

위성 탑재 영상레이다 송신기의 IQ 불균형 저감을 위한 DAC를 이용한 송신 신호 설계 기법에 관한 연구

이영복^{*,1)} · 강태웅¹⁾ · 이현익¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 국방우주기술훈터

A Study on Transmission Signal Design Using DAC to Reduce IQ Imbalance of Satellite-Mounted Synthetic Aperture Radar Transmitter

Young-Bok Lee^{*,1)} · Tae-Woong Kang¹⁾ · Hyon-Ik Lee¹⁾

¹⁾ Defense and Space Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 August 2021 / Revised 14 January 2022 / Accepted 21 March 2022)

Abstract

The on-board processor of satellite synthetic aperture radar(SAR) generates transmission signal by digital signal processing, converts it into an analog signal. At this time, the transmission signal generated from the baseband requires the frequency modulation to convert it to the high-frequency band in order to improve the stability. General frequency modulation method using local oscillator(LO) causes IQ imbalance due to phase error/magnitude error and these error reduce performance of SAR. To generate transmission signal without phase/magnitude error, this paper suggests design method of the frequency modulation method using digital to analog converter(DAC) at on-board SAR. For design, this paper analyzes the characteristic of DAC mode and uses pre-compensation filter. To analyze the proposed method performance, performance index are compared with IQ imbalance signals. This method is suitable for on-board SAR using fast sampling DAC and has the advantage of being able to solve IQ imbalances.

Key Words : Synthetic Aperture Radar Transmitter(합성 개구 레이더 송신기), IQ Imbalance(IQ 불균형), Digital to Analog Converter(DAC 변환), Local Oscillator(국부 발진기)

1. 서론

영상레이다는 기상 조건이나 주야간 관계없이 지상 영상을 고해상도로 획득 할 수 있는 능동형 레이더이다

다. 영상레이다에 탑재된 온 보드 프로세서는 임무 수행을 위해 필요한 송신신호를 생성하고 이를 안테나를 통해 방사 후 목표물에 반사되어 들어오는 신호를 수신한다^[1]. 송신 신호로 사용하는 칩 신호는 임무에 적합한 대역폭, 주파수 및 위상을 갖도록 생성되고 아날로그 신호로 변환되어 표적으로 방사된다. 이때, 송신 신호를 생성하는 과정에서 기저대역에서 생성된

* Corresponding author, E-mail: ybok@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

신호는 노이즈에 대한 민감도나 발전에 대한 안정도 향상을 위해 고주파 대역까지 올려주는 주파수 변조가 필요하다^[2]. 일반적인 주파수 변조 과정은 주로 국부 발진기(Local Oscillator, LO)를 통해 생성된 신호가 원 신호와 결합되어 수행된다. 국부 발진기는 위상 고정 루프, 전압조정발진기, 체배기, 위상 천이기와 혼합기로 구성되어 안정된 저주파수를 체배시켜 일정한 고주파수를 공급하여 변조할 수 있는 장점이 있다^[3]. 하지만 위성 탑재 레이더에서는 우주 환경의 제약으로 인해 LO 소자 선정에 대한 제한이 있고 소자의 비선형적인 특성으로 인해 노이즈가 포함되어 추가 필터가 요구되기도 한다^[4]. 또한, 국부 발진 주파수가 생성되는 과정에서 발생하는 내부 위상 천이기의 열화나 오작동으로 인한 오차는 신호의 IQ 불균형 현상을 발생시킨다^[5]. 이러한 IQ 불균형은 위성 탑재 영상레이더의 시스템 성능을 감소시키는 원인이 된다^[5]. 이와 같은 이유로 주파수를 변조를 고려할 때 소자 선정이 중요하고 IQ 불균형을 최소화하여 설계하는 방법이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 IQ 불균형 저감을 위해 국부 발진기를 이용하는 일반적인 주파수 변조 기법과 달리 위성 탑재 영상레이더에 적합한 DAC 소자의 특성을 이용하여 주파수를 변조시키는 방식을 제시한다. 또한 DAC 소자 특성을 사용함으로써 나타나는 감쇄 영향을 보상하기 위한 전처리 보상 필터를 설계 방법을 함께 제시한다. 이는 사용하는 소자의 수를 감소시킴으로써 비용과 부피 및 우주환경 해석을 줄이는 동시에, IQ 불균형을 발생시키는 원인을 제거함으로써 영상레이더의 성능을 향상시키는 장점이 있다. 제시된 기법의 성능을 검증하기 위해 IQ 불균형이 발생한 경우의 성능 열화를 확인하고 IQ 불균형이 없는 경우에서의 성능을 함께 제시한다.

