

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(2), 131-138(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.2.131

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

광대역 칩 신호의 진폭 및 위상오차 분석을 통한 IRF 성능 분석

김동식*, 김종필**, 이종환***

IRF performance prediction by analyzing of amplitude and phase errors for the wideband Chirp signal

Dong-Sik Kim*, Jong-Pil Kim** and Jong-Hwan Lee***

LIGNEX1* , ** , ADD***

ABSTRACT

In this paper, we studied the IRF performances of the chirp signal used in the SAR system. The most important factors that degrade IRF performances are amplitude and phase errors. Each factor can be represented to linear, quadratic, random and ripple terms. That can be extracted by a quadratic polynomial curve fitting of chirp waveform. We analyzed the IRF performances by the error terms and supposed the minimum value of RF non-linearity to meet the specification of the PSLR and ISLR.

초 록

본 논문에서는 SAR (Synthetic Aperture Radar)에 사용되는 광대역 칩 신호에 대한 IRF (Impulse Response Function) 성능을 분석하였다. 영상 레이더의 칩 신호에서 영상품질에 크게 영향을 주는 인자는 진폭과 위상으로 크게 분류할 수 있다. 이 값들을 2차 다항식 커브 피팅을 사용하여 선형, 직교, 랜덤 그리고 리플 이득으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 인자들에 의한 IRF 영향을 분석하고, PSLR(Peak Side Lobe Ratio) 및 ISLR(Integrated Side Lobe Ratio)의 규격을 만족하기 위한 RF 비선형성에 의한 오차 값들의 최소치를 제안하였다.

Key Words : SAR(영상레이더), PSLR(최대부엽레벨비), ISLR(통합부엽레벨비)

1. 서 론

최근 감시 정찰 레이더의 중요성이 대두되면서, 국내에서도 영상레이더 (SAR, Synthetic Aperture Radar)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 위성에 탑재하여 운영하는 영상레이더와 항공기에 탑재하여 운영하는 항공용 영상레이

더에 대한 연구가 대표적이다[1][2][3]. 영상레이더의 경우 영상품질을 판단하기 위해서 칩 신호의 품질을 분석하는 것이 중요하며, 이에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다[4]. 칩 신호의 품질은 IRF (Impulse Response Function) 를 통해 분석 가능하고, IRF 열화에 가장 크게 영향을 미치는 성분들은 송수신 시스템의 비선형성 및

† Received : October 7, 2015 Revised : December 28, 2015 Accepted : December 30, 2015

* Corresponding author, E-mail : dongsik.kim@lignex1.com

불균형에서 기인하는 진폭과 위상 오차이다 [4][5][6]. 첩 신호의 성분은 고차 다항식 커브 피팅을 사용하여 각각 선형, 직교, 랜덤 그리고 리플이득 성분으로 구분할 수 있다. 커브 피팅 결과는 $A = e_0 + e_1t + e_2t^2 + e_3t^3 + e_4t^4 + e_5t^5$ 이고, 3 차항 이상의 계수값은 RMS(root mean square) 값을 취하여 랜덤오차로 취급할 수 있다 [4].

여기에서, 영차항의 값이 1이 되도록 정규화하면, 진폭의 경우 $A' = 1 + a_1t + a_2t^2$ 으로, 위상의 경우에는 $P' = 1 + b_1t + b_2t^2$ 표현할 수 있다. 각각의 항목들은 리플 이득을 포함할 수 있으며, 정현파함수 (Sin)로 표현 할 수 있다[7].

본 연구에서는, 각 성분들에 대한 IRF 성능 영향성과 개선을 위한 분석을 수행 하였고, 이를 측정결과와 비교하여 검증하였다. 특히, 하드웨어의 비선형성에 의한 첩 신호의 왜곡 정도를 파악하고, IRF 성능을 만족하기 위한 진폭과 위상의 오차 설계치를 제시하였다.

본문의 2.1 절에서는 기존의 첩 신호의 진폭, 위상오차 항목들을 분석하기 위한 기법을 기술하였으며, 2.2 절에서는 본 연구에서 분석한 진폭, 위상 오차값들의 예측 및 분석 기법을 기술하였다. 2.3 절에서는 분석한 기법과 실제 측정 결과와의 유사성 확인을 통하여 분석 기법의 유효성을 검증 하였으며, III 장에서 결론을 내린다.

