

# 위상잡음 특성을 개선한 주파수 변환 모듈의 설계 및 제작

論 文

53C-5-8

## Design and Implement of the Frequency-Shifting Module for the Improvement of Phase Noise Performance

邊鍾大\* · 河泰雄\*\* · 金鎮守\*\*\* · 朴准奭<sup>§</sup> · 林在鳳<sup>§§</sup>

(Jong-Dae Byun · Tai-Woong Ha · Jin-Soo Kim · Jun-Seok Park · Jae-Bong Lim)

**Abstract** - This paper analyzed the phase noise characteristics of frequency-shifting module by figuring out the relationship between the phase noise components of 1st and 2nd local oscillator composing the frequency-shifting module and those of RF output signals shifted in frequency. Also, frequency-shifting module with the improvement of the phase noise performance was designed and implemented by means that the phase noise components of 1st local oscillator were cancelled in the output signal. Output signal has been affected by only phase noise of 2nd local oscillator, which had excellent phase noise performance than that of the 1st local oscillator.

**Key Words** : Phase Noise, Frequency-shifting Module, Local Oscillator

### 1. 서 론

전계 강도가 부족하여 발생하는 부분적인 음영 지역을 커버하기 위해서는 기지국 신호를 재 증폭하여 주는 중계기를 설치하는 것이 이동통신 무선망의 일반적인 설계 방법이다. 중계기의 개념은 기지국의 RF 신호를 제3의 전송 매체를 통해 원하는 지역에 전송하여 다시 RF 신호로 재생하는 방식이다. 중계기는 전송 매체에 따라서 광중계기, 마이크로웨이브 중계기, 레이저 중계기, 주파수 변환 중계기 등으로 분류된다. 그 중에서 주파수 변환 중계기의 경우는 기지국의 RF 신호를 사용하지 않는 유희 FA 신호로 변환하여 안테나로 전송한 후, 원격지에서 수신하여 다시 원래의 주파수 신호로 변환하는 방식이다.[1] 주파수 변환 중계기의 기본 구조는 그림 1과 같이 기지국에 인접해서 기지국 신호를 유희 주파수로 변환해주는 Donor와 서비스 지역에 설치되어 유희 주파수를 다시 원래의 주파수로 변환해주는 Remote로 구성 되어 있다. Donor 및 Remote는 그림 2와 같이 내부에 Duplexer, LNA, Power Amplifier를 포함하여 주파수를 변환하고 원하는 신호만을 선택하여 출력하기 위한 Down, Up Conversion방식(IF 방식)의 주파수 변환 모듈을 가지고 있으며, 주파수 변환을 위한 두개의 국부 발진기를 가지고 있다. 각 국부 발진기는 각각의 위상 잡음 성분을 가지고 있으며, 일반적으로 국부 발진기의 위상 잡음 특성은 주파수가 높을수록 악화된다.

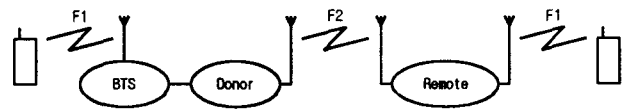


그림 1. 주파수 변환중계기의 기본구조  
Fig. 1 The schematic of frequency-shifting module

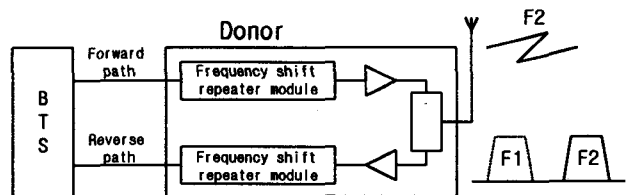


그림 2. 주파수 변환 중계기의 내부 구성도  
Fig. 2 The block schematic of frequency-shifting module

