

밀리미터파/테라헤르츠파 영상 기술 동향

Trends of Millimeter Wave and Terahertz Imaging Technologies

이원희 (W.H. Lee) 전파원천연구팀 선임연구원
 이왕주 (W.J. Lee) 전파원천연구팀 책임연구원
 정태진 (T.J. Chung) 전파원천연구팀 책임연구원

* 본 연구는 산업기술연구회의 지원을 받는 협동연구사업의 연구 결과로 수행함.

밀리미터파 및 테라헤르츠파는 미래 과학 기술의 보고로서 초고속 통신, 보안 검색 등 다양한 분야에 응용/연구되고 있으나, 밀리미터파 및 테라헤르츠파 영상 기술은 고출력 반도체 신호원이나 배열형 검출기와 같은 핵심 부품 기술의 부재로 연구개발 초기 단계에 있다. 밀리미터파 대역에서 100GHz 이상은 테라헤르츠파 대역과 겹쳐지는 부분으로 300GHz 대역의 밀리미터파 및 테라헤르츠파가 갖는 특성인 종이, 섬유 등의 비이온화 물질에 대한 투과성과 금속에 대한 높은 반사도를 이용하면 인구의 집중도가 높은 공공 장소에서의 은닉된 흉기나 폭발물 등의 위험물 영상을 비접촉식으로 획득할 수 있으며, 식품의 가공 또는 유통 과정에서 발생할 수 있는 식품 이물질을 제품의 손상 없이 구별해 낼 수 있다.

2012
 Electronics and
 Telecommunications
 Trends

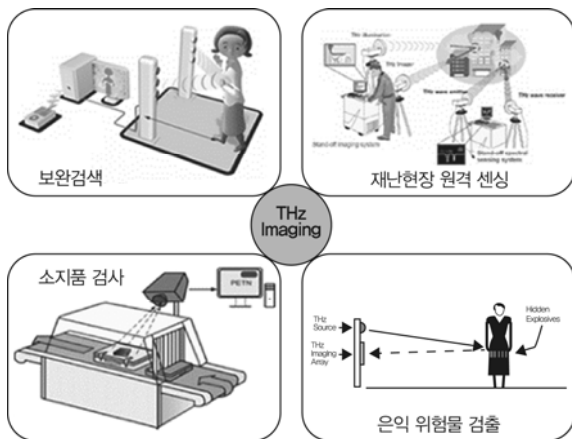
스마트 미디어 시대의
 방송통신 융합기술 특집

- I. 서론
- II. 밀리미터파/테라헤르츠파 영상 시스템
- III. 능동형 이미징 시스템
- IV. 결론

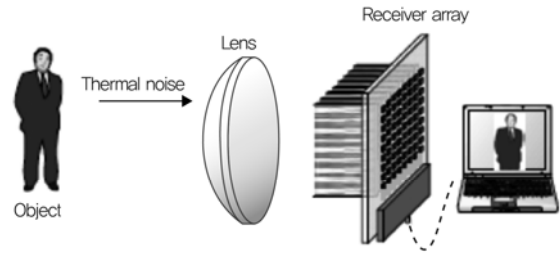
I. 서론

밀리미터파(millimeter wave: MMW)는 30~300GHz, 테라헤르츠(THz)파는 100GHz~10THz 대역의 전자기파로서 투과성과 광파의 직진성 양면의 특성을 모두 가지고 있으며, 전자파 측면에서 가장 높은 주파수, 광파 측면에서 가장 낮은 주파수에 해당하며, X-ray에 비해 양자 에너지가 백만분의 1로 인체에 무해하고 물질에 대한 고유한 지문(finger-print) 특성을 이용한 비파괴 검사가 가능하다. (그림 1)에는 밀리미터파와 테라헤르츠파의 영상 기술 응용 예를 나타내었다.

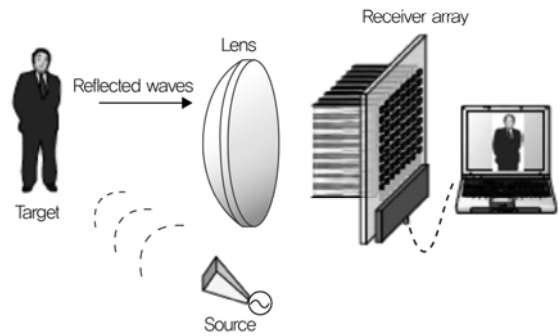
밀리미터파/테라헤르츠파 영상 시스템은 수동형(passive)과 능동형(active)으로 구분되고, 능동형은 비동기식(incoherent)과 동기식(coherent)으로 세분할 수 있다. 실시간 응용을 위한 수동형 시스템의 단점은 자연의 온도 콘트라스트(contrast)를 검출하기 위한 높은 온도 감도(temperature sensitivity)가 요구되고 많은 검출기(detector)에 대한 비용 등을 들 수 있다. 능동형 이미징 시스템은 신호원(signal source)을 이용하여 스팟(spot) 크기가 아주 작은 빔(beam)의 생성이 가능하고 시스템 성능이 기상 조건에 영향을 덜 받는 장점이 있으며, 1mW 정도의 적은 신호원 전력(power)의 방사로도 양호한 신호대 잡음비(SNR)를 얻을 수 있어 빠른 속도로



(그림 1) MMW/THz 영상 기술 응용 예



(a) 수동형 이미징 시스템 개념도



(b) 능동형 이미징 시스템 개념도

(그림 2) 수동형 및 능동형 이미징 시스템 개념도

이미지 프레임을 구현할 수 있다. (그림 2)는 수동형 및 능동형 이미징 시스템의 개념도를 나타낸다.

