

논문 2016-53-7-16

수동 밀리미터파 보안 검색 시스템 개발

(Development of Passive Millimeter-wave Security Screening System)

윤진섭*, 정경권**, 채연식*

(Jin-Seob Yoon, Kyung Kwon Jung, and Yeon-Sik Chae[®])

요약

본 논문에서 설계 및 제작된 보안 검색 시스템은 물체 및 사람으로부터 방사된 에너지를 수신하여 이미지화 하는 시스템이다. 제안한 보안 검색 시스템은 다채널 수신을 위한 집적화된 어레이 안테나를 적용하였으며, 16개의 4단 저잡음 증폭기와 디텍터, CCD/IR 카메라와 반사판 그리고 밀리미터파 렌즈로 구성된다. 본 시스템은 공기 중의 열잡음 신호를 감지해야 하므로, 높은 수신감도와 넓은 대역폭이 요구된다. 시스템에 사용된 저잡음 증폭기 모듈의 이득특성은 82GHz~102GHz의 대역에서 65.8dB의 평균 이득특성을 가진다. 또한 증폭기 모듈로부터 입력된 열잡음 신호를 DC 전압 값으로 나타낼 수 있는 검출기를 제작하였다. 제작된 검출기는 제로-바이어스 쇼트키 다이오드를 사용하여 물체에서 방사된 밀리미터파 신호를 DC 출력 전압으로 변환하는 방사 분석 센서이다. 제작된 검출기의 특성은 0dBm 입력전력에서 350~400mV/mW, 검출 가능 입력 전력 범위는 -10~13dBm으로 우수한 성능을 보였다. 제작된 보안 검색 시스템은 은닉된 금속 재질의 물체뿐만 아니라, 플라스틱 등으로 이루어진 물체들도 검색이 가능하다.

Abstract

The designed and fabricated millimeter-wave security screening system receives radiation energy from an object and a human body. The imaging system consist of sixteen array antennas, sixteen four-stage LNAs, sixteen detectors, an infrared camera, a CCD camera, reflector, and a focusing lens. This system requires high sensitivity and wide bandwidth to detect the input thermal noise. The LNA module of the system has been measured to have 65.8 dB in average linear gain and 82 GHz~102 GHz in bandwidth to enhance the sensitivity for thermal noise, and to receive it over a wide bandwidth. The detector is used for direct current (DC) output translation of millimeter-wave signals with a zero bias Schottky diode. The lens and front-end of the millimeter-wave sensor are important in the system to detect the input thermal noise signal. The frequency range in the receiving sensitivity of the detectors was 350 to 400 mV/mW at 0 dBm (1 mW) input power. The developed W-band imaging system is effective for detecting and identifying concealed objects such as metal or plastic.

Keywords : passive millimeter-wave imaging, concealed object, scanning reflector, millimeter-wave lens

I. 서론

밀리미터파를 이용한 수동 이미징 시스템은 물체가 가지는 온도에 비례하여 방사하는 열잡음 중에서 밀리미터파 영역의 신호를 수신하여 영상으로 만드는 방법

* 정회원, 서울대학교 컴퓨터응용과 (Department of Computer Application, Seoul University)

** 정회원, 전자부품연구원 (Korea Electronics Technology Institute)

© Corresponding Author (E-mail : amazing67@naver.com)

※ 본 논문은 2016년도 서울대학교 학술연구비에 의해 연구되었음

Received ; May 26, 2016

Revised ; June 7, 2016

Accepted ; July 3, 2016

이다. 밀리미터파는 가시광선이나 적외선에 비해 구름, 안개, 비, 먼지, 화염에 의한 감쇄가 적고, 마이크로파보다 높은 분해능을 얻을 수 있는 장점이 있다.

밀리미터파 이미지를 얻기 위한 시스템에서 2-D FPA(Focal Plane Array) 센서는 기존의 레이더 방식이나 단일소자의 스캐닝에 의한 이미지 구현방식에 비해 높은 해상도와 빠른 응답속도(Frame Rate)를 갖는다. 또한 이미지 조합을 위해 기계적 또는 전자적 스캐닝이 필요치 않기 때문에 시스템이 단순해지고 CCD 카메라의 이미지처리 기술을 접목하기 용이하여 제품의 신뢰성을 높일 수 있다. 그러나 FPA 센서를 구성하는 비용이 크기 때문에 기계적인 스캐닝 방법을 활용하고 있다^[1~5].

