

## 레이더용 주파수합성기의 위상잡음 모델링 및 분석

### Modeling and Analysis of the Phase Noise in a Frequency Synthesizer for a Radar System

김 동 식\*  
Dong-Sik Kim

김 민 철\*  
Min-Cheol Kim

이 수 호\*  
Su-Ho Lee

정 명 득\*\*  
Myeong-Deuk Jeong

권 호 상\*\*  
Ho-Sang Kwon

#### Abstract

In this paper, we proposed a phase noise model of a frequency synthesizer for a radar system. Especially, it was proposed a phase noise model in a DAS(Direct Analog Synthesizer) and a frequency up converter system using Leeson's model. The proposed phase noise model was derived from the measurement data of model 1 and evaluated by adapting to model 2 and model 3 frequency synthesizers. The prediction phase noise by modeling was totally matched to the measured data and the effective analysis of the phase noise was done in a frequency synthesizer and a frequency converter of radar system.

Keywords : Phase Noise, DAS, Frequency Synthesizer

#### 1. 서론

레이더 시스템에서 발진기와 주파수 합성장치는 시스템의 주된 위상잡음원이며, 이는 시스템의 성능에 영향을 주게 된다. 레이더 시스템에서 주파수 합성장치는 PLL(Phase Locked Loop)과 DDS(Direct Digital Synthesizer)를 저주파 기준신호원을 이용하여 DAS(Direct Analog Synthesizer)를 통해 주파수 합성 및 상향 변환을 하게 된다<sup>[1]</sup>. 지금까지 PLL 및 주파수 체배기에 의한 위상잡음 모델링 연구가 진행되고 있으나<sup>[2]</sup>,

여러 단의 혼합 및 체배 과정에서 많은 오차가 발생하고 있어 주파수 합성 및 상향변환에 의한 정확한 위상잡음 모델링 및 분석이 필요하다. 본 논문에서는 80MHz PLL출력 신호를 이용하여 S-band까지 주파수 합성 및 상향 변환과정에 따른 위상잡음 변화를 모델 1의 측정결과를 토대로 각각의 소자에 대한 위상잡음을 모델링하여, 최종 출력주파수에서의 위상잡음 결과와 비교 분석하였다. 그 결과 모델링에 의한 위상잡음과 측정 위상잡음과의 결과가 일치함을 확인하였다. 제안된 모델링의 신뢰도를 분석하기 위하여, 주파수 합성 과정이 상이한 주파수 합성장치 모델2와 모델3에 적용하여 최종 출력주파수에서의 위상잡음 열화 과정 및 측정된 위상잡음과 비교 분석하였다. 일반적으로 아날로그 직접 주파수 합성방식에 위상잡음 열화의 주된 요인은 주파수 체배기와 분주기 그리고 주파수 혼합기 이다. 주파수 체배기와 분주기의 경우 체

† 2011년 6월 21일 접수~2011년 8월 26일 게재승인  
\* LIGNEX1 초고주파연구센터(Department of Microwave Lab. LIGNEX1)  
\*\* 국방과학연구소(ADD)  
책임저자 : 김동식(dskim11@lignex1.co.kr)

배수(M)의 제곱승으로 위상잡음이 증가 또는 감소하지만 소자의 특성 및 옵셋 주파수 특성에 따라 증가 또는 감소되는 정도가 차이가 발생하게 된다<sup>[2,3]</sup>. 또한 주파수 혼합기는 두 입력신호의 위상잡음 전력합과 배경잡음의 합으로 출력위상잡음 특성이 좌우된다<sup>[4]</sup>. 따라서, 주파수 합성과정에서 사용되는 주파수 체배기와 분주기 그리고 주파수 혼합기에 대한 정확한 모델링을 통하여 최종 출력 주파수에서의 위상잡음을 효과적으로 분석가능하다.

