

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.4.1>

JIWIT 2012-4-1

특정 물질 검출을 위한 비 접촉식 마이크로웨이브 센서

A Contactless Microwave Sensor for Detection of particular Materials

기현철*

Hyeon-Cheol Ki

요약 전자기파와 반응하는 주파수가 너무 높아 기존의 UWB 센서로 검출하기 어려운 공기 중의 특정 물질 입자를 검출하기 위한 마이크로웨이브 센서 구조를 제시하고 실험 제작하였다. 10GHz의 상향주파수로 공기 중의 수분입자를 검출하는 실험 결과 수분입자의 유무에 따라 75%의 검출 신호 크기의 변화가 발생함을 확인하였다. 이는 다른 물질을 검출하는 데도 같은 방법이 적용될 수 있으므로 수십 GHz이상의 높은 주파수 대역에서 특정 물질을 검출하기에 유용한 구조가 될 수 있을 것이다.

Abstract We suggested a microwave sensor structure and fabricated experimentally to detect particular particles in the air which are difficult to detect using conventional UWB sensors because their reaction frequencies to electromagnetic waves are too high. In the experiment to detect water particles in the air with up-conversion frequency of 10GHz, we verified detect signal amplitude variation of 75% depending on presence or absence of water particles. The suggested structure can be useful to detect particular materials at the high frequencies more than a few 10th GHz, because the same method can be applied to detect other materials.

Key Words : UWB 센서, 마이크로웨이브 센서, 광대역 센서, 물질검출, 무선 센서

1. 서론

전자기파인 마이크로웨이브(microwave)가 특정물질과 반응하는 특성을 분석함으로써 특정 물질의 성분이나 유무를 찾아 낼 수 있다. 이러한 방법은 무선으로 비 접촉식 측정이 가능하고 사용이 간편하며 연속적이고 빠른 측정이 가능하다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 화력 발전소에서 불완전 연소로 인한 탄소 입자의 유무 및 농도를 마이크로웨이브를 이용하여 비 접촉식으로 측정하기 위한 센서를 구현하기 위해 센서구조와 측정방식에 대

한 연구를 한다. 그러나 측정 대상은 탄소 입자에 국한하지 않고 다양한 물질의 입자들에 대해서도 적용될 수 있도록 한다.

유전체 내에서 전기장(electric field)은 교번함에 따라 그 세기나 방향이 변화하고 유전체 내의 유전 분극(dielectric polarization) 입자도 이에 따라 그 방향과 위치를 변화시킨다. 이 때 분극 입자가 다른 입자와 부딪치면서 에너지를 소모한다. 또한 전기장에 의해 분극 입자가 움직일 때 완화시간(τ : relaxation time)이 필요하므로 전기장과 분극 즉, 전속(electric flux) 사이에는 위상차가 발생하게 되며

*정회원, 가천대학교 전자공학과
접수일자 : 2012년 5월 29일, 수정완료 : 2012년 7월 7일
게재확정일자 : 2012년 8월 10일

Received: 29 May 2012 / Revised: 7 July 2012 /

Accepted: 10 August 2012

**Corresponding Author: hcki@gachon.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Gachon University, Korea

이것이 에너지 손실을 야기한다.

전계의 교번 주기(T)가 완화시간(τ)보다 큰 낮은 주파수 ($f=1/T$)에서는 단위시간 동안 분극 입자가 재정렬하는 횟수도 적으므로 유전손실(dielectric loss)도 작다. 주파수가 증가함에 따라 유전손실도 증가하여 $f=1/\tau$ 일 때 최대가 된다. 주파수가 $1/\tau$ 보다 증가할 경우 분극 입자가 주파수에 따라 재정렬을 제대로 하지 못하므로 유전손실이 오히려 감소하게 된다. 따라서 특정 물질은 특정 주파수 대역의 전자기파를 흡수하는 특성을 보이게 된다.

초 광대역(UWB: Ultra Wide Band) 주파수를 이용하여 물질의 이러한 전자기파 흡수특성을 찾아내면 다양한 물질을 단시간에 검출할 수 있게 된다. 따라서 물질 검출 센서로서 UWB파의 사용이 확대되고 있다. UWB 기술은 사인파 기술(sine wave technique), 임펄스 기술(impulse technique) 및 상관 기술(correlation technique)로 분류된다^[1].