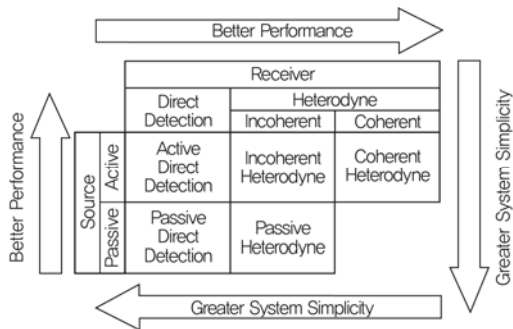
II. 밀리미터파/테라헤르츠파 영상 시스템

1. 구조

신호원과 검출기의 방식에 따라 영상 시스템의 성능이 좌우된다. 신호원의 수동 및 능동 방식과 검출기의 직접 검출(direct detection) 및 헤테로다인(Heterodyne) 방식에 따른 성능과 시스템 복잡도를 (그림 3)과 같이 나타낼 수 있다.

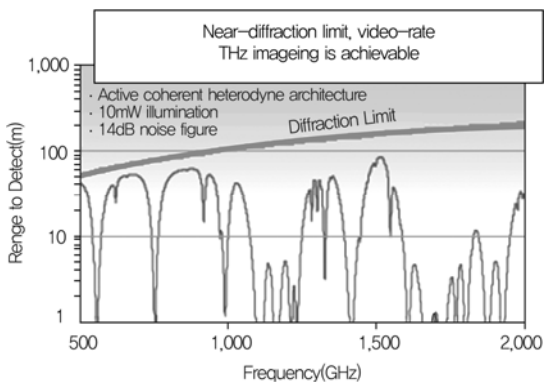
2. 영상 시스템의 성능

THz 사용 주파수에 따른 영상 시스템의 성능 즉, 분해능, 검출 거리, 실시간 성능 등에 대한 미국의 DARPA

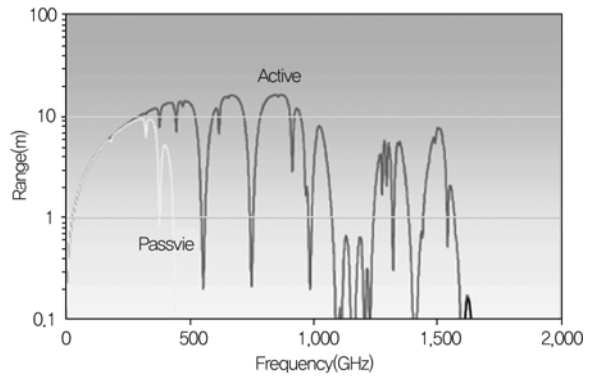


(그림 3) MMW/THz 영상 시스템 구조

자체 연구 결과 557GHz 이상에서 (그림 4)와 같이 실현 가능성을 나타낸다[1]. 이 경우 영상 시스템의 구조는 active coherent heterodyne 방식이고, 신호원의 전력은 10mW, 수신기의 잡음지수(NF)는 14dB이다. 여기서 분해능은 거의 diffraction-limited 수준까지 얻을 수 있고, 비디오급 속도가 달성될 수 있다고 한다. 예를 들면, 500GHz에서 40m의 거리에 있는 물체의 이미지를 비디오급 속도로 얻을 수 있다. 수동 방식보다 능동 방식이 보다 더 좋은 성능을 나타낸다. 수동 방식은 신호원을 사용하지 않고 물체에서 자연적으로 방사되는 테라헤르츠 신호를 수신기만으로 검출하기 때문에 이미지의 콘트라스트에 많은 제약이 따른다. (그림 5)는 두 방식의 주파수별 거리에 따른 물체 식별 특성의 시뮬레이션 결과를 나타내며 수동 방식인 경우 300GHz까지 밖에 사용할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 THz 영상 시스템



(그림 4) 주파수별 영상 시스템 성능 연관도



(그림 5) 수동/능동 이미징 방식의 성능 시뮬레이션

은 능동 방식이 대세를 이루고 있다. (그림 6)과 (그림 7)은 수동 및 능동 방식에 의한 이미징 성능의 예를 각각 나타낸다. (그림 6)과 (그림 7)에서도 능동 방식의 영상 시스템이 수동 방식의 영상 시스템에 비해 은닉된 무기까지 깨끗한 영상화가 가능하여 매우 성능이 우수함을 볼 수 있다.

3. 영상 시스템의 신호원 및 검출 성능

능동 영상 시스템에서 신호원의 송신과 검출기의 수



(그림 6) 광대역 수동 이미징 영상



(그림 7) 헤테로다인 능동 이미징 영상

신은 대역폭(bandwidth)과 다이내믹 레인지(dynamic range)에 대한 새로운 요구사항을 만족해야 한다.