본 논문은 2장에서 모델1의 측정결과를 토대로 기준 신호원 및 주파수 체배기와 주파수 분주기, 그리고 주파수 혼합기에 대한 위상잡음 모델링을 하여 최종 출력 위상잡음과 비교분석 하였으며, 3장에서는 제안된 모델링을 주파수 상향변환 과정이 상이한 모델2와 모델3에 적용하여 측정된 출력 위상잡음과 모델링에 의한 출력 위상잡음을 교하여 모델링의 신뢰도를 분석하였다. 4장에서는 제안된 주파수 합성기의 위상잡음 모델링 방안을 제시하고 결론을 맺는다.

## 2. 본 론

레이더 시스템에서 주파수 합성기는 시스템의 기준 신호 생성 및 송신대역폭으로 확장하기위한 신호를 생성하는 역할을 한다. 또한 기준신호원을 상향 변환하는 과정에서 주파수 체배기 및 혼합기 등을 거치며 위상잡음이 열화되며, 이 과정에서 Leeson 모델을 적용하여 많은 분석들이 이루어지고 있다<sup>[4,5]</sup>. 본 논문에서는 주파수 합성기의 위상잡음 열화과정을 모델링 및 분석하여 시스템의 위상잡음 사양 분석 및 상향 변환과정에서의 위상잡음을 예측하였다. 일반적으로 발진기에 의한 위상잡음은 Fig. 1로 표현되며, high Q와 Low Q일 경우로 분리해서 분석할 수 있다. 위상잡음 특성은  $1/f^3$ ,  $1/f^2$ ,  $1/f^1$  그리고 배경잡음 영역으로 구분하여 생각할 수 있으며,  $1/f^3$ 의 경우에는 30dB/decade로 위상잡음이 증가하며,  $1/f^2$ 의 경우에는 20dB/decade,  $1/f^1$ 는 10dB/decade로 변환한다<sup>[3]</sup>. 여기에서  $1/f^3$ 은 주로 발진기 잡음과 능동 소자의 잡음에 크게 영향을 받으며,  $1/f^2$  성분은 발진기의 Q에 의해 영향을 받게 된다. 또한  $1/f^1$ 는 능동소자의 잡음에 영향을 크게 받게 된다<sup>[6]</sup>. 따라서, 위상잡음 모델링시 각 성분에 대한 값을 도출해야 하며, 소자에 따른 위상잡음 열화 정도를 분석해야 한다. 소자의 물성 특성에 따라서, 위상

잡음 변화 영역에 차이가 있으며, 이는 측정 결과를 바탕으로 도출 가능하다. 본 논문은 PLL을 적용한 80MHz 기준신호를 이용하여 직접아날로그합성방식을 통해 S-band까지 상향 변환하는 과정을 모델링하였다. 먼저 모델1의 주파수 합성 과정은 아래 Fig. 2와 같다. 모델1은 80MHz 신호를 pin diode를 이용하여 각각 3체배와 5체배를 하여 1200MHz를 생성하고, 이를 상용 주파수 체배기를 이용하여 3600MHz 신호를 생성한다. 그리고, 체배와 주파수 혼합을 통해 생성된 960MHz와 혼합하여 최종 S-band 신호를 생성하게 된다. 본 모델 1에서는 주파수 체배기와 분주기 그리고 주파수 혼합기에 대해 모델링하고 최종 S-band 신호의 출력 위상잡음과 비교 분석하였다.

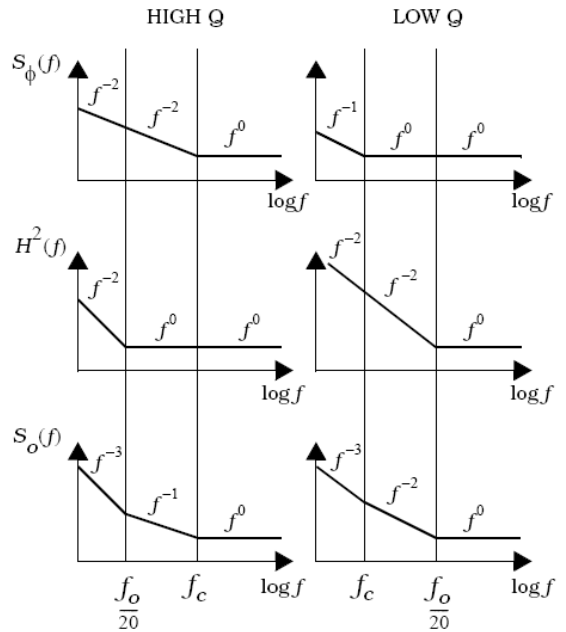


Fig. 1. Leeson 모델의 위상잡음 특성 곡선 (phase noise of Leeson's model)

