

논문 2007-44TC-3-15

밀리미터파 수동 이미징 시스템 연구 III

(Studies on the millimeter-wave Passive Imaging System III)

정민규**, 채연식*, 김순구*, 윤진섭**, 미즈노코지****, 이진구*

(Min-Kyoo Jung, Yeon-Sik Chae, Soon-Koo Kim, Jin-Seob Yoon, Mizuno Koji, and Jin-Koo Rhee)

요약

이차원 이미징 배열소자를 갖는 밀리미터파 수동 이미징 시스템을 제작하였다. 이 이미징 시스템을 제작하기 위하여 하나의 기판에 페르미테이퍼 슬롯 안테나, 밸룬, 저잡음 증폭기, 검파기가 집적되어 있는 이미징 배열 소자를 개발하였다. 또한 2×2 의 이미징 배열소자가 배열된 시스템으로 사람의 밀리미터파 수동 이미지를 얻었다. 현재 실시간 35GHz 밀리미터파 수동 이미징 시스템 개발을 위한 이차원 배열 소자를 개발 중에 있다. 제작된 이차원 이미징 배열소자를 갖는 밀리미터파 수동 이미징 시스템을 바탕으로 밀리미터파 실시간 영상을 취득할 수 있는 밀리미터파 수동 이미징 시스템의 실현을 기대할 수 있게 되었다.

Abstract

We have developed a passive millimeter wave (PMMW) imaging system with two-dimensional imaging arrays. For the imaging system, we achieved the single-substrate imaging-array element which include all necessary component such as Fermi tapered slot antenna (TSA), a balun, LNA's and a detector circuit on it. Two-dimensional arrays for real-time imaging at the 35 GHz band are currently under development. We will be able to make an advanced PMMW image system based on our system with the 2×2 imaging array in the near future.

Keywords: millimeter-wave passive imaging system, two-dimensional imaging array, real-time imaging

I. 서 론

밀리미터파는 가시광이나 적외선 영역에 비해 구름, 안개, 비, 먼지, 화염에 의한 감쇄가 현저하게 감소하고, 마이크로파에 비해 높은 분해능을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 가시광이나 적외선에서는 구름이나 안개 등의 장애물을 통하여 물체의 이미지를 얻을 수 없지만, 밀리미터파 대역에서는 물체의 이미지를 얻

을 수 있다^[1]. 밀리미터파를 이용한 수동 이미징 시스템은 물체 자체가 가지는 온도에 비례하여 방사하는 열잡음 중에서도 밀리미터파 영역의 스펙트럼 강도를 수신하여 이미지를 구성하는 방법이다. 밀리미터파 수동 이미징 시스템은 악천후 상태에서의 비행기의 착륙보조 시스템, 유조선 오일의 유출탐지, 화재시 사람의 움직임 탐지, 분화에 의한 화산의 관측, 터널내부에서 사고에 의한 화재시의 화염이나, 도로상의 안개에 의한 장애물의 형상관측 등 다양한 분야의 응용을 생각해 볼 수 있다^[2]. 또한 군사 및 보안 기술로서는 헬기에서의 은익 군사 장비 및 군사 시설 탐지, 의복안에 숨긴 무기나 폭발물 탐지 등에 응용할 수 있다^[3]. 종래의 밀리미터파 수동 이미징 시스템의 경우, 광학계의 결상면에 단일검출계를 기계적으로 주사하여 이미지를 얻는 방법이 주를 이루어 왔다. 이와 같은 방법으로 취득하는 이미지는 얻고자 하는 이미지의 구성 화소 수에 따라 검출계가 결상면에서 신호를 취득한다. 즉 이미지의 선명도에 검출계의 신호 취득 횟수가 비례하기 때문에 선명한 이

* 정희원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
(Millimeter-wave Innovation Technology Research center)

** 정희원, 삼성 탈레스
(Samsung Thales CO., LTD.)

*** 東北大學 電氣通信研究所
(RIEC Tohoku University)

**** 정희원, 서일대학 컴퓨터전자과
(Seoil College)

※ 이 논문은 1999년도 정부(과학기술부)의 재원으로
한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.
R11-1999-058-01005-0)