가. 신호원의 방사 전력

총 방사전력(illumination power)은 신호원과 검출기 사이의 거리(range)가 아니고 송신기의 시야에서 본 FOV(Field of View)로 결정된다. 즉, 물체의 가로 및 세로의 면적에 따라 결정된다. (그림 8)은 line illumination과 active direct detection 구조에서 전력 레벨에 따른 거리와 FOV 특성을 나타낸다. 10m 거리를 기준으로 FOV가 $1m^2$ 이면 $100\mu W$ 급이면 가능하고, FOV가 10배씩 증가하면 방사 전력도 10씩 증가해야 한다. 또한, 동일한 방사 전력에서 보면 거리가 증가할수록 FOV가 점점 작아짐을 알 수 있다.

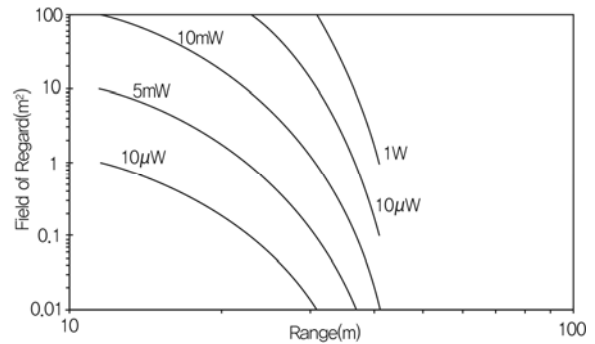
나. 검출기의 다이내믹 레인지

검출기 즉, 수신기의 다이내믹 레인지는 최대 80dB가 필요하다. (그림 9)는 RCS range(max:min) 40dB, 최소 허용 SNR 6:1, 물체까지 최소 거리가 5m라는 가정 하에 다이내믹 레인지의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

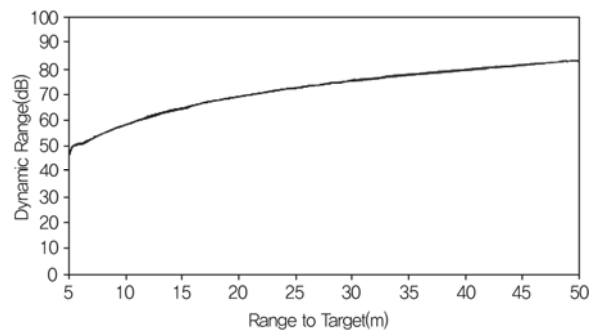
다. 이미지 신호처리 성능 비교

이미지 신호처리 방식에서 logarithm 특성을 사용하면 영상의 성능을 보다 더 향상시킬 수 있다. (그림 10)은 신호처리 방식에 따른 영상 특성의 예를 나타낸다

일반적으로 영상 시스템은 물체의 영상을 픽셀 단위로 스캐닝(scanning)하여 얻는데 이 방식은 영상 한 프레임을 얻는데 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 이미징 속도를 향상시키기 위하여 보통 검출기는 배열형(array)을 사용하는데 배열형에는 1D와 2D 방식이 있다. 1D 라인 스캐닝 시스템은 이미지 스캐닝 메커니즘에 대한 부담을 덜어주며, 라인 스캐닝 어레이가 스테어링(staring) 어레이보다 더 좋은 성능을 보인다. 여기에서 스테어링 어레이는 보통 CCD 카메라와 같이 신호원의



(그림 8) 전력 레벨에 따른 거리와 FOV 특성



(그림 9) 수신기의 다이내믹 레인지



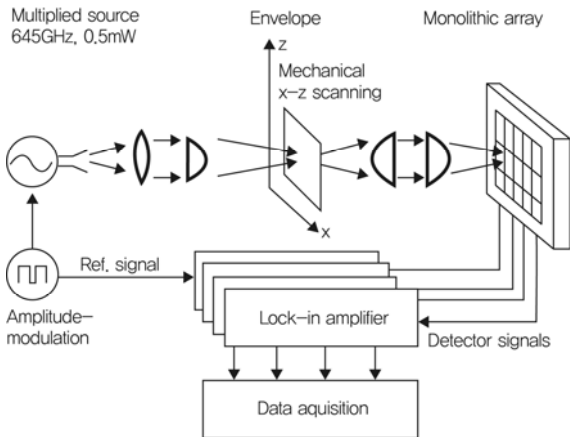
(그림 10) 이미지 신호처리 방식의 예

빔을 동시에 방사하고 동시에 검출하는 구조로서 수동 이미징에 많이 사용된다.

III. 능동형 이미징 시스템

1. 시스템 구성

능동형 이미징 시스템은 (그림 11)에 나타난 바와 같이 신호원과 검출기로 구성되며, 신호원과 검출기 사이에 빔 집적(beam focusing)을 위한 렌즈와 렌즈 사이에 측정 물체 및 이미지 스캐닝을 위한 기계적 장치가 위치



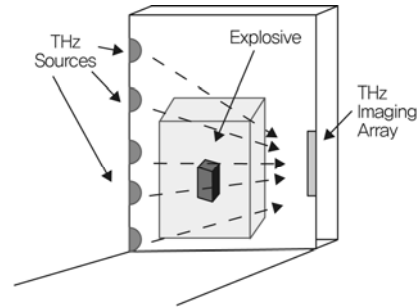
(그림 11) 능동형 이미징 시스템의 구성도

한다. 검출기는 스캐너의 이동에 따라 검출된 신호를 처리하는 증폭기(lock-in amp)와 신호처리 보드로 구성된다. (그림 11)은 하나의 신호원과 배열 검출기(array detector)를 사용하는 투과(transmission) 방식의 전형적인 예를 나타낸다. 여기서, 신호원을 AM 변조하는 것은 lock-in amp의 검출을 용이하게 하기 위함이다.