주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성은 입력 신호의 위상 잡음 성분에 1차, 2차 국부 발진기의 위상 잡음 특성이 더해져서 출력된다. 이러한 경우 입력 신호의 위상 잡음 특성이 우수 하여도 각 국부 발진기의 위상 잡음 특성이 나쁘면 출력 신호의 위상 잡음 성분에 각 국부 발진기의 위상 잡음 성분이 더해져서 출력신호의 위상 잡음 특성이 악화되는 결과를 초래한다.[2] 반면 하나의 국부 발진기 만을 사용하는 입·출력 신호가 동일하도록 설계한 IF 변환 방식 중계기의 경우 출력 신호의 위상 잡음 성분에 국부 발진기의 위상 잡음 성분이 상쇄되는 현상이 명확하게 나타난다. 이와 같은 국부 발진기의 위상 잡음 성분의 영향은 입·출력 신호가 저속 신호인 경우는 문제가 되지 않으나, 고속 신호인 경우는 국부 발진기의 위상 잡음에 의하여 신호의 왜곡이 발생하여 통신 속도의 저하 등과 같은 문제가 발생하게 된다.[3]

\* 正 會 員 : 國民大 工大 電子工學科 博士課程  
 \*\* 正 會 員 : 國民大 工大 電子工學科 碩士  
 \*\*\* 正 會 員 : 國民大 工大 電子工學科 碩士  
 § 正 會 員 : 國民大 工大 電子工學科 教授 · 工博  
 §§ 正 會 員 : 國民大 工大 電子工學科 教授 · 工博  
 接受日字 : 2004年 12月 23日  
 最終完了 : 2004年 1月 27日

본 논문에서는 주파수 변환 모듈의 국부 발진기의 위상 잡음 성분과 주파수 변환된 RF 출력신호의 위상 잡음 성분 사이의 수학적 모델링을 통하여 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성을 해석하였고, 일반적인 IF 방식 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성을 개선하기 위하여 위상 잡음 특성이 비교적 나쁜 높은 주파수의 1차 국부 발진기의 위상 잡음 성분은 상쇄시키고 상대적으로 위상 잡음 특성이 우수한 낮은 주파수의 2차 국부 발진기의 위상 잡음 성분만 출력 신호에 더하여지도록 주파수 변환 모듈을 제안하였다. 본 논문에서는 제안한 주파수 변환 모듈을 설계, 제작하여 주파수 변환 증계기의 위상 잡음 특성을 개선하였다.

2. 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성

2.1 수학적 해석을 통한 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성

일반적인 주파수 변환 모듈의 내부 구성 도는 그림 3에서와 같이 filter와 mixer 그리고 국부 발진기 등으로 이루어져 있다. 출력 신호(F2)에서의 위상 잡음 성분은 입력 신호(F1)의 위상 잡음성분에 각 국부 발진기(W1, W2)의 위상 잡음성분이 더해져서 나타난다.

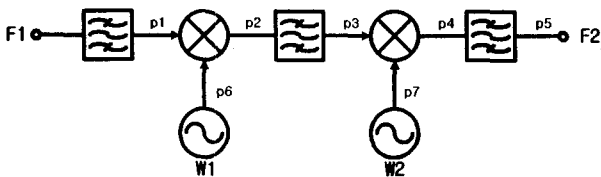


그림 3. 일반적인 주파수 변환 모듈 구성도  
Fig. 3 Block diagram of a conventional frequency-shifting module

입력 신호의 위상 잡음 성분이 없다고 가정하고, 각 국부 발진기의 위상 잡음 성분을 각각  $\phi_{n1}$ ,  $\phi_{n2}$ 라고 하면, 주파수 변환 모듈의 입력신호와 각 국부 발진기 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.[4]

$$P_1 = \cos \omega_s t \tag{1}$$

$$P_6 = \cos (\omega_{w1} + \phi_{n1}) t \tag{2}$$

$$P_7 = \cos (\omega_{w2} + \phi_{n2}) t \tag{3}$$

그러면 그림 3의 각 출력부에서의 신호의 성분은 다음과 같이 결정된다.