### 가. 신호원 모델링

발진기의 위상잡음은 Leeson 모델을 이용하여 PSD (Power Spectral Density)로 표현 가능하며,  $1/f^3$ ,  $1/f^2$ ,  $1/f$  그리고 배경잡음의 영향을 받게 되며, 아래 수식 (1)과 같다.

$$S_{o,s} = \frac{1}{f^3} a_3 + \frac{1}{f^2} a_2 + \frac{1}{f^1} a_1 + a_0 \quad (1)$$

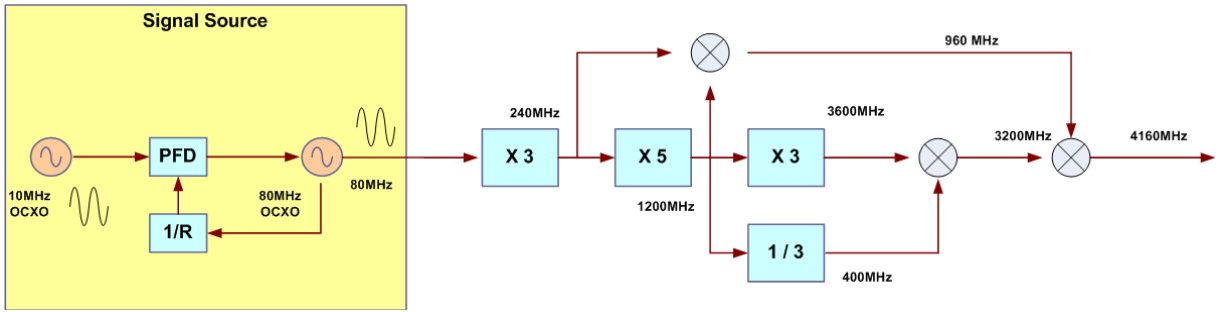


Fig. 2. 모델 1의 주파수 합성 및 상향 변환 과정(Block Diagram of model 1)

여기에서,

$$\frac{1}{f^3}a_3 + \frac{1}{f^1}a_1 + a_0 \gg \frac{1}{f^2}a_2 \text{ 형태로 나타나며}$$

$$S_{o,s} = \frac{1}{f^3}a_3 + \frac{1}{f^1}a_1 + a_0 \quad (2)$$

로 근사화 할 수 있다.

80MHz 측정위상잡음을 토대로 수식 (1)에 대한 변수들을 도출할 수 있으며 아래와 같다.

$$a_3 = 10^{-7.6}, a_2 = 10^{-10.2}, a_1 = 10^{-12.9}, a_0 = 10^{-17.4}$$

80MHz 기준신호의 측정 위상잡음과 모델링에 의한 위상잡음의 결과는 Fig. 3과 같다.

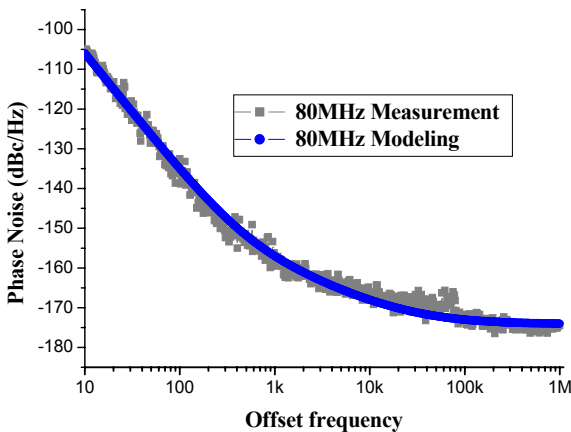


Fig. 3. 80MHz 신호원의 위상잡음 및 모델링 (80MHz signal source modeling of model 1)

주파수 체배기는 일반적으로 체배수(M)의 제공승으로 증가하는 것으로 일반화되어 있으나, 체배기의 물리적 특성 및 플리커(flicker) 영역과  $f^2$ ,  $f^3$  성분특성에 의해 오차가 발생한다. 본 모델링에서는 측정 결과를 바탕으로 하여 PIN diode를 이용한 주파수 체배기에 대해 모델링 하였다.