본 논문에서는 수동 밀리미터파 보안 검색 시스템을 제안한다. 16개의 밀리미터파 이미징 센서를 구성하여 반사판을 이용한 기계적인 스캐닝 방법으로 밀리미터파 영상을 구성하는 방식이다. 2x8 어레이 형태의 안테나를 설계하고, 60dB 이상의 이득을 얻을 수 있는 저잡음 증폭기와 다이오드 검출기를 설계한다. 측정된 밀리미터파 신호를 영상으로 구성하여 은닉물체를 탐지한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안한 시스템의 구성별 상세 내용을 설명하고, III장에서는 수동 밀리미터파 보안 검색 시스템을 이용하여 측정 실험을 수행하고 상용 시스템^[6]과의 성능 비교를 수행한다. IV장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 구성

본 논문에서 제안한 수동 밀리미터파 보안 검색 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 검색 대상자로부터 방출되는 밀리미터파 신호를 밀리미터파 렌즈로 집속하여 밀리미터파 이미징 센서를 통해 증폭/검출하고, 데이터 수집 장치(DAQ)를 통해 PC에 전달한다. 전달된 데이터는 GUI 프로그램에서 영상처리를 통해 밀리미터파 영상을 구성되며, CCD 카메라와 IR 카메라 영상을 이용하여 은닉물체 정보를 표시한다.

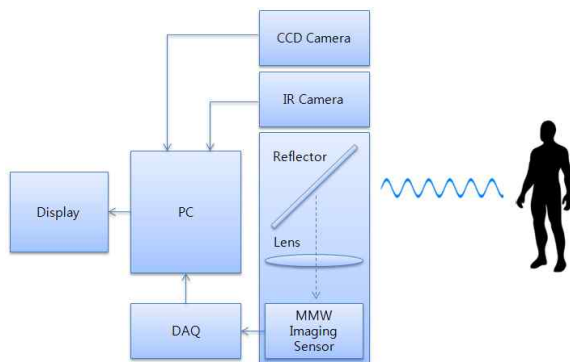


그림 1. 제안한 시스템 구성도
Fig. 1. Block diagram of proposed system.

1. 밀리미터파 이미징 센서

밀리미터파 이미징 센서는 그림 2와 같이 안테나와 4단 저잡음 증폭기, 검출기로 구성된다.

이미징 시스템용 안테나는 선명한 해상도를 얻기 위해 높은 이득과 지향성을 필요로 한다. 설계한 안테나는 94GHz에서 -26.5dB이며 W-band의 전 주파수 대역에서 -25dB 이하의 반사계수 값을 나타냈다. 안테나의

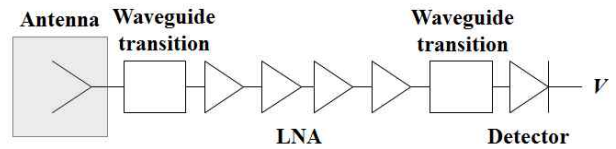


그림 2. 밀리미터파 이미징 센서 구성도
Fig. 2. Block diagram of millimeter-wave imaging sensor.

최대이득은 17.5dBi의 고이득 특성을 나타낸다. 이미징 시스템에서 영상을 실시간으로 받아들이기 위해서는 센서를 어레이 할 필요가 있다. 그림 3과 같이 2x8로 구성하여 해상도를 개선하였다.

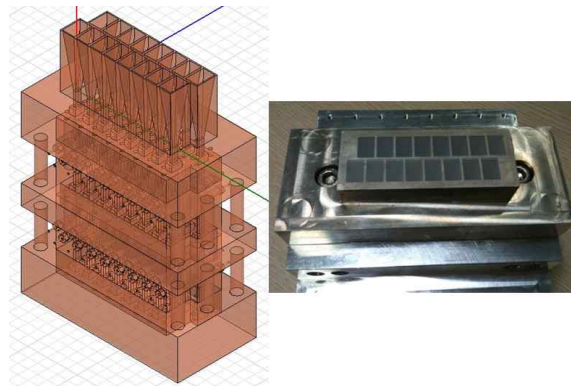


그림 3. 2x8 혼 어레이 안테나
Fig. 3. 2x8 horn array antenna.