$$P_2 = [\cos(\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1}) t + \cos(\omega_s - \omega_{w1} - \phi_{n1}) t] / 2 \tag{4}$$

$$P_3 = \frac{\cos (\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1}) t}{2} \tag{5}$$

$$P_4 = [\cos(\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1} + \omega_{w2} + \phi_{n2}) t + \cos(\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1} - \omega_{w2} - \phi_{n2}) t] / 4 \tag{6}$$

$$P_5 = \cos (\omega_s + \omega_{w1} - \omega_{w2} + \phi_{n1} - \phi_{n2}) t / 4 \tag{7}$$

식(7)에서 보는바와 같이 출력 신호에 해당되는 P5에는 입력 신호에서 주파수 변환 ( $\omega_s + \omega_{w1} - \omega_{w2}$ )된 성분 이외에도 각 국부 발진기의 위상 잡음 성분  $\phi_{n1}$ ,  $\phi_{n2}$ 이 포함되어 있음을 알 수 있다.[5]

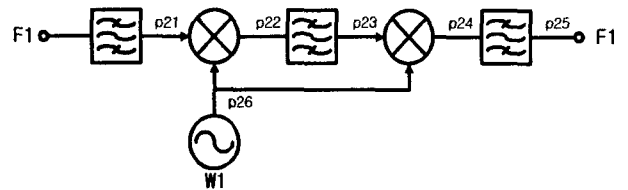


그림 4. 입·출력 주파수가 동일한 IF 방식을 이용한 주파수 변환 모듈 구성도

Fig. 4 Repeater module using IF-conversion method

그림 4는 IF 방식을 이용한 증계기의 내부 모듈 구성도로 입·출력 신호의 주파수가 동일하기 때문에 내부에 하나의 국부 발진기만을 사용 하였다. 이 경우 국부 발진기(W1)에 의한 위상 잡음성분은 출력 신호에서 상쇄되어 보이지 않는다. 그림 4에 나타난 주파수 변환 모듈의 입력신호와 국부 발진기 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{21} = \cos \omega_s t \tag{8}$$

$$P_{26} = \cos (\omega_{w1} + \phi_{n1}) t \tag{9}$$

각 출력부에서의 신호의 성분은 다음과 같이 결정된다.

$$P_{22} = [\cos(\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1}) t + \cos(\omega_s - \omega_{w1} - \phi_{n1}) t] / 2 \tag{10}$$

$$P_{23} = \frac{\cos (\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1}) t}{2} \tag{11}$$

$$P_{24} = \cos (\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1} + \omega_{w1} + \phi_{n1}) t + \cos (\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1} - \omega_{w1} - \phi_{n1}) t / 4 \tag{12}$$

$$P_{25} = \cos \omega_s t / 4 \tag{13}$$

식(13)에서와 같이 최종 출력 신호에 해당되는 P25에는 국부 발진기의 위상 잡음 성분  $\phi_{n1}$ 이 상쇄되어, 출력신호의 위상 잡음 특성이 국부 발진기의 위상 잡음 성분에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이러한 주파수 변환 모듈은 RF 입·출력 신호의 주파수가 동일하기 때문에 주파수 변환 증계기로의 적용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 그러나 그림 4와 같은 방식을 주파수 변환 증계기의 1차 국부 발진기단에 적용하면 출력신호의 위상 잡음 특성을 개선 할 수 있다.