#### 나. PIN diode를 이용한 체배기

주파수 체배기의 위상잡음은 입력신호의 위상잡음에 주파수 체배항 만큼 커지게 되며, 주파수 체배기 자체의 배경잡음이 더해지게 된다. 주파수체배기의 위상잡음원은 아래 Fig. 4로 표현할 수 있다. 주파수 체배기의 위상잡음은 아래 수식 (3)으로 표현 가능하며, 측정 결과를 바탕으로 모델링하면 수식 (4)로 근사화가 된다.

$$S_{o,s} = S_i \cdot M^2 \cdot a_2 + \frac{1}{f}a_1 + a_0 \quad (3)$$

$$S_i \cdot M^2 \cdot a_2 + a_0 \gg \frac{1}{f}a_1$$

$$S_{o,s} \approx S_i \cdot M^2 \cdot a_2 + a_0 \quad (4)$$

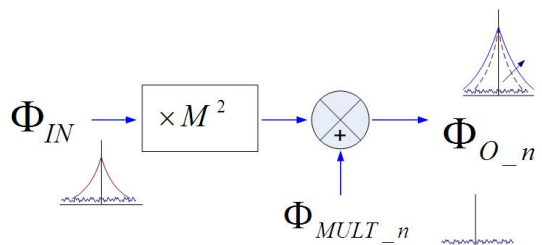


Fig. 4. 주파수 체배기의 위상잡음원 (Noise source of frequency multiplier)

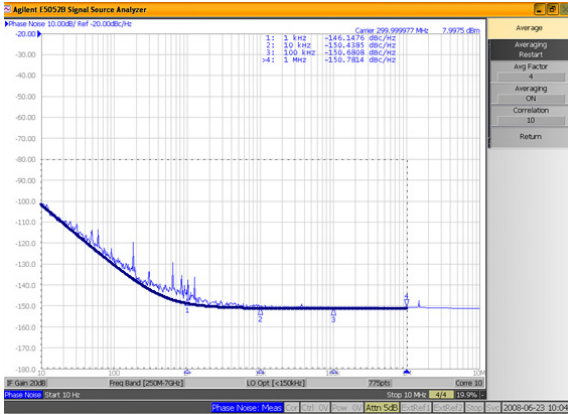


Fig. 5. Pin diode 체배기의 출력 위상잡음 (phase noise of frequency multiplier)

측정 결과를 바탕으로 도출된 변수의 값은 아래와 같다.

$$a_2 = 0.5, a_1 = 10^{-13}, a_0 = 10^{-17.4}$$

80MHz 신호를 3체배와 5체배 후의 1200MHz 측정 위상잡음과 모델링에 의한 위상잡음은 Fig. 5와 같다.

다. 상용 주파수 분주기 모델링

주파수 분주기는 일반적으로 입력신호의 위상잡음에 분주비의 제곱항 만큼 작아지게 되며, 1/f 영역에 의해 영향을 받게 되며, 분주기의 배경잡음이 더해진 위상잡음이 출력되게 된다. 이를 도식화 하면 Fig. 6과 같다.

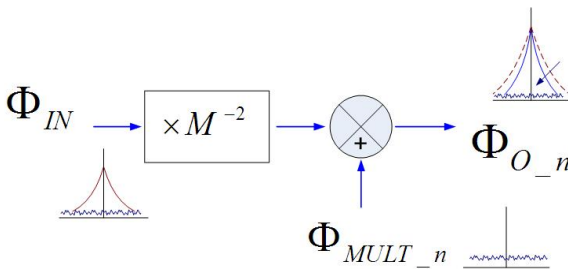


Fig. 6. 주파수 분주기의 위상잡음원 (Noise source of frequency divider)

주파수 분주기는 아래 수식 (5)로 표현되며, 측정 결과를 바탕으로 변수를 도출하면 아래와 같다.