2. 송신단 IQ imbalance 성분

일반적으로 위성 탑재 레이더에서 사용되는 기저대역의 칩 신호는 동위상 성분과 직교위상 성분으로 다음과 같이 표기된다.

$$s_{base}(t) = I(t) + Q(t) \quad (1)$$

기저대역의 칩 신호는 이상적인 국부 발진기의 경

우 다음과 같이 국부발진기의 주파수(f_{LO})를 갖는 코사인, 사인이 믹스되어 주파수 변조가 가능하다.

$$s_{IF}(t) = I(t)\cos(2\pi f_{LO} t) + Q(t)\sin(2\pi f_{LO} t) \quad (2)$$

하지만 국부 발진기 내부의 위상 천이기의 위상과 진폭 오차는 IQ 불균형 현상을 야기한다.

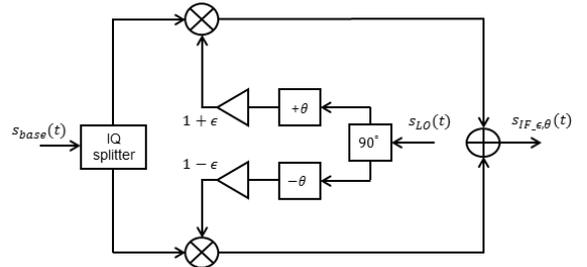


Fig. 1. IQ imbalance in transmitter

Fig. 1은 체배된 주파수가 위상 천이기를 통과하면서 발생하는 오차를 나타낸다. Fig. 1에서 ϵ 은 크기 오차 성분을 나타내고 θ 는 위상 오차 성분을 나타낸다. 이러한 성분들이 기저 대역 신호에 곱해질 경우 식 (2)는 다음과 같이 변하게 된다^[6].

$$s_{IF,\epsilon,\theta}(t) = I(t)(1+\epsilon)\cos(2\pi f_{LO} t + \theta) + Q(t)(1-\epsilon)\sin(2\pi f_{LO} t - \theta) \quad (3)$$

식 (3)과 같이 동위상 성분과 직교위상 성분은 서로 간섭을 일으켜 신호를 훼손시키고 영상레이더의 성능을 감소시킨다.

3. DAC를 이용한 주파수 변조

본 논문에서는 DAC 소자의 특성만을 이용해 주파수를 변조시켜 송신 신호를 설계하는 기법을 제시한다.

본 절에서는 DAC mode의 특성을 제시하고 DAC mode를 적용한 송신 신호를 설계 하는 기법을 제시한다.

3.1 DAC mode

기본적으로 디지털 단에서 생성된 신호가 안테나에서 방사되기 위해서는 디지털에서 아날로그 신호로의

변환이 필요하다. DAC 변환은 디지털 값에 해당하는 아날로그 값을 DAC의 클럭 시간마다 일정 시간씩 출력시킴으로서 이루어진다. 이때 각 디지털 신호에 대한 아날로그 값을 유지하는 시간과 형태에 따라 송신 신호의 출력 특성이 달라진다. 각 시간 유지에 따른 변환 모드에는 대표적으로 NRZ(No Return to Zero), NRTZ(Narrow Return To Zero), RTZ(Return To Zero), RF(Return to complement with reset pulse)가 존재한다^[7].