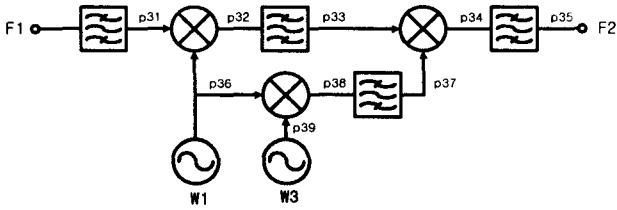


그림 5. 제안된 주파수 변환 모듈 구성도  
Fig. 5 Proposed frequency-shifting module

그림 5는 주파수 변환 증계기에 적용하기 위하여 본 논문에서 제안된 주파수 변환 모듈의 구성 도를 나타낸다. 그림 4와 같은 방식을 1차 국부 발진기단에 적용하여 1차 국부 발진기의 위상 잡음 성분이 상쇄 되도록 회로를 설계 하였다. 1차 국부 발진기 (W1)는 상대적으로 높은 주파수를 갖는 발진기로 기존 주파수 변환 모듈에 사용되는 국부 발진기(그림3의 W1)와 동일한 위상 잡음 특성을 가지고 있으며, 입력 신호를 IF신호로 변환 하는데 사용된다. 2차 국부 발진기 (W3)는 1차 국부 발진기에 비해 상대적으로 낮은 주파수 (그림3의 W1과 W2의 차이 : W2-W1)의 발진기로 1차 국

부 발진기에 비하여 위상 잡음 특성이 우수하며, IF신호를 다시 출력신호로 바꿔주는 역할을 한다. 그림 5에 나타난 제안된 주파수 변환 모듈에서 국부 발진기의 위상 잡음 성분을 각각  $\phi_{n1}$ ,  $\phi_{n3}$  라고 하면, 입력신호와 각 국부 발진기 신호는 다음과 같이 표현 할 수 있다

$$P_{31} = \cos \omega_s t \tag{14}$$

$$P_{36} = \cos(\omega_{w1} + \phi_{n1})t \tag{15}$$

$$P_{39} = \cos(\omega_{w3} + \phi_{n3})t \tag{16}$$

각 출력부에서의 신호의 성분은 다음과 같이 결정된다.

$$P_{38} = \cos(\omega_{w1} + \omega_{w3} + \phi_{n1} + \phi_{n3})t + \cos(\omega_{w1} - \omega_{w3} + \phi_{n1} - \phi_{n3})t / 2 \tag{17}$$

$$P_{37} = \cos(\omega_{w1} - \omega_{w3} + \phi_{n1} - \phi_{n3})t / 2 \tag{18}$$

