



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

TERAHERTZ GÖRÜNTÜLEME VE TANIMA
SİSTEMLERİ

MUSTAFA TEKBAŞ
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. ÜMİT ÇİĞDEM TURHAL

BİLECİK, 2014
Ref. No: 10045151




BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

TERAHERTZ GÖRÜNTÜLEME VE TANIMA
SİSTEMLERİ

MUSTAFA TEKBAŞ
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. ÜMİT ÇİĞDEM TURHAL

BİLECİK, 2014

 <p>BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</p>	<p>YÜKSEK LİSANS</p> <p><u>JÜRİ ONAY FORMU</u></p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/05/2014 tarih ve 23/4 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12/06/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mustafa TEKBAŞ'ın "TERAHERTZ GÖRÜNTÜLEME ve TANIMA SİSTEMLERİ" başlıklı tez çalışması Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Ümit Çiğdem TURHAL



ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Nazım İMAL



ÜYE

: Doç. Dr. Cihan KARAKUZU



ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA MÜHÜR
Doç. Dr. Mehmet KURBAN
Müdür



ÖZET

Bu çalışmada, güvenli mesafeden (3m – 10m) kişi üzeri gizlenmiş metal objelerin Terahertz (THz) frekanslarında görüntülenmesi incelenmiştir. Bir çok madde içerisinde geçmesi ve bazı molekülleri titreştirmesi gibi özelliklerinden dolayı güvenlik, medikal ve tahribatsız muayene gibi görüntüleme çalışmaları için uygun olan THz dalgaları, elektromanyetik spektrumun 0.1 THz ile 10 THz arasında yer alan bölgeyi kapsamaktadır. Basit yapısı, uygulanabilirliği ve yayım yapmaması nedeniyle tercih edilen pasif görüntüleme yönteminde, görüntüleme için kozmik arka plan ışımından kaynaklanan THz ışımının yansımaları kullanıldığından ayrıca verici yada THz kaynak kullanımına olan ihtiyaç ortadan kalkmıştır. THz görüntüleme için gerekli olan yarı optik görüntüleme sistemleri, mekanik tarayıcı sistemler ve düşük gürültülü THz alıcı yapılarının incelendiği bu çalışmada, yapılacak deneysel çalışma için yalıtkan mercekli yarı optik görüntüleme sistemi ile ön yükselteçli düşük gürültülü THz alıcı yapısı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, ülkemizde Terahertz Görüntüleme üzerine yapılan ilk deneysel çalışma olmakla birlikte, gerçekleştirilen deneysel sistemden elde edilen görüntüler THz dalgalarının görüntüleme amacıyla kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler

Terahertz, Görüntüleme, Terahertz Alıcılar, Pasif Terahertz Görüntüleme, Pasif milimetre Dalga Görüntüleme

ABSTRACT

In this study, imaging of concealed metallic objects on human body at Terahertz (THz) frequencies by a stand off distance (3m – 10m) is investigated. THz waves, which are appropriate for imaging purposes on safety, medical, non-destructive inspection, etc. because of penetration through lots of materials and vibration of some molecules, cover the region between 0.1 THz and 10 THz in the electromagnetic spectrum. The need to use transmitter or THz sources have disappeared in passive imaging method, which uses the cosmic background radiation caused by the reflections of the THz radiation and is also preferred for its simple structure, applicability and non-radiating property. A quasi-optic imaging system with insulating lens and low noise THz detector with pre-amplifier have been realized for experimental studies, beside investigations on quasi-optic THz imaging systems, mechanical scanning systems and low noise THz detector structures. This study is the first experimental study conducted on our country about Terahertz imaging and the THz images obtained from the experimental system reveal availability of THz waves for imaging.

Key Words

Terahertz, Imaging, Terahertz Receivers, Passive Terahertz Imaging, Passive millimeter wave imaging

TEŞEKKÜR

Çalışmanın fikir olarak ortaya atılmasından uygulamanın sonuçlanmasına kadar sabırlı desteklerini ve değerli bilgi birikimlerini paylaşan, gerekli yönlendirmeleriyle tez çalışmasının sonuçlanmasında desteklerini esirgemeyen değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ümit Çiğdem TURHAL'a, görüş ve önerileri için değerli tez jüri üyelerim Yrd. Doç. Dr. Nazım İMAL'e ve Doç. Dr. Cihan KARAKUZU'ya, tezin son şeklini almasını sağlayan ve çalışma sonuna kadar yardım ve desteğini eksik etmeyen değerli yöneticim ve TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Milimetre Dalga ve Terahertz Teknolojileri Laboratuvarları (MİLTAL) yöneticisi Doç. Dr. Bahattin TÜRETKEN'e, çalışmalarına başlamamı sağlayan, fikrin uygulanması konusunda beni yönlendiren ve burada olduğu sürece verdiği sonsuz destek için Prof. Dr. Alexey VERTII'ye, arayüz, veri toplama ve tarayıcı kontrol kısımları için Ahmet KIZILHAN'a, kontrol ve düzeltmeler için Dr. İlhami ÜNAL'a, çizim, montaj ve mekanik üretim için Mustafa KILIÇ ve Sertan SÜVARI'ye, teşekkürlerimi sunarım. Tezi aldığım ilk günden beri bıkmıp usanmadan tezin bitmesi için beni teşvik eden tüm değerli dostlarıma, MİLTAL çalışma arkadaşlarıma, üniversitemiz Fen Bilimleri öğrenci işleri personeline -ayrı ayrı isimlerini belirlemediğim için üzgün olduğumu bildirerek- teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam ve yazım esnasında bilgisayarım ile oynayan oğlum Muhammet Can'a, henüz küçük olduğu için sadece ağlayabilen oğlum Mehmet Furkan'a yoğun anlarda tatlı bir mola verdirdikleri için; hayatım boyunca desteklerini eksik etmeyen, her zaman yanımda olan anneme, babama ve eşime teşekkür ederim.

Not: Projenin cihaz altyapı desteği MİLTAL tarafından sağlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEZ ONAY SAYFASI (son teslim için)	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	2
1.2 Tez Çalışmasının Kapsamı.....	3
2. TERAHERTZ GÖRÜNTÜLEME	4
2.1 Elektromanyetik Dalgalar ve Elektromanyetik Spektrum	4
2.2 Terahertz Dalgalar ve Uygulama Alanları	6
2.3 Terahertz Görüntüleme	9
2.4 Aktif Terahertz Görüntüleme	12
2.4.1 Uyumlu (Coherent) Aktif Görüntüleme	12
2.4.1.1 Radar Tabanlı Aktif Görüntüleme	12
2.4.1.2 THz Holografi ve THz Tomografi ile Görüntüleme.....	17
2.4.1.3 THz Spektroskopik Görüntüleme	18
2.4.2 Uyumsuz (Incoherent) Aktif Görüntüleme.....	19
2.4.3 Aktif Görüntüleme Ticari Ürünler	21

2.5	Pasif Terahertz Görüntüleme	21
2.5.1	Radyometrik Görüntüleme ve Fiziksel Arka Plan.....	21
2.5.2	Pasif Görüntüleme Ticari Ürünler	29
2.6	Terahertz Görüntüleme Sistem Karşılaştırması.....	31
2.7	Terahertz Görüntüleme Sisteminde Alıcılar.....	32
2.7.1	Mikrobolometre Tipi Alıcı.....	33
2.7.2	Ön Yükselteçsiz Direkt Algılama	33
2.7.3	Ön Yükselteçli Direkt Algılama	33
2.7.4	Ara Katlı Alıcı ile Algılama.....	34
2.7.5	Diğer Sistemler	34
2.8	Terahertz Görüntüleme Sisteminde Tarayıcılar	35
2.8.1	Hedef Yüzeyi Tarayan Görüntüleme Sistemleri.....	36
2.8.2	Sanal Görüntü Görüntüleme Sistemleri (Sanal Görüntüleme)	38
3.	TERAHERTZ PASİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	41
3.1	Genel Yapı.....	41
3.2	Tarayıcı.....	42
3.3	Kontrol Ve Veri Toplama	46
3.3.1	Elektronik Donanım.....	46
3.3.2	Kontrol ve Veri Toplama Yazılımı.....	48
3.4	Yalıtkan Mercek (Dielektrik Lens)	51
3.5	Radyometrik Alıcı	58
3.5.1	Radyometrik Alıcı Sistem.....	58
3.5.2	THz Anten.....	59
3.5.3	THz Düşük Gürültülü Yükselteç	60
3.5.4	THz Detektör ve Entegratör.....	61
3.5.5	Alıcı Entegrasyon Zamanı	65
3.5.6	Alıcı Sıcaklığı	65
3.5.7	Alıcı Hassasiyeti Hesaplama	66
3.6	Terahertz Görüntüleme Sistemi Gerçekleştirme	69