II. 본 론

2.1 첩 신호 분석 기법

영상레이더에서 높은 품질의 영상 해상도를 위해 광대역의 첩 신호를 사용하고, 이는 펄스폭 내에서 시간에 따라 주파수가 증가 또는 감소하는 특성을 가지고 있다. 광대역 첩 신호는 목적에 따라 수신 측면에서 첩 신호 연관성 분석 기법을 사용하여 대역폭 감소와 데이터 용량을 줄일 수 있는 부가적인 장점을 얻을 수 있다. 이러한 첩 신호의 대역폭은 거리방향 해상도와 연결되며, 더 높은 해상도를 얻기 위해서는 더 넓은 첩 대역폭이 필요하다. 하지만, 대역폭이 넓을수록 하드웨어의 오차로 인해 발생하는 오차 성분들이 증가하게 되며, 이에 대한 분석 및 보상이 필수적이다. 최근 측정 결과를 바탕으로 첩 신호의 진폭과 위상 오차 성분을 분석하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있고, 대표적인 기법이 2차 다항식 피팅 기법이다[4]. Fig. 1에서 보듯이 이상적인 첩 신호를 하드웨어 장치에 입력하게 되면, 하드웨어의 비선형성에 의해 진폭과 위상이

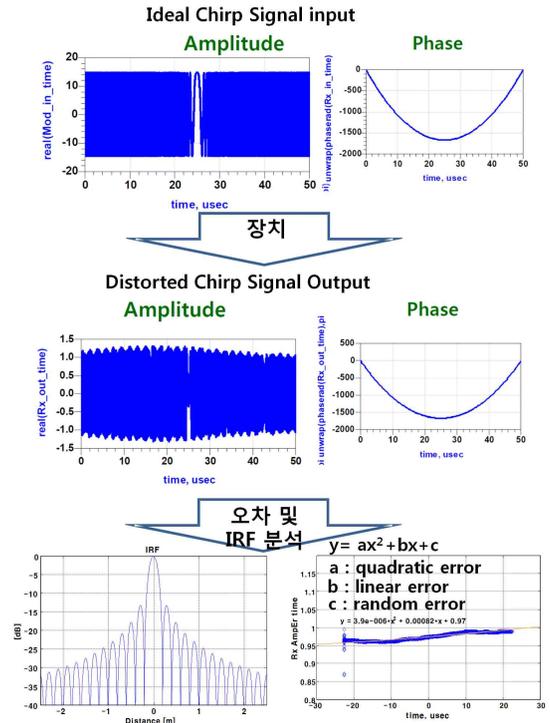


Fig. 1. Chirp signal analysis by the measured data

왜곡되며, 그 정도를 2차 다항식으로 표현하여, 선형, 직교, 랜덤 오차를 도출할 수 있다. 측정된 첩 신호의 IRF를 분석하면, PSLR과 ISLR값이 이상적인 값에 비해 저하됨을 알 수 있다. 하지만, 선형, 직교, 랜덤 항목 각각들이 PSLR과 ISLR값에 미치는 정도를 파악하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 오차 항목들이 IRF 성능에 미치는 영향을 분석하고, 측정이 아닌 설계단계에서부터 시스템 규격을 만족하기 위한 오차 값들의 한계치를 설정하고, 개선할 수 있는 방안을 제시하였다.

2.2 제안된 첩 신호 성능 예측 기법

본 연구는 영상레이더에 적용되는 첩 신호가 하드웨어에 의해 왜곡되는 정도를 예상하고, 왜곡에 따른 IRF 성능을 미리 예측할 수 있는 방안이다. 하드웨어에 의한 왜곡 정도를 2차 다항식으로 모델링하고, 모델링 결과가 실제 측정결과와 유사성을 가지고 있다면, 2차 다항식에 의한 오차 값으로 하드웨어의 규격을 정의 할 수 있을 것이다. 본 연구에서 하드웨어에 의해 왜곡되는 거리방향 IRF 성능의 규격치는 이상적인 값의 10% 이내로 정의하여, -12 dB 이하의 PSLR