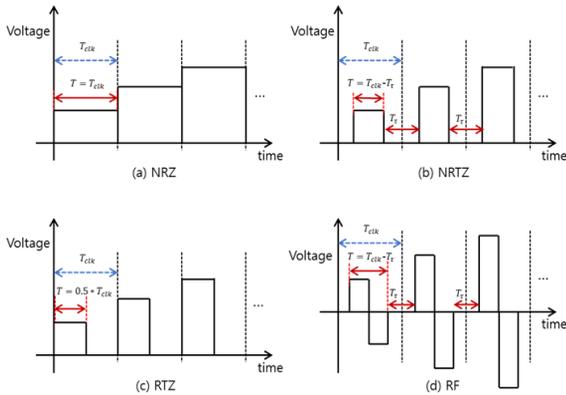


Fig. 2. Analog output signal

Fig. 2a와 같이 NRZ 모드의 경우 DAC 클럭 시간 내에서 아날로그 값을 일정하게 유지한다. Fig. 2b의 NRTZ 모드의 경우 DAC 클럭 시간 내에서 $T_{clk} - T_r$ 동안 값을 출력하는 특징을 갖는다. 여기서, T_{clk} 는 클럭 주기, T_r 는 펄스가 재형성되는데 걸리는 시간으로 시스템마다 다르다. Fig. 2c의 RTZ 모드의 경우 샘플링 클럭의 반주기 동안 아날로그 값을 출력하고, Fig. 2d의 RF 모드는 $T_{clk} - T_r$ 시간 내에서 동일한 아날로그 값을 반씩 반전시켜 출력한다. 이러한 시간영역에서의 특징들은 주파수 영역에서도 모두 다른 특징을 보인다.

NRZ 모드의 경우, 주파수 영역에서의 최대 출력 전력을 수식화하면 다음과 같다^[8].

$$P_{out}(X) = 20 \log_{10} \left[\frac{|\text{sinc}(\pi X)|}{0.893} \right] \quad (4)$$

여기서, $X = F_{out}/F_{clk}$ 으로 표준화된 출력 주파수를 나타내고 $X = 0.5n$, $n = 1, 2, 3 \dots$ 로 나이키스트 영역이 구분된다. 출력 전력의 특성을 분석해 보면 Fig.

3에서와 같이 1st 나이키스트 영역에서 전력 감쇠가 적으나, 2nd 및 그 이상의 나이키스트 영역에서는 노치의 영향이 발생하고 감쇠 영향이 증가함을 확인할 수 있다.

NRTZ 모드의 경우, 주파수 영역에서의 최대 출력 전력을 수식화하면 다음과 같다^[8].

$$P_{out}(X) = 20 \log_{10} \left[\frac{|k \text{sinc}(k\pi X)|}{0.893} \right] \quad (5)$$

where, $k = \frac{T_{clk} - T_r}{T_{clk}}$, $X = F_{out}/F_{clk}$

Fig. 3에서와 같이 주파수 영역에서 출력 전력의 특성을 보면 NRZ 모드와 유사하지만 2nd 영역까지의 전력 감쇠도가 더 우수함을 확인할 수 있고 있다.

RTZ 모드의 경우에는 주파수 영역에서의 최대 출력 전력을 수식화하면 다음과 같이 표현할 수 있다^[8].

$$P_{out}(X) = 20 \log_{10} \left[\frac{|0.5 \text{sinc}(0.5\pi X)|}{0.893} \right] \quad (6)$$

where, $X = F_{out}/F_{clk}$

Fig. 3에서와 같이 주파수 영역에서 출력 전력의 특성을 보면 RTZ 모드에서는 노치영역이 4th 나이키스트 영역으로 이동하여 낮은 나이키스트 존에서 노치의 영향이 없으나 다른 모드들 보다 전력 감쇠가 심해짐을 알 수 있다.

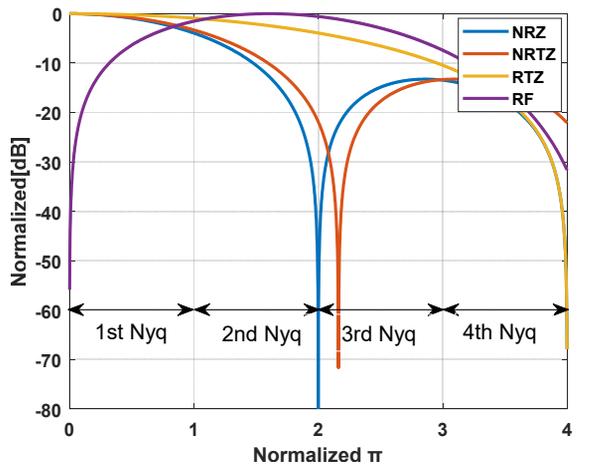


Fig. 3. Normalized $\text{dB}(P_{out})$ vs normalized output frequency(X) at 1.0 Gsps, $T_r = 75$ ps

마지막으로 RF 모드의 경우, 주파수 영역에서의 최대 출력 전력을 수식화하면 다음과 같다^[8].