사인파 기술은 주파수를 서서히 변화시키면서 측정 대상 물질에 사인파를 인가하고 물질과 반응한 파를 수신하여 그 특성을 분석함으로써 특정 물질을 감지한다. 각 주파수 점에서 감지하므로 협대역 필터를 사용한 잡음제거가 가능하여 매우 우수한 감도를 얻을 수 있으나 복잡한 주파수 합성기를 필요로 하는 등 복잡하고 집적 회로화 하는 것이 어려워 가격경쟁력이 떨어지며 큰 시장을 확보하는 것을 기대하기 어렵다.

임펄스 기술은 측정 대상 물질에 임펄스를 인가하고 물질과 반응한 파형을 ADC(Analog to Digital Conversion)하여 받아들이고 DSP(Digital Signal Processing)를 통해 그 특성을 분석함으로써 특정 물질을 감지한다. 일반적인 임펄스 시스템은 비교적 저가로 제작할 수 있어 현재 가장 널리 쓰이고 있는 기술이다. 그러나 큰 전압의 신호를 다루야 한다는 어려움과 넓은 대역폭을 통해 신호를 획득함에 따른 잡음문제로 높은 수신 감도를 유지하기 어려운 점등의 문제가 있다.

상관 기술은 임펄스 기술과 유사하나 특정 테스트 신호(test signal)를 사용하는 대신 일련의 신호로부터 상관 관계를 구하여 그 특성을 분석한다. 따라서 임펄스에 비해 침투 전압이 작으면서도 큰 평균전력을 갖는 광대역의 테스트 신호를 인가할 수 있다. 테스트 신호의 큰 평균전력은 감도를 향상시키고 넓은 대역은 측정 속도를 높이게 된다. 또한, 낮은 파고율(crest factor)로 인한 낮

은 전압 신호는 집적 회로로의 구현이 가능하도록 해주므로 시스템의 성능향상과 더불어 단가 절감이 가능하도록 해준다. 따라서 상관 기술은 마이크로웨이브 센서의 저가격과 소형화로 광범위한 응용을 가능하게 할 기술이라 할 수 있다. 본 논문에서는 상관 기술을 근간으로 공기 중에 있는 특정 물질의 입자를 검출하기 위한 마이크로웨이브 센서의 구조에 대해 연구한다.

II. 마이크로웨이브 센서의 구조와 원리

상관원리(correlation principle)를 이용하면 임의의 파형을 테스트 신호로 사용할 수 있다. 따라서 유사잡음코드(Pseudorandom Noise Code)를 테스트 신호(test signal)로 사용한다. 이 경우 임펄스 기술에 비해 테스트 신호의 파고율이 낮아지므로 저전압 회로로써 구현이 가능해진다. 또한, 유사잡음코드는 주기적 신호이므로 평균을 취함으로써 잡음을 억제할 수 있을 뿐만 아니라 언더 샘플링(undersampling)으로 신호를 획득할 수 있으므로 광대역 신호를 저가의 부품으로 획득할 수 있다.

그림 1은 공기 중의 특정 물질 입자를 검출하기 위해 본 논문에서 제시하는 마이크로웨이브 센서의 구조를 보여주고 있다. 클럭발생기는 전체 시스템의 클럭을 생성하고 있으며 클럭의 주기를 T_{ck} 라고 하면, n-단의 시프트 레지스터로 구성된 PN코드 발생기에서 생성하는 유사잡음코드 $x(t)$ 의 주기 T_{pn} 은 다음 수식으로 표현된다.

$$T_{pn} = (2^n - 1) T_{ck} \quad (1)$$

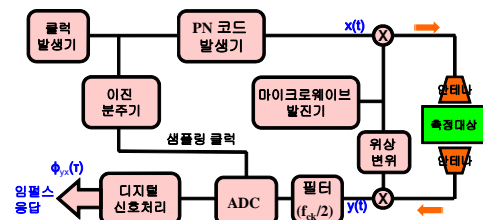


그림 1. 공기 중의 특정 물질 입자를 검출하기 위한 마이크로웨이브 센서의 구조

Fig. 1. Structure of the microwave sensor to detect particular particles in the air

유사잡음코드를 언더샘플링하기 위한 샘플링 클럭은 n-단으로 구성된 이진분주기로부터 간단히 구해질 수

있으며 이 경우 샘플링 주파수 f_s 는 다음과 같다.

$$f_s = 2^{-m} f_{ck} \quad (2)$$

여기서 $f_{ck}=1/T_{ck}$ 로서 클럭 주파수이다.