과 -9.5 dB 이하의 ISLR 값을 목표로 정의하였다. 이 값은 레이더의 해상도와 요구도에 따라 달라질 수 있다. 먼저, 일반적인 칩 신호는 시간에 따라 주파수성분이 증가하는 형태를 가지게 되며, 여기에 진폭오차와 위상오차가 더해지게 되는 형태가 된다. 먼저 진폭과 위상 오차를 간단하게 2차 함수형태로 모델링하고 3차 이상항목에 대해서는 모두 랜덤 항목으로 정의하였다. 기본적인 칩 신호와 본 연구에서 사용한 모델링 수식은 아래와 같다[6].

$$\begin{aligned}
 n, t) &= \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp j(2\pi f_c t + \pi m t^2) \\
 &= \text{time}, \quad = \text{Pulse length} \\
 &- T_p/2 \leq \hat{t} \leq T_p/2
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$S_o = A(e) \times S_x(n, t) \times \phi(e) \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 A(e) &= A_1(\sin 2\pi f_{\text{ripple}} t) \\
 &+ A_{\text{lin}} t + A_{\text{quad}} t^2 + A_{\text{rnd}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 \phi(e) &= \exp j(\phi_1 \sin 2\pi f_{\text{ripple}} t) \\
 &\times \exp j(\phi_{\text{lin}} t + \phi_{\text{quad}} t^2 + \phi_{\text{rnd}})
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기에서, lin 은 선형, quad 는 직교, rnd 는 랜덤오차를 의미한다. $S_x(n, t)$ 는 이상적인 칩 입력 신호이며, S_o 는 장치출력에서 오차가 포함된 신호이다. f_c 는 중심주파수, 그리고 m 은 칩 비율을 의미한다. $A(e)$ 는 진폭오차이며, $\phi(e)$ 는 위상오차이다.

2.2.1 진폭오차 분석

칩 신호의 대역내 진폭 오차가 IRF 성능에 미치는 영향성을 분석하면, 이상적인 칩 신호의 경우, 아래 Fig. 2와 같이 PSLR은 -13.26 dB이며,

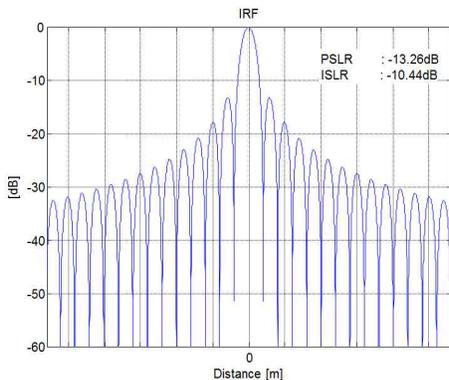


Fig. 2. IRF characteristic of ideal chirp

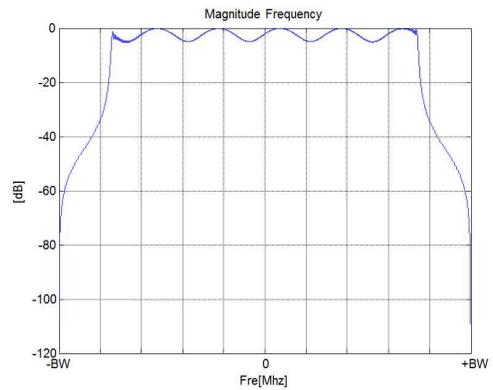


Fig. 3. Chirp spectrum by amplitude error (F_{ripple}: 5 and ripple : 5dB)

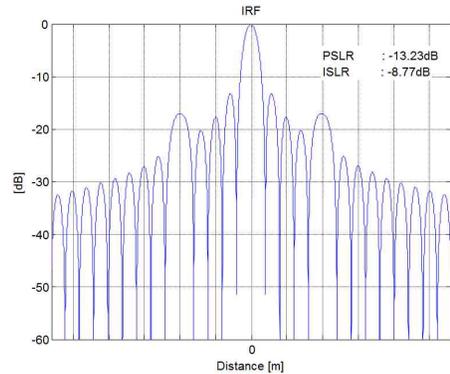


Fig. 4. IRF characteristic with amplitude error (F_{ripple}: 5 and ripple : 5dB)

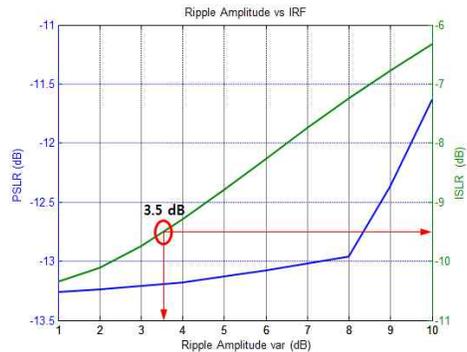


Fig. 5. IRF performance against for amplitude ripple error

ISLR은 -10.44 dB이다. 하지만 실제의 경우에는 진폭의 왜곡이 발생하며 이에 대한 영향성을 분석하면 다음과 같다. 우선, 대역 내 리플에 대한 영향은 리플의 크기와 개수에 영향을 받게 된다.