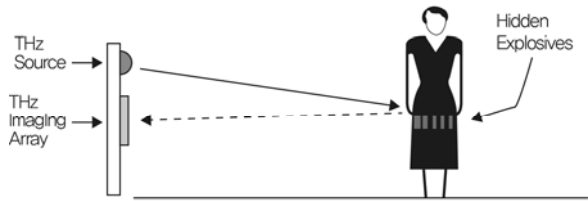
이미징 모드(mode)는 응용 분야에 따라서 (그림 12)와 같이 투과(transmission) 모드, 반사(reflection) 모드, 이중 투과(dual transmission) 모드로 나눌 수 있다. (그림 12a)의 투과 모드는 신호원에서 방사되는 빔이 대상 물체를 투과하고 검출기가 투과된 신호를 검출하여 영상을 얻는 방식이다. (그림 12b)의 반사 모드는 신호원과 검출기가 동일 선상에 놓여지고 신호원에서 방사된 빔이 대상 물체에서 반사되는 신호로부터 영상을 얻는 방식이다. (그림 12c)의 이중 투과 모드는 반사 모드와 유사한 방식이나 차단 물체(barrier)에 가려진 대상 물체를 식별하기 위하여 반사경(mirror)을 이용하는 구조이다.

가. 밀리미터파/테라헤르츠파 신호원 기술

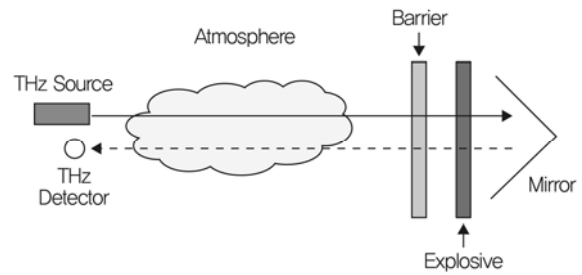
얻을 수 있는 신호원 전력 레벨은 (그림 13)에 나타난 THz 신호원(CW source)은 발생시키는 방식에는 다양하지만 여기서는 고체 반도체(solid-state semiconductor)



(a) 투과 모드

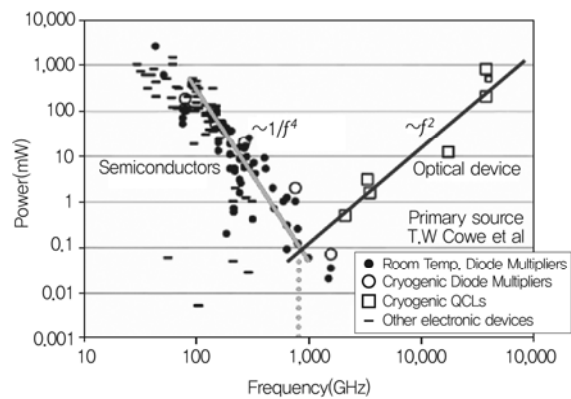


(b) 반사 모드



(c) 이중 투과 모드

(그림 12) 투과, 반사, 이중 투과 모드의 이미징 방식



(그림 13) 고체 반도체 MMW/THz 소스(CW)

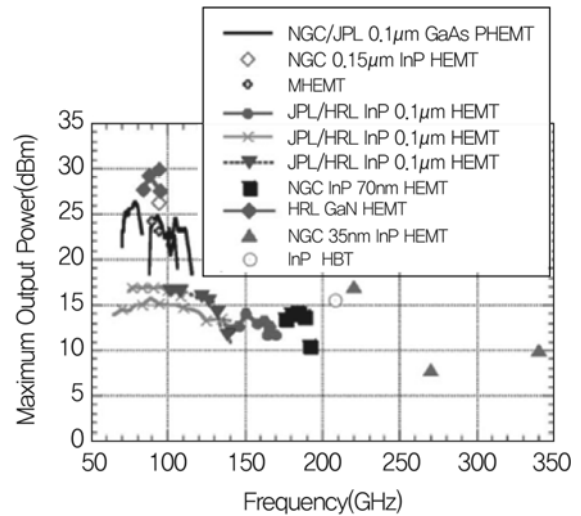
기술에 의한 신호원에 대하여만 고려한다. 현재의 기술 수준에서 바와 같이 주파수의 4 제곱에 반비례하

는 특성이 있다. 1THz에서 0.1mW 정도가 기술적인 한 계로 되어 있다.

