이다. 이를 보면 IAA와 SPICE 모두, 이상적인 FMICW 시스템의 IF 신호를 일반적인 FFT로 스펙트럼 분석한 것에 근접한 성능을 내는 것을 알 수 있다.

IAA의 경우, 한 iteration을 위해 SPICE보다 좀 더 많은 계산 시간이 필요하다^[8]. SPICE는 희소성 제한 조건에 의해서 작은 목표물(IF 신호의 스펙트럼 상에 차지하는 구간이 작은 목표물)의 경우 잘 동작하지만, 큰 목표물(IF 신호의 스펙트럼 상에 차지하

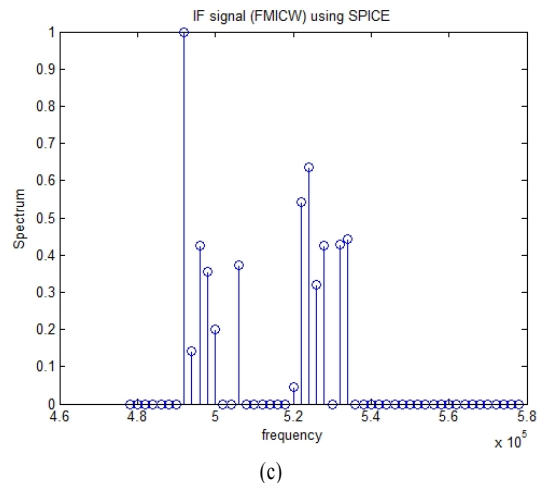


그림 10. (a) 그림 8(a)의 확대, (b) 그림 9(a)의 확대, (c) 그림 9(b)의 확대
Fig. 10. (a) Enlarged Fig. 8(a), (b) Enlarged Fig. 9(a), (c) Enlarged Fig. 9(b).

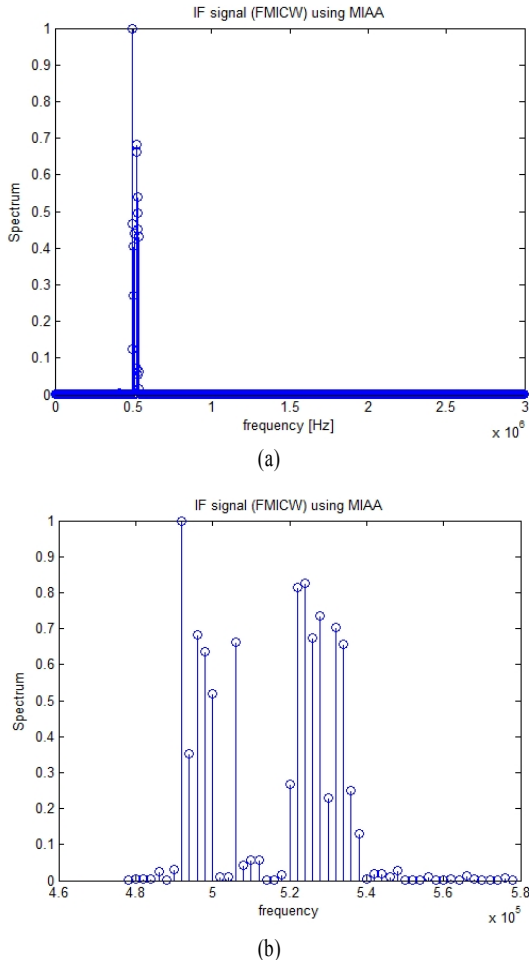


그림 11. (a) MIAA 이용하여 신뢰할 수 없는 데이터를 추정된 후 다시 일반적인 FFT를 이용하여 분석된 정규화된 FMCW IF 신호 스펙트럼, 실험 B, (b) 그림 11(a)의 확대

Fig. 11. (a) The normalized spectrum of the IF signal in an FMCW system using MIAA for signal recovery before conventional FFT in case of simulation B, (b) Enlarged Fig. 11(a).

는 구간이 넓은 목표물의 경우에는 알고리즘이 잘 동작하지 않는다. 본 논문에서는 전체 IF 신호의 스펙트럼 구간에 비해 작은 구간을 차지하는 목표물을 가정하고 있으므로 SPICE 알고리즘이 잘 동작하고 있으며, IAA보다 계산 시간이 작았고 스푸리어스 제거 성능도 좋게 나타났다.