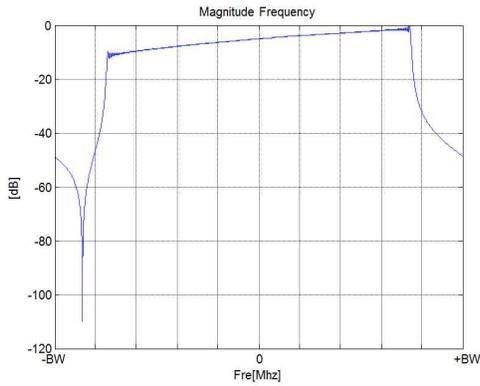


Fig. 6. Chimp spectrum with 10dB linear amplitude error

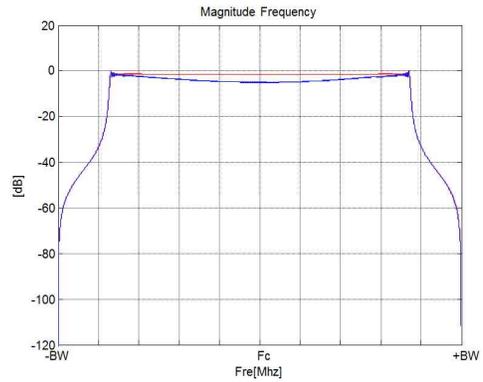


Fig. 8. Chimp spectrum with 10dB quadratic amplitude error

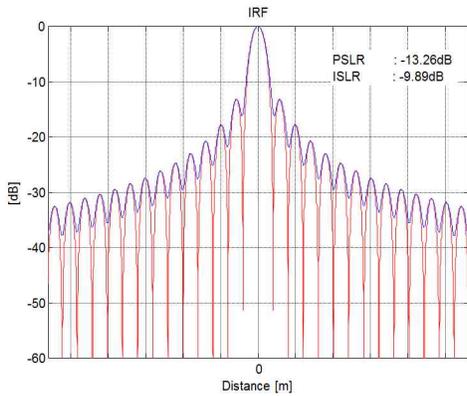


Fig. 7. IRF characteristic with 10dB linear amplitude error

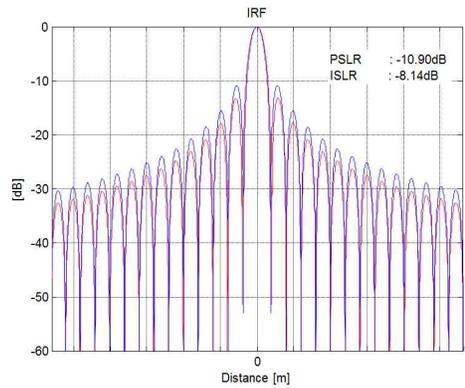


Fig. 9. IRF characteristic with 10dB quadratic amplitude error

Fig. 3과 같이 대역 내 리플의 개수가 5개이고, 리플의 크기 오차가 5 dB 인 경우 IRF 특성은 Fig. 4에서 보듯이 리플의 개수와 동일한 5번째 부엽이 증가하게 되며, ISLR이 증가하게 된다.

결국 대역 내 진폭에 대한 IRF 변화량은 Fig. 5와 같으며, -9.5 dB이하의 ISLR 값을 갖기 위해서는 리플 진폭의 크기가 3.5 dB 이내여야 한다.

다음은 대역 내에서 선형 오차만 포함하고 있는 경우이며, 이때 첩 파형은 Fig. 6과 같다. 이러한 경우 IRF 결과를 보면, Fig. 7과 같이 부엽사이의 깊이가 줄어들게 되며, 결과적으로 PSLR은 크게 변화가 없으나, 부엽사이의 깊이가 줄어들어 ISLR 값의 저하를 가져오게 된다.

