

X-대역 레이더용 국부 발진기의 설계 및 구현

김기래*

Design and Implementation of Local Oscillator for X-Band Radar

Gi-Rae Kim*

요 약

본 논문은 GaAs MESFET를 이용하여 X-band 레이더용 국부발진기를 설계 및 제작하였다. GaAs MESFET는 매우 낮은 저잡음특성과 높은 전하이동도를 가지기 때문에 초고주파용 저잡음 발진기에 적합하다. 본 논문의 발진기 설계 방법은 RF 공진기를 사용하지 않고 능동소자의 부성저항 특성과 임피던스 정합법에 의해 이루어진다. 따라서 RF 공진기가 차지하는 면적을 줄일 수 있고 MMIC화가 가능하여 발진기의 크기를 소형화할 수 있는 장점이 있다. 설계된 발진기는 중심주파수 10.545 GHz에서 출력 2.30 dBm을 나타낸다.

ABSTRACT

In this paper, a local oscillator for X-band radar system is designed and fabricated with GaAs MESFET. GaAs MESFET is good for microwave oscillators because of very low noise figure and high electron mobility. Oscillator design methods in this paper are used the characteristic of negative resistance of active component and impedance matching technique without RF resonator. So, oscillator is designed in compact size because space of RF resonator is reduced and can be applied MMIC technique. Designed oscillator has characteristic of the output power of 2.30 dBm and center frequency of 10.545GHz.

키워드

X-Band, RF Circuit, Oscillator, Negative Resistance, GaAs MESFET
X-밴드, RF 회로, 발진기, 부성저항, GaAs MESFET

1. 서론

레이더 시스템은 전자파 에너지를 송신하고 수신되는 전자파 에너지를 분석하여 거리를 측정하거나 목표물을 검출하는 용도로 사용된다. 레이더의 형태는 에너지의 송신 방식에 따라 분류하는데 일정 간격으로 펄스를 송출하는 방식을 펄스 레이더라고 부른다 [1]. 그리고 일정한 주파수를 송신하여 이동 표적으로부터 반사되어 돌아오는 주파수의 변화를 분석하

는 방식을 CW 레이더라고 한다. FMCW 레이더는 송신신호가 연속적이므로 CW 레이더의 일종이며 작은 출력으로 동작가능하고 동일한 발진기가 송수신부에 사용되어 구현이 용이한 장점으로 인해 산업용 거리계, 차량용 충돌방지 센서, 고도계 등 표적의 감시 환경이 열악한 근거리 탐색 분야에 광범위하게 응용된다[2-4]. 최근 밀리미터파 대역의 안테나 및 MMIC의 비약적인 발전에 기인하여 실용화를 촉진시키고 있다. FMCW 레이더에서 발진기는 정확한 주파수와

* 신라대학교 전자공학과(grkim@silla.ac.kr)
접수일자 : 2014. 08. 05

심사(수정)일자 : 2014. 10. 20

게재 확정일자 : 2014. 11. 10

안정도 특성이 우수해야 하며, 소형화 설계가 중요한 요소가 된다. 초정밀 레이더 시스템에 대한 시대적 요구에 부응하는 전자재료로 GaAs 등의 화합물 반도체는 Si에 비하여 전자의 이동도와 비저항율이 높아서 수동소자와 능동소자를 동일 웨이퍼 상에 제작하는 MMIC화에 유리한 장점을 갖는다[5].

초고주파 발진기에 사용되는 반도체 소자는 Gunn 다이오드와 IMPATT 다이오드 그리고 Bipolar Transistor와 GaAs MESFET 등으로 이용되는데 Gunn 다이오드를 이용한 발진기는 IMPATT 다이오드를 이용한 발진기보다 효율이나 출력전력 면에서 매우 높은 것이 장점이며 Bipolar Transistor를 이용한 발진기는 최대 발진주파수가 GaAs MESFET보다 낮은 단점이 있다[6]. 이들 소자 중에서 GaAs MESFET는 전이이동도 및 저잡음 특성으로 초고주파 발진기의 제작에 가장 일반적으로 이용되고 있다[7]. 발진기의 설계 및 해석은 임피던스를 이용한 설계 관점, 케환을 이용한 설계 관점과 반사계수를 이용한 설계 관점에 의해 이루어진다[8-9]. 본 논문에서는 반사계수를 이용한 설계방법을 기초로 하여 GaAs MESFET와 Source단에서 들여다본 임피던스의 실수부가 음의 값을 가지게 하고 이때 부가적으로 발생된 리액턴스를 상쇄하게 하는 방법을 이용하여 설계하였다. 이 방법은 기존의 RF 공진기를 이용한 발진기 설계 방법에 비해 위상잡음 특성은 다소 떨어지지만 RF공진기가 불필요하므로 발진기를 소형화할 수 있고 MMIC 설계가 편리한 장점이 있다.