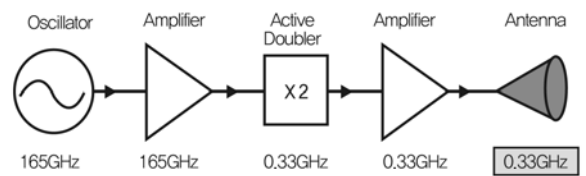
최근 HEMT(High Electron Mobility Transistor) 및 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor) 기술의 발전에 힘입어 고속 능동소자가 개발되고 이를 이용한 저잡음 증폭기(LNA), 고출력 증폭기(HPA) 등의 MMIC가 속속 개발되고 있다. 고체 반도체 소자를 이용한 THz 신호원의 발생 방법은 MMIC 방식과 낮은 주파수 대역의 고출력 증폭기를 이용하여 주파수를 체배(frequency multiplier)하는 방식으로 크게 구분할 수 있는데 현재까지는 후자의 방식이 주류를 이루고 있다. (그림 14)는 다양한 MMIC 기술을 이용한 고출력 증폭기의 주파수 대비 최대 출력을 나타낸 것이다. (그림 14)에서 보면 348GHz에서 10mW의 출력을 얻은 연구 결과를 보여준다. (그림 15)는 전력증폭기와 주파수 체배기를 이용한 THz 신호원 발생기의 구성도를 나타낸다. (그림 15b)의 경우 출력단의 병렬 구조는 전력 분배기/결합기(power divider/combiner)를 나타낸다. 더 높은 주파수에서 더 높은 전력(Watt급)을 고효율로 얻기 위해 공간 전력결합 기술(spatial power combining technology)이 심도 있게 연구되고 있다. (그림 16)은 공간 전력결합 기술의 개념도를 나타내는데 복수 개(N) 신호원의 출력을 공간적으로 결합하여 N^2 의 출력을 얻을 수 있다. 여기서, N은 신호원 하나의 출력이다. 현재의 연구 수준은 150 GHz에서 전력 결합 효율이 70% 이상이다[2],[3]. THz 신호원 제작에서 도전적이고 원천적인 기술 분야는 MMIC 설계기술, 저손실 수동소자 기술(안테나, 전송선 등), spatial power combining 기술, packaging 및 testing 등으로 요약할 수 있다.

나. 밀리미터파/테라헤르츠파 검출기 기술

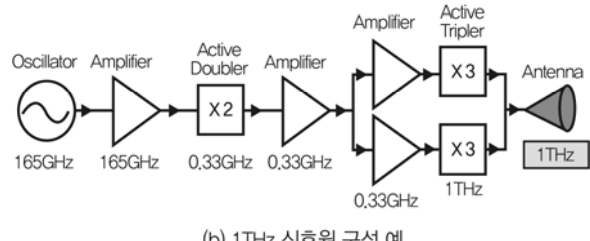
THz 검출기 즉 수신기의 구조는 (그림 17)과 같이 구성되며, 검출소자로는 쇼트키 다이오드, FET, 볼로미터(bolometer), Golay cell 등이 있다. THz 검출기 기술의



(그림 14) 최근의 MMIC 전력증폭기 기술 수준

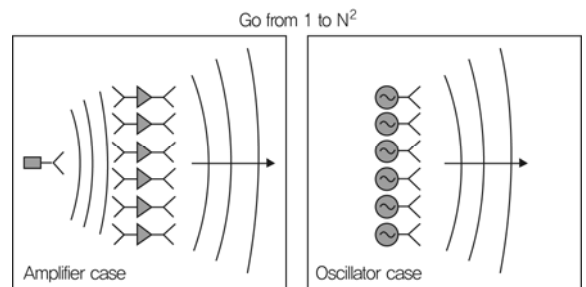


(a) 0.33THz 신호원 구성 예



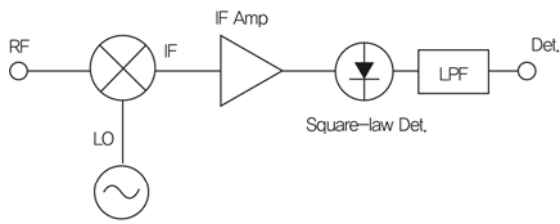
(b) 1THz 신호원 구성 예

(그림 15) 전력증폭기와 주파수 체배기를 이용한 신호원

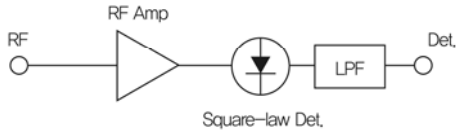


(그림 16) 공간 전력결합 기술

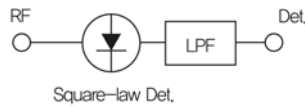
최근 연구 동향은 FET(Field Effect Transistor) 능동소자를 이용하여 배열 구조로 집적화하는 기술이 추세