접수일자: 2006년8월28일, 수정완료일: 2007년3월14일

미지를 얻으려면 주사시간도 선명도에 따라 길어지게 된다. 그러므로 단일검출계를 기계적으로 주사하여 이미지를 얻는 방법^[4]으로는 실시간 2차원의 선명한 이미지를 얻는 것은 불가능하게 된다. 이러한 방법과 달리 광학계의 결상면에 얻고자하는 화소 수 만큼의 검출계를 2차원적으로 배열하면 검출계를 기계적으로 주사할 필요가 없게 되어 실시간 영상을 얻는 것이 가능할 것이다. 본 논문에서는 이차원 이미징 배열소자를 갖는 밀리미터파 수동 이미징 시스템을 제작하였다. 이미징 시스템을 제작하기 위하여 하나의 기판에 페르미테이퍼 슬롯 안테나, 발룬, 저잡음 증폭기, 검파기가 집적되어 있는 일체형 이미징 배열 소자를 개발하였다. 본 논문에서는 제작된 이미징 배열 소자의 사양 및 특성 등에 대하여 상세하게 기술하고자 한다. 또한 2×2의 이미징 배열소자가 배열된 시스템으로 사람의 밀리미터파 수동 이미지를 얻었다.

II. 안테나 배열 수동 이미징 시스템

그림 1은 이차원 이미징 배열 시스템을 나타내고 있다. 이미징 배열 소자는 렌즈의 결상면에 이차원 배열이 가능한 소형이면서 안테나, 발룬(Balun), MMIC, 검파기를 하나의 기판 위에 실장하여 저손실 및 저잡음의 특성을 갖도록 설계·제작하였다. 이미징 배열 소자에 실장한 안테나는 광대역에서 높은 이득과 낮은 부엽을 갖는 것을 특성으로 하는 페르미 테이퍼 슬롯 안테나(Fermi Taper Slot Antenna)^[5-7]이다.

안테나로부터 전달되는 신호는 슬롯 선로에 의해 전송되지만, 증폭기에 신호를 입력하기 위해 이를 CPW로 변환하였다. 또한 밀리미터파 수동 이미징 시스템의 수

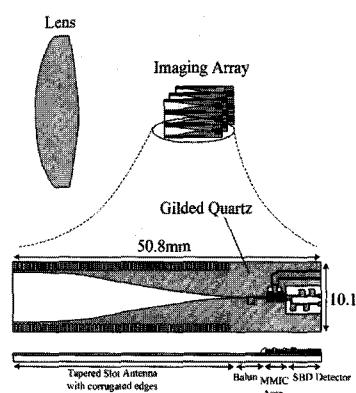


그림 1. 이차원 이미징 배열 시스템

Fig. 1. PMMW imaging array system.

신 신호는 매우 미약한 열잡음이기 때문에 고이득, 광대역, 고감도, 저잡음의 검출회로를 실장하였다.

III. 페르미 테이퍼 슬롯 안테나

실시간 이미지 취득이 가능한 이차원 이미징 배열 시스템을 제작하기 위하여 렌즈의 결상면에 이차원 배열이 가능한 소형이면서 광대역, 저잡음인 이미징 배열소자를 제작하였다. 제작된 배열소자에 실장된 페르미 테이퍼 슬롯 안테나(Fermi Taper Slot Antenna)는 바깥 쪽에 주름 모양의 패턴을 가지고 있으며, 밀리미터파 수동 이미징 시스템에 적합한 구조를 얻기 위한 이론적인 분석은 Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 방법을 이용하여 수행하였다.

그림 2는 35GHz 대역 페르미 테이퍼 슬롯 안테나의 기하학적인 형태와 치수이다. 길이 L = 34.28mm, 폭 D = 10.1mm 인 페르미 테이퍼 슬롯 안테나는 두께 0.2 mm이고 유전율이 3.7인 수정유리 기판 위에 제작하였다. 테이퍼 슬롯 부분의 최대 개구 폭은 7.8mm, 테이퍼 슬롯 부분의 길이는 34.28mm($4\lambda_c$), 슬롯 선로의 폭은 $100\mu\text{m}$ 로 최적화하였다. 기판 폭은 10.1mm로 선택하였다. 안테나의 아래와 위의 바깥쪽에 있는 주름 구조는 주름의 깊이가 1.1mm이고 주름 사이의 간격이 0.3428mm로 하여 제작하였다.