II. 발진기의 발진조건

그림 1은 2-단자 회로망 발진기의 블록도를 나타낸 것이다. Z_L 은 부하 쪽의 임피던스이고 Z_S 는 게이트 단을 바라본 임피던스이다. 트랜지스터의 안정도 (stability) k 는 반사계수가 1인 원의 반지름과 원점에서 중심까지의 거리로부터 유도되며 다음과 같다.

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} \quad (1)$$

여기서, $\Delta = |s_{11}s_{22} - S_{12}S_{21}|$ 이다.

발진기가 발진조건을 만족하기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 갖추어야 한다.

$$k < 1 \quad (2)$$

$$\Gamma_{in} \Gamma_s = 1 \quad (3)$$

$$\Gamma_{out} \Gamma_L = 1 \quad (4)$$

만약 안정도 k 가 1보다 큰 트랜지스터에 대해 회로는 안정하므로, 안정도 k 가 1보다 작은 트랜지스터를 이용하여 발진기를 구성하기 위해서는 공통단자를 바꾸어 주거나 케환회로를 첨가하고, 식(3)과 식(4)를 만족시킬 수 있도록 Gate단을 설계해야한다. 여기서 게이트 단 반사계수의 크기인 $|\Gamma_s|$ 가 1보다 작으므로 $|\Gamma_{in}|$ 이 1보다 커야한다. 이 조건을 만족하기 위해서는 능동소자인 트랜지스터 측으로 바라본 입력임피던스(Z_{in})가 음의 값을 갖는 부성저항 특성을 나타내야 한다. 입사되는 에너지의 양보다 게이트 단으로 반사되는 에너지의 양이 더 많아지게 된다. 게이트단의 Q가 공진 주파수에서 매우 높으면 발진기는 그 발진 주파수에서만 매우 안정한 발진을 일으키게 된다.

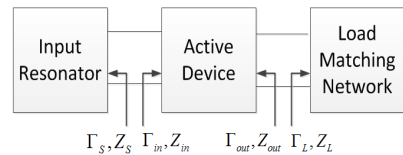


그림 1. 2단자 발진기의 구성도
Fig. 1 Configuration of two port oscillator

III. 발진기의 설계

발진기를 설계하기 위해서는 원하는 동작주파수 대역에서 충분한 이득과 출력 전력을 가지는 트랜지스터를 선정하여야 한다. 본 논문에서는 GaAs MESFET 중에서 HP사의 ATF - 13786을 선정하였고, 발진기의 설계는 반사계수 파라미터를 이용하여 발진기의 발진조건을 만족하도록 설계하였다.

선정한 트랜지스터는 안정된 상태로 발진조건을 만족하지 못하기 때문에 트랜지스터의 소스단에 리액턴스

소자를 추가하여 귀환(feedback) 루프를 만들어 발진조건을 만족하도록 설계한다. 본 논문에서는 그림 2에서 나타난 바와 같이 소스단에 리액턴스 소자로 커패시터 소자를 추가하였다. 커패시터의 용량을 변화시키면 트랜지스터의 입력 임피던스 값이 변하게 되고 발진조건인 음의 값을 갖게 될 수 있다. 그림 2는 선택된 트랜지스터에 귀환소자로 커패시터를 추가하고 그 용량을 변화시키면서 입력 임피던스의 실수값과 허수값을 구하기 위한 회로이며, ADS 툴을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 트랜지스터의 게이트 단에서 입력 임피던스가 부정저항을 가지도록 커패시턴스 값을 변화시키면서 입력 임피던스의 실수 값과 허수 값을 구하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 시뮬레이션 결과에서 입력임피던스의 실수 값이 음의 값을 갖도록 하는 커패시턴스 값은 많이 존재하지만 본 논문에 커패시턴스를 0.1 [pF]인 점을 선택하였다. 이 조건에서 트랜지스터의 입력 임피던스는 $Z_{in} = -50.88 - j11.27 [\Omega]$ 이다.