그림 4는 제작한 저잡음 증폭기 모듈의 내부 사진과 회로도이다. 밀리미터파 신호는 총 4개의 저잡음 증폭기 칩을 거쳐서 증폭되어 검출기에 입력된다. 4단 저잡음 증폭기의 측정된 주파수 응답특성은 80~100GHz에서 평균적으로 65dB 정도의 특성을 가진다. 저잡음 증폭기칩은 ALH504(Northrop Grumman)를 사용하였다.

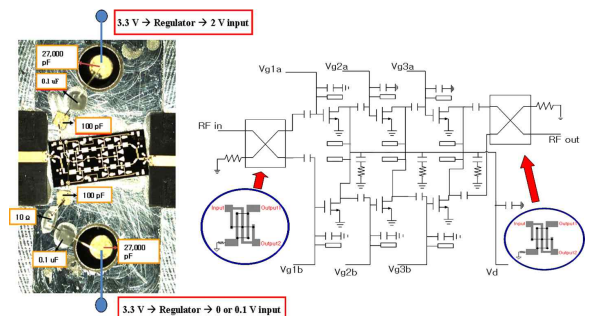


그림 4. 저잡음 증폭기
Fig. 4. Low Noise Amplifier.

그림 5는 검출기 구조도이다. 이 방식은 도파관을 통해 들어온 TE₁₀모드의 신호를 쇼트키 다이오드에 인가

시켜 DC 신호를 검출하는 구조를 가지고 있다. 임피던스 정합을 위한 다단 트랜스포머를 사용하여 도파관 입력력과 쇼트키 다이오드의 임피던스를 정합한다. 다단 트랜스포머는 광대역에서 임피던스 정합이 가능한 장점이 있다. 쇼트키 다이오드를 통해 검출된 신호에서 RF 신호를 제거하기 위해 계단형 임피던스를 가진 저역통과여과기를 사용한다.

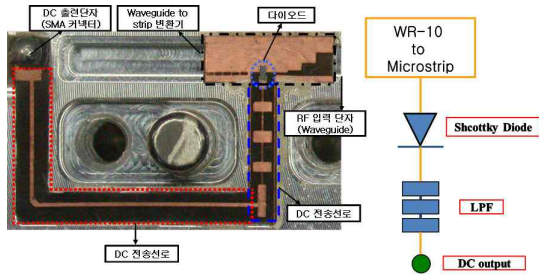


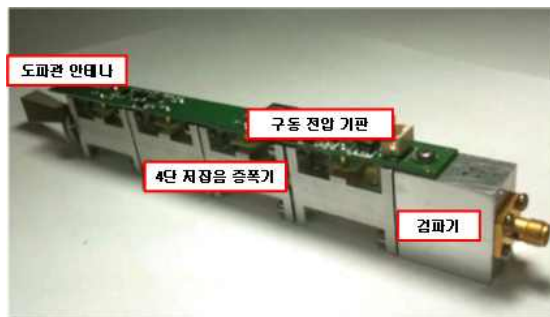
그림 5. 다이오드 검출기
Fig. 5. Diode detector.

다이오드 검출기의 동작범위는 $-20\text{dBm} \sim 12\text{dBm}$ 이고 이때 출력은 $0\text{mV} \sim 1.2\text{V}$ 까지 이다.

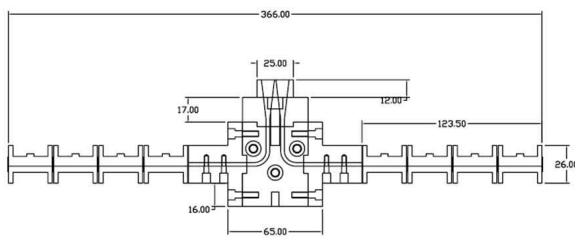
그림 6은 조립된 밀리미터파 이미징 센서의 구조로 중앙에 2x8 안테나를 배치하고 좌우에 4단 저잡음 증폭기와 디텍터를 배치하였다.