$$P_{out}(X) = 20 \log_{10} \left[\frac{\left| k \operatorname{sinc} \left(\frac{k\pi X}{2} \right) \sin \left(\frac{k\pi X}{2} \right) \right|}{0.893} \right] \quad (7)$$

where, $k = \frac{T_{clk} - T_{\tau}}{T_{clk}}$, $X = F_{out} / F_{clk}$

Fig. 3에서와 같이 주파수 영역에서 출력 전력의 특성을 보면 RF 모드에서는 노치영역이 4th 나이키스트 영역 이상에 있고 2nd, 3rd 영역에서 다른 모드보다 전력 감쇠가 적다.

3.2 DAC를 이용한 송신 신호 설계 방법

나이키스트 샘플링 이론에 따라 신호는 샘플링 될 때 샘플링 주기로 이미지 성분이 발생한다. 같은 원리로 DAC 변환을 위한 인터폴레이션 과정에서도 이미지 신호가 발생하게 된다^[9]. 본 논문에서는 이러한 이미지 성분과 DAC 모드의 주파수 영역에 분포된 전력 특성 그리고 필터를 이용하여 기존 IQ 불균형 현상을 야기하는 방법을 사용하지 않는 주파수 변조 효과를 얻을 수 있다. 현 저궤도 SAR 위성은 신호 송신을 위해 L-band에서 생성된 칩 신호를 4채배 하여 X-band에서 방출 하는 것이 일반적이다^[10]. 이에 칩 발생기에서는 L-band에 해당하는 칩 신호를 생성할 필요가 있다. 현 우주급 DAC clock 주파수를 고려했을 때 DAC RF 모드의 2nd 또는 3rd가 적합하다. 본 논문에서는 주파수 변조를 위해 위성 탑재 레이더에 적합한 RF 모드의 3rd 나이키스트 영역을 이용하며, 제시하는 방법을 통해 2nd 나이키스트 영역에서도 적용 가능하다. DAC 모드의 경우, DAC 소자를 설정하여 사용 가능하지만 주파수 대역을 갖는 칩 신호를 사용하는 위성 탑재 영상 레이더에 적용하기 위해서는 성능에 영향을 미치는 Fig. 3에서의 출력 전력 왜곡 현상을 보상할 필요가 있다. 이를 위해 디지털 단에서 출력을 DAC로 전달하기 전에 왜곡을 보상할 수 있는 전처리 보상 필터를 함께 제시한다.

Fig. 4는 제안하는 칩 발생기의 구조를 나타낸다. 그림과 같이 칩 발생기는 임무에 적합한 디지털 파라미터를 입력 받아 디지털 칩을 생성하고, DAC 왜곡에 대한 보상을 통과 후, DAC 소자에서 RF 모드로 아날로그 변환되어 출력된다. DAC 후단에는

출력되는 이미지 신호 중 3rd 나이키스트 영역의 신호만을 통과시키는 일반적인 아날로그 대역통과 필터가 붙는다.

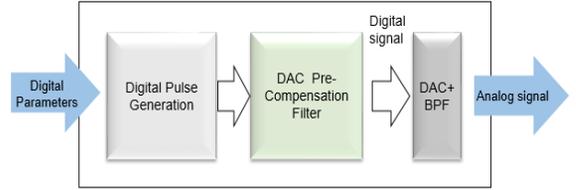


Fig. 4. Waveform generation system with DAC pre-compensation

DAC 왜곡 전처리 보상기 설계를 위해서는 DAC RF 3rd 나이키스트 영역에서의 주파수 응답의 크기를 1st 나이키스트 존에서 역으로 필터링 할 수 있는 계수로 산출한다. 예를 들어, 필터 계수 산출을 위해 탭 길이를 100, Bit수를 12로 가정하는 경우, Fig. 3 RF 모드 3rd 나이키스트 영역의 응답을 역수화하고 푸리에 역변환 함으로써 필터 계수를 산출 할 수 있다.

Fig. 5는 예제와 같이 산출된 필터 계수와 기저대역에서 사전 보상되어 크기가 기울기를 갖는 칩 신호를 나타낸다.