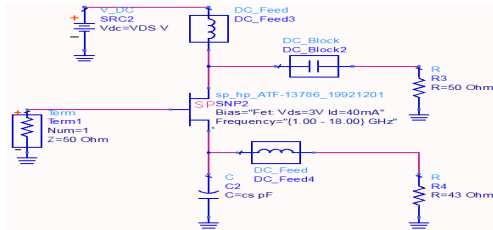


그림 2. 귀환소자를 갖는 트랜지스터 회로
Fig. 2 Simulation TR circuit with feedback

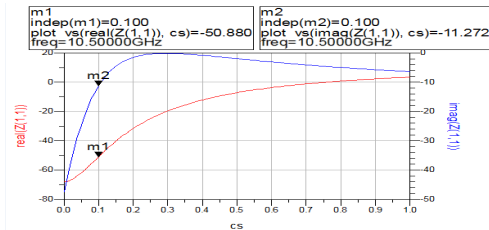


그림 3. 트랜지스터의 입력임피던스
Fig. 3 Input impedance of transistor

트랜지스터의 입력 단, 즉 게이트 단에서 발진 조건을 만족하기 위해서는 입력 임피던스의 실수 값은 음의 값을 가져야하고 허수 값의 합은 0이 되어야 한다. 입력 임피던스의 실수 값은 $-50.88 [\Omega]$ 이고 허수 값은 $-j11.27 [\Omega]$ 이다. 발진 조건을 만족하기 위해

이 허수 값의 리액턴스를 상쇄하여야 하므로 게이트 단에 $+j11.27 [\Omega]$ 의 리액턴스를 추가해야 한다. 발진 주파수에서 인덕턴스 값을 계산하면 0.24 [nH] 이다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 트랜지스터의 게이트 단자에 인덕터를 추가하여 기본적인 발진조건을 만족하는 발진기회로를 구성하였다. 그림 4와 같이 설계된 기본적인 발진회로가 소신호에서 발진조건을 만족하는지 여부를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 위해 기본 발진회로에 바이어스 회로를 추가하였다. 바이어스 특성은 $V_{DS} = 3[V]$ 일 때 $I_D = 40[mA]$ 이며, $V_{GS} = -1.0[V]$ 이다. 따라서 자기바이어스(self-bias)를 위해 소스 단자에 $25[\Omega]$ 의 저항을 연결하였고 DC와 AC회로를 분리하기 위해 DC_Feed (RFC)와 DC_Block을 추가하였다. 그림 4의 설계된 발진기 기본회로에 대해 ADS 툴을 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 결과는 트랜지스터의 게이트 단에서 반사계수(S11)의 실수 값과 허수 값을 구하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 주파수 10.5 [GHz]에서 반사계수의 실수 값이 1보다 크고, 허수 값인 위상이 0을 나타내어 소신호 발진 조건을 만족하는 것을 알 수 있다.

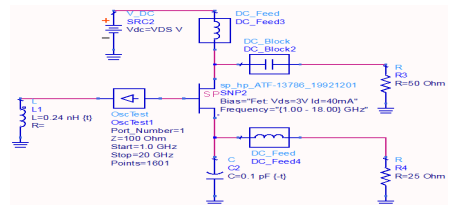


그림 4. 소신호 발진가능성 시뮬레이션
Fig. 4 Simulation of oscillation for small signal

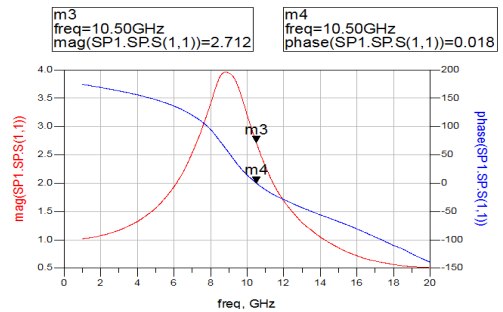


그림 5. 반사계수(S11) 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation result of reflection coefficient(S11)