4. TERAHERTZ PASİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İLE YAPILAN ÖLÇÜM VE GÖRÜNTÜLEME ÇALIŞMALARI.....	70
4.1 Deneysel Çalışma Yöntemleri.....	70
4.2 Yalıtkan Mercek Odak Noktası, Büyütme Oranı ve Güç Yoğunluğu Ölçümleri	70
4.3 Alıcı Çözünürlük Ölçümleri.....	74
4.4 Alıcı Anten – Tarayıcı Adımı Görüntü Çözünürlüğü İlişkisi	78
4.5 Kişi Üzeri Gizli Obje Görüntüleme	83
5. SONUÇLAR	85
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1 Bazı ışınma kaynaklarının sıcaklık değerleri.....	24
Çizelge 2.2 Bazı ticari THz görüntüleme cihazları ve temel özellikleri.....	31
Çizelge 2.3 Alıcı yapıları ve genel özellikleri.	35
Çizelge 3.1 Yalıtkan mercek tasarım parametreleri.....	57
Çizelge 3.2 Alıcı özellikleri.	68
Çizelge 4.1 Alıcı çözünürlük ölçümleri.	78
Çizelge 4.2 Kullanılan ticari antenler.	80
Çizelge 4.3 MİLTAL antenler	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 Düzlemsel elektromanyetik dalgalar.	4
Şekil 2.2 Elektromanyetik spektrum (SURA, 2012).	6
Şekil 2.3 THz bölgesi.....	7
Şekil 2.4 THz dalgaları atmosfer yayılımı.	8
Şekil 2.5 Terahertz dalgaların atmosferde zayıflaması.	10
Şekil 2.6 Terahertz aktif görüntüleme ve terahertz pasif görüntüleme (Masaru, Mizuno, 2010).	11
Şekil 2.7 Terahertz görüntüleme çeşitleri.	11
Şekil 2.8 a) SAR veri toplama geometrisi, b) ISAR veri toplama geometrisi (Özdemir,2012).	14
Şekil 2.9 (a) Pense ve tornavidalar ait fotoğraf ve odaklanmış SAR görüntüsü (b) Metal silah gizlenmiş insana ait odaklanmış SAR Görüntüsü (Yiğit vd., 2011).....	15
Şekil 2.10 a) 2 cm ³ boyutlarında metal küpün fotoğrafı, tarama geometrisi ve odaklanmış ISAR görüntüsü, b) Metal silahın fotoğrafı, tarama geometrisi ve odaklanmış ISAR görüntüsü (Çetinkaya vd., 2011).	16
Şekil 2.11 0.6THz FMCW görüntüleme sistemi ve sonuçlar.	16
Şekil 2.12 a) Tomografi çözümü b) Holografik çözüm.	17
Şekil 2.13 a) THz tomografi ölçüm b)Ölçülen hedef c) Ölçüm sonucu.....	18
Şekil 2.14 Holografik bazlı THz görüntüleme a)Görüntüleme sistemi b)Hedef c) Sonuç.....	18
Şekil 2.15 TeraView firmasına ait THz spektroskopik görüntüleme a)Cihaz b) Uygulanan THz darbe ve spektrumu c) Elde edilen görüntü.	19
Şekil 2.16 Yansıtıcı dizili görüntüleme sistemi (Agilent).	19
Şekil 2.17 Örnek hedef aydınlatma yöntemi için kullanılan yayıcı.....	20
Şekil 2.18 Aktif aydınlatma kullanılan görüntüleme sistemi ve görüntü (Coward ve Appleby, 2003).....	20
Şekil 2.19 L3 SafeView, kullanım şekli ve ekran görüntüsü.....	21

Şekil 2.20	8mK sıcaklığı için siyah cisim ışıma karşılaştırılması.	24
Şekil 2.21	Doğal ısı kaynaklarının siyah cisim ışıma spektrumları.....	25
Şekil 2.22	Kozmik arkaplan ışıması COBE ölçüm sonucu.	26
Şekil 2.23	Kozmik arka plan ışıması (WMAP uydusu, 2003).....	27
Şekil 2.24	Frekansa göre kozmik arka plan ışıması.....	28
Şekil 2.25	Kirchhoff yasası.....	28
Şekil 2.26	ThruVision T4000 ve ekran görüntüleri.....	29
Şekil 2.27	Brijot BIS-WDS, iç yapısı ve ekran görüntüleri.....	29
Şekil 2.28	Sago Trex ST150 ve ekran görüntüleri.....	30
Şekil 2.29	a) ThruVision TS4C b) ThruVision TS4.	30
Şekil 2.30	İdeal alıcı(Skou, 2006).....	32
Şekil 2.31	Gerçek alıcı(Skou, 2006).....	32
Şekil 2.32	Mikrobolometre tip alıcı.....	33
Şekil 2.33	Direkt alıcı (Skou, 2006).	34
Şekil 2.34	Ara katlı alıcı (Skou, 2006).	34
Şekil 2.35	Doğrudan görüntüleme (Hedef tarama).....	36
Şekil 2.36	Kullanılabilecek bazı açıklık anten aapıları a)Parabolik anten b) Off-Set parabolik anten c)Cassegrain anten d)Gregorian anten e)Lens anten.....	37
Şekil 2.37	MİLTAL Bünyesinde gerçekleştirilen parabolik yansıtıcı kullanılan doğrudan görüntüleme sistemi ve sonuçları(Vertiy vd., 2011).	38
Şekil 2.38	Yalıtkan lens kullanılan yarı optik görüntüleme sistemi.	39
Şekil 2.39	Yansıtıcı (Reflektor) kullanılan yarı optik görüntüleme sistemi.	39
Şekil 2.40	a) Tek alıcı ile iki boyutlu tarana sistemi b) Tek boyutlu alıcı dizisi ile tek boyutlu tarama sistemi c) İki boyutlu alıcı dizisi.	40
Şekil 3.1	Sistem şema ve fotoğrafı.	41
Şekil 3.2	Sistemde kullanılan adım motor.	42
Şekil 3.3	Tarayıcı hareket sağlayıcısı motor.....	43
Şekil 3.4	Motor sürücü kutusu.	44
Şekil 3.5	Motor sürücüleri.	44
Şekil 3.6	Tarayıcı sistemin ölçüm sırasında izlediği yol.	45
Şekil 3.7	Tarayıcı ön görünüm.....	45
Şekil 3.8	Bilgisayar kontrol ünitesi ve bağlantı noktaları.....	46

Şekil 3.9	Bilgisayar kontrol ünitesi devre şeması.....	47
Şekil 3.10	Bilgisayar kontrol yazılımı.....	48
Şekil 3.11	Bilgisayar kontrol yazılımı ana penceresi.....	49
Şekil 3.12	Tarayıcı kontrol penceresi ve tarayıcı konumlandırma ilişkisi.....	49
Şekil 3.13	Ölçüm alanı tanımlama bilgileri.....	50
Şekil 3.14	Ölçüm işaret görüntüleme penceresi.....	50
Şekil 3.15	Mercek ve görüntü oluşumu.....	51
Şekil 3.16	Mercek kalınlığının etkisi.....	52
Şekil 3.17	a) Geometrik optik b) Dalga optiği.....	54
Şekil 3.18	Geometrik yöntem ile mercek tasarımı.....	54
Şekil 3.19	Kartezyen çizim.....	56
Şekil 3.20	Yalıtkan lens çizimi.....	57
Şekil 3.21	Üretilen mercek (Lens) fotoğrafları a) Üstten b) Yandan c) Yerine montajlı	58
Şekil 3.22	Radyometrik alıcı (Dairesel huni anten ile).....	58
Şekil 3.23	Alıcı sistem.....	59
Şekil 3.24	Kullanılan antenler.....	59
Şekil 3.25	Alıcı yükselteç katının kazanç ölçümü.....	60
Şekil 3.26	Alıcı yükselteç kazancı.....	60
Şekil 3.27	Alıcı yükselteç giriş duran dalga oranı.....	61
Şekil 3.28	Ön yükselteçli alıcı.....	61
Şekil 3.29	HXI ve ELMİKA WR-10 Detektör.....	62
Şekil 3.30	Detektör hassasiyet ölçüm sonuçları a) HXI b) Elmika.....	62
Şekil 3.31	Hesaplama da kullanılan Butterworth eşit bağlantı Alçak Geçiren Filtre parametreleri a) Zayıflatma b) Katsayı tablosu.....	63
Şekil 3.32	Alçak geçiren filtre devresi.....	64
Şekil 3.33	Alçak geçiren filtre.....	64
Şekil 3.34	Alçak geçiren filtre sonuçları.....	64
Şekil 3.35	Alıcı işaretleri.....	66
Şekil 3.36	Terahertz görüntüleme sistemi a) Tarayıcı kısmı b) Mercek tarafından görünüm c) Ön taraf.....	69
Şekil 4.1	Yalıtkan mercek ölçüm şekli.....	71