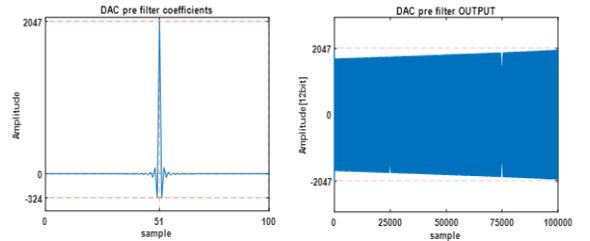


Fig. 5. DAC pre-compensation filter

Fig. 6은 위와 같이 설계된 왜곡 보상 필터가 있을 경우와 없을 경우의 DAC 칩 신호 출력을 나타낸다. 보상 필터가 없을 경우 칩 신호는 Fig. 3의 전력 감쇠 특성에 따라 왜곡되어 출력된다. 반면에 설계된 왜곡 보상 필터를 통과할 경우 왜곡이 보상된 신호가 출력됨을 확인할 수 있다. 전처리 필터를 통과하여 보상된 DAC 출력 신호는 3rd 나이키스트 영역만의 신호를 사용하기 위해 아날로그 대역통과 필터를 통과하게 되고 원하는 L-band의 칩 신호를 생성할 수 있다.

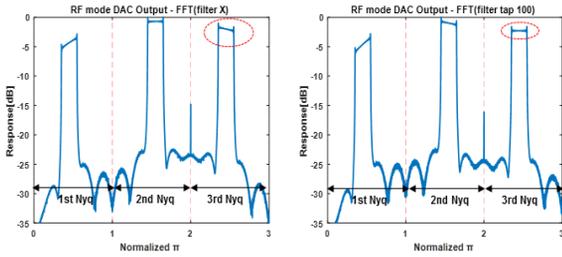


Fig. 6. DAC pre-compensation filter output

Table 1. Comparison between non-compensation and compensation

Apply	Band Width	Distortion[dB]
Non-comp	0.3π	1.7179
Comp	0.3π	0.0155

Table 1은 Fig. 3의 DAC 주파수 응답에 의한 신호 왜곡이 전처리 보상 필터를 통해 최종 출력에서 어느 정도 잔존하게 되는지를 나타낸다. 왜곡은 피크-피크로 측정되었고, 탭 길이가 19인 FIR필터를 이용하여 왜곡 보상을 수행하는 경우, 최종 출력에서 잔존하는 왜곡의 크기가 약 1.7 dB 개선됨을 확인할 수 있다.

4. 제안한 방법의 성능 분석

성능 분석을 수행하기 위해 영상레이다 칩 신호의 파라미터를 가정하여 제안된 방법에 따라 송신 신호를 L-band에서 설계하고 수신 신호는 추가 왜곡 없이 수신됨을 가정한다. 성능 검증을 위해서는 영상레이다의 성능 지표로 활용되는 IRF(Impulse Response Function) 특성인 PSLR(Peak Side Lobe Ratio), ISLR(Integrated Side Lobe Ratio)을 이용한다^[11].

본 논문에서는 제안한 방법으로 설계된 과형 생성기의 성능을 검증하기 위해 IQ 불균형이 발생하는 상황을 가정하여 식 (3)의 위상 오차 성분인 θ 을 변동시켜 IQ 위상 불균형이 반영된 칩 신호의 IRF 특성, 식 (3)의 크기 오차 성분인 ϵ 을 변동시켜 IQ 크기 불균형이 반영된 칩 신호의 IRF 특성을 제안한 방법과 비교 분석 한다.

성능 분석을 위해 사용되는 칩 신호의 파라미터는 Table 2와 같다.

Table 2. The parameter of chirp signal

Chirp parameters	Value
Bandwidth	0.3π
Pulse duration	100 us

다음은 제안한 방식의 성능 검증을 위해 수행한 IRF분석 결과이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 0~90도 만큼의 IQ 위상 불균형이 발생 했을 경우의 PSLR과 ISLR 특성을 나타낸다.