그림 4에서 설계된 발전기의 기본회로는 집중소자로 구성되었다. 집중소자는 자가 공진 주파수(SRF)로 인하여 X-대역의 주파수에서는 특성을 나타내지 못하므로 분포소자인 마이크로스트립 라인으로 변환하여 발전기를 설계하였다. 그림 4의 커패시터와 인덕터를 마이크로 스트립 선로로 변환하는 과정을 ADS 툴을 이용하여 계산하였다. 먼저, 그림 4의 소스 단에 있는 귀환 커패시터를 전송선로로 변환한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에는 커패시터 외에 소스 단에 추가되는 바이어스회로까지 고려하여 나타내었다. 커패시터 기능을 대체할 개방 스텐트와 RFC기능의 스트립선로 2개, 그리고 셀프바이어스를 위한 저항으로 구성하여 소스 단을 설계한 것이다. 그림 7은 개방된 전송선로(TL2)의 길이를 변화하면서 집중소자 커패시터와 스미스차트상의 같은 리액턴스 값을 갖는 전송선로의 길이를 나타낸 그림이다. 그 결과 개방된 전송선로의 길이가 0.91 [mm] 일 경우 집중소자의 리액턴스 값과 일치함을 알 수 있다.

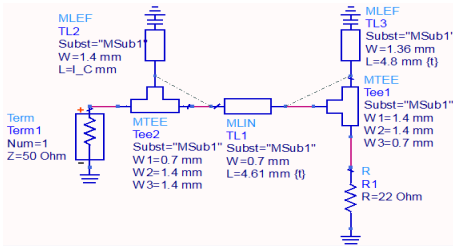


그림 6. 소스단 커패시터의 전송선로로 변환
Fig. 6 Capacitor convert to transmission line

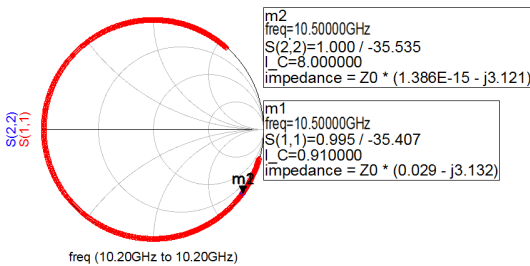


그림 7. 개방 전송선로 길이
Fig. 7 Length of open transmission line

다음 단계는 소스단에서 발생한 리액턴스를 상쇄하기 위해 게이트단에 삽입한 인덕터도 같은 방법으로

전송선로로 변환할 수 있다. 그림 8은 집중소자 인덕터를 전송선로로 변환하기 위한 단락된 전송선로와 저항, RFC로 구성된 회로도도를 나타낸 그림이다. 그림 8은 상단부의 전송선로와 하단부의 인덕터 0.24 [nH]가 발전 주파수에서 리액턴스가 같도록 전송선로의 길이를 구하는 시뮬레이션 회로이다. 집중소자를 하단부와 같이 회로를 구성한 뒤 단락된 전송선로의 길이를 변화시켜 집중소자 인덕터와 스미스차트 상의 리액턴스가 일치하는 길이를 구하는 것이다. 그림 9에서 나타낸 바와 같이 단락된 전송선로의 길이가 9.31 [mm]일 경우 집중소자 인덕터와 같은 리액턴스 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

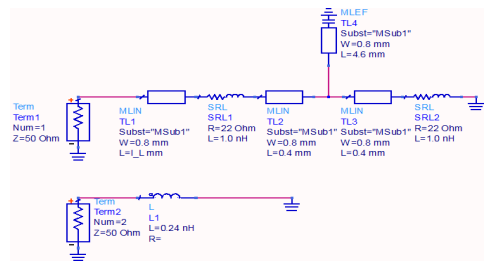


그림 8. 인덕터의 전송선로 변환
Fig. 8 Inductor convert to transmission line

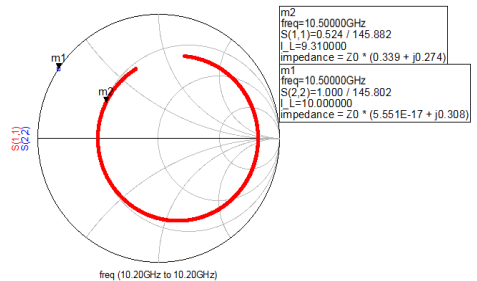


그림 9. 단락 전송선로 길이
Fig. 9 Length of short transmission line

DC Block 회로를 집중소자 커패시터를 사용하게 되면 주파수가 높을 경우 기생적인 인덕터와 저항 성분이 포함되어 발전에 나쁜 영향을 주게 된다. 발전기에 최소의 영향을 주어야 하기 때문에 결합전송선로를 이용하여 DC블록을 설계하였다.

그림 10에서 보논바와 같이 결합전송선로와 바이어스 회로를 추가하여 DC블록을 설계하였다. 그림 11은 DC블록 회로도도의 결합전송선로 길이에 변화를 주어

본 논문에서 제안된 주파수대역에서 가장 작은 삽입 손실을 가지는 길이를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 결합전송선로의 길이가 5.09 [mm] 일 경우 가장 작은 손실을 가지는 것을 알 수 있다.

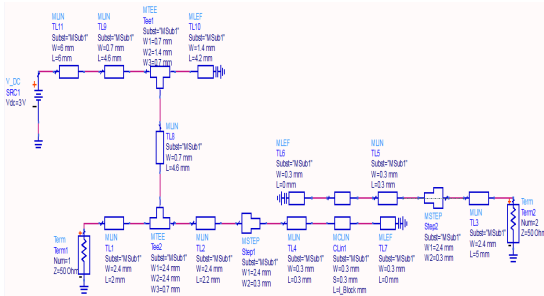


그림 10. DC 블록 시뮬레이션 회로도
Fig. 10 Simulation circuit of DC block

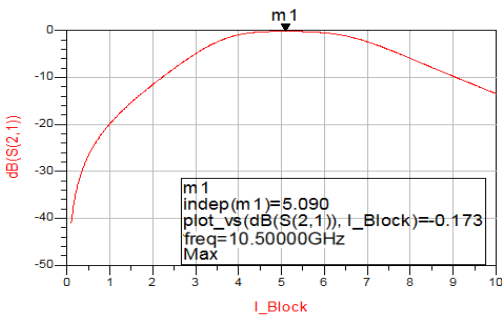


그림 11. 길이의 변화에 따른 DC블록의 특성
Fig. 11 Characteristic of DC block

그림 12는 전송선로로 설계된 발진기의 전체 회로도를 나타낸 그림이다. 그림 13은 전송선로로 설계된 발진기의 소신호발진가능성을 나타낸 결과이다. 그 결과 본 논문에서 제안된 주파수 대역인 10.2 [GHz]에서 소신호 발진이 일어나는 것을 알 수 있다. 그림 14는 설계된 발진기의 발진 주파수, 신호 크기 및 하모닉 신호의 크기의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 결과 값이 소신호 해석의 발진주파수와 약간 차이를 보이는 것은 시뮬레이션 도구에서 소신호 트랜지스터와 대신호 트랜지스터 모델의 오차에 기인한 것이다. 이것은 발진기의 제작시 EM 시뮬레이션 과정을 통해 조정이 가능하다.

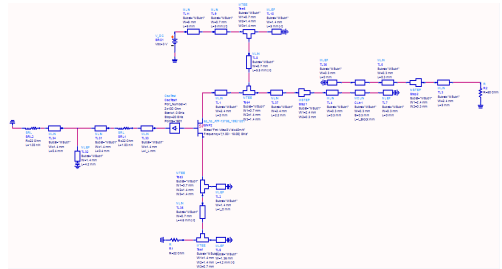


그림 12. 전송선로를 이용한 발진기 회로도
Fig. 12 Circuit of oscillator with transmission line

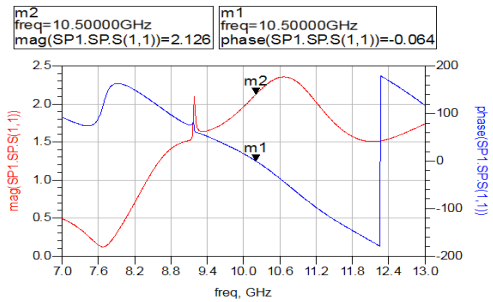


그림 13. 설계된 발진기의 발진조건 결과
Fig. 13 Oscillation result of designed oscillator

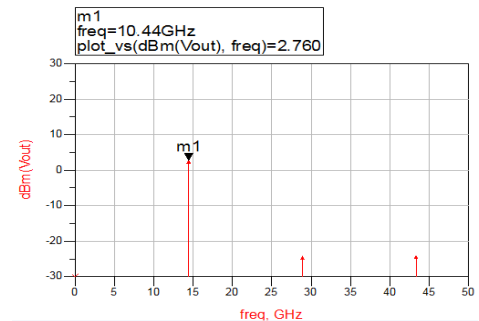


그림 14. 대신호 발진 시뮬레이션 결과
Fig. 14 Oscillation result for large signal

IV. 발진기 제작 및 측정

트랜지스터의 동작점은 I_D 는 40[mA], V_{DS} 는 3.0[V], V_{GS} 는 -1.0[V]가 되도록 회로를 설계하였고 바이어스 방법은 자기 바이어스 방법을 이용하여 설계하였다. 그림 15는 발진기의 최적화된 값을 고려하여 제작된 발진기를 나타내었다. 그림 16은 제작된 발진기의 측정된

결과를 나타낸 그림이다. 발진기의 스펙트럼 특성은 스펙트럼 분석기를 사용하였고 제작된 발진기의 발진 주파수는 10.543 [GHz]이고 출력은 2.34 [dBm]이다.

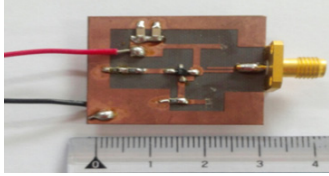


그림 15. 제작된 X-band용 발진기 사진
Fig. 15 Photo of designed oscillator

V. 결론

본 논문에서는 반사계수를 이용한 설계방법을 기초로 하여 GaAs MESFET와 Source단에서 들여다본 임피던스의 실수부가 음의 값을 가지게 하고 이때 부가적으로 발생한 리액턴스를 상쇄하게 하는 방법을 이용하여 설계하였다. 이 방법은 기존의 RF 공진기를 이용한 발진기 설계 방법에 비해 위상잡음 특성은 다소 떨어지지만 RF공진기가 불필요하므로 발진기를 소형화할 수 있고 MMIC 설계가 편리한 장점이 있다. 제작된 발진기의 측정결과는 발진주파수 10.543 [GHz]에서 2.34 [dBm]이 측정 되었다. 본 논문의 발진기는 X-대역 레이더의 수신부의 국부 발진기로 사용될 수 있다.

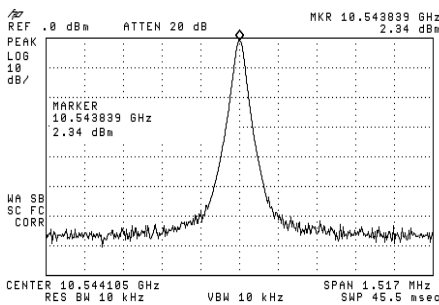


그림 16. 제작된 발진기 측정결과
Fig. 16 Experiment result of designed oscillator

References

[1] D. Barton and H. Ward, *Handbook of Radar Measurements*. New Jersey : Prentice Hall, 1969.

[2] S. A. Hovanesian, *Radar System Design and Analysis*. New York : Artech House Inc., 1984.
 [3] J. Kim, J. Lim, J. Jun, T. Kim, K. Ahn, and S. Lee, "Development of a Microwave Level Meter Using YIG-VCO for Industrial Process," *The J. of Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 11, no. 1, 2000, pp. 18-25.
 [4] A. Stove, "Obstacle detection radar for car," *Electronics & Communication Engineering J.*, vol. 3, no. 5, Oct. 1991, pp. 232-240.
 [5] A. Madjar, "A large-signal Model for the GaAs MESFET," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech*, IEEE MIT-34, no. 10, Oct. 1986, pp. 1059-1063.
 [6] G. Kim, J. Yoon, and Y. Lee, *RF Circuit Design*. Seoul : Chung mun gak, 2010, pp. 593 - 681.
 [7] K. Yeom, *Active Microwave Design theory and introduction*. Seoul : Hongriling publishing company, 2008, pp. 396-499.
 [8] Y. Yoon, *RF active circuit design theory and practical*. Seoul : Hongriling publishing company, 2005, pp. 74-95.
 [9] J. Hong and B. Kim, "A Study on Inset Fed Microstrip Antenna Loaded with Complementary Single loop Resonator," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 8, Aug. 2014, pp. 921-926.

저자 소개



김기래(Gi-Rae Kim)

1986년 서강대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1988년 서강대학교대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1998년 경남대학교대학원 전자공학과(공학박사)
 1988년~1993년 삼성전자(주) 정보통신연구소
 1993~1999년 마산대학교 정보통신공학과 교수
 1999년~현재 신라대학교 공과대학 전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : 초고주파 회로 설계, MMIC, 전파 해석 및 모델링