Şekil 4.2	Yalıtkan mercek ölçüm düzeneği.	71
Şekil 4.3	Yalıtkan mercek ölçüm sonuçları.	71
Şekil 4.4	En iyi görüntü.	73
Şekil 4.5	Yalıtkan mercek güç dağılımı.	73
Şekil 4.6	Sıvı azot ile ölçüm.	75
Şekil 4.7	0°C (Buzlu su ile) ölçüm.	76
Şekil 4.8	100°C (Kaynayan su ile) ölçüm.	77
Şekil 4.9	Alıcı çözünürlük grafiği.	78
Şekil 4.10	Anten ve tarayıcı ölçümü için hedef.	79
Şekil 4.11	Ticari antenler ölçüm sonuçları.	81
Şekil 4.12	MİLTAL antenleri ölçüm sonuçları.	82
Şekil 4.13	Ölçüm sonucu ve ölçüm fotoğrafı.	83
Şekil 4.14	Hedef üzerine yerleştirilen metal model (30cm uzunlukta)	83
Şekil 4.15	Güvenlik görevlisi ölçümü	84

SİMGELER ve KISALTMALAR

\vec{B}	:Vektörel manyetik alan
c	:Işık hızı
\vec{E}	:Vektörel elektrik alan
f	:Frekans
SURA	: Southeastern Universities Research Association
Thz	:Terahertz
λ	:Dalga boyu
MİLTAL	:Milimetre dalga ve Terahertz teknolojileri Araştırma Laboratuvarları
PNNL	: Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarı
h	:Planck sabiti
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
v	:Bağıl hız
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
SAR	:Yapay açıklık RADAR (Synthetic aperture RADAR)
ISAR	:Ters yapay açıklık RADAR (Inverse SAR)
TÜBİTAK	:Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu
MAM	:Marmara Araştırma Merkezi
LO	:Yerel üreteç (Local oscillator)
IF	:Ara Frekans (Intermediate frequency)
Amp	:Yükselteç (Amplifier)
LNA	:Düşük gürültülü yükselteç (Low noise amplifier)
ADC	:Analog – dijital çevirici
USB	:Evrensel seri veriyolu (Universal serial bus)
FMCW	:Frekans modülasyonlu sürekli dalga
SNR	:İşaret gürültü oranı (Signal to noise ratio)
ϵ	:Yayımlı katsayısı (Emissivity)
k	:Boltzman sabiti
E	:Enerji

1. GİRİŞ

İnsan varoluşundan beri duyu organlarının yetersiz kaldığı durumlarda arayış teknoloji ile kapatmıştır. Özellikle göz ile göremediği nesnelere görmek ve uzaklardan haberdar olmak için sürekli yeni arayışlara girmiştir. Son yüzyılda gelişen elektronik ve mikrodalga teknolojisi ile elektromanyetik dalgalar kullanılarak bu eksiklik giderilmeye çalışılmıştır. Hiç şüphesiz ki elektromanyetik dalgaların kullanıldığı en önemli uygulamalar haberleşme alanında kablosuz veri (ses, görüntü,..vb) aktarımı ve RADAR (*RA*dio *D*etecting *A*nd *R*anging; *R*adyo dalgaları ile algılama ve mesafe tayini) cihazlarıdır. Bu uygulamalar ile birlikte elektromanyetik dalgaların bir uygulaması da görüntülemedir. Fakat bu görüntüleme daha ziyade RADAR sistemlerine eklenen tomografi, holografi, SAR gibi algoritmalar ile elde edildi. Günümüz görüntüleme teknolojileri olarak optik kameralar, kızılötesi (IR) kameralar, X-Ray teknolojileri, Manyetik Rezonans (MR) ve ultrasonik görüntüleme sayılabilir. Optik kameralar ile gözümüzün gördüğü görüntüyü (uzak veya yakından), kızılötesi kameralar ile ısıya bağlı görüntü elde edilir. X-Ray, MR ve ultrasonik görüntüde ise görüntülenecek nesne, ölçüm sisteminin içerisinde yer almak zorundadır. X-Ray ile uzaktan görüntüleme mümkündür ama insan sağlığı açısından tehlikelidir. Terahertz dalgaların metal ve su hariç (Metallerden yansır, suda ise soğurular) diğer malzemelerden belli oranda geçmesi, tekstil, kumaş, kağıt ...vb malzemelerde ise neredeyse zayıflamadan geçmesi onun görüntüleme amacıyla kullanılması imkanını verir. Ayrıca kozmik arka plan ışınmasının en etkin olduğu bölge yine THz bölgesi içerisinde yer alır. Bu şekilde hiçbir yayım yapmadan sadece hedeften yansıyan ve yayılan THz ışınımına alınarak pasif bir şekilde görüntüleme gerçekleştirilebilir.

Terahertz görüntüleme, kişi üzeri gizlenmiş objelerin görüntülenmesi ile önemli bir güvenlik açığını kapatabilir ve sağlığa zararı olmadığından hamile ve çocuklar olmak üzere herkes üzerinde kullanılabilir. Ayrıca görüntüleme mesafesi kullanılacak yarı optik sisteme göre 0.1m`den kilometrelere çıkabilmektedir. (Siegel,2002 ve Kemp, 2006)

Terahertz görüntüleme, THz bölgesi katı hal yarı iletken aktif devre elemanları (HEMT, PHEMT, Diyot) geliştirilmeye başlandıktan sonra ilerlemiştir. Günümüzde 220GHz ve üstü düşük gürültülü yükselteç çalışmaları, bolometre geliştirme çalışmaları tüm hızıyla devam etmektedir. Bu çalışmalar ile birlikte THz görüntüleme sistemleri geliştirilmesi de devam etmektedir. (Grossman, 2012 ve Yujiri, 2006)

1.1 Literatür Taraması

THz görüntüleme sistemleri gelişimi RADAR ve yarı iletken elektronik devre elemanları gelişimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle literatür hazırlanırken genel elektronik/elektromanyetik ve RADAR çalışmaları yerine doğrudan Terahertz görüntüleme çalışmaları ele alınmıştır.

Ditchfield ve England (Ditchfield ve England, 1955) tarafından gerçekleştirilen “Green Minnow” çalışması ilk pasif görüntüleme kabul edilir. 40 GHz frekansında gerçekleştirilen ve yaklaşık 500kg ağırlığında olan bu görüntüleme sistemi Lincoln bombardıman uçağına monte edilmiş ve havadan görüntü alma amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmadan sonra benzer yapılar uçaklardan ve uzaydan görüntü almak, su yoğunluğunu ölçmek amacıyla kullanılmıştır (Appleby, 2008) .

Gleed ve Appleby (Gleed ve Appleby, 1997) tarafından kişi üzeri gizli objeleri gösteren 94GHz`de çalışan ilk görüntüleme sistemi MITRE, Qinetiq tarafından geliştirildi. 1,2m²`lik anteni ve büyük yapısına rağmen kullanılan mekanik tarama sistemi nedeniyle görüntü alma süresi uzun olmuştur.

Appleby, Anderton vd. (Appleby, Anderton vd., 1999) tarafından video hızında görüntü alabilen (25 Hz) ilk görüntüleme sistemi olan MERIT, Qinetiq tarafından gerçekleştirildi. 150 adet direkt alıcıdan oluşan MERIT sadece 60cm anten açıklığına sahipti.

Sinclair, Coward, vd. (Sinclair, Coward, vd., 2002) tarafından gerçekleştirilen pasif terahertz görüntüleme sistemi, üzerinde yasaklı obje taşıyan hava yolu yolcuları üzerinde görüntü elde etmesi için ilk defa güvenlik uygulamasında kullanıldı. Bu

tarihten itibaren özellikle ABD başta olmak üzere İngiltere, Almanya, Rusya, Japonya ve Güney Kore`de ufak değişiklikler ile benzer çalışmalar tekrarlandı.

Dengler, Cooper, vd. (Cooper, Dengler, vd., 2007-2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda 580GHz, 600GHz ve 630GHz frekanslarında FMCW kullanarak aktif terahertz görüntüleme gerçekleştirilmiştir. 4m mesafeden gerçekleştirilen ölçümlerde 2cm çözünürlüğe ulaşılmıştır.

McMakin, Sheen, vd. (McMakin, Sheen, vd., 2008) tarafından PNNL`de gerçekleştirilen aktif terahertz görüntüleme çalışmasında elde edilen veriler holografi yöntemiyle görüntüye dönüştürüldü. Böylece 30cm mesafeden yüksek çözünürlükte kişi üzeri gizlenmiş silah algılaması gerçekleştirildi.

Sato ve Mizuno (Sato ve Mizuno, 2010) tarafından floresan lamba ile aydınlatılmış alanda pasif terahertz görüntüleme çalışması gerçekleştirildi ve floresan lamba yayımının olumlu etkisi gözlemlendi.