2. 광학 및 반사판 기구부

밀리미터파 대역 신호 집중용으로 89GHz~99GHz 대역의 밀리미터파용 렌즈를 설계하였다. 재료는 테프론을 사용했으며, 94GHz를 중심 주파수를 갖는다. 그림 7의 도면에서 곡률반경이 큰 왼쪽면이 3m 떨어진 피사체를 향하고 오른쪽 면이 수신기 쪽을 향하게 된다. 두께는 렌즈의 직경과 포물면에 의해 결정되었고 거기에 렌즈 설치 시 마운트에 고정을 위하여 10mm의 여유를 두었다. 반사율을 줄이기 위하여 무반사층을 만들었는데 무반사층의 깊이는 0.66mm, 피치는 0.7mm, 골의 길이는 0.4mm로 결정 하였다.



(a)

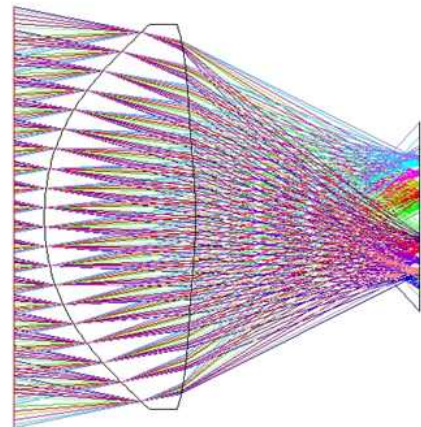


(b)



(c)

그림 6. 밀리미터파 이미징 센서. (a) 단일 센서, (b) 조립도, (c) 밀리미터파 이미징 센서 사진
Fig. 6. Millimeter wave imaging sensor. (a) single sensor, (b) assembly diagram, (c) photograph of millimeter wave imaging sensor.



(a)



(b)

그림 7. 밀리미터파 렌즈. (a) Ray-tracing 방법을 이용한 설계, (b) 렌즈 사진
Fig. 7. Millimeter-wave lens. (a) design of the millimeter-wave lens using ray-tracing method, (b) photograph of millimeter-wave lens.

그림 8은 반사판으로 3m 전방 160cm 범위를 스캐닝 할 수 있도록 $\pm 20^\circ$ 범위에서 움직일 수 있게 설계하였다.

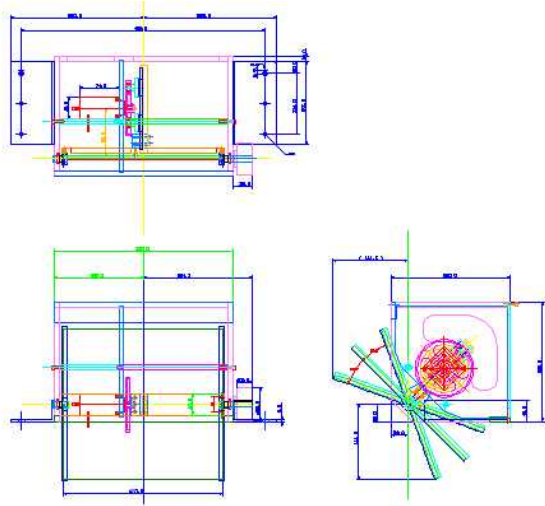


그림 8. 밀리미터파 스캐닝 반사판 설계
Fig. 8. Design of millimeter-wave scanning reflector.

$$H(z) = \frac{0.0023 - 0.0023z^{-1} - 0.0023z^{-2} + 0.0023z^{-3}}{1 - 2.9688z^{-1} + 2.9388z^{-2} - 0.97z^{-3}} \quad (1)$$

모폴로지 필터(morphology filter)로 영상을 합성하고, 마커 추출(Marker extraction)과 영역 성장(region growing) 방법을 통해 감시 대상자의 영역을 추출한다. 그림 9는 GUI 프로그램 화면이다.