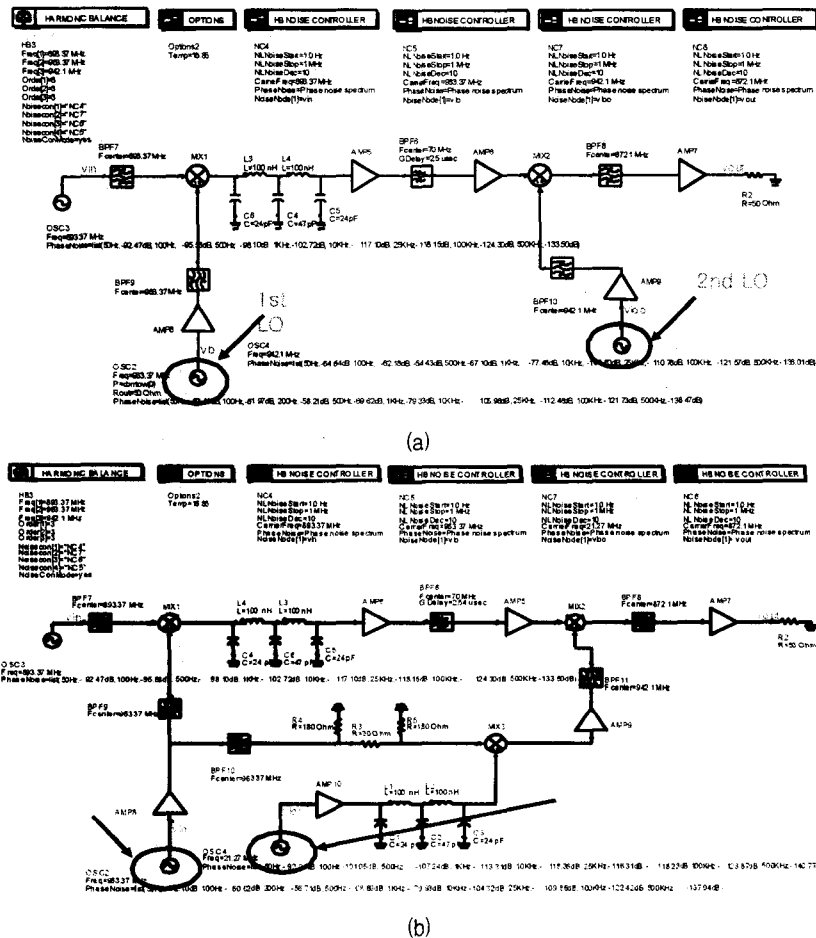


그림 6. 시뮬레이션 회로 구성도 (a) 일반적인 주파수 변환 모듈 (b) 제안된 주파수 변환 모듈  
Fig. 6 Schematic diagram of (a) conventional frequency-shifting module (b) Proposed frequency-shifting module

$$P_{32} = \frac{[\cos(\omega_s + \omega_{w1} + \phi_{n1})t + \cos(\omega_s - \omega_{w1} - \phi_{n1})t]}{2} \quad (19)$$

$$P_{33} = \frac{\cos(\omega_s - \omega_{w1} - \phi_{n1})t}{2} \quad (20)$$

$$P_{34} = \cos(\omega_s - \omega_{w3} - \phi_{n3})t + \frac{\cos(\omega_s - 2\omega_{w1} - 2\phi_{n1} + \omega_{w3} + \phi_{n3})t}{8} \quad (21)$$

$$P_{35} = \frac{\cos(\omega_s - \omega_{w3} - \phi_{n3})t}{8} \quad (22)$$

식(22)에서 보는바와 같이 출력신호(P35)에서는 높은 주파수를 갖는 1차 국부 발진기의 위상 잡음 성분  $\phi_{n1}$ 은 상쇄되고, 상대적으로 낮은 주파수를 갖는 2차 국부 발진기의 위상 잡음 성분  $\phi_{n3}$ 만이 나타남을 알 수 있다.

### 2.2 시뮬레이션 해석을 통한 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성

그림 6에서는 (a) 일반적인 주파수 변환 모듈, (b) 제안된 주파수 변환 모듈의 출력 위상 잡음 특성을 시뮬레이션 상에서 비교 실험하기 위한 각각의 회로를 나타내었다.[6] 시뮬레이션 tool로는 Agilent사의 ADS Version2003을 사용하였다. 각각의 회로에서 입력 신호는 893.37MHz로 결정하여 동일한 위상 잡음 특성을 갖도록 하였고, 또한, 그림 6 (a), (b)의 1차 국부 발진기의 주파수를 모두 963.37MHz로 하여 동일한 위상 잡음 특성을 갖도록 하였다. 그림 6 (a)의 2차 국부 발진기는 942.1MHz, 그림 6 (b)의 2차 국부 발진기는 21.27 MHz로 설정하여 출력 주파수를 872.1MHz로 동일하게 하였다.

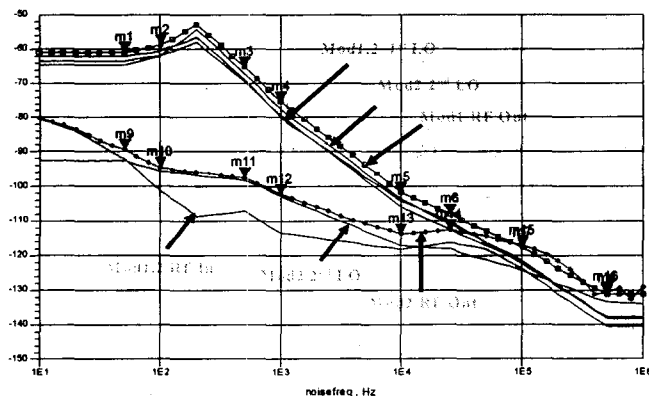


그림 7. 위상 잡음 특성 시뮬레이션 결과 비교 그래프 (Mod1 : 일반적인 주파수 변환 모듈, Mod2 : 제안된 주파수 변환 모듈)