진폭에서 IRF 성능에 가장 크게 영향을 미치는 것이 바로 비선형성에서 기인하는 직교 항목이다. Fig. 8과 같이 대역 내에서 직교항목의 진폭이 10 dB 변화하면, PSLR값이 -10.9 dB까지

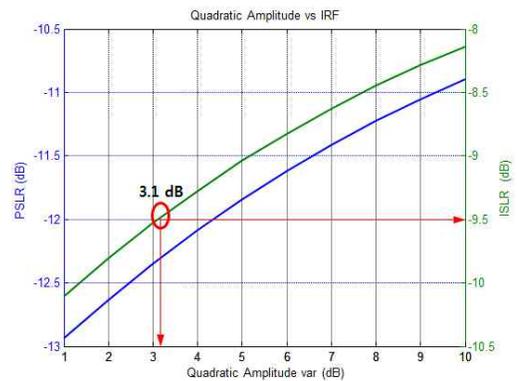


Fig. 10. IRF performance against for quadratic amplitude error

증가하게 됨을 알 수 있다.

Figure 9와 같이 직교 성분이 커질수록 부엽의 크기가 증가하게 되어 결국 PSLR과 ISLR값을

증가시키게 된다.

Figure 10은 직교 진폭 변화에 따른 PSLR 과 ISLR 이다. -12 dB 이내의 PSLR과 -9.5 dB이내의 ISLR 값을 갖기 위해서는 대역 내 진폭의 변화량이 3.1 dB 이내여야 한다.

IRF 성능은 두 신호의 유사성에 기인하므로, 랜덤성분과 절대 진폭 크기에 대해서는 영향성이 아주 미미하다. 결과적으로 IRF성능에 가장 크게 영향을 주는 진폭오차는 대역 내 리플 이득과 직교 항목임을 알 수 있다.

2.2.2 위상오차 분석

IRF 성능에 영향을 미치는 것 중 또 다른 요인이 바로 위상의 오차이다. 위상의 변화량도 진폭과 동일하게 펄스 폭 내 리플 주파수와 크기에 의해 영향을 받으며, 진폭과 동일하게 직교 항목이 PSLR과 ISLR을 크게 저하시키는 요인이 된다.

Figure 11과 같이 펄스폭 내 위상 리플의 개수가 3개인 경우, IRF 분석 결과는 Fig. 12에서 보듯이 3번째 이내의 부엽이 증가하게 되며, PSLR