1.2 Tez Çalışmasının Kapsamı

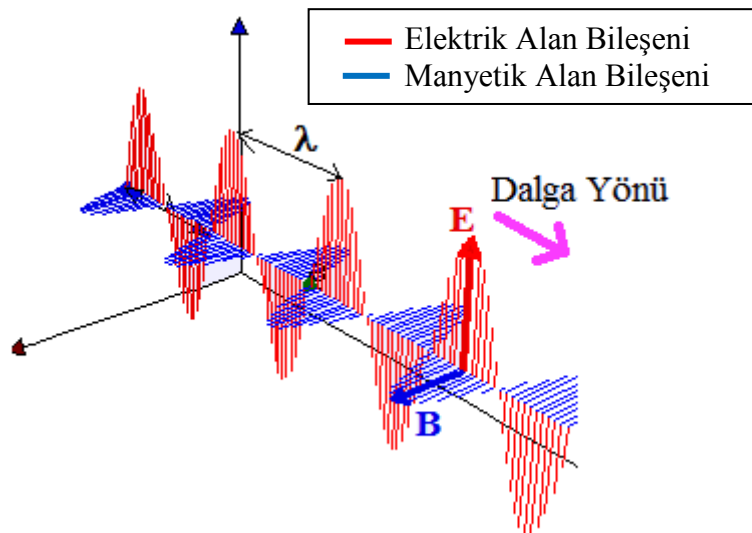
Bu tez çalışmasındaki amaç, terahertz teknolojisinin anlaşılması ve bu kapsamda ülkemizde ilk terahertz görüntüleme sisteminin gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Bununla birlikte gerçekleştirilecek THz görüntüleme sisteminin güvenlik uygulaması ve kişi üzeri gizli metal obje görüntüleme kapasitesi ve kullanılan anten açıklığının görüntü çözünürlüğüne etkisi incelenecektir.

Bu amaç doğrultusunda giriş bölümünde literatür çalışması, ikinci bölümde terahertz görüntüleme ile ilgili genel açıklamalar ve teorik bilgi verildi. Üçüncü bölümde Terahertz görüntüleme sistem bileşenleri tasarımı, gerçekleştirme ve ölçümü ile görüntüleme sisteminin gerçekleştirilmesi; dördüncü bölümde ise görüntüleme sistemi ile yapılan ölçüm ve görüntüleme çalışmaları bilgisi verildi. Son bölümde tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirildi. Ayrıca kullanılan anten açıklığının çözünürlüğe etkisi de incelenecektir.

2. TERAHERTZ GÖRÜNTÜLEME

2.1 Elektromanyetik Dalgalar ve Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik dalgalar, yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucu oluşan, birbirine dik elektrik (\vec{E}) ve manyetik alan (\vec{B}) bileşeni bulunan ve bu iki alanın oluşturduğu düzleme dik doğrultuda yayılan, yayılmaları için ortam gereksinimi olmayan, boşlukta c ışık hızı ile yayılan enine dalgalardır. Elektromanyetik dalga kavramı ilk olarak James Clerk Maxwell tarafından ortaya atılmıştır ve ardından Heinrich Hertz tarafından doğrulanmıştır. Maxwell, elektrik ve manyetik alanların dalga benzeri yapılarını ve simetrilerini açığa çıkaran alan dalga formu denklemleri elde etmiştir. Maxwell, ışığın ölçülen hızının, dalga denklemlerinden çıkan EM dalgaları hızları ile çakışık olmasından dolayı ışığı da bir elektromanyetik dalga olarak kabul etmiştir. Maxwell'in denklemlerine göre, hareketsiz bir elektrik yükü etrafında bir elektrik alan oluşturur. İvmeli hareket eden bir elektrik yüküyse oluşturduğu elektrik alana ek olarak manyetik alan oluşturur. Bu alanlar birbirlerine dik olarak salınırlar ve Şekil 2.1`de gösterildiği gibi düzlemsel elektromanyetik dalgalar oluşur(Chang, 2009).



Şekil 2.1 Düzlemsel elektromanyetik dalgalar.

Elektromanyetik dalganın bir saniyede meydana getirdiği salınım sayısına frekans denir, birimi Hertz'dir ve Hz ile gösterilir. Ayrıca her iki dalga tepesi arası

mesafe dalgaboyu olarak tanımlanır, λ (lambda) ile gösterilir, birimi metre`dir. v hızına sahip elektromanyetik dalga için;

$$v = f\lambda \quad (\text{E. 2.1})$$

Elektromanyetik Dalgalar boşlukta ışık hızı (c) ile yayılırlar. Bu durumda “E.1.1” boşlukta yayılan elektromanyetik dalgalar için aşağıdaki şekilde gösterilir;

$$c = f\lambda \quad (\text{E. 2.2})$$

c : Işık Hızı (Boşlukta) 3×10^8 m/s

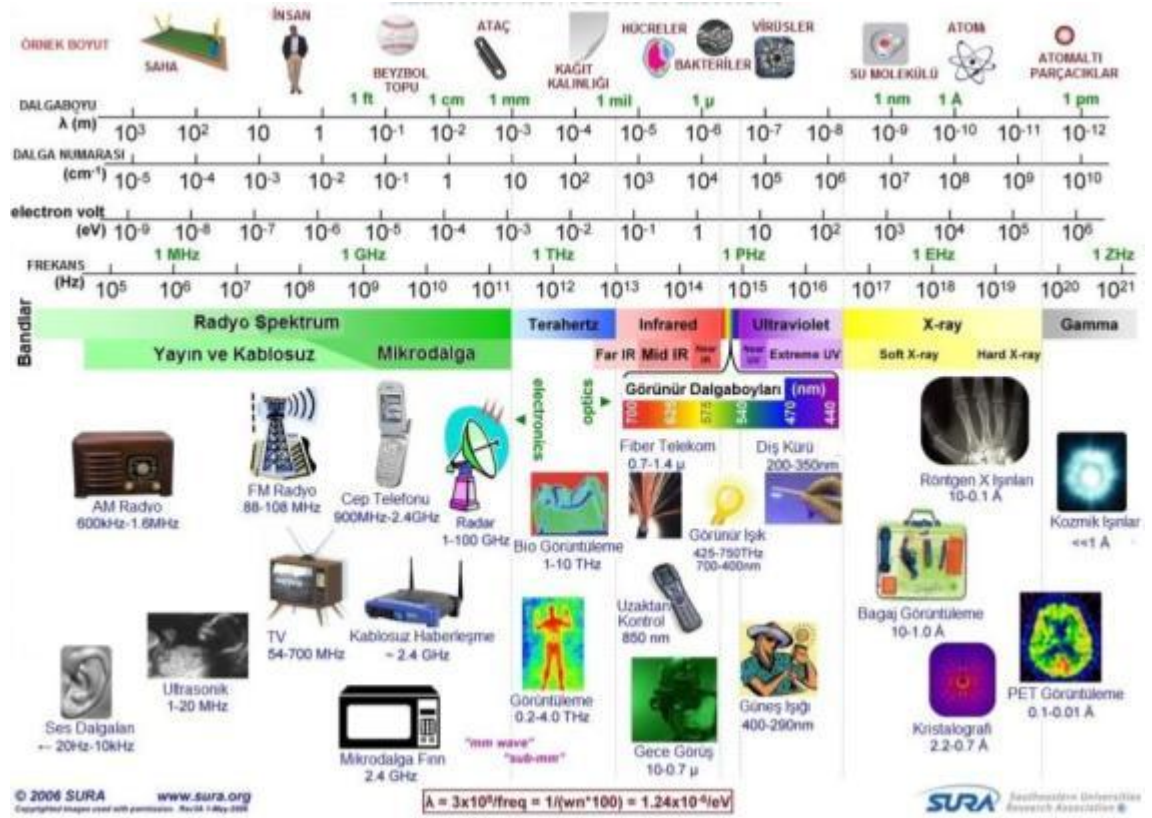
Elektromanyetik dalga yayılımı hem dalga hem de parçacık özellikleri taşımaktadır. Foton ismi verilen bu parçacıklar ile enerji taşınımı gerçekleşir. Yayılan elektromanyetik dalgadaki foton başına enerji miktarı “ E ” frekans ile doğru orantılıdır, birimi J m (Joule metre)¹ `dir ve aşağıdaki Planck-Einstein eşitliği ile açıklanır. Bu durumda frekans arttıkça enerji artar ve dalgaboyu kısalmır.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{E. 2.3})$$

h : Planck Sabiti $6,626 \times 10^{-34}$ J s (Joule saniye)

Elektromanyetik dalgalar frekanslarına/dalgaboylarına göre bir spektrumda gösterilirler ve isimlendirilirler. Elektromanyetik spektrum binlerce kilometreden atomaltı uzunluklara kadar geniş bir yelpazedeki dalgaboylarında elektromanyetik yayılımı kapsar. Şekil 2.2`de SURA tarafından hazırlanan elektromanyetik spektrum verilmiştir.