Fig. 7 The graphs resulted from comparison of phase noise simulation test (Mod1 : Conventional frequency-shifting module, Mod2 : Proposed frequency-shifting module)

표 1. 위상 잡음 특성 시뮬레이션 결과 비교표 (Mod1 : 일반적인 주파수 변환 모듈, Mod2 : 제안된 주파수 변환 모듈)

Table 1. Resulted from comparison of phase noise simulation test (Mod1 : Conventional frequency-shifting module, Mod2 : Proposed frequency-shifting module)

Marker	Mod1 RF Out (dBc/Hz)	Mod2 RF Out (dBc/Hz)
50Hz	- 61.00	-89.35
100Hz	- 59.06	-94.47
500Hz	- 65.20	-97.42
1kHz	- 75.27	-102.20
10kHz	- 101.62	-113.60
25kHz	- 108.12	-112.70
100kHz	- 117.65	-117.20
500kHz	- 131.23	-130.60

그림 7은 일반적인 주파수 변환 모듈, 제안된 주파수 변환 모듈의 출력 위상 잡음 특성을 시뮬레이션 상에서 실험한 결과를 나타낸다. 그림 7에서 일반적인 주파수 변환 모듈의 경우, 출력 신호의 위상 잡음성분(Mod1 RF Out)은 입력 신호의 위상 잡음 성분(1차 국부 발진기의 위상 잡음 성분)이 더해져서 변환기 출력신호의 위상 잡음특성이 악화됨을 볼 수 있다. 반면 그림 7의 본 논문에서 제안된 주파수 변환 모듈의 경우, 출력 신호의 위상 잡음 성분(Mod2 RF Out)에는 1차 국부 발진기의 위상 잡음 성분(1차 LO)은 상쇄되고 상대적으로 낮은 주파수의 2차 국부 발진기의 위상 잡음 성분(2차 LO)만이 합쳐져서 나타남을 알 수 있다. 일반적인 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성과 비교하여 볼 때, TABLE 1에서 보는바와 같이 50Hz~10kHz 대역에서 10dB~30dB 이상 위상 잡음 특성이 개선됨을 알 수 있다.

### 2.3 주파수 변환 모듈의 설계 및 제작

그림 8은 본 논문에서 제안된 주파수 변환 모듈의 측정을 위하여 실제 제작된 사진을 나타낸다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 제작된 주파수 변환 모듈은 1차 (963.37MHz), 2차 (21.27MHz) 국부 발진기와, 1차 국부 발진기의 위상 잡음성분을 상쇄하고 원하는 신호만 filtering하기 위한 down, up conversion 회로로 구성되어 있다.