테이퍼 구조에 대한 페르미-디락 함수^[5]는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{a}{1 + \exp(b(x+c))}$$

여기서, a = 3.00, b = -280, c = -17.14 이다.

그림 3은 제작된 페르미 테이퍼 슬롯 안테나의 방사

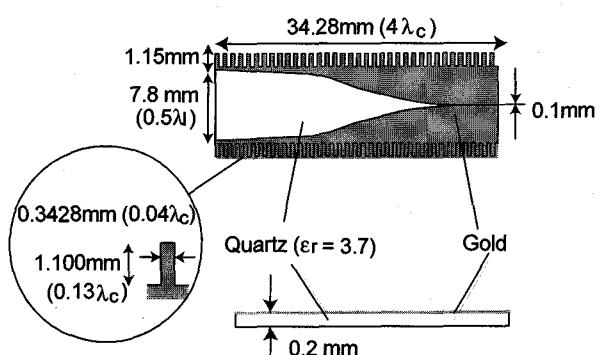


그림 2. 제작된 페르미 테이퍼 슬롯 안테나

Fig. 2. The geometry and dimensions of the designed TSA's.

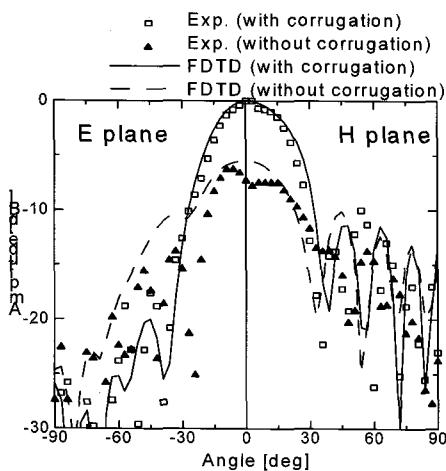


그림 3. 제작된 페르미테이퍼 슬롯 안테나의 방사 패턴
Fig. 3. Calculated and measured radiation pattern.
(35GHz)

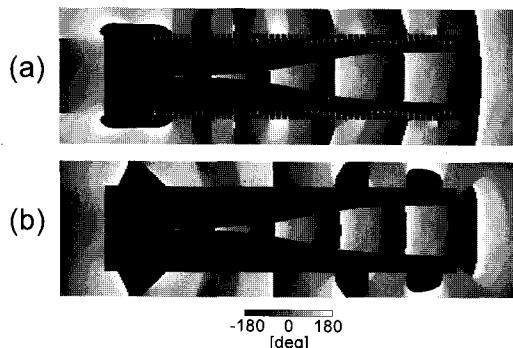


그림 4. 테이퍼 슬롯 안테나의 전기장 E_z 의 상 분포
(a) 주름 구조의 테이퍼 슬롯 안테나 (b) 테이퍼 슬롯 안테나
Fig. 4 Phase distribution of electric field E_z of TSA with corrugation(a) and without corrugation(b).

패턴으로 주름구조의 테이퍼 슬롯안테나가 주름이 없는 안테나보다 약 7dB의 이득 증가를 나타낸다. 그림 4는 테이퍼 슬롯 안테나의 전기장 E_z 의 상 분포로서 주름이 존재 할 때는 개구면의 내부와 외부의 전계가 동위상이 되어 안테나의 이득증가를 가져온다. 이와 같이 제작된 페르미 테이퍼 슬롯 안테나의 특성은 밀리미터파 이미지 시스템 구성에 있어서 시스템의 크기와 성능면에서 매우 유리한 점을 갖게 된다.