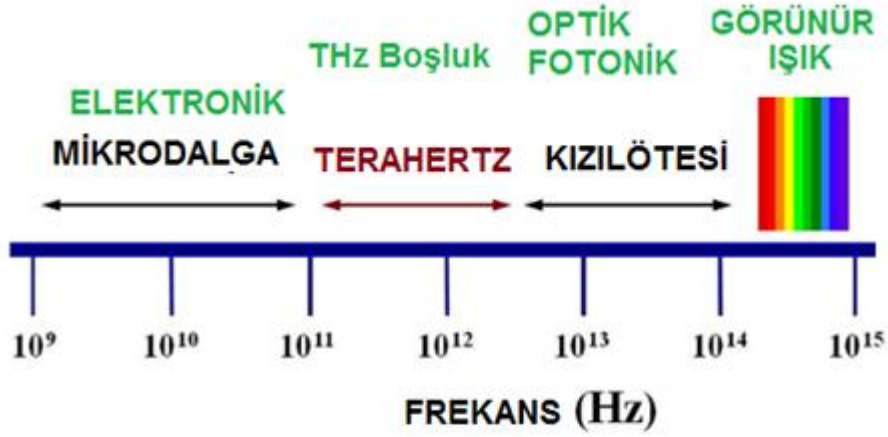
¹ Planck sabiti $6,626 \times 10^{-34}$ J s alınırsa E nin birimi J m (Joule metre) olur.



Şekil 2.2 Elektromanyetik spektrum (SURA, 2012).

2.2 Terahertz Dalgalar ve Uygulama Alanları

“Tera” metrik birimlerde kullanılan 10^{12} çarpan değerine sahip bir ön ektir ve “T” ile ifade edilir. 1 Terahertz= 10^{12} Hertz dir. Terahertz dalgalar, elektromanyetik spektrumun milimetre dalga ile uzak kızılötesi arasındaki $0.1 \text{ THz} - 10 \text{ THz}$ (en geniş ifade) bölgesi için kullanılır. Bu bölge T-ışınımı (T-rays) olarak da adlandırılır. Bu frekans aralığı mikrodalga ile uzak kızılötesindeki aralığa karşılık gelir. Terahertz teriminin ilk kullanımı 1974’de Fleming’in Michelson interferometresinin frekans aralığını açıklarken kullanımına bağlanır (J.W.Fleming, 1974). THz dalgaları elektromanyetik spektrumun geniş bir alanını kaplamalarına rağmen çok fazla keşfedilmemiş bir bölgede bulunmaktadır. THz frekanslı ışığa yenilikçi algılama ve görüntüleme yetenekleri ile son yılların üzerinde en çok çalışılan araştırma konularından birisi olmuştur (Özyüzer, 2009). Ayrıca astrofizikçiler tarafından milimetreatlı dalgalar (sub-mmwave) olarak isimlendirilir (Maagt, Bolivar, Mann, 2005).



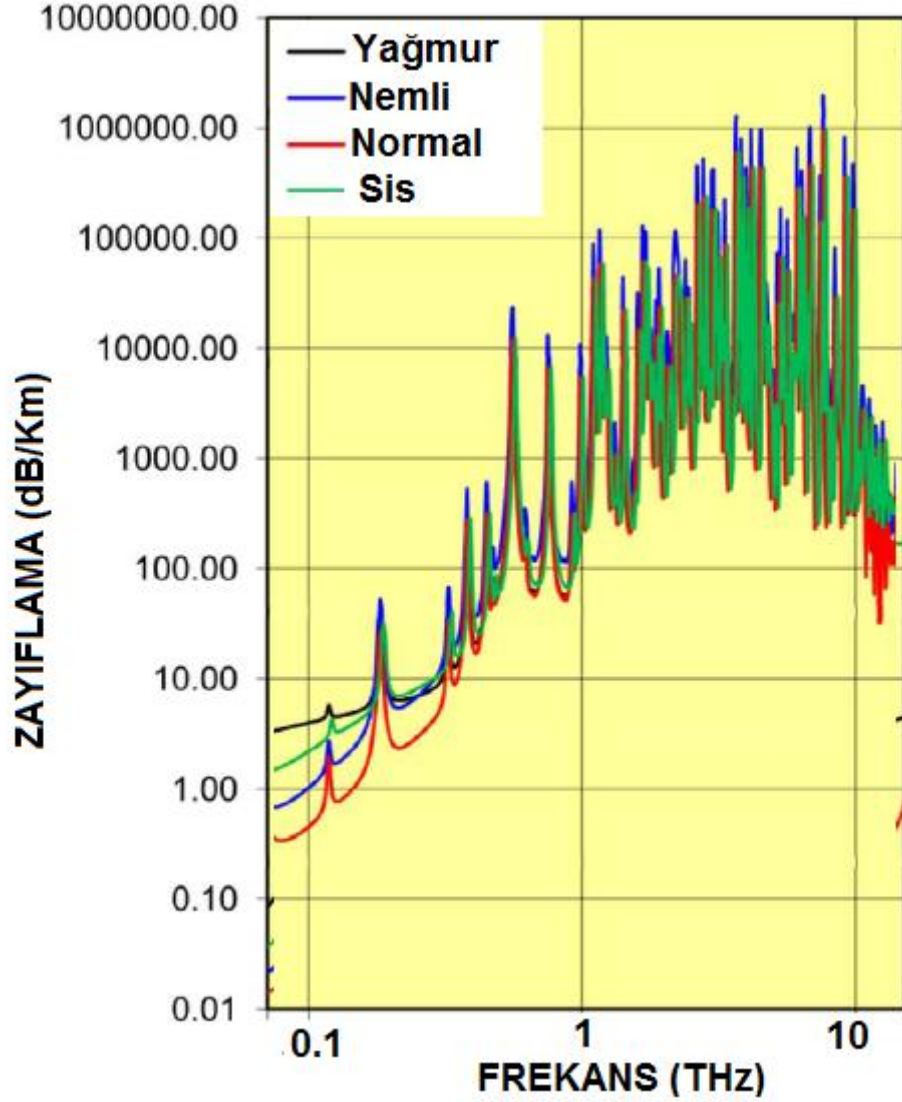
100 GHz - 10 THz	Veya	3 mm - 30 μm
1 THz = 1 ps = 300 μm = 33 cm⁻¹ = 4.1 meV = 48 K		

Şekil 2.3 THz bölgesi.

Terahertz ışınması, elektromanyetik spektrumunun diğer bölümlerinde bulunmayan benzersiz özelliklere sahiptir. Terahertz ışınması su ve metal haricindeki hemen hemen her maddeye belirli bir derecede nüfuz edebilir ve kimyasal, biyolojik moleküllerin büyük bir kısmının titreşim hareketine uyan frekans aralığındadır. T-ışınları plastik, karton, kumaş gibi çoğu malzemeden geçerek su ve su buharında soğrulup metallere yansır. Bu sayede havaalanı güvenliğinde uygulama alanı bulabilmekle birlikte, THz dalgaboyları çoğu kimyasal ve biyolojik malzemenin de parmak izi spektrumunu da oluşturduğundan, tehlikeli maddelerin tanımlanmasında kullanılabilir. THz dalgaları çok hızlı kablosuz iletişimde, tıbbi görüntüleme, kara mayınlarının uzaktan algılanmasında yeni avantajlar sağlayacaktır. Özellikle artan görüntü kalitesi nedeniyle artan veri miktarını hızlı bir şekilde kablosuz aktarmak için THz frekanslarında taşıyıcılar kullanılması söz konusudur. Bu nedenle bütün bunların yanında, T-ışınları biyolojik dokuları iyonize etmeme özelliğinden dolayı X-ışınlarına göre zararsızdır. Canlılar üzerinde dozaj sınırı olmadan tıbbi görüntüleme veya başka amaçlarla kullanılabilir.

Havaalanlarındaki güvenlik çemberinden çanta, eşya veya giysiler X-ışını kameralarından geçerken, yolcular üzerinde metal bulunup bulunmadığını manyetik

algılayıcılar tespit etmektedir. Dolayısıyla yolcuların taşıdıkları tüm metal nesnelere üzerlerinden çıkarıp, hatta ayakkabılarını, X-ışını cihazına koymaları gerekmektedir ki bu da havaalanlarında uzun kuyrukların oluşmasına neden olmaktadır. Biyolojik dokulara zarar vermeyen T-ışınları ile yolcuların eşyalarını bırakmadan taramadan geçirilmeleri mümkün olacaktır (Liu, 2007).



Şekil 2.4 THz dalgaları atmosfer yayılımı.