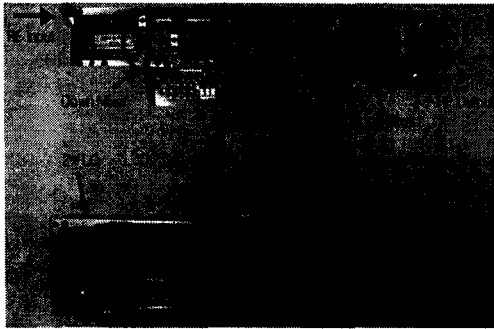
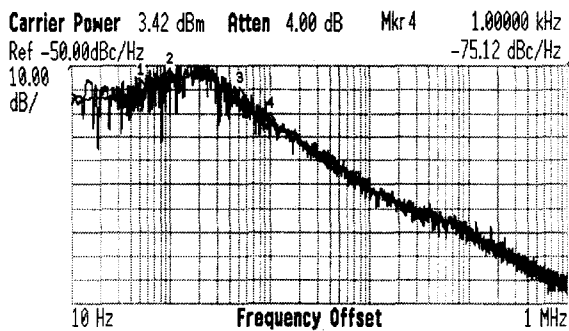
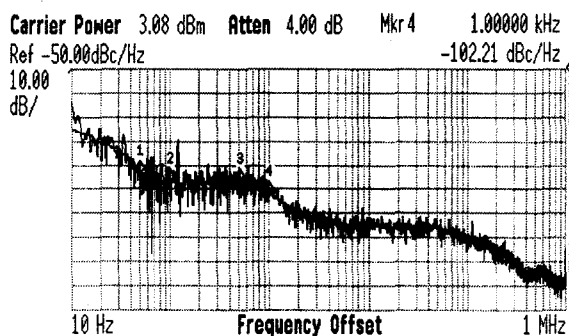


그림 8. 실제 제작된 제안된 주파수 변환 중계기의 사진  
**Fig. 8** Photograph of the implemented proposed frequency-shifting module

그림 9와 TABLE 2는 실제 제작된 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성을 측정된 결과이다. 그림 9(a) 일반적인 주파수 변환 모듈과 비교하여 그림 9(b)의 본 논문에서 제안된 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성이 시뮬레이션결과와 마찬가지로 50Hz~10kHz 대역에서 10dB~30dB 이상 개선됨을 알 수 있다. 실험을 위한 입력 Source와 출력 측정 장비로는 Agilent사의 E4438C(ESG Vector Signal Generator) 와 E4448A(PSA Series Spectrum Analyzer)를 사용하였다.



(a)



(b)

그림 9. 실제 제작된 모듈의 위상 잡음 실험 결과 비교 그래프 (a) 일반적인 주파수 변환 모듈 (b) 제안된 주파수 변환 모듈

**Fig. 9** A graph resulted the phase noise measuring of (a) Conventional frequency-shifting module, (b) Proposed frequency-shifting module

표 2. 실제 제작된 모듈의 위상 잡음 실험 결과 비교표  
 (a) 일반적인 주파수 변환 모듈 (b) 제안된 주파수 변환 모듈

**Table 2.** Resulted from the phase noise measuring of (a) Conventional frequency-shifting module, (b) Proposed frequency-shifting module

Marker	(a) dBc/Hz	(b) dBc/Hz
50Hz	- 61.83	-93.53
100Hz	- 56.91	-97.28
500Hz	- 64.93	-97.17
1kHz	- 75.12	-102.21
10kHz	- 102.53	-114.87
25kHz	- 110.06	-116.17
100kHz	- 121.14	-120.92
500kHz	- 136.22	-134.81

### 3. 결 론

본 논문에서는 주파수 변환 중계기 내부의 주파수 변환 모듈의 국부 발진기의 위상 잡음 성분과 주파수 변환된 RF 출력신호의 위상 잡음 성분 사이의 수학적 모델링을 통하여 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성을 해석하였다. 또한 주파수 변환 모듈의 위상 잡음 특성을 개선하기 위한 방법으로 1차 국부 발진기의 위상 잡음성분이 상쇄되는 주파수 변환 구조를 제안하였다. 본 논문에서 제안된 주파수 변환 module에 대한 시뮬레이션 test 결과와 실제 제작한 모듈의 측정 결과 기존의 주파수 변환 중계기의 위상 잡음 특성과 비교하여 매우 우수한 특성으로 개선됨을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2003년도 한국항공대학교 교비 특별연구 과제 연구비에 의하여 지원된 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

[1] 이상근, 방효창, IMT-2000 CDMA 기술, pp217-229, 세화, 2000.  
 [2] G. D. Vendelin, A. M. Pavio, U. L. Rohde, Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques, pp418-442, 1990.  
 [3] K. Tajima, and K. Kawakami, and A. Kagohara, and K. Itoh, Phase Noise Effect on Frequency Measurement Error of IFM Receiver, pp1815-1818, MTT-S International Microwave Symposium Digest 98.3(1998

Vol,III [MWSYM], 1998.