디지털 신호처리 블록은 측정 대상과 반응한 후의 신호 $y(t)$ 를 ADC를 통해 디지털 신호로 받아 인가해준 유사잡음코드 $x(t)$ 와의 교차상관(cross-correlation) $\Phi_{xy}(\tau)$ 를 구하여 특정물질을 검출하게 된다. 즉, 측정대상의 임펄스 응답을 $g(t)$ 라고 하면 입력에 해당하는 자기상관(auto-correlation) $\Phi_{xx}(\tau)$ 와 출력에 해당하는 교차상관(cross-correlation) $\Phi_{yx}(\tau)$ 의 관계는 다음의 컨벌루션(convolution) 식으로 표현될 수 있다.

$$\Phi_{yx}(\tau) = g(\tau) * \Phi_{xx}(\tau) \quad (3)$$

테스트 신호의 대역폭이 충분히 클 경우 자기상관 함수는 임펄스 함수와 같아지므로 $\Phi_{xx}(\tau) \approx \delta(\tau)$ 가 된다. 따라서 식(3)으로부터 $\Phi_{yx}(\tau) \approx g(\tau)$ 가 된다. 결국 측정 대상 물질에 대한 임펄스응답 $g(\tau)$ 는 다음 수식으로 표현된다.

$$g(\tau) \approx \Phi_{yx}(\tau) = \int y(t)x(t+\tau)dt \quad (4)$$

결과적으로 교차상관 $\Phi_{yx}(\tau)$ 을 구하여 그 특성을 분석함으로써 특정물질의 유무를 판단할 수 있다. 한 주기 동안 샘플된 유사잡음코드 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$ 이고, 반응한 후의 신호 $\mathbf{y}=[y_1, y_2, y_3, \dots, y_N]$ 이라고 하면 교차상관 $\Phi_{yx}=[\Phi_{yx,1}, \Phi_{yx,2}, \Phi_{yx,3}, \dots, \Phi_{yx,N}]$ 는 다음의 행렬식으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{yx,1} \\ \Phi_{yx,2} \\ \Phi_{yx,3} \\ \vdots \\ \Phi_{yx,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_N \\ x_N & x_2 & x_3 & \dots & x_{N-1} \\ x_{N-1} & x_2 & x_3 & \dots & x_{N-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

한편, 유사잡음코드의 스펙트럼은 그림 2에 보인 바와 같다. ADC에서 언더샘플링을 했지만 등가적인 샘플링 주파수(equivalent sampling frequency)는 클럭 주파수

f_{ck} 로 볼 수 있다. 따라서 에일리어싱(aliasing)이 없이 측정 가능한 최대 대역폭은 $f_{ck}/2$ 가 된다^[2].

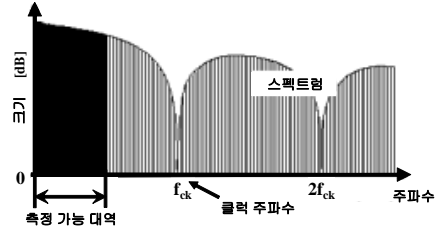


그림 2. 유사잡음코드의 스펙트럼
Fig. 2. Spectrum of pseudorandom noise code

마이크로웨이브 센서 시스템에서 가장 고속 동작이 요구되는 블록은 유사잡음코드 발생기, 이진분주기 및 ADC이다. 따라서 이들 블록을 고속 집적회로로 구현함으로써 고속 특성과 아울러 단가 절감 효과를 얻을 수 있다. 실제로 SiGe BiCMOS공정을 이용하여 고속 집적회로화 할 경우 7GHz 정도의 클럭 주파수에서 동작시킬 수 있다^[3]. 이 경우 측정가능 대역은 3.5GHz 정도가 된다. 그러나 본 논문에서 검출하고자하는 공기 중의 특정 물질 입자들의 반응 주파수 대역은 매우 높을 뿐만 아니라 물질 간에도 편차도 매우 크다.