IV. 렌즈와 안테나의 정합

렌즈는 이미징 시스템에서 분해능을 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. 밀리미터파 이미징 시스템에서 렌즈를 설계할 때 고려해야 할 특성으로는 공간분해능, 수차, 렌즈의 시야, 렌즈와 안테나의 정합 등이 있다. 본

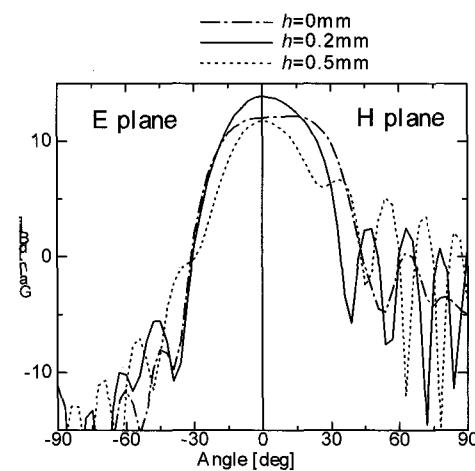


그림 5. 페르미 테이퍼 슬롯 안테나의 기판 두께에 따른 방사 패턴
Fig. 5. Measured radiation patterns with varying the thickness of the substrate.

표 1. 35GHz 대역에서 계산한 광학 전달 함수
Table 1. Calculated transformation coefficients and antenna gains (35GHz), h : thickness of Fermi TSA substrate.

	Transformation coefficient (α)			Antenna gain (dBi)
	E plane (1)	H plane (2)	Total ((1)×(2))	
Spherical Horn	75%	72%	54%	11.4
Fermi TSA ($h=0\text{mm}$)	96%	78%	74%	12.0
Fermi TSA ($h=0.2\text{mm}$)	95%	87%	83%	14.0
Fermi TSA ($h=0.5\text{mm}$)	90%	69%	62%	11.8

연구에서 밀리미터파 수동 이미징 시스템에 채용한 렌즈는 수차가 가장 작은 비구면 렌즈로서 직경은 500mm, 두께는 180mm이며 폴리에칠렌(굴절율:1.53)을 사용하였다. 35GHz 대역에서 렌즈의 초점 거리는 500mm이며 50m 떨어진 물체에 대한 공간 분해능은 1m이다. 렌즈로 집속된 밀리미터파를 가장 높은 효율로 수신할 수 있는 안테나의 방사 패턴을 고려함^[8]과 더불어 다음과 같은 렌즈와 안테나간의 광학전달함수^[9]를 도입했다.

$$\alpha = \frac{\left| \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} q(\phi) f(\phi) d\phi \right|^2}{\left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |q(\phi)|^2 d\phi \right] \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |f(\phi)|^2 d\phi \right]}$$

여기서 $f(\phi)$ 는 안테나의 방사 패턴이고, $q(\phi)$ 는 렌즈의 집광 패턴이다. 그럼 5는 페르미 테이퍼 슬롯 안테나의 기판 두께 h 에 따른 안테나 방사 패턴이다.

35GHz 대역에서 광학전달함수 α 를 고려하여 렌즈의 집광패턴과 안테나 빔 패턴의 조화를 통한 렌즈와 안테나 사이의 전달 효율이 83%가 되는 것은 기판의 두께가 0.2mm인 경우이다.

V. 슬롯라인과 코플레너 도파관 변환 및 검파기

밀리미터파 수동 이미징 시스템의 안테나에서 수신하는 신호는 매우 약하기 때문에 저잡음 증폭기로 증폭해야 하며 안테나로부터 전달되는 신호는 슬롯 선로에 의해 전송되지만, 증폭기에 신호를 입력하기 위해 이를 CPW로 변환해야 한다. 설계한 변환회로^[10]의 특성은 그림 6과 같다.

변환회로는 이미징 시스템에서 이미징에 필요한 대역인 30~40GHz에 있어서 Return loss는 -10dB 이하, Insertion loss는 -0.5dB 정도의 특성을 가지고 있어, 35GHz 밀리미터파 수동 이미징 시스템의 안테나로부터의 신호를 저손실 및 광대역으로 선로변환하는 용도로 사용할 수 있다.