- [4] LEON W. COUCH, A study of a Driven Oscillator with FM Feedback by use of a Phase-Lock-Loop Model, pp357-366, vol MTT-19 No.4 APRIL1971.
- [5] Stephen J. Erst, Receiving Systems Design, pp51-53, Artech House, Inc, 1985.
- [6] Behzad Razavi, RF MICROELECTRONICS, pp118-165, Prentice Hall PTR Prentice-Hall, Inc, 1998.

## 저 자 소 개



### 변 증 대 (邊 鍾 大)

1989년: 국민대학교 전자공학과 학사  
 1991년: 국민대학교 전자공학과 석사  
 2004년: 국민대학교 전자공학과 박사과정  
 경력 및 활동: 현광전자 통신 부설 연구소 연구소장(98~현재)  
 주요연구분야: Microwave용 LNA 설계 및 개발  
 Tel: 02-908-0861  
 Fax: 02-900-1430  
 E-mail: jdbyun@heti.co.kr



### 하 태 응 (河 泰 雄)

1999년: 국민대학교 전자공학과 학사  
 2001년: 국민대학교 전자공학과 석사  
 경력 및 활동: 현광전자통신 부설 연구소 근무(99~현재)  
 주요연구분야: 이동통신용 증계기 및 GPS 수신기 설계 및 개발  
 Tel: 02-908-0861  
 Fax: 02-900-1430  
 E-mail: twlms26@heti.co.kr



### 김 진 수 (金 鎭 守)

1991년: 국민대학교 전자공학과 학사  
 1993년: 국민대학교 전자공학과 석사  
 경력 및 활동: 해태전자 통신연구소 근무(92~99)  
 현광전자통신 부설 연구소 근무(99~현재)  
 주요연구분야: 이동통신용 광증계기 및 Microwave 증계기 설계 및 개발  
 Tel: 02-908-0861  
 Fax: 02-900-1430  
 E-mail: kjeans@heti.co.kr



### 박 준 석 (朴 准 奭)

1991년: 국민대학교 전자공학과 학사  
 1993년: 국민대학교 전자공학과 석사  
 1996년: 국민대학교 전자공학과 박사  
 경력 및 활동: Dept. of EE, UCLA/P.D. Fellow(97~98)  
 순천향 대학교 정보기술공학부/조교수(03)  
 (주) 아모텍 / 기술고문(00~현재)  
 (주) Wavics / 기술고문(01~현재)  
 국민대학교 공과대학 전자정보통신공학부/조교수(03~현재)  
 주요연구분야: RFIC, MMIC, LTCC 기술을 이용한 RF/Microwave 하이브리드 모듈 디자인 및 해석  
 Tel: 02-910-4829  
 Fax: 02-910-4646  
 E-mail: jspark@kookmin.ac.kr



### 임 재 봉 (林 在 鳳)

서울대학교 전기공학과 학사  
 서울대학교 전기공학과 석사  
 서울대학교 전기공학과 박사.  
 경력 및 활동: 충남 대학교 공과대학 전자공학과/조교수  
 미국 텍사스 주립대학교 전기공학과/조교수  
 한국통신학회/이사  
 SKT,홍창,삼성전자,Netel,A-telsys/기술고문  
 제 21회 산학협동대상 수상  
 국민대학교 전자정보통신공학부 / 교수  
 주요연구분야: GPS 시스템 application, 셀룰라 / IMT-200용 광증계기 설계  
 Tel: 02-910-4703  
 Fax: 02-910-4646  
 E-mail: