

레이더 시스템을 위한 주파수 선택적 IQ 불일치 보상 기법

류영빈¹ · 허제¹ · 손재현² · 최문각³ · 오혁준^{4*}

A Compensation Scheme of Frequency Selective IQ Mismatch for Radar Systems

Yeongbin Ryu¹ · Je Heo¹ · Jaehyun Son² · Mungak Choi³ · Hyukjun Oh^{4*}

¹Graduate Student, Department of Electronics and Comm. Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897 Korea

²Chief Engineer, Hanwha Systems, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17121 Korea

³Senior Engineer, Hanwha Systems, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17121 Korea

^{4*}Professor, Department of Electronics and Comm. Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897 Korea

요약

본 논문은 레이더 시스템에 사용되는 상용칩의 주파수 선택적 IQ 불일치를 보상하는 기법을 제안하고, 성능 열화로 인하여 고성능 레이더 시스템에 적용이 어려웠던 상용칩의 사용이, 제안된 기법을 통하여 가능함을 성능 분석을 통하여 보였다. IQ 불일치 보상 성능의 극대화를 위하여 본 논문에서는 특잇값 분해를 통한 차원 축소 기법을 제안하고, 제안된 차원 축소 기법에 기반한 IQ 불일치 복소 보상 여파기의 설계를 위한 최적화 모델을 제안하였다. 제안된 보상 기법의 우수성을 입증하기 위하여 실제 상용칩에 기반한 IQ 불일치 측정 및 보상 시스템을 FPGA로 구현하였으며, 개발된 시스템을 통하여 논문에서 제안하는 방법의 성능을 검증하였다. 성능 검증 결과, 기존 방법과 비교하여 본 논문에서 제안하는 방법이 큰 복잡도 증가 없이 기존 방법의 성능을 뛰어넘는 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, a compensation scheme of frequency selective IQ mismatch for high-performance radar systems based on commercial RFIC's is proposed. Besides, an optimization model and its solution based on the dimension reduction scheme using singular value decomposition are also proposed to design the optimal IQ mismatch compensation digital filter with complex coefficients. The performance of the proposed method had been analyzed through experiments using the IQ mismatch measurement and compensation system implemented on an FPGA board with a target RFIC and compared with the previous method. The experiment result showed a performance improvement of the proposed method over the existing one without noticeable increments in complexities. These performance analysis results showed that the limitation of using commercial RFIC's in high-performance radar systems due to the undesirable maximum SNR cap caused by their IQ mismatches could be overcome by employing the proposed method.

키워드 : 레이더, 주파수 선택적, IQ 불일치, 차원 축소, 특잇값 분해

Keywords : Radar, Frequency selective, IQ mismatch, Dimension reduction, SVD

Received 20 January 2021, Revised 8 February 2021, Accepted 8 February 2021

* Corresponding Author Hyukjun Oh(E-mail:hj_oh@kw.ac.kr, Tel:+82-2-940-5132)

Professor, Department of Electronics and Comm. Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.4.565>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 레이더 시스템의 경우, 과거의 아날로그 또는 RF 부분이 주로 핵심 설계 기술 요소였다면 지금은 디지털 신호처리 부분이 주요 핵심 설계 기술 요소로 등장하고 있다. 하지만, 이러한 핵심 디지털 신호처리 부분의 정상적인 동작과 최고 성능 획득을 위해서는 여전히 아날로그 및 RF 부분의 안정적인 성능이 요구된다.

과거 아날로그 및 RF 파트와 디지털 신호처리 부분이 독립적으로 설계되던 것에서 벗어나서 근래에는 두 부분이 유기적으로 상호 동시 설계 및 동작하여 시스템 성능을 극대화하고 있다. 이로 인하여 아날로그 및 RF 분야의 구성이 간단해진다거나 고성능을 나타내도록 설계가 가능해졌다.

IQ 기반 RF 레이더 송신기에서 디지털신호처리부의 역할은 펄스변조, 인터플레이션, 펄스성형, 최종 DAC 입력 신호 생성 등등이다. 이런 블록들은 디지털적으로 구현되므로 고정소수점 설계에서 발생하는 DC offset만을 효과적으로 구현하여 제거한다면 이 블록에서 발생하는 생성 I/Q 신호의 왜곡 또는 에러는 미비하다고 볼 수 있다.