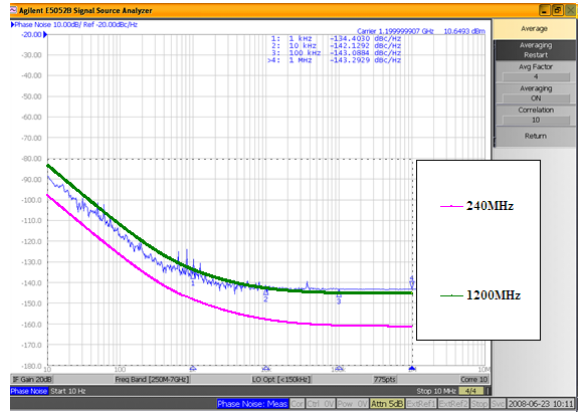


Fig. 7. 주파수 분주기의 출력 위상잡음 (phase noise of frequency divider)

$$S_{o,s} = S_i \cdot M^{-2} \cdot a_2 + \frac{1}{f} a_1 + a_0 \quad (5)$$

$$S_i \cdot M^{-2} \cdot a_2 + a_0 \gg \frac{1}{f} a_1$$

$$S_{o,s} \approx S_i \cdot M^{-2} \cdot a_2 + a_0$$

$$a_2 = 0.25, a_1 = 10^{-13}, a_0 = 10^{-15.5} \text{ 이다.}$$

1200MHz의 4분주 주파수인 300MHz 신호의 모델링과 측정결과는 Fig. 7과 같이 예측할 수 있다.

라. 주파수 혼합기 모델링

주파수 혼합기의 위상잡음원은 아래 Fig. 8로 표현되며, 두 입력신호의 위상잡음의 전력 합으로 출력 위상잡음을 모델링하며, 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$S_{o,s} = S_{LO} + S_{IF} + S_{mix,n} \quad (6)$$

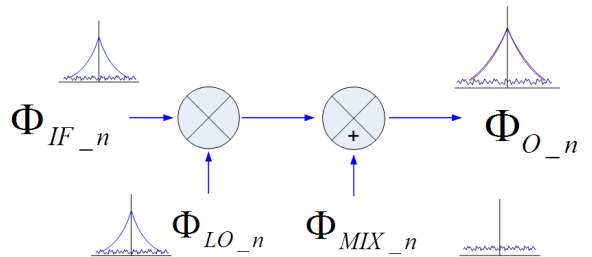


Fig. 8. 주파수 혼합기의 위상잡음원 (Noise source of mixer)

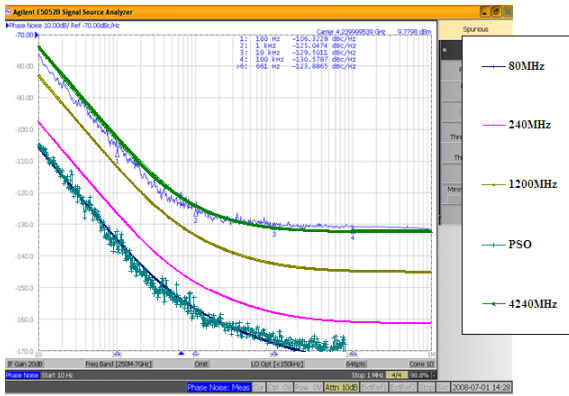


Fig. 9. 모델1의 최종출력 위상잡음 및 모델링 (phase noise of output signal of model 1)

여기에서, 주파수 혼합기의 배경잡음은 일반적으로 두 입력신호 중 배경잡음이 높은 신호로 표현 된다. 지금까지 모델링을 적용하여, 모델 1의 최종 S-band 신호의 출력 위상잡음과 비교하면 Fig. 9와 같다. 모델1의 최종 S-band 출력 위상잡음과 모델링을 통한 출력 위상잡음이 어느 정도의 오차는 발생하나, 이는 전원 잡음 및 측정오차로 생각되며, 두 결과가 유사함을 알 수 있다.