또한 밀리미터파 수동 이미징 시스템의 수신 신호는 매우 미약한 열잡음이기 때문에 고이득, 광대역, 고감도, 저잡음의 검출회로가 요구된다. 더구나 일체형 페르미 테이퍼 슬롯 안테나를 배열하여 이미징 배열 소자화하는 경우에는 수신 소자 자체를 얼마나 작게 할 수 있는가 하는 것도 제작 시에 고려해야 할 중요한 사항 중의 하나가 된다. 자승검파를 하기 위해서는 schottky

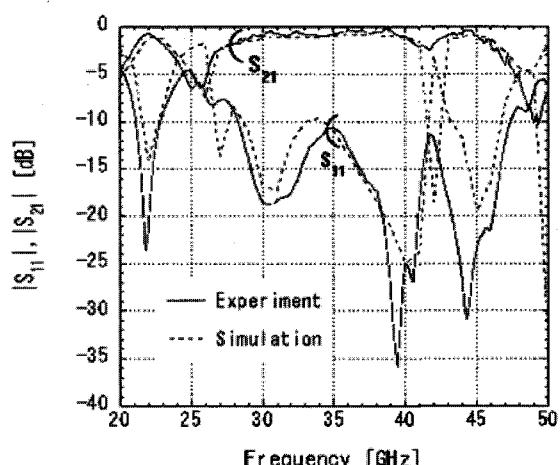


그림 6. 변환 회로의 특성

Fig. 6. Characteristics of the transition.

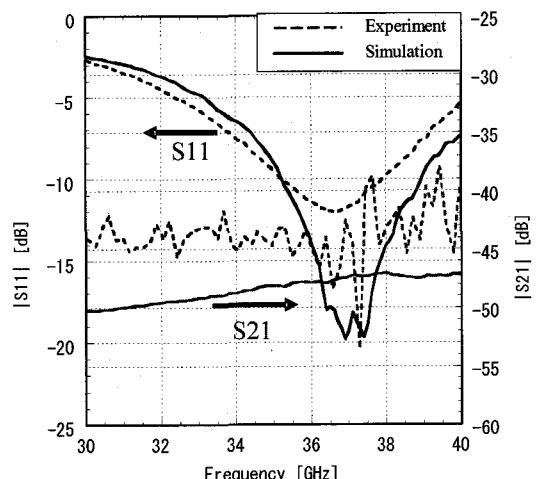


그림 7. 검파기 특성

Fig. 7. Detector characteristics.

barrier diode(SBD) 검파회로에 검파가능한 최저입력전력이 약 -40dBm정도이므로 본 이미징 시스템의 증폭기는 35GHz대역에 있어서 최소 30dB이상의 이득을 필요로 한다. 본 연구에서는 Fujitsu사의 FMM5704X MMIC를 사용하여 2단 구조의 증폭단을 제작하였다. 측정 결과, 30~40GHz에 있어서, 제작된 증폭단의 잡음지수 3.5dB와 평균 이득 39.3dB로서 목표 특성을 만족하는 특성이 얻어졌다. 또한 검파회로에 있어서도 대역폭 10GHz의 광대역 및 고감도가 요구 되므로, 자승검파를 하기 위해 SBD를 검출소자로 사용하였다. SBD의 경우, 바이어스가 필요 없기 때문에 바이어스 회로가 필요 없으며 수신단 전체가 간략화 된다는 이점을 가지고 있다. 다이오드의 매칭은 테이퍼 스트립 라인(Tapered Stripe Line)을 사용하여 광대역 매칭이 가능하게 하였다. 검파회로의 감도는 2200V/W로서 고감도 검파회로가 설계·제작 된 것을 확인하였다. 검파기의 특성을 그림 7에 보인다. 검파기 특성에 대한 시뮬레이션에는 ADS를 사용하였다.

VI. 2×2 밀리미터파 수동 이미징 배열 소자

밀리미터파가 접속되는 초점에 안테나를 위치시키고 안테나를 기계적으로 이동시키면서 한 점씩의 화소를 얻어 전체적인 영상을 얻는 기계적 주사형 이미징 시스템으로는 밀리미터파 실시간 영상을 얻는 것은 불가능하다. 따라서 밀리미터파 이미징 시스템으로 실시간 영상을 얻기 위한 방안의 하나로서 다수의 검출기를 광학계의 결상면에 이차원적으로 배열하는 안테나 배열 밀