(a) Heterodyne Detection

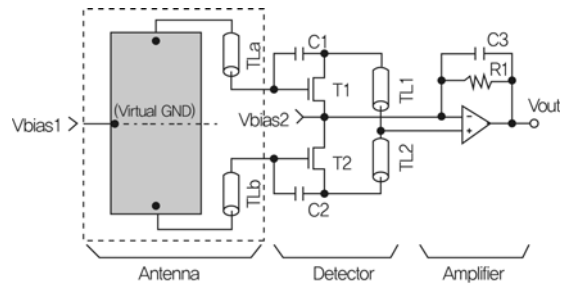


(b) Direct Detection with Pre-Amp

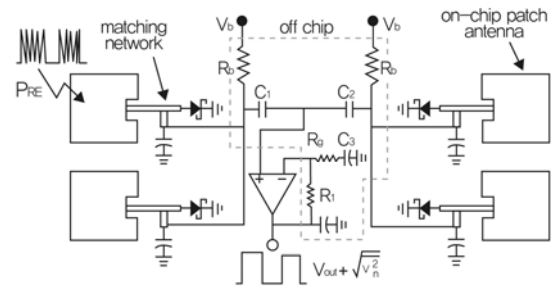


(c) Direct Detection

(그림 17) MMW/THz 검출기의 구성도



(a) FET 단일 셀 검출기 회로 구성도



(b) SBD 단일 셀 검출기 회로 구성도

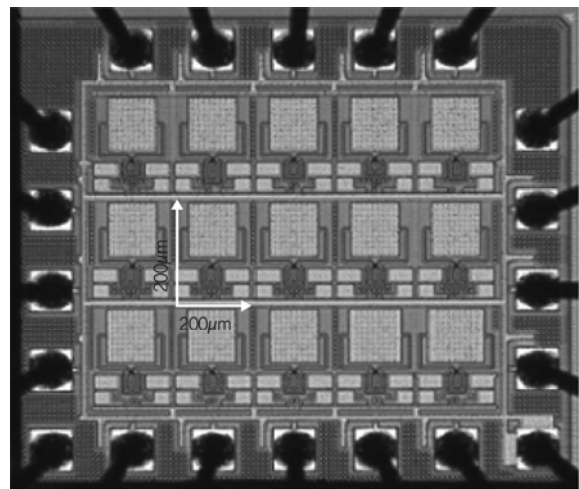
(그림 18) FET 및 SBD 단일 셀 검출기 회로

이다. 이는 쇼트키 배리어 다이오드(Schottky Barrier Diode: SBD) 소자의 낮은 responsivity 특성과 낮은 dynamic range 특성을 개선하는 데 목적이 있다.

단일 검출기는 안테나, 검출기 회로, 후단 증폭기를 하나의 셀로 집적화하고, 이를 $N \times N$ 픽셀 어레이로 제작하는 기술이 성숙 단계에 와있다. (그림 18)은 안테나 및 후단 증폭기 집적 단일 셀 검출기를 FET와 SBD로 구성한 예이다. (그림 19)는 1/4 마이크로 CMOS 공정에 의해 3×5 pixel로 제작한 0.65THz FPA(Focal Plane Array) 검출기의 예를 나타낸다.

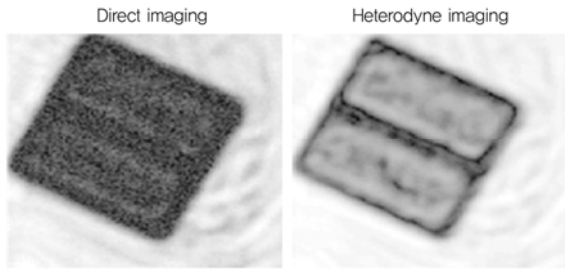
다. 헤테로다인 영상 시스템

지금까지는 쇼트키 다이오드, 볼로미터 등을 이용한 직접 검출 방식에 대하여 서술하였는데 본 절에서는 직접 검출 방식보다 감도(sensitivity)가 높고, 약 100dB 정도의 높은 SNR 특성을 가지며, 또한 진폭(amplitude) 및 위상(phase) 정보를 동시에 가지고 있는 헤테로다인 검출 방식에 대하여 기술한다. 헤테로다인 방식은 테라



(그림 19) 3×5 pixel로 제작한 0.65THz FPA 검출기

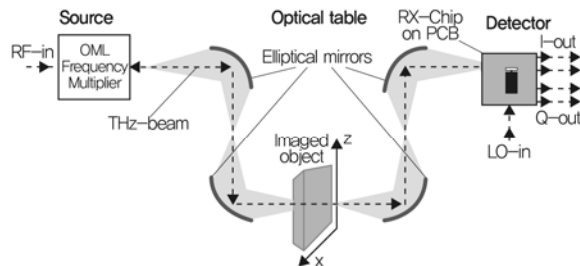
헤르츠파 신호를 국부발진기(LO) 신호와 mixing하여 그 차의 주파수에 해당하는 중간 주파수(IF)를 이용하는 방식으로 직접 검출기 구조보다 다소 시스템이 복잡한 단점을 가지나 이미징 성능은 매우 우수하다. (그림 20)은 직접 검출기 및 헤테로다인 검출기의 이미징 성능을



(그림 20) 직접 및 헤테로다인 검출기의 이미징 성능

비교한 것이다. 그림에서 보면, 헤테로다인 검출기는 높은 SNR 특성에 의한 높은 이미지 콘트라스트를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