### 3. 모델링 검증

주파수 합성장치 모델1의 위상잡음의 모델링을 주파수 합성 및 상향변환 과정이 상이한 모델2에 적용하여 모델링의 신뢰성을 분석하였다. 모델2는 80MHz 기준신호원을 주파수 체배기를 이용하여 총 40체배하여 S-band 신호를 생성한다. 모델링을 적용하기 위하

여 이 모델에 사용한 80MHz 기준신호를 Leeson 모델을 적용하여 유사하게 모델링 하였다. 도출된 모델링은 아래 수식 (7)과 같다.

$$S_{o,s} = \frac{1}{f^3} a_3 + \frac{1}{f^2} a_2 + \frac{1}{f^1} a_1 + a_0 \quad (7)$$

$$a_3 = 10^{-6.2}, a_2 = 10^{-10.1}, a_1 = 10^{-13}, a_0 = 10^{-16.8}$$

측정된 위상잡음이 전원잡음 및 측정오차를 포함하고 있어 Leeson 모델로 정확히 분석이 힘들다. 본 모델에서는 100Hz, 1KHz, 10KHz, 100KHz 읍셋의 값을 가지고 모델링을 하였다. 생성된 S-band 신호와, 800MHz 대역의 신호와 혼합하여 최종 신호를 생성하게 된다. 모델2의 주파수 합성 및 상향 변환 과정은 Fig. 10과 같다. 80MHz 신호를 체배 및 주파수 혼합하여 3GHz 대역의 신호를 생성하고, 이를 800MHz 대역 신호와 혼합하여 최종 4GHz 대역의 신호를 생성하게 된다. 먼저 모델2에서 사용된 80MHz 기준신호원에 대한 모델링을 하여 측정치와 비교하면 아래 Fig. 11과 같다.

Fig. 10에서와 같이 80MHz 신호원이 주파수 합성 및 상향 변환에 의해 최종 4GHz 대역의 신호를 생성하게 되며, 이때, 측정결과와 모델링에 의한 예상 위상잡음의 결과는 Fig. 12와 같다. 전원 잡음 및 모델링 오차에 의해 발생한 범위에서 유사한 정도의 차이를 보이며, 모델링된 100Hz, 1KHz, 10KHz, 100KHz 읍셋에서의 위상잡음은 측정 위상잡음과 모델링의 값이 일치함을 알 수 있다.

모델 3은 모델1과 동일한 80MHz 신호원을 사용하였으며, 80MHz를 32체배한 신호와 6체배한 신호를 혼합하여 최종 4GHz 대역의 신호를 생성하게 된다. 먼저 모델3의 주파수합성 및 상향 변환 과정은 Fig. 13

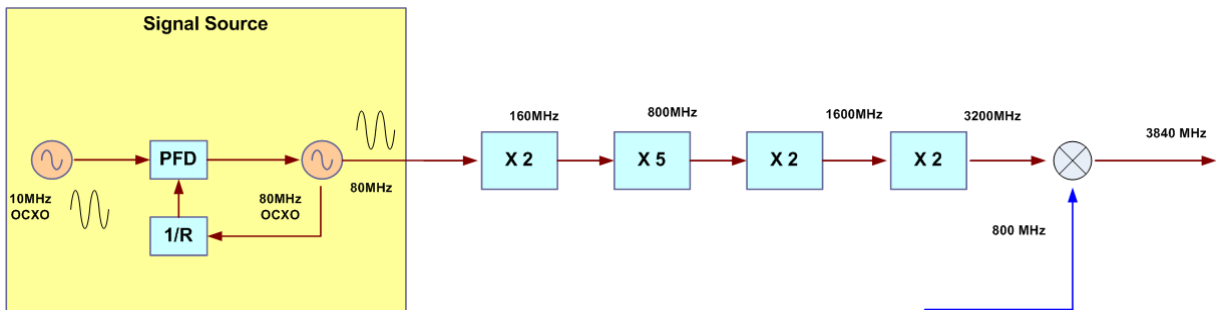


Fig. 10. 모델2의 주파수 합성 및 상향 변환 과정(Block Diagram of model 2)

와 같다. 모델1을 통해 도출한 모델링을 적용하여 최종 4GHz 대역의 위상잡음과 측정결과에 의한 위상잡음은 Fig. 14와 같다.