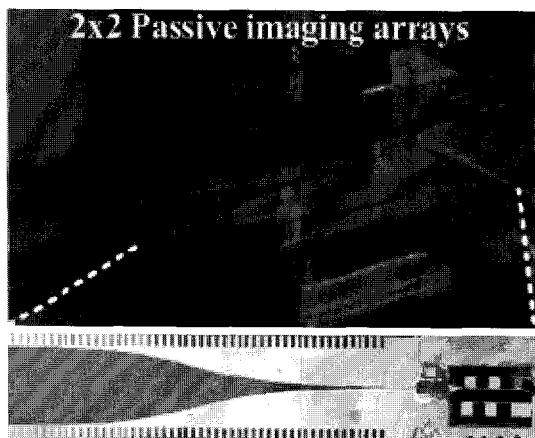
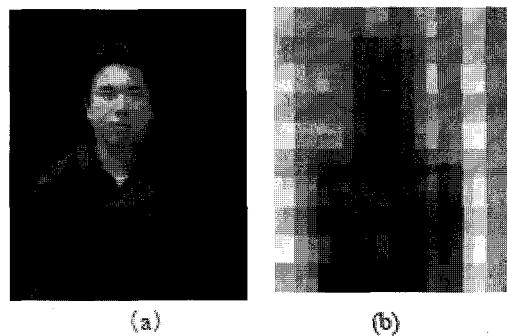


그림 8. 제작한 2×2 수동 이미징 배열 소자
Fig. 8. The fabricated 2×2 passive imaging array.

리미터파 수동 이미징 시스템을 제안하고 이를 실현하기 위한 시도로 안테나 일체형 이차원 이미징 배열 소자를 제작하였다.

밀리미터파 수동형 이미징 시스템에 적용할 안테나 일체형 이차원 이미징 배열 소자의 제작에 있어서 안테나로는 주름구조의 페르미 안테나를 채용하여 30~40GHz 대역에서 저손실 광대역 특성을 얻었다. 제작한 페르미 안테나의 기판 폭은 10.1mm이고 이 페르미 안테나의 간격에 있어서 상호 결합량은 E 면에서 -20dB, H면에서 -30dB 인 것으로 보고된 바 있다^[11]. 안테나 배열 소자에서 각 소자의 겹출회로, 즉 MMIC에 의한 인접 배열 소자간의 상호 결합을 고려하여 두께 1mm의 전파흡수체를 소자간에 삽입했다. 그림 8에 실제 제작한 2×2 의 이미징 배열 소자를 나타내었다. 전단 부는 안테나 부분이고 후단 부는 DC-증폭기 부분이다. 배열한 각각의 소자간에 동일한 입력에 대한 동일한 출력을 확보하기 위하여 후단 부에는 이득 조절이 가능한 저잡음의 DC-증폭기를 연결하였다.

이차원 이미징 배열 소자의 기본 단위인 일체형 이미징 배열 소자간의 수평 간격은 1.1mm이고 수직 간격은 10mm이다. S/N 비를 높이기 위해 겹파 회로로 부터의 출력신호를 록인 앰프에 연결하였으며, 록인 앰프의 참조 신호를 위하여 안테나 앞쪽에 안테나 쪽으로 전파흡수체가 부착된 쪼퍼를 장착하였다. 전파흡수체가 부착된 쪼퍼는 기계적으로 회전을 하도록 하여 물체로부터의 신호와 전파 흡수체로 부터의 신호에 대한 입력 전력 스위칭이 반복되도록 하였다. 록인 앰프의 적분시간은 0.3K의 온도 분해능을 달성하기 위하여 1초로 하였다. 제작한 2×2 수동 이미징 배열 소자를 기계적으



(a) (b)

Spatial resolution

그림 9. 사람에 대한 가시광 이미지(a)와 밀리미터파 수동 이미지(b)

Fig. 9. Optical view(a) and PMMW image(b) of a man at 3 meter ahead.

로 스캔하여 밀리미터파 수동 이미지를 얻었다. 그림 9는 3m 앞에 있는 사람에 대한 가시광 이미지와 20×20 픽셀의 밀리미터파 수동 이미지를 보이고 있다. 20×20 픽셀 밀리미터파 수동 이미지를 취득하기 위하여 수평 축을 10등분하고 나뉘어진 하나의 위치로 2×2 수동 이미징 배열 소자를 이동 시킨 후 신호를 취득하였다. 이와 같은 동작을 10 번에 걸쳐서 반복하여 수평축에 대한 주사를 완료하였다. 또한 동일하게 수직축도 10등분하여 각 수직 등분 위치에서 위의 수평 동작을 각각 10회 기계적으로 반복하였다. 그림 9 (b)에서 어두운 부분은 상대적으로 온도가 높은 영역이고, 밝은 부분은 상대적으로 온도가 낮은 영역을 나타낸다.