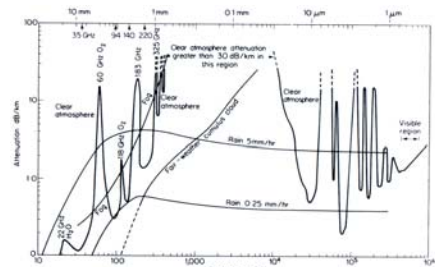


그림 3. 물질에 따른 전자기파 흡수 특
Fig. 3. Absorption characteristics of electromagnetic wave depend on material

그림 3은 물질에 따른 전자기파 흡수 특성을 보여주고 있다^[4]. 많은 물질들이 수십 내지 수백 GHz대역에서 반응하고 있으며 이와 같은 물질들을 검출하기 위해 마이크로웨이브 센서의 대역폭을 확장하는 방법은 현재 기술로 실현이 가능하지 않다고 할 수 있다^[5,6]. 그러나 각 물질의 흡수 특성은 특정 주파수 점을 중심으로 비교적 넓지 않은 대역폭으로 반응하고 있으므로 대역폭을 확장하

는 대신 이동하는 방법이 가능하다. 그림 1에서 마이크로웨이브 발진기에 나온 주파수 f_M 은 혼합기를 통해 유사 잡음코드 $x(t)$ 의 주파수대역을 상향변환(up-conversion)하여 준다. 이 경우 측정 가능 대역은 $f_M - f_{ck}/2$ 로부터 $f_M + f_{ck}/2$ 까지가 되어 f_M 만큼 상향 이동함과 동시에 대역폭도 f_{ck} 로 되어 2배로 증가한다. 측정대상과 반응한 신호는 f_M 만큼 하향변환(down-conversion)되어 본래 주파수 대역으로 환원된 후 ADC에 인가된다.

III. 실험 및 측정

본 실험에서 확인하고자하는 것 중 가장 중요한 것은 저주파 대역의 테스트 신호를 특정 물질이 반응할 수 있는 주파수 대역까지 상향변환 하여 반응시킨 후 다시 하향변환 하였을 때 그 반응 결과가 제대로 남아있어 특정 물질 검출에 활용할 수 있는지를 확인하는 것이다. 따라서 애초 설계한 그림 1의 마이크로웨이브 센서 구조에서 위의 목적에 지장을 주지 않는 범위 내에서 회로를 개조하여 단순화함으로써 실험용 프로토타입 제작에서 발생할 수 있는 현실적 어려움을 피하고자 하였다. 즉, 아직 초광대역 유사 잡음 코드 발생기가 상용화되어 있지 못하고, 초고속 ADC도 매우 고가이므로 초 광대역을 구현함에 있어 현실적인 한계가 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 초 광대역의 유사 잡음 코드 대신 좁은 대역의 구형파를 사용하였으며, 이 구형파 신호를 상향변환 하여 반응시킨 후 다시 하향변환 하여 그 반응 결과를 분석하고자 한다.

그림 4는 실험용으로 제작된 마이크로웨이브 센서를 보여주고 있다. 그림4(a)는 제작된 마이크로웨이브 센서의 사진이고 그림4(b)는 블록도이다. 마이크로웨이브 발진기에서 생성된 10GHz의 신호는 3dB-분배기를 통해 이분된다. 이분된 신호 중 한 쪽은 SPST(Single Pole Single Through) 스위치에 인가되고 SPST 스위치가 신호발생기에서 생성된 테스트 신호에 의해 스위칭 됨으로써 상향변환된 테스트 신호가 생성되어 안테나를 통해 측정대상 물질에 조사된다. 측정대상과 반응한 신호는 수신 안테나를 통해 수집되어 LNA(Low Noise Amplifier)를 통해 증폭된 후 혼합기에 인가된다. 혼합기에 인가된 신호는 분배기에서 이분된 나머지 한쪽의 신호와 혼합되어 하향변환 된 후 디지털 신호처리 보드에 인가된다. 디지털 신호처리 보드에서는 수신된 신호를

디지털 신호처리로 분석하며 그 결과는 컴퓨터를 통해 확인할 수 있도록 구성되었다.