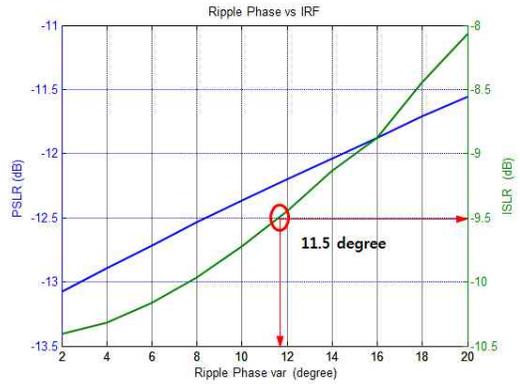


Fig. 13. IRF performance against for phase ripple

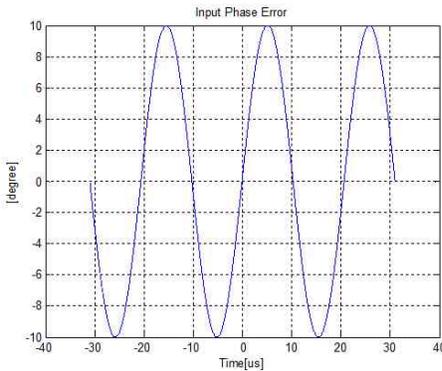


Fig. 11. Phase ripple within pulse width

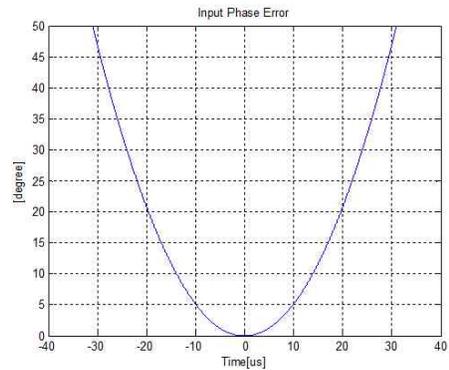


Fig. 14. 50deg quadratic phase error within pulse width

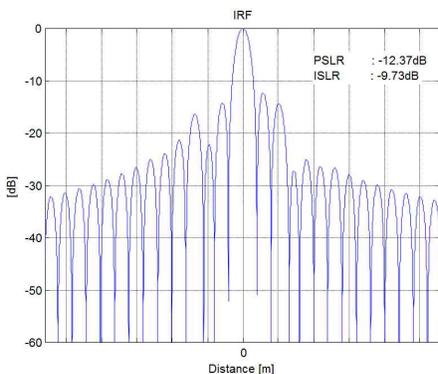


Fig. 12. IRF characteristic with phase error (F_{ripple}: 3 and ripple : 10 deg)

과 ISLR에 영향을 주게 된다. 위상의 변화에 따른 결과는 Fig. 13을 통해 확인 할 수 있으며, -12 dB PSLR과 -9.5 dB의 ISLR값을 만족하기 위해서는 위상의 크기 변화는 11.5 도 이내여야 한다.

위상의 변화에 대한 IRF 영향성도 진폭의 영향과 마찬가지로 선형 성분과 랜덤 성분은 IRF에 크게 영향을 미치지 않는다. 하지만, 비선형성으로 인한 직교 성분은 IRF 성능에 영향을 미치며, 그 결과는 아래와 같다.

Figure 14와 같이 펄스폭 내 직교 위상성분이 50 도 변화를 가정하면, Fig. 15와 같이 PSLR 과 ISLR은 -11.77 dB 와 -9.68 dB 이다.

Figure 16에서 보듯이 위상의 변화에 따른 PSLR값과 ISLR값의 변화량은 상대적으로 작을 수 있다. 하지만, Fig. 15와 같이 주엽의 3dB 대역폭이 커지게 되어, 해상도 성능이 감소하게 된다. 이는 영상의 해상도를 좌우하는 중요한 성

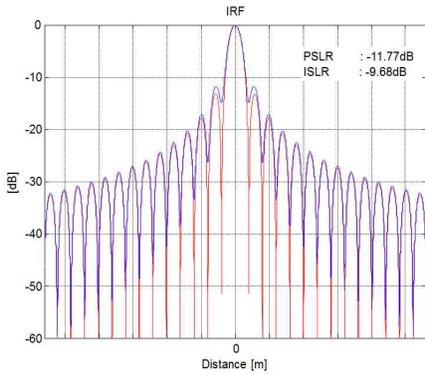


Fig. 15. IRF characteristic with 50deg quadratic phase error

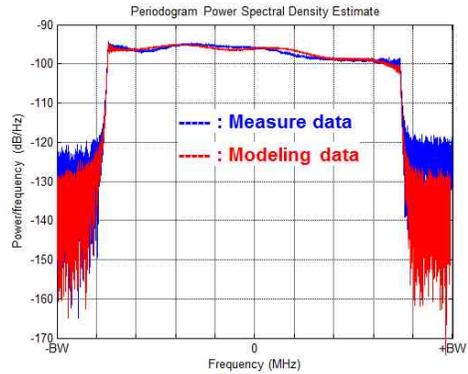


Fig. 17. Chirp spectrum of the measured and modeling data

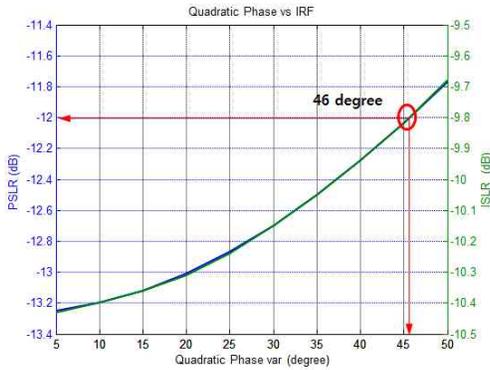


Fig. 16. IRF performance against for quadratic phase error

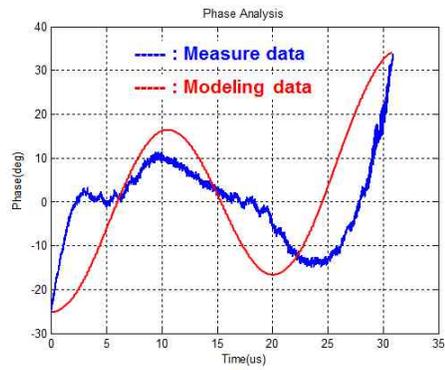


Fig. 18. measured and modeling Phase error within pulse width

분이 되므로, 설계시 반드시 고려되어야 한다.