III. 실험 및 검토

본 논문에서 제안한 수동 밀리미터파 보안 검색 시스템은 그림 10과 같다. 시스템의 하단부에는 밀리미터파 센서를 배치하고, 중앙에는 반사판과 렌즈를, 상단에는 CCD 카메라와 IR 카메라를 배치하였다. 전면부 중앙은 밀리미터파가 투과되도록 창을 뚫었으며, 시스템 내부는 전파흡수체를 이용하여 금속 프레임에서 반사되는 잡음을 최소화하였다.

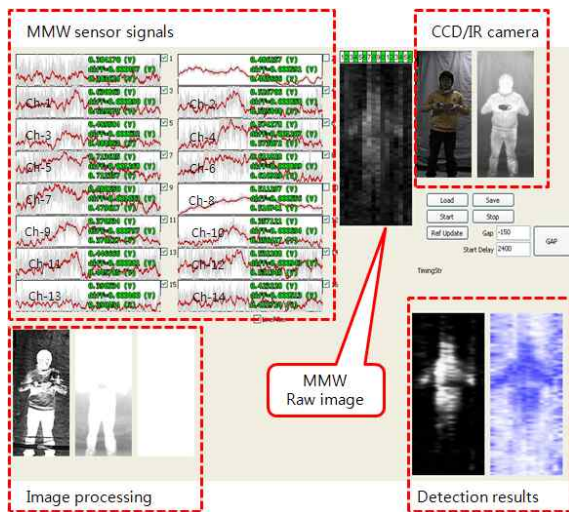
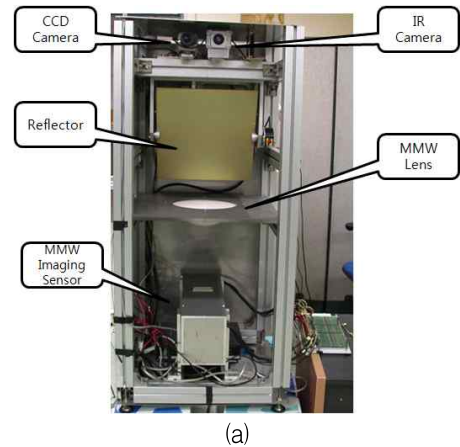


그림 9. GUI 프로그램 화면
Fig. 9. Screenshot of GUI program.

3. GUI 프로그램

GUI 프로그램에서는 측정된 밀리미터파 이미징 센서 신호를 이용하여 밀리미터파 영상을 생성하고, CCD 카메라 영상과 IR 카메라 영상을 이용하여 은닉 물체 감지 알고리즘을 수행한다.

DAQ로 측정된 신호는 디지털 필터를 통해서 저주파 성분을 검출하고 영상으로 구성한다. 디지털 필터의 차수는 3차로 설계하였고 식(1)과 같다. 통과대역 주파수는 5Hz, 통과대역 리플은 1dB, 차단주파수는 8.667Hz, 차단대역 attenuation은 30dB이다.



(a)



(b)

그림 10. 수동 밀리미터파 보안 시스템. (a) 구성, (b) 외관
Fig. 10. Passive millimeter-wave screening system. (a) configuration, (b) appearance

그림 11은 브레드보드, 플라스틱 음료수병, 책을 측정 한 영상으로 위는 대상이 보이게 하여 측정한 것이고, 아래는 옷에 숨겼을 때의 영상이다. 결과에서 볼 수 있듯이 밀리미터파 신호를 이용하면 물체를 숨겼을 때에도 신체와 대비되는 영상을 얻을 수 있다.

본 논문에서 제안한 시스템은 NETD(Noise Equivalent Temperature Difference)가 2K 이하이고, 공간 분해능은 약 5cm, 영상 획득 프레임수는 1Hz로 개발에서 참고한 상용 제품과의 비교는 표 1과 같다.

표 1. 성능 비교

Table1. Comparison with commercial system.