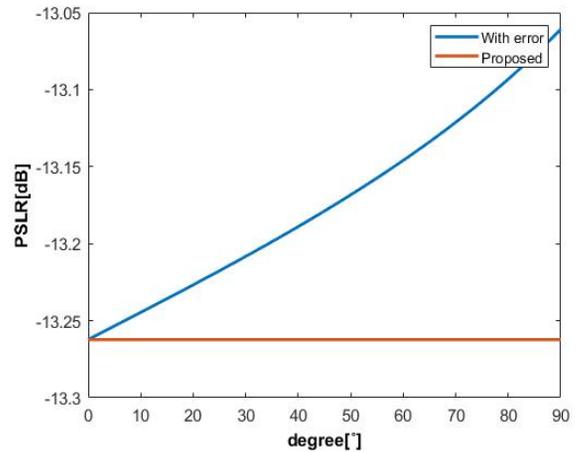


Fig. 7. The PSLR of IQ phase imbalance at 0~90 degree difference

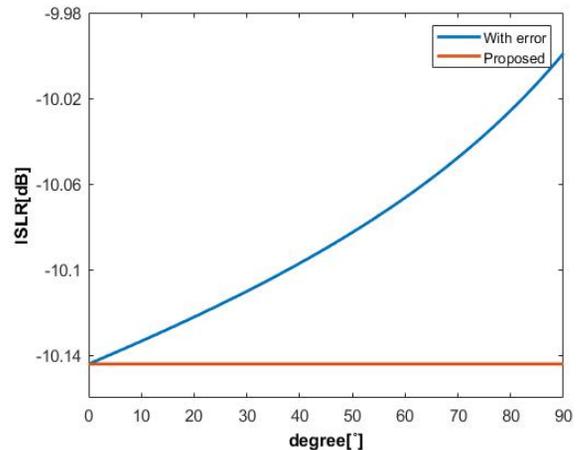


Fig. 8. The ISLR of IQ phase imbalance at 0~90 degree difference

Fig. 9와 Fig. 10은 0~10 dB 만큼의 IQ 크기 불균형이 발생했을 경우의 PSLR과 ISLR 특성을 나타낸다.

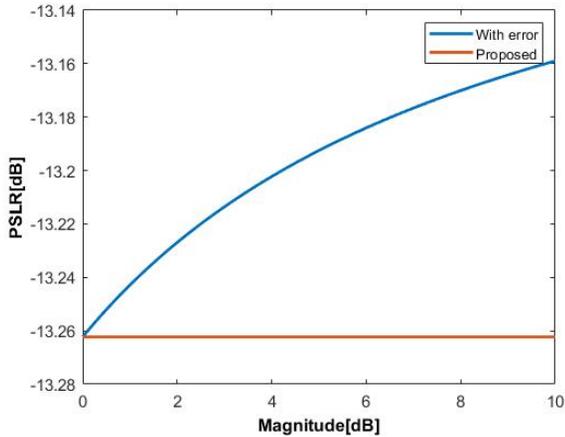


Fig. 9. The PSLR of IQ magnitude imbalance at 0~10 dB difference

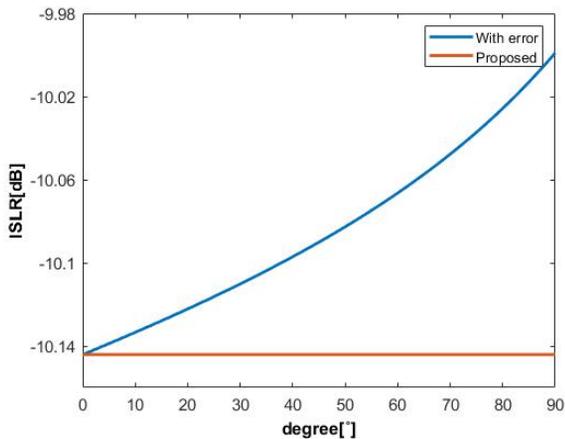


Fig. 10. The ISLR of IQ magnitude imbalance at 0~10 dB difference

Table 3. The IRF comparison of IQ imbalance output and proposed method output at worst case

IRF factor	IQ Phase imbalance	IQ Magnitude imbalance	Ideal	Proposed
PSLR [dB]	-13.0608	-13.1604	-13.2623	-13.2623
ISLR [dB]	-9.999	-10.0831	-10.1442	-10.1442

IRF 성능분석 결과에서 IQ 불균형은 위상이나 크기 오차가 클수록 성능이 감소됨을 확실히 할 수 있고 복합적으로 오차가 발생할 경우 성능 감소가 커짐을 예상할 수 있다.

Table 3은 worst case에서의 IRF 성능지표 비교를 나타낸다.