하지만 DAC 출력이 아날로그단과 연결되면 아날로그 및 RF의 불완전성으로 인한 I/Q 신호의 왜곡이 발생하게 되며, 이 부분에서 가장 큰 부분을 차지하는 것 중의 하나가 IQ 불균형이다. 아래 그림1은 개개의 컴포넌트 단위로 일반적인 송신부를 표시한 것이다.

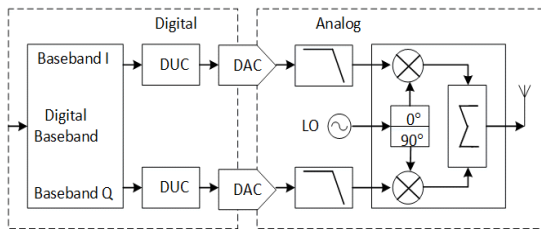


Fig. 1 Component-level radar transmission system

최근 방산 분야에서 AESA 레이더 등과 같은 최첨단 레이더에 대한 수요가 제기되었고, 디지털 및 아날로그/RF 부분의 최적 통합을 통해 고성능 시스템의 획득이 가능한 기술 수준에 도달하였다 [1]-[3]. 그뿐만 아니라, 기존 디스크리트 소자에 기반하여 TR 모듈을 구현하여 오던 방식에서 벗어나 다수의 상용 RFIC에 기반한

AESA 레이더와 같은 고성능 레이더를 개발하려는 움직임을 보이고 있다 [3]-[4].

구현 복잡도의 감소와 저전력 및 제품 크기의 감소 등 다양한 장점으로 인하여 일반적인 상용 RFIC의 경우 주로 직접 변환 송수신기 구조에 기반하여 구현되고 있으나, 최근 레이더 시스템의 송수신기는 아날로그 측면에서 보면 직접 변환 송수신기 구조의 IQ 불일치 보정 성능이 레이더에서 요구하는 수준에 미치지 못하여 상용 RFIC에 기반한 고성능 레이더 설계가 쉽지 않은 상황이다 [5]-[8].

직접 변환 송수신기의 경우 I/Q 신호의 생성을 위하여 LO 출력과 두 아날로그 신호 사이의 직접적인 믹싱이 필요하다. 일단 디지털 베이스밴드 I/Q 신호가 DAC에 의하여 아날로그 영역으로 변경되는 순간 IQ 불균형을 포함한 다양한 왜곡이 발생하게 된다. 아래 그림은 그러한 왜곡의 원인을 몇 가지 정리하여 표시한 것이다.

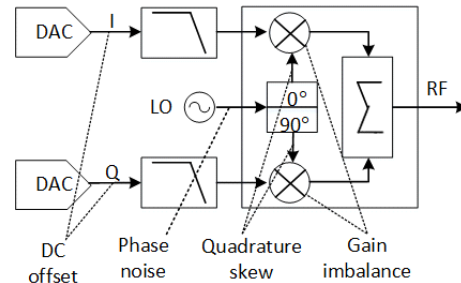


Fig. 2 IQ mismatch in direct upconversion architecture

위 그림에서 보듯이 직접 변환 구조 송신기의 경우 주로 각각의 I/Q 신호 경로에 대해 동일한 부품이 쌍으로 2개씩 사용되는 부분에 왜곡과 에러의 원인이 집중되어 있다 [6]. 따라서 I/Q 부정합, 불균형, 불완전성이라는 용어들을 사용한다.

레이더 시스템은 송신된 레이더 파형에 대하여 일반적으로 디지털통신 시스템과 비교할 때 더욱 정밀한 위상, 진폭의 전이 및 주파수를 가져야 한다. 그렇지 않으면 이미지 성분으로 인한 실제 존재하지 않는 허위 목표물이 탐지되는 고스트 현상이 나타나는 문제가 발생한다.

본 논문에서는 직접 변환 송수신기에 기반한 상용 RFIC의 IQ 불일치 보정 성능을 대폭 개선하여 고성능 레이더에 활용이 가능하도록 요구 성능을 만족할 수 있는 IQ 불균형 보정 알고리즘을 제시하고 이를 실제 상용

RFIC를 포함하는 FPGA 보드에 구현하여 성능 검증하였다.

II. 시스템 모델

직접 변환 송수신기 구조를 갖는 시스템에서의 IQ 불일치 문제는 과거 오랫동안 다루어진 주제로, 이에 대한 해석을 위한 모델과 해석 기법은 기존의 여러 연구를 참고로 하여 어렵지 않게 유도할 수 있다 [5]-[8].