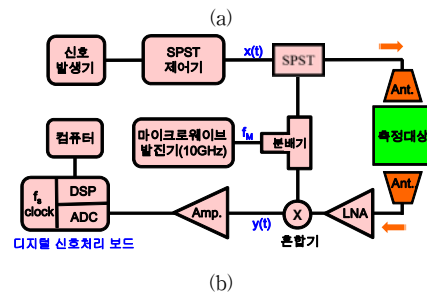
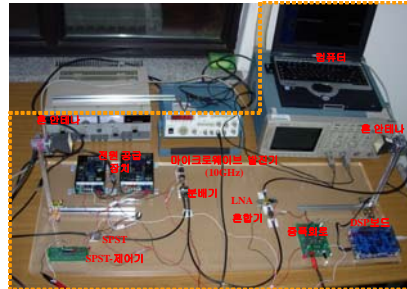


그림 4. 제작된 마이크로웨이브 센서

(a) 사진 (b) 블록도

Fig. 4. Fabricated microwave sensor

(a) Photograph (b) block diagram

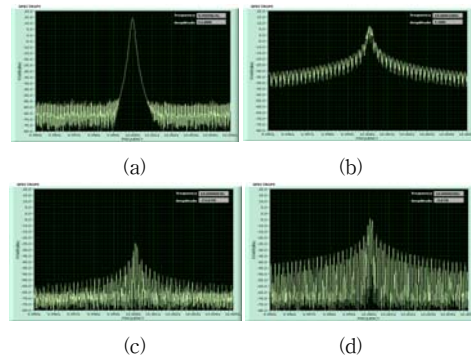


그림 5. 제작된 마이크로웨이브 센서로부터 측정된 신호

(a) 마이크로웨이브 발진기 출력 (b) 송신 안테나 입력 신호

(c) 수신 안테나 출력신호 (d) LNA 출력신호

Fig. 5. Measured signals from the fabricated microwave sensor

(a) Output of microwave generator (b) Input signal of Tx-antenna (c) Output signal of Rx-antenna (d) Output signal of LNA

그림 5는 제작된 마이크로웨이브 센서로부터 측정된 신호를 보여준다. 그림5(a)는 마이크로웨이브 발진기의

출력으로서 10GHz에서 14dBm의 출력을 내고 있으며 사이드 로브 없이 깨끗하게 발전되고 있음을 보여준다. 그림 5(b)는 SPST스위치를 거쳐서 상향변환된 테스트 신호(4KHz의 구형파)가 송신 안테나로 인가될 때의 스펙트럼으로서 10GHz에서 7.5dBm의 출력을 보여주고 있다. 이는 분배기 감쇄 -3dB와 토글되는 스위치에 의한 감쇄 -3dB를 고려할 때 신호전달 과정에서 추가로 0.5dB만큼의 감쇄가 발생하고 있음을 보여준다. 그림 5(c)는 수신 안테나의 출력신호로서 10GHz에서 -24.67dBm의 출력을 보여 1M의 거리를 송수신하는 과정에서 32.17dB의 감쇄가 발생했음을 알 수 있다. 또한 스펙트럼의 특성에서 수많은 주파수 성분이 새로이 생성되었음을 볼 수 있으며 이는 측정대상물질과의 반응에 의한 것 외에도 주변에서 반사되어 들어오는 파나 매질의 비선형적 특성에 의해 생성된 하모닉들도 포함되어 있을 것으로 추정된다. 그림 5(d)는 저잡음 증폭기의 출력신호로서 10GHz에서 -3.67dBm의 출력을 나타내고 있어 저잡음 증폭기에서 21dB의 이득을 얻고 있음을 볼 수 있다.

로 세로가 각각 50cm 이고 두께가 3cm인 마른 스폰지를 두 안테나 사이에 가로 질러 놓아 마른 스폰지 장벽을 형성한 상태에서 디지털 신호처리된 최종 수신 파형의 스펙트럼과 시간영역 파형을 각각 보여준다. 마른 스폰지는 전자기파에 특별한 반응을 보이지 않으므로 수신된 파형에서 특별한 변화가 감지되지 않았다. 반면에 그림 6(b)와 (d)는 스폰지를 물에 적신 후 꼭 짜서 약간의 수분이 남아있도록 하여 수분 입자가 스폰지 장벽에 분포하도록 한 상태에서의 측정 결과이다. 마른 스폰지 장벽의 결과에 비해 스펙트럼의 모양에는 큰 변화가 없으나 신호의 크기가 약 25%로 급격히 감쇄됨을 확인할 수 있었다. 따라서 저주파 대역의 테스트신호를 상향 변환하여 특정 물질에 반응시킨 후 하향변환 하여 반응 특성을 분석함으로써 공기 중의 특정 물질 입자를 검출하는 것이 가능함을 확인하였다. 공기 중의 특정 물질 입자를 검출하기 위해 본 논문에서 제시한 구조의 센서는 기존의 UWB 센서에 비해 적은 비용으로 더 높은 주파수에서 반응하는 물질을 검출할 수 있을 것으로 기대된다.

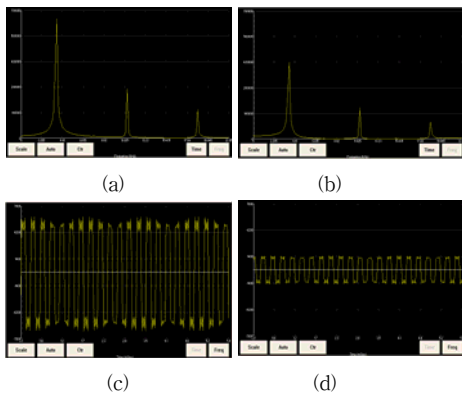


그림 6. 제작된 마이크로웨이브 센서를 이용하여 수분입자를 측정된 신호
(a),(c)마른 스폰지 장벽이 있을 때 최종 수신 신호의 스펙트럼 과 시간영역 신호. (b),(d)젖은 스폰지 장벽이 있을 때 최종 수신 신호의 스펙트럼과 시간영역 신호

Fig. 6. Measured signal of water particles using the fabricated microwave sensor
(a),(c)Spectrum and time domain signal with a barrier wall of dry sponge
(b),(d)Spectrum and time domain signal with a barrier wall of wet sponge

그림 6은 제작된 마이크로웨이브 센서를 이용하여 수분입자를 측정한 신호를 보여준다. 그림6(a)와 (c)는 가

IV. 결론

전자기파 반응 주파수 대역이 높아 기존의 UWB 센서로 검출하기 어려운 공기 중의 특정 물질 입자를 검출하기 위해 테스트 신호를 상향변환 하여 특정 물질과 반응시킨 후 하향변환 하여 분석하는 마이크로웨이브 센서 구조를 제시하고 실험적으로 제작하였다. 10GHz의 상향 주파수로 공기 중의 수분입자를 검출하는 실험을 시행한 결과 수분입자의 유무에 따라 검출 신호의 크기가 75% 변화하였다. 이는 탄소를 비롯한 다른 특정 물질 입자에 대해서도 같은 방법으로 적용할 수 있으므로 수십 GHz 이상의 높은 주파수 대역에서 특정 물질을 검출하기에 유용한 구조가 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] J. Sachs, J. Dvoracek, A. Schneider, J. Fiiedrich and R. Zetic, "Ultra-Wideband Methods applied for Moisture and Liquid Sensing," 4th International Conference on "Electromagnetic Wave Interaction

with Water and Moist Substances”, May pp.13-16, 2001.

- [2] J. Sachs, P. Peyerl and M. Robberg, “A New UWB-Principle for Sensor-Array Application,” 16th IEEE Instrument and Measurement Technology Conference, pp.1-6, May 1999.
- [3] M. Kmec, R. Herrmann, J. Sachs and P. Peyerl, “A family of M-Sequence based UWB sensors,” 51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, September pp.11-15, 2006
- [4] M. I. Skolnik, “Introduction to RADAR Systems,” 2nd Ed; McGraw-Hill, 1980.
- [5] S. Kim, and J. Ryu, “Design of 24GHz Low Noise Amplifier for Automotive Radar,” Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol.10, No.7, pp.41-47, 2012.
- [6] D. Kang, J. Ahn, and S. Son, “Development of Wireless Gantry Loader System,” Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.12, No.10, pp.42961-4301, 2011.

저자 소개

기 현 철(정회원)



구원 연구원.

- 1984년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1986년 8월 : 한양 대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1986년 ~ 1989년 : 한국 전자통신 연구원 연구원.

• 1996년 ~ 1997년 : 미국 조지아공대 post.doc

• 2010년 ~ 2012년 : 미국 UCLA 객원교수

• 1992년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 전자공학과 교수.

<주관심분야 : RFIC설계, Meta-material 응용, 아날로그 회로설계, 광통신용고속IC설계>

※ 이 논문은 2012년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임.(GCU-2012-R107)