Terahertz dalgaları atmosfer ortamında yayılımı Şekil 2.4'de verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere 0,1 THz – 1THz arası işaretler atmosferde düşük zayıflama ile yayılırken, 1 THz – 10 THz arası atmosferde çok zayıflamaktadır. THz işaretlerin uygulandığı malzemelerdeki yansıma ve geçiş zayıflama değerleri o

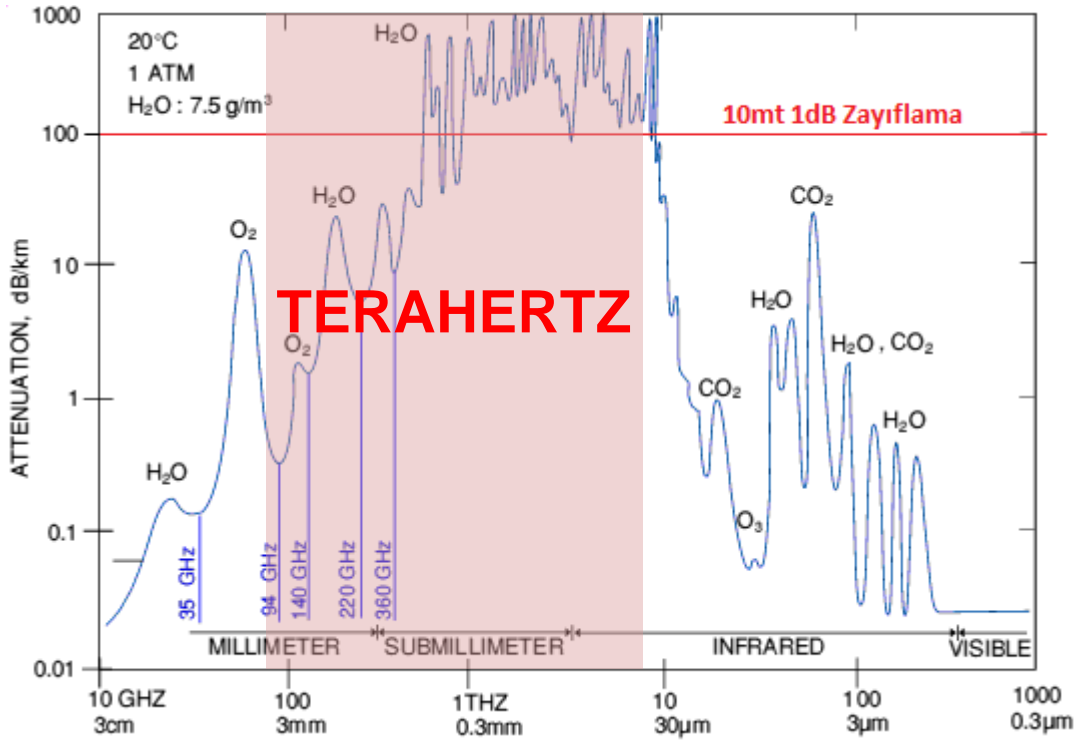
malzemeleri tanımlayan parmak izi gibidir. Bu nedenle malzemeleri tanımlayan THz spektroskopiler geliştirilmiştir.

IEEE bünyesinde “Terahertz Science and Technology” dergisi ve IEEE802.15 THz çalışma grubu mevcuttur. Ayrıca MIT tarafından dünyayı değiştirecek 10 teknolojiden birisi olarak THz teknolojileri gösterilmiştir (Arnone, 2004).

2.3 Terahertz Görüntüleme

Terahertz dalga boylarında yapılan görüntülemedir. X-ışınları çok iyi nüfuz eder fakat aynı zamanda iyonlaştırıcıdır ve insan sağlığı için potansiyel tehlike oluşturmaktadır. Görünür ve kızılötesi dalga boylarında görüntüleme yapmak kolaydır, fakat duman, sis, yağmur gibi ortamlarda kolayca saçıldıklarından etkili değildirler. Radyo frekansları ise bu tip ortamlarda ilerleyebilir fakat büyük boyutlarda algılayıcı ve anten gerektirmekle birlikte zayıf bir açısal çözünürlüğe sahiptir. THz dalga boyları ise, saçıcı ortamlarda ilerlemeye yetecek kadar uzun, aynı zamanda da uygulanabilir ve taşınabilir sistemler yapmaya yetecek kadar da küçük, ve uzaysal çözünürlük açısından da orta derecede kabul edilebilir bir değere sahiptir. Su ve metal dışındaki maddelere nüfuz edebilmesi ve iyonize olmayan ışınması ile gizlenmiş nesnelere görüntülenmesinde avantajlıdır. Özellikle giysi gibi kumaş veya dielektrik malzemeler ile gizlenmiş metal silah ya da patlayıcıların tespitini uzaktan mümkün kılar. Bu kadar önemli özellikleri bir arada barındıran THz frekans bandında çalışan görüntüleme sistemleri henüz gelişme aşamasındadır.

Terahertz dalgalarının atmosfer ortamındaki zayıflama ve soğurulması görüntüleme için kullanılacak bandı belirler. Uzaktan görüntüleme özellikle atmosfer ortamında zayıflamanın düşük olduğu bölgelerde gerçekleştirilir. Şekil 2.5 incelendiğinde 0,1THz ile 1 THz arası bölge atmosferde daha az zayıfladığından uzaktan algılama için daha uygundur.

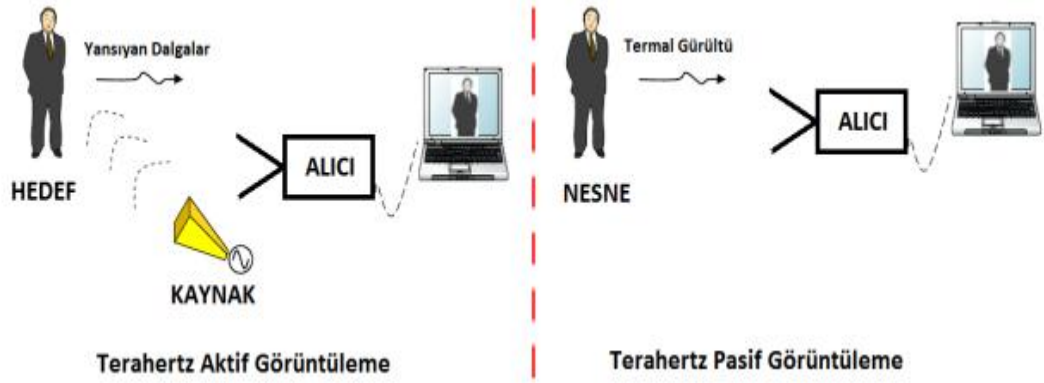


Şekil 2.5 Terahertz dalgaların atmosferde zayıflaması.

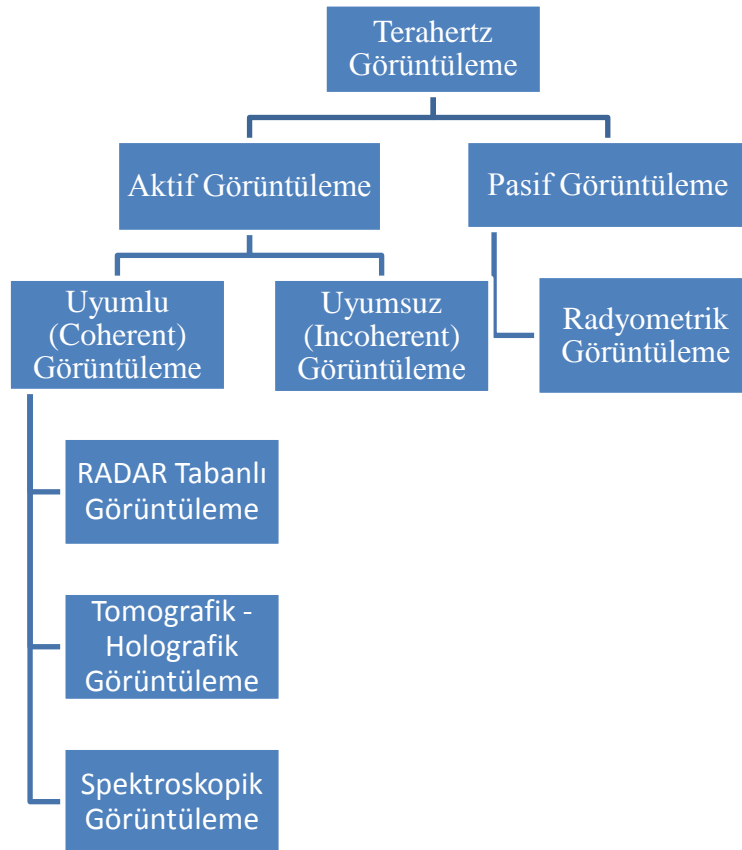
Terahertz bandı dalgaboyu nedeniyle madde moleküllerinde titreşime neden olmaktadır. Molekül yapısı farklı her malzeme için bu özellik parmak izi gibi belirleyici niteliğe sahiptir. Bu nedenle tüm THz bandında, spektroskopik görüntüleme ile malzeme tespiti ve malzeme içi görüntüleme gerçekleştirilebilir.

Günümüzde THz görüntüleme, güvenlik uygulamaları (Ev, hava alanları,...), tıbbi görüntüleme, malzeme tanımlama, ilaç sanayi ve savunma amaçlı görüntüleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Ortamda yayılması ve moleküler imza hakkında bilgi verebilmesi gibi avantajlarının yanında, elektronik ve optik sistemleri gibi teknolojilerin bu alanda gelişmemiş olması başlıca dezavantajıdır (Siegel, 2002) .