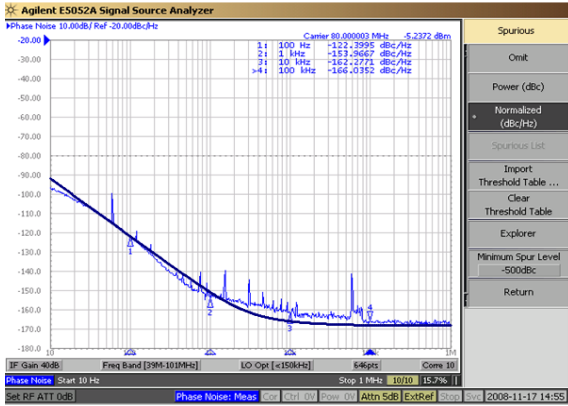


Fig. 11. 모델2의 80MHz 위상잡음과 모델링 (80MHz signal source modeling of model 2)

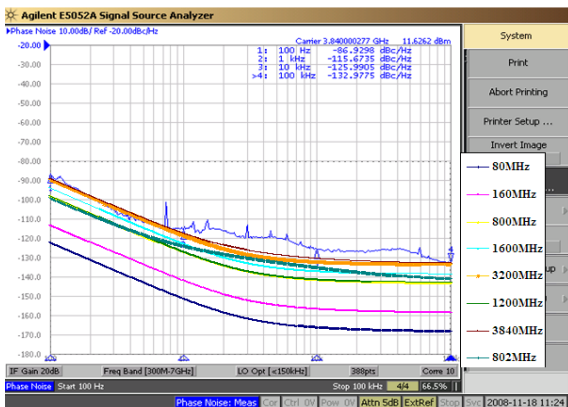


Fig. 12. 모델2의 최종 출력 위상잡음 및 모델링 (phase noise of output signal of model 2)

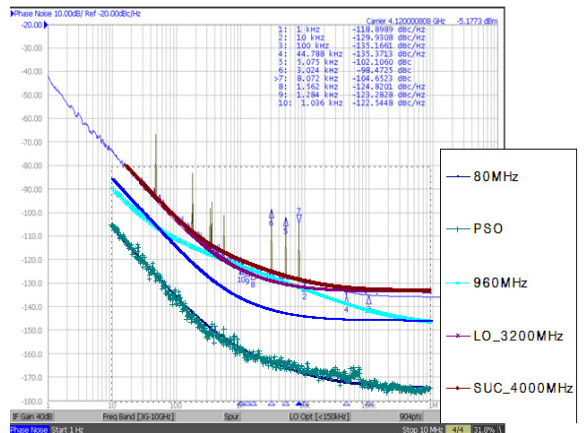


Fig. 14. 모델3의 출력 위상잡음 및 모델링 (phase noise of output signal of model 3)

Fig. 14에서 보듯이 측정된 위상잡음과 모델링에 의한 위상잡음이 동일함을 알 수 있으며, 이를 통해 모델링이 잘 적용됨을 확인 하였다.

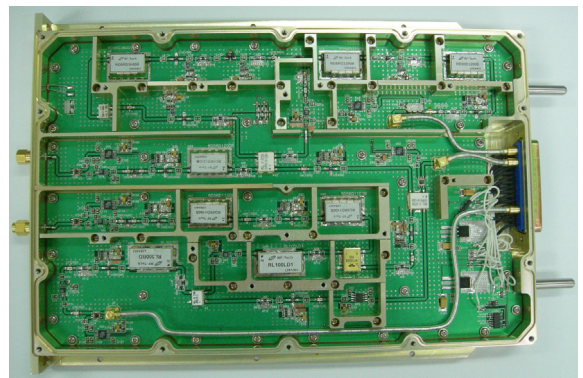


Fig. 15. 모델1의 주파수 합성 장치 형상 (frequency synthesizer of model 1)