직교 위상 오차의 경우 -12 dB PSLR과 -9.5 dB의 ISLR값을 만족하기 위해서는 46도 이내여야 한다.

2.3 측정결과 및 비교분석

지금까지 영상 레이더에서 적용할 칩 파형의 펄스 내 진폭과 위상의 오차들이 거리방향의 IRF성능에 미치는 영향들을 확인하였다.

본 연구에서는 앞서 제시한 진폭과 위상의 오차 항목들로 왜곡된 칩 파형을 모델링하고, 진폭과 위상이 실제 파형과의 유사성을 확인하고, IRF분석을 통해 실측치와 비교, 분석 하였다. 이를 통해 하드웨어에 의해 왜곡될 수 있는 정도를 미리 예측하고, 왜곡된 정도에 따른 PSLR과 ISLR값을 분석하여, 적용하고자 하는 영상 레이더의 규격을 만족하기 위한 하드웨어 규격을 정의 할 수 있을 것이다. 아래 Fig. 17은 실제 측정된 칩 파형과, 실제 측정된 파형과 가장 유사하도록 진폭

과 위상값들의 오차값들을 입력하여 2차 다항식으로 모델링한 결과이다. 모델링한 2차 다항식의 오차 값들은 대역 내 진폭의 리플이 3개이며, 리플의 크기는 1 dB이다. 선형 진폭 오차는 3 dB, 직교 진폭오차는 3 dB로 설정하여, 측정결과와 유사한 형태의 파형을 생성하였다.

아래 Fig. 18은 위상 오차에 대한 실제 파형과 모델링 한 결과이다. 모델링한 오차는 펄스폭 내에서 위상 오차는 리플이 1.5개 이며, 리플의 위상 변화량은 20 도 이다. 선형 위상오차는 10 도이며, 직교 위상 오차는 5 도로 정의 하였다.

측정 파형의 IRF 결과와 모델링한 파형의 IRF의 결과는 Fig. 19와 같으며, PSLR값은 -9.59 dB와 -8.95 dB이며, ISLR값은 -9.94 dB와 -9.6 dB로 1 dB이내의 오차를 가지며, IRF 모양이 유사함을 알 수 있다.

결과적으로 진폭과 위상 오차들을 정현파 형태의 리플과 선형, 직교, 랜덤 항목으로 PSLR과 ISLR값을 실제 측정치와 비교하였을 경우, 0.5 dB이

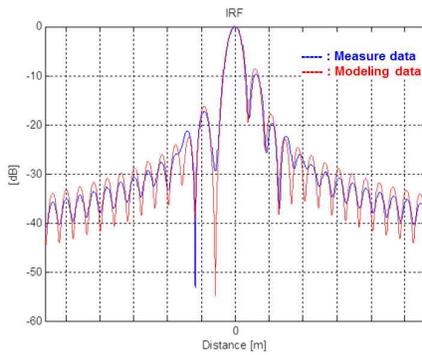


Fig. 19. IRF characteristic of the measured and modeling chirp signal

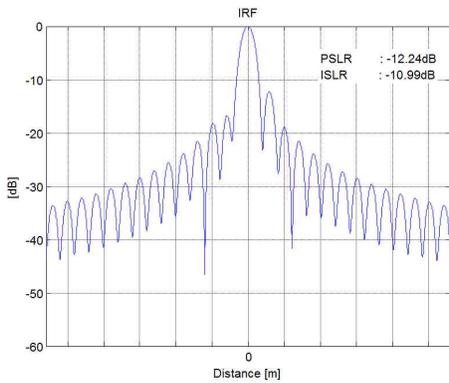


Fig. 20. improved IRF characteristic (phase ripple 6 deg and 2dB amplitude quadratic error)

내 오차로 모델링이 가능하다는 것을 확인 할 수 있다.