IQ 불일치 보상은 송신부뿐만 아니라 수신부에 대하여 모두 이루어져야 하고, 송신부와 수신부의 IQ 불일치 해석의 방법에 일부 차이가 있으므로 송신부와 수신부의 IQ 불일치 해석 및 보정이 독립적으로 이루어져야 한다.

직접 변환 구조를 갖는 송신부의 IQ 불일치 해석을 위하여 그림 3과 같이 IQ 불일치 값에 영향을 주는 DAC 부분을 시작으로 최종 RF 출력까지 모델링하였다.

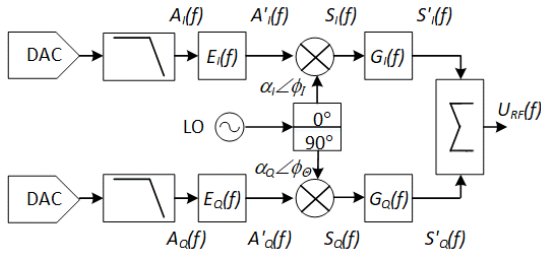


Fig. 3 Frequency dependent IQ mismatch model at Tx

그림 3을 기반으로 최종 RF 출력에서의 IQ 불일치 성분을 유도하면 다음과 같이 표시할 수 있다. 이때, $\tilde{G}(f)$ 는 $G(f)$ 의 기적대역 등가 시스템을, $A(f) = A_I(f) + jA_Q(f)$ 을 나타낸다.

식(1)에서 보듯이 최종 출력은 총 4가지의 성분으로 구성되어 있다. 첫 번째 성분은 양의 중심 주파수 f_M 에 위치하는 원하는 신호 성분이고, 두 번째 성분은 동일한 주파수에 존재하는 IQ 불일치로 인한 이미지 성분이다. 음의 중심 주파수 f_M 에 대하여도 동일하게 세 번째 성분이 원하는 신호 성분이고 마지막 성분이 IQ 불일치로 인한 이미지 성분이다.

$$2U_{RF}(f) = A(f-f_M) \begin{bmatrix} \alpha_I E_I(f-f_M) \tilde{G}_I^*(f-f_M) e^{j\phi_I} \\ + \alpha_Q E_Q(f-f_M) \tilde{G}_Q^*(f-f_M) e^{j\phi_Q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + A^*(-f+f_M) \begin{bmatrix} \alpha_I E_I(f-f_M) \tilde{G}_I(f-f_M) e^{j\phi_I} \\ - \alpha_Q E_Q(f-f_M) \tilde{G}_Q(f-f_M) e^{j\phi_Q} \end{bmatrix} \\ & + A^*(-f+f_M) \begin{bmatrix} \alpha_I E_I(f+f_M) \tilde{G}_I^*(-f-f_M) e^{-j\phi_I} \\ + \alpha_Q E_Q(f+f_M) \tilde{G}_Q^*(-f-f_M) e^{-j\phi_Q} \end{bmatrix} \\ & + A(f+f_M) \begin{bmatrix} \alpha_I E_I(f+f_M) \tilde{G}_I^*(-f-f_M) e^{-j\phi_I} \\ - \alpha_Q E_Q(f+f_M) \tilde{G}_Q^*(-f-f_M) e^{-j\phi_Q} \end{bmatrix} \\ & = A(f-f_M) V_1(f-f_M) + A^*(-f+f_M) V_2(f-f_M) \\ & + A^*(-f-f_M) V_1^*(-f-f_M) + A(f+f_M) V_2^*(-f-f_M) \end{aligned}$$

동일한 방법으로 수신부에 대하여도 IQ 불일치에 대한 해석이 가능하다. 그림 4와 같이 직접 변환 구조를 갖는 수신부의 IQ 불일치 해석을 위하여 RF 입력부터 IQ 불일치 값에 영향을 주는 ADC 부분까지 모델링 하였다.

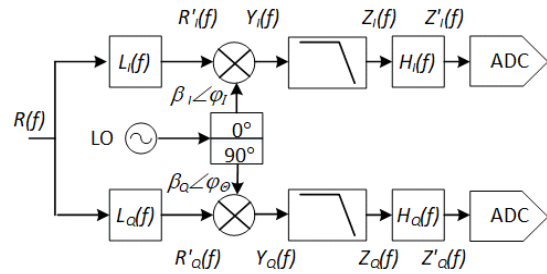


Fig. 4 Frequency dependent IQ mismatch model at Rx

송신단과 유사한 방법으로 그림 4를 기반으로 다음과 같은 최종 수신단에서의 IQ 불일치 성분을 얻을 수 있다. 수신부의 경우에도 송신부와 마찬가지로 물결표는 해당 신호 및 여파기의 기저대역 등가 신호 또는 여파기를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \tilde{Z}(f) &= \tilde{Z}'(f) + j\tilde{Z}''(f) \quad (2) \\ &= \frac{\tilde{R}(f)}{2} \left[\beta_I e^{-j\psi_I} H_I(f) \tilde{L}_I(f) + \beta_Q e^{-j\psi_Q} H_Q(f) \tilde{L}_Q(f) \right] \\ &+ \frac{\tilde{R}(-f)}{2} \left[\beta_I e^{j\psi_I} H_I(f) \tilde{L}_I^*(-f) - \beta_Q e^{j\psi_Q} H_Q(f) \tilde{L}_Q^*(-f) \right] \\ &= \tilde{R}(f) W_1(f) + \tilde{R}(-f) W_2(f) \end{aligned}$$

위 식을 살펴보면, 수신부의 경우에도 송신부와 동일하게 IQ 불일치로 인한 전체 수신신호는 총 4개의 신호 성분으로 표현됨을 볼 수 있다. 송신부의 경우와 동일하게 주파수 대칭성에 따라 2개의 성분으로 나뉘고 복소 신호와 해당 복소 신호의 공액복소수 관계로 나타나는 신호의 관계로 2가지 성분이 또 나뉘게 되어 총 4가지 성분으로 나누어짐을 볼 수 있다.

위 식에서 $\tilde{R}(f)$ 가 추출하여야 하는 원본 신호이므로 결국 윗줄에 있는 성분만을 뽑아내어야 한다. 즉, 아랫줄에 나타난 신호가 최종적으로 추정하여 제거하여야 할 수신부의 IQ 불일치 성분이 된다.

송신부 및 수신부 IQ 불일치 보상이란, 결국 송신부 식 (1)의 마지막 이미지 성분과 수신부의 식 (2)의 마지막 성분을 제거할 수 있는 일종의 간섭 제거 여파기를 최적으로 설계하는 것이다. 식(1)과 (2)에서 확인할 수 있듯이 이 두 성분은 서로 대칭적인 형태가 아니므로 복소보상 여파기의 설계가 필요하다.

III. 제안하는 보정 기법

본 장은 주파수 선택적 IQ 불일치의 보정 장치에 관하여 기술한다. 주파수 선택적 IQ 불일치의 보정 장치의 기본 원리는 입력 신호의 공액복소수로 변환 후, 이미지 신호를 생성하고 그 생성된 이미지 신호를 보정 파라미터를 탭 계수로 갖는 복소 여파기를 통과시켜 IQ 불일치로 생성된 이미지 성분과 정합되는 이미지 성분을 생성하여 IQ 불일치 이미지 성분이 제거되도록 하는 그림 5와 같은 구조이다. 통신시스템의 채널 등화기와 유사한 개념으로 볼 수 있다 [9].

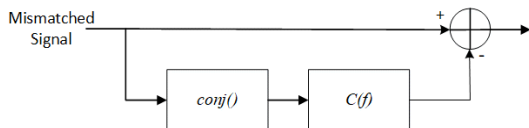


Fig. 5 Frequency dependent IQ mismatch compensation

$$C_{I_x}(f) = \frac{V_2(f)}{V_1(-f)} \tag{3}$$

$$C_{I_x}(f) = \frac{W_2(f)}{W_1^*(-f)}$$

그림 5의 출력에서 IQ 불일치 성분이 제거되도록 하는 송신단 및 수신단의 보상 여파기 $C_{\alpha}(f)$, $C_{\alpha}(f)$ 를 각각 식(1)과 식(2)에 대입하여 구하면 식 (3)과 같다.

따라서, 주파수 선택적 IQ 불일치 제거를 위하여 할당된 전체 주파수 대역의 IQ 불일치 성분인 $V_1(f)$, $V_2(f)$, $W_1(f)$, $W_2(f)$ 을 우선 추출하여야 한다. 이를 위하여 크게

2가지 방법이 사용된다. 첫 번째 방법은 전체 대역을 점유하는 변조된 신호나 랜덤 신호를 사용하여 전체 대역의 IQ 불일치 성분을 한 번에 추출하는 방법이다. 두 번째 방법은 단일 톤 신호를 사용하되, 단일 톤 신호의 주파수를 전체 대역 내에서 특정 간격으로 변경해 가면서 각각의 단일 톤 주파수에 대한 IQ 불일치를 성분을 추출하는 방법이다.

고성능, 고이득 지향성 레이더의 경우 다수의 TR 모듈이 사용될 뿐만 아니라, 실시간성이 중요한 관계로 IQ 불일치 보정 시스템의 복잡도가 낮아야 한다. 이러한 측면에서 전자의 방법보다는 후자의 단일 톤 신호를 사용하는 방법이 선호된다.

본 논문에서는 전체 주파수 대역의 IQ 불일치 성분을 추출을 위하여 1MHz 간격으로 M개의 다중 단일 톤 신호를 사용한다. M개의 단일 톤 신호를 사용하여 M개 해당 주파수에서의 IQ 보정 여파기인 $C_{\alpha}(f)$, $C_{\alpha}(f)$ 을 얻게 된다. 이 값을 사용하여 전체 채널 대역폭에 대한 주파수 선택적 IQ 불일치 보정 파라미터 값을 추출하여야 한다. 실제로 이 보정 값들은 $C(f)$ 라는 보정 여파기의 주파수 응답으로 표시되기 때문에 결국 보정 여파기 $C(f)$ 가 (N-1)차의 복소 여파기일 때, M개의 톤 신호에 대한 $C(f)$ 의 주파수 응답을 갖도록 하는 N개의 $C(f)$ 탭 계수를 구해내는 것과 같다.

1MHz 간격의 M개 단일 톤 신호를 사용하여 IQ 불일치 파라미터를 추출하게 되면 결국 주파수 대칭을 고려할 때, 채널 대역폭 내의 총 2M개 특정 주파수에 대한 IQ 불일치 파라미터를 구할 수 있다. 주파수 영역에서 보면 일종의 2M개 주파수 응답을 기반으로 전체 채널 대역폭의 주파수 응답을 추정하는 보간 과정이고, N개의 탭 계수를 구하는 측면에서 보면 2M개의 복소 방정식을 이용하여 N개의 탭 계수를 구해내는 최적화 문제가 된다. 이를 수식화하여 최적화 모델을 표시하면 다음과 같은 근사화 문제로 표시할 수 있다.

$$C(f) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{-j2\pi f n} \approx C_d(f) \tag{4}$$

$C_d(f)$ 는 2M개의 주파수에서 얻어낸 일종의 이미 알려진 특정 주파수에서의 이상적인 주파수 응답을 나타낸다. 식 (4)는 모두 c_n 에 대한 1차 식이므로 이를 벡터 형태로 아래와 같이 다시 간단하게 정리할 수 있다.

$$Ax = b \tag{5}$$

위 식에서 x 는 $N \times 1$ 의 탭 계수 벡터를 나타내며, b 는 $2M \times 1$ 의 이상적인 주파수 응답을 나타내는 벡터이다. 행렬 A 는 $2M$ 개 방정식의 계수들을 정리한 것으로서, $2M \times N$ 의 차원을 갖는다. 최종적으로 식 (5)로 표현된 일종의 연립방정식을 풀어 x 벡터로 주어지는 N 개의 탭 계수를 갖는 보상 여파기 $C(f)$ 를 구한다.

이러한 최적화 문제를 푸는 방법은 여러 가지가 존재하지만, 본 논문에서는 제한된 연산 능력 내에서 제한된 시간 안에 모든 연산을 처리해야 하는 실시간 처리 시스템을 고려하여 비교적 구현이 간단한 의사 역행렬기반의 방법을 적용한다.

$$x = (A^H A)^{-1} A^H b \quad (6)$$

대부분의 경우 의사 역행렬은 별다른 어려움 없이 얻어지지만, 만약 $A^H A$ 의 역행렬이 특이 행렬, 준특이 행렬, 또는 유사 특이 행렬 등일 경우, 수치 안정성의 문제로 인하여 정확한 x 벡터를 구하는 것이 어렵거나 과적합 문제가 나타나게 된다. 이를 방지하기 위하여 영공간 제거 기법을 적용한다.

$A^H A$ 의 역행렬이 특이 행렬, 준특이 행렬, 또는 유사 특이 행렬일 경우, $N \times N$ 행렬인 $A^H A$ 행렬이 N 개의 독립적인 신호로 구성된 것이 아니라 일부 차원의 신호는 이미 존재하는 다른 차원의 신호와 근본적으로 유사하므로 N 차원 중에 L 차원의 독립적인 신호를 제외한 유사한 $O = N - L$ 차원의 신호를 영공간 신호로 보고 제거가 가능하다.

$$\begin{aligned} R &= A^H A \\ R &= U S V^H \\ S^{-1} &= \begin{cases} 0 & \lambda \approx 0 \\ \lambda^{-1} & \text{else} \end{cases} \\ R^{-1} &= V S^{-1} U^H \\ x &= R^{-1} A^H b \end{aligned} \quad (7)$$

이러한 특성을 기반으로 하여 O 차원의 영공간 신호를 제거하여 사실상 $L \times L$ 의 행렬의 역행렬을 구하는 것으로 연립방정식을 수정하여 간단하게 최적 보상 여파기를 구한다. 이를 단계적으로 정리하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

식 (7)의 두 번째 식은 특잇값 분해를 적용한 것이며, λ 는 특잇값이다.

IV. 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는 III장에서 제안된 IQ 불일치 추정 및 보정 알고리즘의 검증에 위하여 실제 ADI사의 AD9371 기반 레이더 하드웨어에서 데이터를 채집하여 IQ 불일치 파라미터를 추정하고, 이를 통하여 추출된 보정 파라미터를 해당 하드웨어에 적용하여 보정된 결과를 측정하였다.

추정 및 보정 측정 결과, 실제 하드웨어 시제에 적용하였을 경우 전체 대역폭 내에서 이미지 제거율 (Image Rejection Ratio: IRR)이 약 60dB 근처에 근접하는 것을 확인하였다.

4.1. 주파수 비 선택적 IQ 불일치 보상

그림 6은 단일 톤 신호를 사용하여 톤 신호 주파수에 서만 수신부 캘리브레이션을 수행하기 위하여 채집한 데이터의 주파수 특성과 본 논문에서 제안한 방법으로

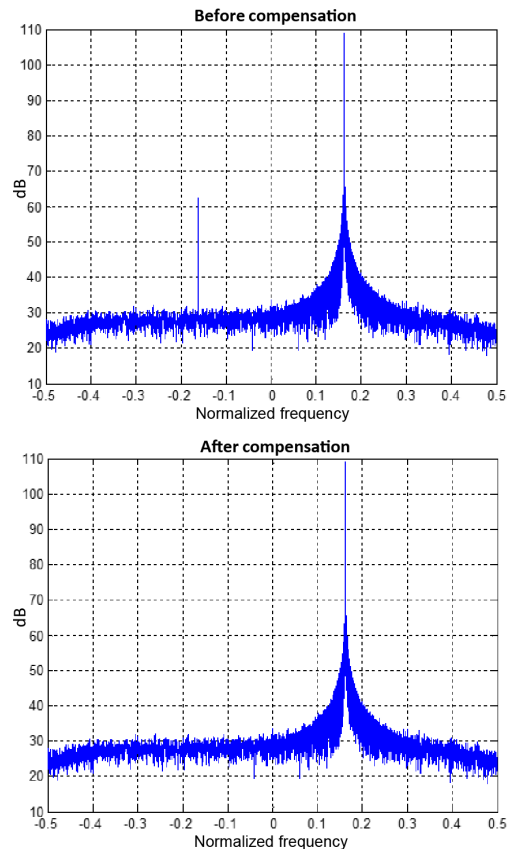


Fig. 6 IQ mismatch compensation at receiver side

IQ 불일치 추정 후 보정을 수행한 결과를 도시한 것이다. IQ 불일치 보상 전 약 42~43dB 정도의 IRR 성능을 나타내고 있었으나, 본 논문에서 제안한 방법으로 IQ 불일치 추정 및 보정 후에는 80~90dB 수준으로 이미지 성분이 사라졌음을 볼 수 있다.

다음으로 송신부 캘리브레이션을 위한 데이터의 채집을 위하여 수신부 RF 캘리브레이션을 수행했던 동일한 수신부를 통하여 직접 하향 변화 후 최종 수신부의 I/Q 데이터를 베이스밴드에서 FPGA를 이용하여 채집하였다.

그림 7은 각각 송신부 IQ 불일치 보상 전후의 주파수 특성을 나타내고 있다. IQ 불일치 보상 후의 경우 본 논문에서 제안한 송신부 및 수신부 IQ 불일치 보상 기법이 모두 적용된 상태로서, 위 그림에서 보듯이 최종적으로 약 80~90dB 정도의 IRR 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 IQ 불일치 추정 및 보정 기법

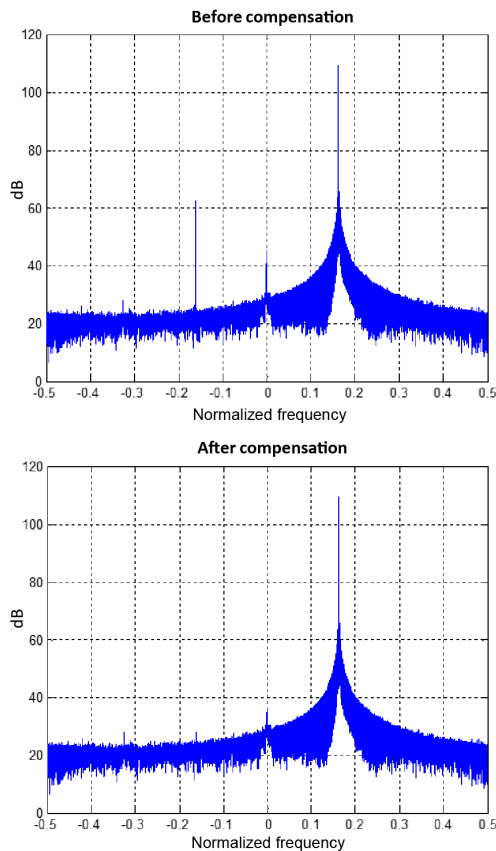


Fig. 7 IQ mismatch compensation at transmitter side

을 주파수 비 선택적 IQ 불일치에 적용할 경우, 이상적인 수준에 근접하는 성능을 보인다.

4.2. 주파수 선택적 IQ 불일치 보상

다음은 주파수 선택적 IQ 불일치의 보정에 대한 실제 하드웨어에서 IQ 불일치 파라미터 추정 및 보정을 수행한 결과이다.

총 51개 주파수에 대하여 III장에서 제안한 방법에 기초하여 각 51개 특정 주파수에 대한 IQ 불일치 보정 파라미터를 추출하였으며, 이를 기반으로 41개의 탭을 갖는 송신부 및 수신부 복소 보정 여파기를 본 논문에서 제안하는 방법을 통하여 설계하여 캘리브레이션 전후 송수신부 주파수 특성을 관찰하였다.

그림 8에 도시된 주파수 특성은 정확한 성능 파악을 위하여 같은 간격으로 존재하는 51개의 특정 주파수에 인접한 두 주파수 사이의 중간값에 해당하는 IQ 불일치 보상 특성을 나타낸 것이다. 최종 송수신부 캘리브레이션 결과, IRR 값이 60dB에 근접함을 볼 수 있다.

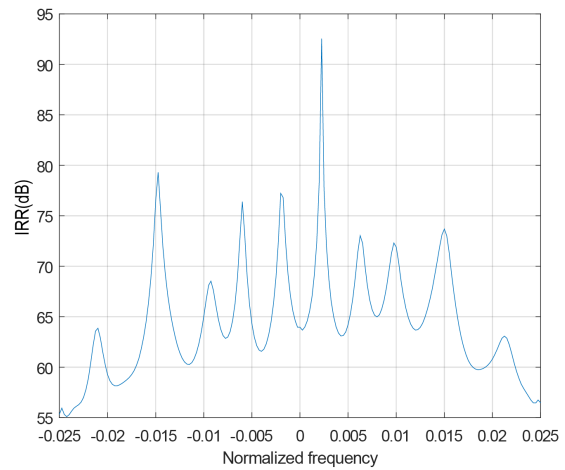


Fig. 8 Image rejection ratios after frequency dependent IQ mismatch compensation

V. 결론

본 논문에서는 상용 RFIC에 기반한 고성능 레이더 시스템에 적용될 수 있는 수준의 성능을 달성할 수 있는 송수신부 주파수 선택적 IQ 불일치 파라미터를 추정하고 보상하는 방법을 제안하였으며, 제안된 방법을 검증