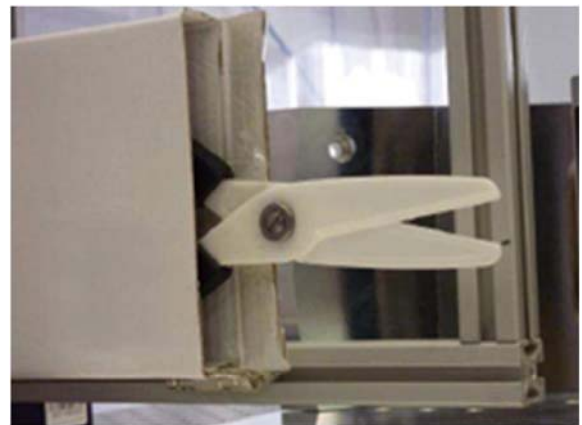
헤테로다인 방식에 의한 신호의 크기 및 위상을 검출함으로써 향후 3차원(3D) 이미징 시스템이 가능해진다. 여기서 일반적으로 크기 정보는 물체의 윤곽을 검출하는 데 유용하며, 위상 정보는 물체의 내부 구조를 알 수 있게 한다. 또한, 3D 레이더 영상 시스템 응용에서는 단일 CW 캐리어 주파수가 아닌 FMCW(Frequency Modulated CW) 방식을 이용하며, 수신기는 헤테로다인 검출을 한다. CW 헤테로다인 방식 중에서 최초의 위상 이미징 시스템 성능을 잘 보여주는 예를 소개한다[4]. 본 시스템의 주요 성능을 요약하면, CW 주파수는 160 GHz(158~165GHz), dynamic range는 110dB, IF 필터의 BW=12Hz, 수신기는 quadrature Zero-IF 수신 구조이다(그림 21 참조). 160GHz CW 신호원은 OML사의 frequency multiplier 모듈을 사용하였으며 혼 안테나를 통하여 -10dBm이 출력된다. 2D 스캐닝은 X-Z stage를 이용하고, 초점에서 spot의 크기는 약 4mm 정



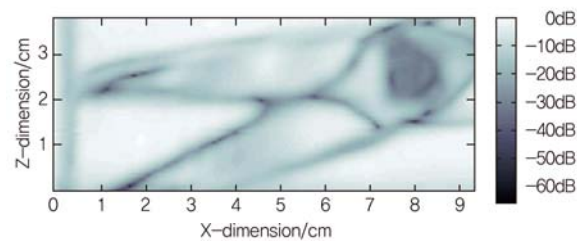
(그림 21) 160GHz 헤테로다인 영상 시스템의 구조

도이다. 좌측 두 개의 미러(mirror) 중 위에 있는 것은 빔을 collimation하기 위해 사용되고, 아래의 것은 빔을 focusing하기 위해 사용된다. 우측의 미러들은 빔의 진행 방향에 따라 recollimating, projecting하는 기능을 한다.

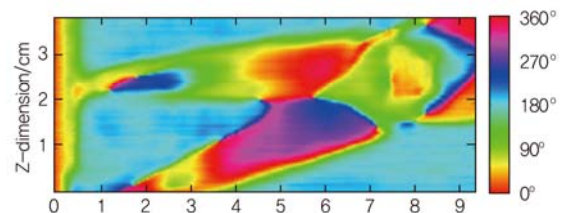
(그림 22)는 종이 박스(cardboard box) 내에 놓여진 세라믹 가위의 amplitude 이미지와 phase 이미지의 결과를 보여 준다. 스캔 이미지의 Z-step size는 0.5mm, lock-in amp의 시정수(time constant)는 15ms이며,



(a) Original 이미지



(b) Amplitude 이미지



(c) Phase 이미지

(그림 22) Single Detector Raster 스캐닝 이미징 결과

CW chopping 주파수는 50kHz이다.

(그림 22)의 결과로부터, amplitude 이미지는 아주 높은 이미징 콘트라스트를 보여 주며, phase 이미지는 물체의 두께(thickness) 및 내부 구조(internal structure)를 분석하는 데 매우 유용하다. 물체의 두께(3D)는 그 물체의 유전상수(dielectric constant)를 안다면 2D phase 정보로부터 unwrapping하여 복원(reconstruction)할 수 있다. <표 1>은 현재 상용화 개발된 제품의

사양 및 성능을 요약한 것이다. 주로 300GHz 이하의 밀리미터파 대역의 주파수에서 동작하는 시스템이다. 300GHz 이상의 THz 시스템은 현재 연구 개발 중에 있고[5],[6], 상용품과 현장 운용 시스템은 최근에 초보적인 수준으로 발표되고 있다. 이 주파수 대역에서는 연구 기관마다 각기 다른 접근법을 사용하고 있으나 다음과 같이 대략 3가지 그룹으로 나눌 수 있다. 그것은 300 GHz와 600GHz 사이에서 동작하고, 단일 주파수(single