수치적인 측면에서 시뮬레이션 결과 중 worst case로 위상 오차의 경우 Ideal case 대비 PSLR: 0.2015 dB, ISLR: 0.1452 dB, 크기 오차의 경우 Ideal case 대비 PSLR: 0.1018 dB, ISLR: 0.0611 dB 성능 저하를 보였다. 0.1 dB 정도의 값은 수치적으로 작으나 위성 시스템에서 정확한 성능 분석을 위한 경우나 성능 규격을 만족시키기 위해서와 같이, 경우에 따라 영향성이 있다. 본 논문에서는 송신단 왜곡만 고려하였기에, 수신단에서 발생하는 왜곡이 함께 고려된다면 왜곡으로 인한 성능 열화는 더 악화될 것이다. 제안된 방법의 경우, 본문에서 언급한 IQ 불균형을 유발시키는 LO 소자를 사용하지 않고 DAC 기법을 이용한 주파수 변조를 사용하였기에 위와 같은 오차에 따른 성능지표 변화가 없다. 즉, IQ 불균형이 발생하지 않는 소자를 이용하여 설계되므로, 기존 설계 방법보다 성능이 확보되고 위와 같은 IQ 불균형에 저감 효과는 분명하다.

5. 결론

본 논문에서는 위성 탑재 영상레이더의 IQ 불균형 영향을 해소한 DAC를 이용한 송신 신호 설계 기법과 성능 분석을 기술하였다.

IQ 불균형의 원인과 DAC 모드 특성에 대해 분석하고 DAC RF 모드를 이용하여 주파수를 변조시키는 방법에 제시하였으며 DAC RF 모드 변조로 인한 출력 파워 감쇠 영향을 보상하기 위한 필터 설계 방법을 함께 제시하여 영상레이더를 위한 송신 신호 구현 방안을 확인하였다.

제시된 방법으로 RF 모드에서 왜곡이 보상된 칩 신호가 생성됨을 확인하였다. 또한, IQ 불균형을 갖는 신호의 IRF 특성을 분석함으로써 제안하는 방법의 IQ 불균형 영향 저감 성능을 입증하였다.

본 논문에서 제안한 영상레이더에서의 송신 신호 설계 기법을 활용하기 위해서는 높은 DAC 샘플링 주파수를 요구하나 이는 성능이나 효율 측면에서 위성 탑재 영상레이더에 적합하다. 우주인증 소자 선정의

어려움을 개선하고 IQ 불균형을 발생시키는 원인을 제거함으로써 영상레이더의 성능을 향상시키는 우수성이 있다. 이에 따라, 제안된 방식을 차기 위성 개발에 적용하여 활용할 계획이다.

References

- [1] Ian G. Cuming, Frank H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data," ARTECH HOUSE, Boston, America, pp. 20-30, 2005.
- [2] E. H. Armstrong, "A Method of Reducing Disturbances in Radio Signaling by a System of Frequency Modulation," in Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Vol. 24, No. 5, pp. 689-740, May 1936.
- [3] J. E. Brittain, "The Evolution of Electrical and Electronics Engineering and the Proceedings of the IRE: 1913-37," in Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 6, pp. 837-856, June 1989.
- [4] E. J. Baghdady, "Frequency-Modulation Interference Rejection with Narrow-Band Limiters," in Proceedings of the IRE, Vol. 43, No. 1, pp. 51-61, Jan. 1955.
- [5] S. Y. Kim, J. B. Sung, J. H. Lee and D. W. Yi, "Analysis on Spectral Regrowth of Bandwidth Expansion Module by Quadrature Modulation Error in Digital Chirp Generator," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science Vol. 21, No. 7, pp. 761-768, 2010.
- [6] B. Razavi, "RF Microelectronics," Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1988.
- [7] Khramov, Konstantin & Romashov, V., "Operational Modes of High-Speed DACs: Analysis and Mathematical Modeling," Journal of Physics: Conference Series. 2018.
- [8] "EV12DS130xZP Datasheet," e2v Technologies.
- [9] Harris, Fredric J., "Multirate Signal Processing for Communication Systems," Prentice Hall, 2004.
- [10] "ITU Radio Regulations 2012," Retrieved 18 June 2014.
- [11] D. S. Kim, J. P. Kim, J. H. Lee, "IRF Performance Prediction by Analyzing of Amplitude and Phase Errors for the Wideband Chirp Signal," Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences. Vol. 44, pp. 131-138, 2016.