THz görüntüleme genel olarak THz kaynak kullanımına göre ikiye ayrılır. THz kaynak kullanan sistemler Aktif görüntüleme sistemleri, THz kaynak kullanılmayanlar ise Pasif görüntüleme sistemleri olarak adlandırılır.



Şekil 2.6 Terahertz aktif görüntüleme ve terahertz pasif görüntüleme (Masaru, Mizuno, 2010).



Şekil 2.7 Terahertz görüntüleme çeşitleri.

2.4 Aktif Terahertz Görüntüleme

Bütün nesnelerin THz ışınımı yapması pasif görüntüleme tekniklerini uygulanabilir kılsa da aynı zamanda ciddi bir gürültü kaynağı olarak davranmaktadır. Bu nedenden ötürü pasif THz görüntüleme metotları daha çok uzay ortamında ya da dış ortamda etkili olmaktadır. Uyduya yerleştirilen bir algılayıcı dünyada kaçınılmaz olan güçlü termal gürültüden uzak bir şekilde yalnızca ilgi duyulan hedefe odaklanabilir. Ayrıca dış ortamda metal gibi yüksek yansıtıcılı hedefler tespit edilebilir. İç ortamlarda cisimler kozmik arka plandan kaynaklanan ışımaya yapmadıklarından THz dalga boylarında tespiti zordur. Bu nedenle hedefin görüntülenmesi için başka bir kaynak ile aydınlatılması ve hedeften yansıyan, kırılan dalgaların algılanması gerekmektedir.

2.4.1 Uyumlu (Coherent) aktif görüntüleme

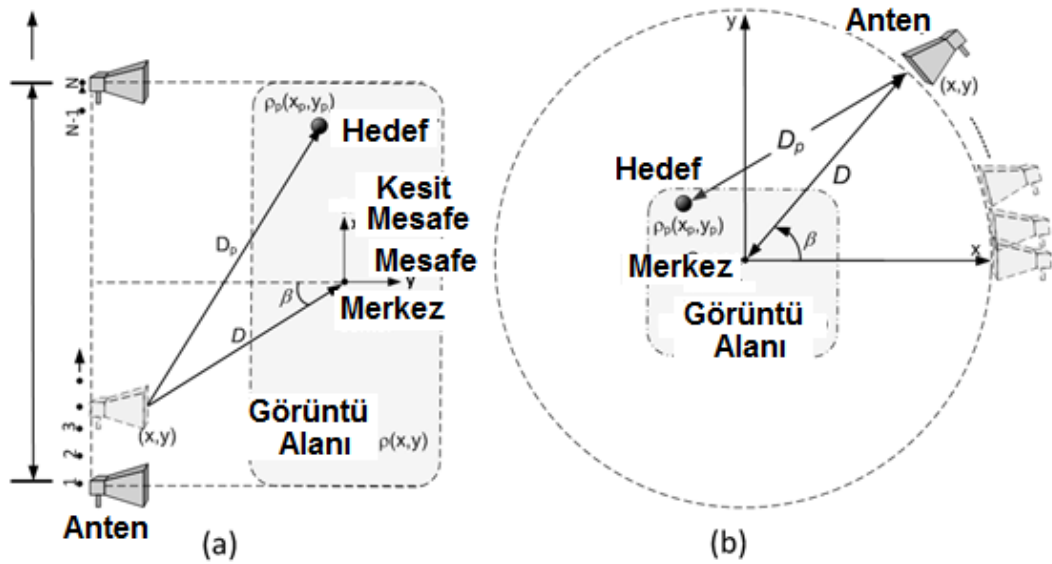
Alıcı birimin verici birimden referans aldığı görüntüleme sistemleridir. Bu sayede genlik ile birlikte faz bilgisi de elde edilir. Aktif görüntüleme, pasif görüntüleme tekniğinde olduğu gibi gökyüzünde gelen gürültü gibi bir kaynakla hedefin aydınlatılması gereklidir. Aydınlatma enerjisi düzgün olarak mümkün olan en geniş açıdan gönderilmelidir. Radar tabanlı; Yapay açıklık radar (Synthetic Aperture RADAR, SAR), Ters Yapay Açıklık Radar (Inverse SAR, ISAR) ile THz holografi ve THz tomografi görüntüleme yöntemleri bu gruba girer. Radar tabanlı sistemler ile genellikle hedef mesafesi ve hız belirleme gerçekleştirilirken; holografi ve tomografi ile yakın alan görüntüleme gerçekleştirilir.

2.4.1.1 Radar tabanlı aktif görüntüleme

SAR tekniği sayesinde yeryüzü haritaları çıkarıldığı gibi, hedeflerin konum bilgileri ve yaklaşık şekilleri de tespit edilebilmektedir. Yeryüzü arazilerinin 3 boyutlu haritalarının çıkarılmasında da etkin bir şekilde kullanılan SAR tekniği, orman arazileri arkasında gizlenmiş askeri (Tank, Uçak, Depo vs.) mühimmatın bulunmasında da kullanılmaktadır. SAR sistemi hareketli bir platforma monte edilmiş, verici (Tx) ve alıcı (Rx) anten çiftlerinden oluşan ve aktif görüntüleme yapan bir yapıya sahiptir.

Ters sentetik açıklıklı radar (ISAR) sisteminde ise, anten sabit iken hedefin açısal hareketliliğiyle görüntü elde edilmektedir. Hedefin sabit olduğu ve antenin dairesel bir hat boyunca hedefin etrafında dolaştığı bir geometri, ISAR sisteminin dengi olarak kabul edilir. Buna göre standart bir SAR/ISAR sistemi için 2 boyutlu veri toplama geometrisi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. SAR anteni sabit bir hat üzerinde hareket ederken, menzil yönünde Tx anten tarafından gönderilen elektromanyetik (EM) saçılımların, hedeflere çarpması sonucu geri saçılımları toplarken, ISAR tekniğinde radar antenleri dairesel bir hat boyunca hedeflenen bölgeden elde edilen geri saçılımları toplamaktadır. İç ortam laboratuvar ortamlarındaki ISAR ölçümleri döner tabla aracılığıyla elde edilmektedir.

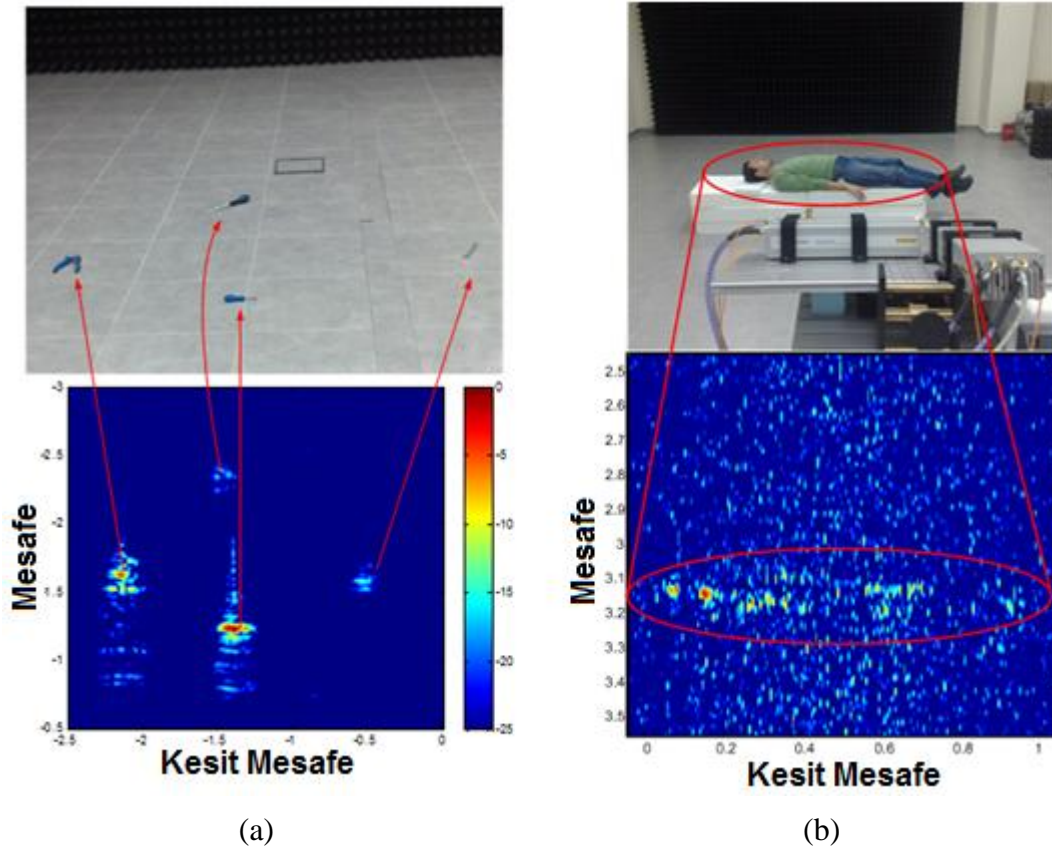
SAR/ISAR ile görüntüleme işleminin hedefin 2 boyutlu görüntüsünün oluşturulabilmesi için, sentetik açıklıklı, açısal açıklığın hedef boyutlarına eşit veya büyük olması ihtiyacıdır. Zira 5 m genişliğindeki bir hedefin SAR ile görüntülenebilmesi için en az 5 m'lik sentetik açıklıkta tarama gerekmektedir. Ayrıca ISAR ile görüntüleme yapılabilmesi için hedefin 360 derecelik bir açısal açıklıklı taranması gerekmektedir. Bu gereksinimler, SAR ve ISAR ile 2 boyutlu görüntüleme uygulamalarının başlıca dezavantajları arasında yer almaktadır. Aktif radar tekniğini kullanan SAR görüntüleme hedeflerin konum bilgisi net bir şekilde elde edilirken, hedeflerin yapılarının tespit edilmesi ayrı bir problem teşkil etmektedir. Hedeflerin şekillerinin belirlenebilmesi için, fiziksel tabanlı görüntüleme algoritmalarının da işleme tabi tutulması gereklidir. Aktif radarlarda, verici anten tarafından gönderilen sinyalin metalik hedefler üstünde oluşturduğu etkiden kaynaklı girişimler ve rastgele saçılımlar, hedef şeklinin tespitine mani olmaktadır (Özdemir, 2012).