Specification	Commercial (indoor) [6]	This work (indoor)
Center Frequency (GHz)	90	94
Bandwidth (Δf)	20	10
No. of Receiver	16	16
System NETD (ΔT)	1 K	≤ 2 K
Spatial Resolution	5×5 cm ²	5×5 cm ²
Image Quality	clearly	noisily
Refresh Rate	4 ~ 10 Hz	1 Hz
Cost	\$130,000	< \$50,000



(a)

(b)

(c)

그림 11. 실험 결과. (a) 브레드보드, (b) 플라스틱 콜라 병, (c) 책
 Fig. 11. Test results. (a) breadboard, (b) plastic bottle (coke), (c) book.

IV. 결 론

본 논문에서는 수동 밀리미터파 보안 검색 시스템을 제안하였다. 제안한 보안 검색 시스템은 다채널 수신을 위한 집적화된 어레이 안테나를 적용하였으며, 16개의 4단 저손실 증폭기와 검출기, CCD/IR 카메라와 반사판, 밀리미터파 렌즈로 구성된다. 시스템에 사용된 저잡음 증폭기 모듈의 이득특성은 82GHz~102GHz의 대역에서 65.8dB의 평균 이득특성을 가진다. 검출기는 재료-바이어스 쇼트키 다이오드를 사용하여 물체에서 방사된 밀리미터파 신호를 DC 출력 전압으로 변환한다. 제작된 디텍터의 특성은 0dBm 입력전력에서 350~400mV/mW, 검출 가능 입력전력 범위는 -10~13dBm으로 우수한 성능을 보였다. 실험을 통해 은닉된 금속 재질의 물체뿐만 아니라, 플라스틱 등으로 이루어진 물체들도 검색이 가능함을 확인하였다. 향후 시스템의 NETD를 높여 밀리미터파 영상의 화질을 개선하고, 영상처리를 통한 물체 검출을 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] Kyung Kwon Jung, Yeon Sik Chae, and Jin Koo Rhee, "Studies on the Millimeter-wave Passive Imaging Sensor," Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 45-SC, No. 2, pp. 1-7, March 2008.
- [2] M. Shoucri, R. Davidheiser, B. Hauss, P. Lee, M. Mussetto, S. Young, L. Yujiri, "A passive millimeter wave camera for aircraft landing in low visibility conditions," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Volume 10, Issue 5, pp. 37-42, May 1995.
- [3] L. Yujiri, M. Shoucri, P. Moffa, "Passive millimeter wave imaging," IEEE Microwave Magazine, Volume 4, Issue 3, pp. 39-50, Sep. 2003.
- [4] Hyun-Jun Lim, Yeon-Sik Chae, Kyung-Kwon Jung, Mi-Ra Kim, and Jin-Koo Rhee, "Study Of Millimeter-Wave Passive Imaging Sensor Using the Horn Array Antenna," Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 47-TC, No 2, pp. 67-73, Feb. 2010.
- [5] G. S. Dow, D. C. W. Lo, Y. Guo, E. W. Lin, T. T. Chung, M. D. Biedenbender, O. Miromontes, A. Marashi, L. Yujiri, P. S. C. Lee, M. M. Shoucri, B. R. Allen, "Large scale W-band focal plane array for passive radiometric imaging," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Volume 1, pp. 369-372, 1996.
- [6] <http://www.brijot.com/>

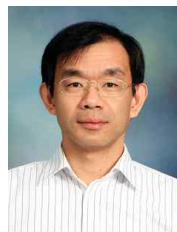
저 자 소 개

윤진섭(정회원)
대한전자공학회 논문지
제38권 SD편 제1호 참조



정경권(정회원)
1998년 동국대학교 전자공학과
학사 졸업.
2000년 동국대학교 전자공학과
석사 졸업.
2003년 동국대학교 전자공학과
박사 졸업.

2009년~현재 전자부품연구원 연구원 재직
<주관심분야: 밀리미터파 응용, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템>



채연식(정회원)
1993년 동국대학교 전자공학과
학사 졸업.
1997년 동국대학교 전자공학과
석사 졸업.
2002년 동국대학교 전자공학과
박사 졸업.

2012년~현재 서일대학교 컴퓨터응용과 재직
<주관심분야: 반도체소자, 밀리미터파 응용, 마이크로웨이브 회로설계>