IV. 결 론

본 논문에서는 FMCW를 사용한 고해상도 레이

더 시스템에서 IF 신호의 주기적 비연속성 때문에 스펙트럼 분석 시에 생기는 스푸리어스를 제거하기 위한 수신 신호 분석 기법을 제안하였다. 이 기법은 STFT를 이용하여 IF 신호에서 신뢰할 수 있는 데이터를 추출하고, 그 데이터에 IAA 또는 SPICE와 같은 스펙트럼 분석 기법을 적용하는 방법이다. III장의 시뮬레이션 결과에 따라 FMCW 시스템에서 IF 신호의 신호 대 잡음비가 0 dB에 가까울 정도로 낮지 않다면 멀리 떨어져 있는 두 목표물뿐만 아니라, 근접한 두 목표물에 대해서도 제안된 기법을 통해 일반적인 FFT를 이용한 FMCW 시스템과 유사한 고해상도 거리 프로파일(range profile)을 얻을 수 있다고 판단된다. SPICE의 경우에는 회소성이 야기되므로 신호가 없는 구간은 스펙트럼 값이 0으로 제한된다. 참고적으로 MIAA(Missing-data IAA)^[11]를 이용하여 신뢰할 수 없는 데이터를 추정하면 간섭성 신호(coherent signal)의 샘플이 많아지는 샘플므로 이를 다시 일반적인 FFT로 스펙트럼 분석하면 coherent integration 효과가 생겨서, 그림 11과 같이 IAA를 사용했을 때보다 noise floor를 낮출 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] P. D. L. Beasley, A. G. Stove, B. J. Reits, and B. As, "Solving the problems of a single antenna frequency modulated CW radar", *IEEE Radar Conference*, pp. 391-395, May 1990.
- [2] J. A. McGregor, E. M. Poulter, and M. J. Smith, "Switching system for single antenna operation of an S-band FMCW radar", *IEE Proc., Radar Sonar Navig.*, pp. 241-248, 1994.
- [3] J. T. González-Partida, M. Burgos-García, B. P. Dorta-Naranjo and F. Pérez-Martínez, "Stagger procedure to extend the frequency modulated interrupted continuous wave technique to high resolution radars", *IET Radar, Sonar, Navigat.*, vol. 1, p. 281, 2007.
- [4] D. R. Wehner, *High Resolution Radar*, Second Edition, Artech House, 1995.
- [5] B. R. Mahafza, A. Z. Elsherbeni, *MATLAB Simulations for Radar System Design*, Boca Raton, FL:

- CRC, 2003.
- [6] R. H. Khan, D. K. Mitchell, "Waveform analysis for high-frequency FMICW radar", *IEE Proc.*, vol. 138, no. 5, pp. 411-419, Oct. 1991.
- [7] T. Yardibi, J. Li, P. Stoica, M. Xue, and A. B. Baggeroer, "Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 46, pp. 425-443, 2010.
- [8] P. Stoica, P. Babu, and J. Li, "New method of sparse parameter estimation in separable models and its use for spectral analysis of irregularly sampled data", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 1, pp. 35-47, 2011.
- [9] J. E. Allen, L. R. Rabiner, "A unified approach to short time Fourier analysis and synthesis", *Proc. IEEE*, vol. 65, pp. 1558-1564, 1977.
- [10] W. Roberts, P. Stoica, J. Li, T. Yardibi, and F. Sadjadi, "Iterative adaptive approaches to MIMO radar imaging", *IEEE J. Sel. Topics in Signal Process.*, vol. 8, no. 3, pp. 5-20, 2010.
- [11] P. Stoica, J. Li, and J. Ling, "Missing data recovery via a nonparametric iterative adaptive approach", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 241-244, Apr. 2009.

양 희 성



2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2010년 2월~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리, 통신 신호 처리

송 성 찬



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
 2002년 11월~현재: 삼성탈레스(주) 레이더연구소 전문연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템 및 송수신기 설계, 전자파 수치해석

전 주 환



1989년: Ph.D, Dept. of EE, Stanford University, California
 1989~1992년: Member of Technical Staff, General Electric, Schenectady, New York
 1992년~현재: 한국과학기술원 교수
 2009년~현재: Associate Editor of IEEE

Transaction on Vehicular Technology
 [주 관심분야] 신호 처리, 통신 이론, 수치 해석