영상레이더의 영상품질 요구조건에 따라 요구되는 PSLR 과 ISLR 값은 달라질 수 있다. 앞서 분석한 결과를 토대로 PSLR과 ISLR 값을 개선할 수 있는 성분은 바로 리플성분과 직교 성분이다. Fig. 17, 18 과 같이 측정된 파형에서 해상도와 PSLR과 ISLR의 영향이 가장 큰 위상 리플의 크기를 6 도 이내, 그리고 진폭에서는 직교 성분이 2 dB 이내로 개선하면, 해상도의 저하 없이 PSLR 및 ISLR을 -12.24 dB 와 -10.99 dB 까지 개선할 수 있음을 Fig. 20을 통해 알 수 있다. 결과적으로 진폭과 위상오차 항목 중 IRF에 가장 크게 영향을 미치는 것은 대역 내 리플 항목과 비선형에서 기인한 직교 항목이다. 그러므로 실제 제작시 파형의 리플과 비선형에 가장 크게 영향을 주는 RF 필터와 증폭기 설계에 주의해야 한다. 또한, IRF 결과에서 특정 부

엽의 크기를 증가시키는 대역 내 리플의 주파수와 크기성분을 줄임으로써 대칭성도 함께 개선할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 영상레이더에 사용되는 광대역 첩 신호의 대역내 진폭과 영상 품질을 판단하는 IRF성능에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고, 2 차 다항식으로 진폭과 위상오차를 모델링하고, 실측치와 비교하여, 대역내 스펙트럼의 유사성을 확인하고, 0.5 dB 이내의 오차로 모델링이 가능함을 확인 하였다.

IRF 성능에 가장 크게 영향을 미치는 성분은 리플 성분과 시스템의 비선형성으로부터 기인하는 직교 성분이며, IRF 성능을 개선하기 위해서 위상 리플의 크기를 20 도에서 6도 까지 개선하고, 진폭의 직교 성분을 3 dB에서 2 dB 까지 개선함으로써 PSLR과 ISLR값을 -9.59 dB에서 -12.24 dB 으로, -9.94 dB에서 -10.99 dB 까지 개선 할 수 있다.

본 연구에서 제시한 기법을 통해 영상레이더에서 요구하는 첩 신호의 IRF 성능을 달성하기 위한 하드웨어의 진폭과 위상 오차 한계치를 충분히 정의 할 수 있으며, 개선 방향을 찾고 그 결과 값을 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) Hyon-Ik Lee, Se-Young Kim, Byeong-Tae Jeon, Jin-Bong Sung, "Operational Concept Design and Verification for Airborne SAR System", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 41, No. 7, 2011, pp.588~595.
- 2) Jun-Young Kwak, Dae-Gwon Jeong, "A study on the image formation system variable and performance analysis for optimum design of high resolution SAR", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 40, No. 1, 2011, pp.49~60.
- 3) Tae-Bong Oh, Chul-Ho Jung, Sun-Ho

Song, Jae-Min Shin and Young-Kil Kwag, "Development of SAR Image Quality Performance Analysis Tool for High Resolution Spaceborne Synthetic Aperture Radar", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 38, No. 7, 2010, pp.188~194.

4) Jin-Bong Sung, Se-Young Kim, Hyon-Ik Lee, Byeong-Tae Jeon, , "Modeling and Simulation Techniques for Performance Analysis of high Resolution SAR System", Journal of The Korean institute of electromagnetic engineering and science, Vol. 24, No. 5, 2013, pp.558~565.

5) Jin-Bong Sung, Se-Young Kim, Jong-Hwan Lee Byeong-Tae Jeon, "Development and

Performance compensation of the Extremely Stable Transceiver System for High Resolution Wideband Active Phase Array Synthetic Aperture Radar", Journal of The Korean institute of electromagnetic engineering and science, Vol. 21, No. 6, 2010, pp.573~582.

6) Se-Young Kim, Jin-Bong Sung, Jong-Hwan Lee, Dong-Woo Yi, "Analysis on Spectral Regrowth of Bandwidth Expansion Module by quadrature Modulation Error in Digital chirp Generator", Journal of The Korean institute of electromagnetic engineering and science, Vol. 21, No. 7, 2010, pp.761~768.

7) Walter G. Carrara, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms", Artech house,inc., 1995, pp.203-287