할 수 있는 상용 RFIC를 포함하는 FPGA 보드를 제작하여 IQ 불일치 보상 기법을 구현함으로써 성능을 검증하였다. 시험을 통한 성능 검증 결과 고성능 레이더 시스템에서 요구하는 IRR 60dB 수준의 IQ 불일치 보정 성능을 만족함을 확인하였고, 이를 통하여 제안된 IQ 불일치 보정 기법을 사용하여 저가의 상용 RFIC 기반 고성능 레이더 시스템의 TR 모듈을 구현할 경우, 요구 성능을 만족할 수 있는 시스템의 구현이 가능함을 보였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by a grant-in-aid of HANWHA SYSTEMS.

References

- [1] A. K. Mishra, "AESA radar and its application," *International Conference on Communication, Computing and Internet of Things*, Chennai: IN, pp. 205-209, 2018.
- [2] H. Yi, D. Kim, and I. Han, "Design of sub-array receiver for active phase array radar," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 568-573, May, 2019.
- [3] G. Paparisto and D. Vey. (2016, November). Designing Next-Generation AESA Radar. *Microwave Journal* [Online]. Available: <http://www.microwavejournal.com/articles/27385>.
- [4] J. Herd, S. Duffy, D. Carlson, M. Weber, G. Brigham, C. Weigand, and D. Cursio, "Low cost Multifunction Phased Array Radar concept," *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Waltham: MA, pp. 457-460, 2010.
- [5] F. Rech and K. Huang, "Correction of IQ mismatch for a particle tracking radar," *European Microwave Conference in Central Europe*, Prague: CZ, pp. 277-280, 2019.
- [6] Y. Yan, C. Li, and J. Lin, "Effects of I/Q mismatch on measurement of periodic movement using a Doppler radar sensor," *IEEE Radio and Wireless Symposium*, New Orleans: LA, pp. 196-199, 2010.
- [6] G. Vallant, M. Epp, W. Schlecker, U. Schneider, L. Anttila, and M. Valkama, "Analog IQ impairments in Zero-IF radar receivers: Analysis, measurements and digital compensation," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz: AT, pp. 1703-

1707, 2012.

- [7] M. Ulrich and Bin Yang, "IQ and array calibration for FMCW radar," *International Radar Symposium*, Prague: CZ, pp. 1-10, 2017.
- [8] P. Gupta et al, Dynamic iq mismatch correction in FMCW radar, US Patent US20190107601A1, to TI, Patent and Trademark Office, Washington D.C., 2019.
- [9] S. Yoo, Y. Ji, H. Cho, C. Han, M. Seo, and H. Oh, "Performance of equalization in narrowband multiple transmission communication systems," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 623-629, May, 2020.



류영빈(Yeongbin Ryu)

2021년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 공학사
 2021년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 석사과정
 ※관심분야: 통신신호처리, 레이다신호처리, 인공지능



허 제(Je Heo)

2021년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 공학사
 2021년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 석사과정
 ※관심분야: 통신신호처리, 레이다신호처리, 인공지능



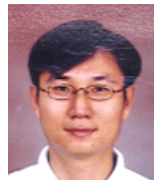
손재현(Jaehyun Son)

2001년 2월: 충북대학교 전기전자공학부 공학사
 2004년 2월: 충북대학교 전자공학과 공학석사
 2004년 3월 ~ 현재: 한화시스템 레이다연구소
 ※관심분야: 디지털송수신블록(DTRB), 레이다신호처리, RF 회로 설계



최문각(Mungak Choi)

2008년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학사
 2010년 2월: 경북대학교 전자공학과 공학석사
 2020년 2월: 경북대학교 전자공학과 공학박사
 2010년 3월 ~ 2016년 2월: 이엘아이즈통신 선임연구원
 2016년 9월 ~ 현재: 한화시스템 전문연구원
 ※관심분야: 디지털 레이다, RF 회로 설계, 인테나 측정



오혁준(Hyukjun Oh)

1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
 1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
 1999년 9월 ~ 2000년 12월: 미국 Stanford University 박사후과정
 2001년 1월 ~ 2004년 8월 미국 퀄컴 QCT 3GPP 사업부
 2004년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수
 ※관심분야: 통신신호처리, VLSI 신호처리, 인공지능데이터신호처리