<표 1> 상용 밀리미터파 영상 시스템

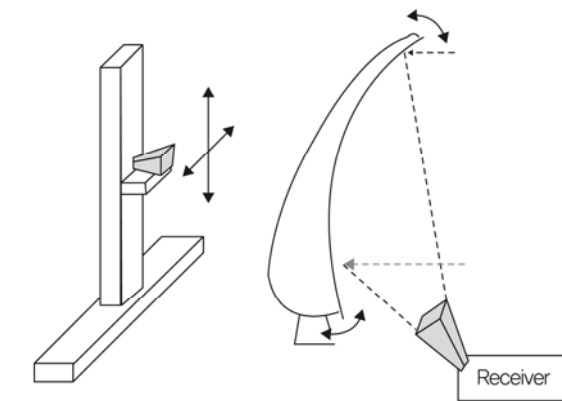
Name	L3 SafeView Provision 100	Agilent	Qinetiq	Qinetiq SPO 20	Smiths Tadar	Sago Trex ST150	Sago Trex Real Time Imager	Brijot BIS-WDS	ThruVision T4000
Application	Portal	Portal	Portal	Stand-off 8-30m	Portal	5m Stand-off	Stand-off	3~10m Stand-off	Stand-off
Active/Passive	Active	Active	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive
Frequency	24~30GHz	24GHz	35GHz	94GHz	94GHz	75.5~93.5GHz	75.5~93.5GHz	90GHz	250GHz
Bandwidth	-	-	-	-	>10GHz	-	-	20GHz	-
Imaging System	Source & receiver array rotates around subject	Active antenna array programmable Fresnel zone-plate	-	Folded Schmidt camera: conical scan, off axis rotating mirror	Mechanical: Tilted rotating mirrors	Frequency scanned antenna and reflector	Phased array of freq scanned antennas	-	-
No. of Receivers	-	1	64	64	24	1	232	16	-
Receiver Technology	-	-	-	InP MMIC	InP Direct detection	InP HEMT MMIC	-	-	GaAs Schottky Mixer
System NETD	-	-	-	5K	1K	1~3K	6K	1K	1~1.5K (receivers)
Spatial Resolution	0.5cm Lateral 1.5cm depth	0.5cm	0.75cm 2cm	0.3degree	10mm	6mrad	6mrad 128×192 pixels	5cm	3cm
Refresh rate	6 views in 3secs	15Hz	-	15Hz	10Hz(24 receivers)	0.5Hz variable	30Hz	4~10Hz	1~3Hz
Aperture	-	90cm	-	80cm	60cm	-	-	18cm	12cm
Dimensions L×W×H cm	150×150×270	90×10×90	-	-	250×160×220	-	-	71×33×48	-

frequency)에 초점을 맞춘 THz 전자 부품 및 시스템 개발, 단일 주파수를 사용하고 600GHz 이상에서 동작하는 부품 및 시스템 개발, 광대역 이미징 및 스펙트로스코피(spectroscopy)의 개발이다.

IV. 결론

이미징 시스템은 실시간성(real time)이 매우 중요한 시스템 요소이다[7]. 실시간의 정의는 한 프레임의 영상을 얻는 frame time이 1~10Hz 범위이나 전자 방식, 기계 방식이 병존하고 있다. 최근의 기술은 video-rate급(30Hz) 시스템도 개발되고 있다. (그림 23)은 가장 보편적인 스캐닝 메커니즘을 나타낸다. (그림 23b)는 미러를 이용하여 상하 방향으로 약간의 각도($\pm 3^\circ$)만 움직이면 Z축의 스캐닝 속도를 줄일 수 있어 frame time을 10Hz 정도로 향상시킬 수 있다.

이 외에도 응용 분야에 특정한 시스템으로서 이미징 시스템은 광학계를 포함하는 복합적인 시스템 기술이며, 송신기 및 수신기의 H/W 기술 못지 않게 이미지 신호처리 등의 S/W 기술도 대단히 중요하다.



(a) X-Z mechanical scan (b) Mechanical Mirror scan
(그림 23) Mechanical 스캐닝 구조

용어해설

Dynamic Range	신호 수준의 최소값과 최대값의 차이
Collimation	광학 장비의 중심선 등의 상호 관계를 정렬시키는 일련의 작업
Spectroscopy	파장과 관련하여 빛이나 다른 복사파의 흡수 방출을 연구하는 학문

약어 정리

FET	Field Effect Transistor
FMCW	Frequency Modulated CW
FOV	Field Of View
FPA	Focal Plane Array
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
MMV	millimeter wave
SBD	Schottky Barrier Diode

참고문헌

- [1] M. Rosker, "Progress Towards a THz Imager," DARPAR MTO(Microsystems Technology Office) *IMS Workshop*, June 8th, 2007.
- [2] J. Harvey et al., "Spatial Power Combining for High-Power Transmitters," vol. 1, no. 4, *IEEE Microw. Mag.*, 2000, pp. 48-59.
- [3] R. Judaschke, M. Hoft, and K. Schunmann, "Quasi-optical 150-GHz Power Combining Oscillator," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no.5, 2005.
- [4] K. Statnikov et al., "Towards 3D-Imaging with Low-Cost SiGe-Technology at 160GHz," *New Circuits Syst. Conf. (NEWCAS)*, June 2011, pp. 26-29.
- [5] A. Keil et al., "300GHz Imaging with 8 Meters Stand-off Distance and One-dimensional Synthetic Image Reconstruction," *Proc. SPIE*, vol. 8022, 2001.
- [6] D.M. Sheen et al., "Active Wideband 350 GHz Imaging System for Concealed-weapon Detection," *Proc. SPIE*, vol. 7309, 2011.
- [7] Christian am Weg et al., "Fast Active THz Cameras with Ranging Capabilities," *J. Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 30, no. 12, 2009, pp. 1281-1296.