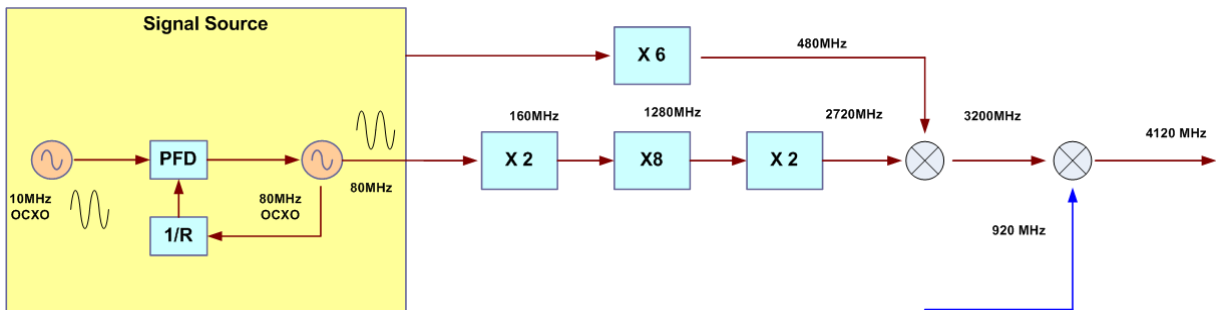


Fig. 13. 모델 3의 주파수 합성 및 상향 변환 과정(Block Diagram of model 3)

모델1의 제작된 주파수 합성기의 형상은 Fig. 15와 같으며, S-band 이하의 주파수에서는 제작의 용이성을 위하여 FR-4 기판을 사용하여 제작하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 레이더용 주파수 합성 및 상향변환 과정의 위상잡음을 측정 결과를 바탕으로 하여 모델링 하고 이를 주파수 합성 및 상향 변환 과정이 상이한 모델에 적용하여 모델링을 검증하였다. 모델1을 통해 제안된 모델링은 모델2와 모델3을 통해 모델링이 정확성과 신뢰성을 가지고 있음을 확인하였다. 주파수 합성 및 상향 변환과정에서 위상잡음에 가장 큰 영향을 미치는 것은 주파수 체배기와 주파수 분주기, 그리고 주파수 혼합기이며, 본 모델링을 통해 주파수 합성 장치의 위상잡음 분석을 용이하고, 보다 정확하게 분석가능하다.

#### 후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 연구되었음.

#### References

- [1] D. Sherer, "Generation of Low Phase Noise Microwave Signals", Unpublished HP Seminar, September 1981.
- [2] James J. Stagliano Jr. Phase Noise, "Coherency, and Clutter Suppression", 32nd Conference on Radar Meteorology, Thursday, 13 January 2005.
- [3] Wu Tao, Tang Xiaohong, Xiao Fei, "Research on the Effect of Frequency Synthesizer on the Performance of MMW Stepped Frequency Radar", GSMM2008 Proceeding, 2008.
- [4] Harker, B. J. Dobrosavljevic, Z. Craney, E. P. Tubb, C. M. Harris, G. L., "Dynamic Range Improvements and Measurements in Radar Systems", Radar, Sonar & Navigation, IET, pp. 398~406, Dec. 2007.
- [5] Merrill L. Skolnik., Introduction to Radar Systems 3rd Edition, Mc Graw Hill, pp. 149~197, 2001.
- [6] B. J. Harker, "Dynamic Range Enhancements in Radar Systems", 2nd EMRS DTC Echnical Conference - Edinberg, 2005.
- [7] Bar-Giora Goldberg, Digital Frequency Synthesis Demystified, LLH Technology Publishing, pp. 1~56, 1999.
- [8] Analog Device, 1 GSPS 14-Bit, 3.3V CMOS Direct Digital Synthesizer, Preliminary Technical Data AD9910, Avaliable : <http://www.analog.com>