VII. 결 론

이차원 이미징 배열소자를 갖는 밀리미터파 수동 이미징 시스템을 제작하였다. 이미징 시스템을 제작하기 위하여 하나의 기판에 페르미테이퍼 슬롯 안테나, 발룬, 저잡음 증폭기, 겹파기가 집적되어 있는 이미징 배열 소자를 개발하였다. 이차원 이미징 배열소자를 갖춘 밀리미터파 수동 이미징 시스템은 렌즈를 이용하여 밀리미터파를 집광하고 이 결상면에 이차원 이미징 배열소자를 기계적으로 주사하여 영상을 얻는다. 제작된 배열소자는 2×2 형태이며 이를 이용하여 사람에 대한 밀리미터파 수동 이미지를 얻었다. 본 연구에서 제작된 이차원 이미징 배열소자를 갖는 밀리미터파 수동 이미징 시스템을 바탕으로 밀리미터파 실시간 영상을 취득 할 수 있는 밀리미터파 수동 이미징 시스템의 실현을 기대할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] J. D. Kraus, "Radio Astronomy," chap.3, McGraw-Hill Book Company, New York, 1966.
- [2] K. Mizuno, K. Watanabe, J. Bae, T. Nozokido, and S. Sugawara, "Millimeter wave imaging technologies," 1997 Topical Symposium on Millimeter Waves(Invited), Hayama, Japan, July 1977.
- [3] David M. Sheen, Douglas L. McMakin, and Thomas E. Hall, "Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 49, pp. 1581-1592, Sept. 2001.
- [4] 정민규, 채연식, 김순구, 미즈노코지, 이진구, "밀리미터파 수동 이미징 시스템 연구" 전자공학회 논문지, 제43권TC편 제5호, pp. 182-187, 2006.
- [5] S. Sugaware, Y. Maita, K. Adachi and K. Mizuno, "A MM-Wave Tapered Slot Antenna with Improved Radiation Pattern," IEEE MTT-S IMS Dig., pp. 952-962, 1997.
- [6] S. Sugawara, Y. Maita, K. Adachi, K. Mori and K. Mizuno, "Characteristics of a MM Wave Tapered Slot Antenna with Corrugated Edges," IEEE MTT-S IMS Dig., pp. 533-536, 1998.
- [7] H. Sato, K. Sawaya, N. Arai, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, "FTDT Analysis of Fermi Tapered Slot Antenna With Corrugation Structure" CJMW2002, pp. 137 - 140, 2002.
- [8] M. K. Joung, Y. Suzuki, K. Kanari, N. Arai, H. Sato, Y. Wagasuma, Y. Yamanaka, S. Kim, K. Mizuno, "A Design of Antenna for Passive Millimeter-wave Imaging Arrays," APMC2002, WE4B-3, pp. 253-256, 2002.
- [9] S. E. Schwarz, "Efficiency of Quasi-optical Couplers," Int. J. Infrared Millimeter Waves, vol.5, pp.1517-1525, 1984.
- [10] P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "Analysis and Application of a New CPW-Slotline transition," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 47, No. 4, pp. 426 - 432, Apr. 1999.
- [11] 新井直人 "ミリ波パッシブイメージング装置に関する研究" 석사학위논문, 동북대학, 2002.

저 자 소 개

정민규(정회원)
2006년 5월 대한전자공학회 논문지
제 43 권 TC편 제 5 호 참조

채연식(정회원)
2006년 5월 대한전자공학회 논문지
제 43 권 TC편 제 5 호 참조

김순구(정회원)
2004년 8월 대한전자공학회 논문지
제 41 권 SD편 제 8 호 참조

윤진섭(정회원)
2001년 1월 대한전자공학회 논문지
제 38 권 SD편 제 1 호 참조

미즈노코지
2006년 5월 대한전자공학회 논문지
제 43 권 TC편 제 5 호 참조

이진구(정회원)
2005년 5월 대한전자공학회 논문지
제 42 권 TC편 제 5 호 참조