Şekil 2.8 (a) SAR veri toplama geometrisi, (b) ISAR veri toplama geometrisi (Özdemir,2012).

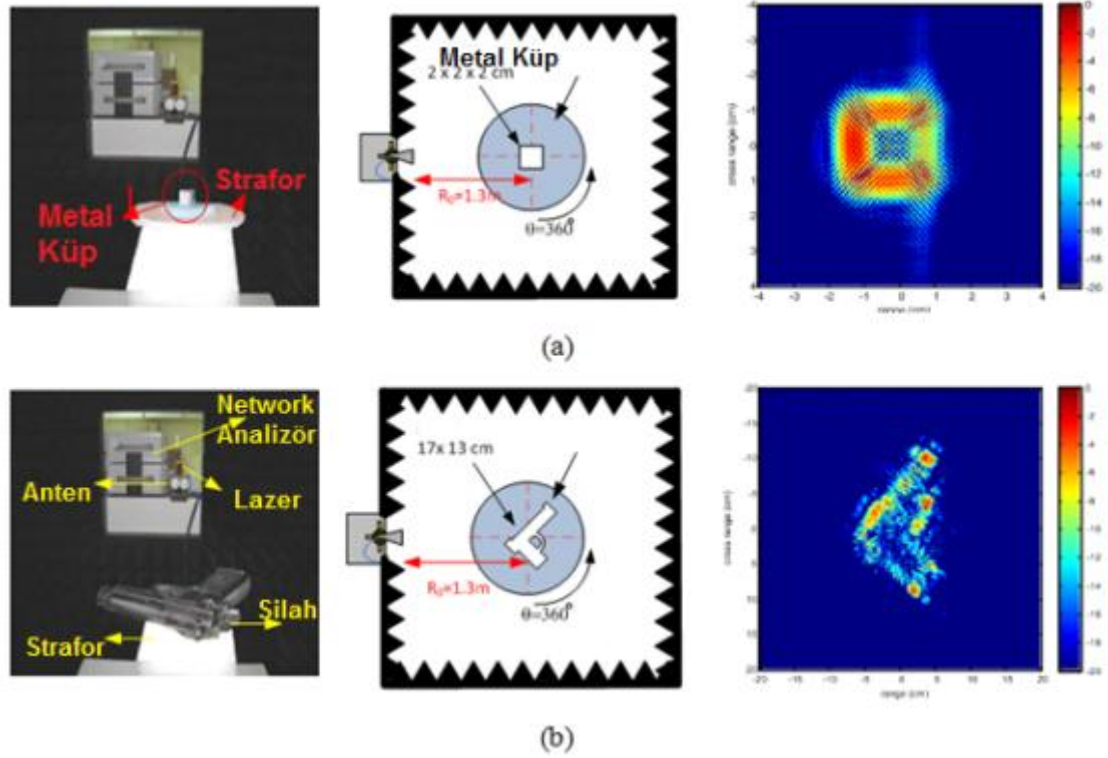
İleri Elektromanyetik Görüntüleme Projesi kapsamında MİLTAL'da gerçekleştirilen SAR çalışmaları Şekil 2.9'da ve ISAR çalışmaları Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Özdemir,2012).

Bu sonuçlar incelendiğinde, pense ve tornavidalara ait yansımalar 2 boyutlu düzlemde doğru konumlarında tespit edilmiş (mesafe bilgisi) ancak hedeflerin gerçek görüntüsü, odaklanmış SAR görüntüsünden anlaşılammıştır. Örneğin soldaki penseden alınan yansımanın oldukça karıştığı görülmektedir. Bir diğer SAR deneyi de, Şekil 2.9 b'de görülmektedir. Bu deneyde, MİLTAL personeli, kazağının altına gizlediği bir silah ile uzanmış ve yatayda SAR taraması gerçekleştirilmiştir. Ancak çok fazla saçıcı nokta olması ve hedefin kompleks yapısından dolayı, odaklanmış görüntü oldukça gürültülü ve karışık bir biçimde elde edilmiştir.



Şekil 2.9 (a) Pense ve tornavidalar ait fotoğraf ve odaklanmış SAR görüntüsü **(b)** Metal silah gizlenmiş insana ait odaklanmış SAR Görüntüsü (Yiğit vd., 2011)

Şekil 2.10'da ise iki adet ISAR deney sonuçları verilmiştir. Şekil 2.10 a'da, 360 derecelik bir açıklıkta taranan bir metal küpün sonuçları sunulmaktadır. Burada küpün şeklinin oluştuğu görülmektedir. Ancak bu şeklin elde edilebilmesi için, küpün tam kesitinden 360 derecelik bir açı aralığında taranması gerekmiştir. Bu ise uygulamada pek pratik değildir. Şekil 10 b'de verilen sonuçlar metal bir silaha ait olup yine 360 derecelik tarama sonrası elde edilmiştir. Ancak burada dikkat çeken silaha ait saçıcı noktalardaki yoğunluk farkıdır. Zira ISAR tekniği, temel olarak hedefin şeklini oluşturmaktan ziyade, hedefe ait saçıcı noktaları gerçek konumlarına aktaran ve böylelikle yüksek çözünürlüklü görüntü sunan bir tekniktir (Yiğit vd., 2011).



Şekil 2.10 (a) 2 cm³ boyutlarında metal küpün fotoğrafı, tarama geometrisi ve odaklanmış ISAR görüntüsü, (b) Metal silahın fotoğrafı, tarama geometrisi ve odaklanmış ISAR görüntüsü (Çetinkaya vd., 2011).

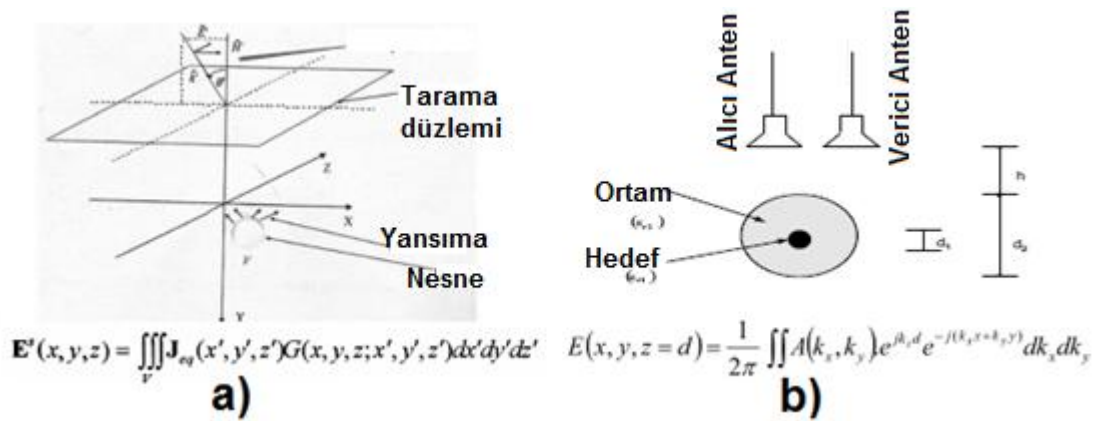
Literatürde 0.6THz ile 0.85 THz arasında aktif FMCW kullanan sistemler mevcuttur. Benzer bir çalışma Şekil 2.11’de verilmiştir. Bu çalışmalarda hedef 25 metreden 1 cm çözünürlük ile saniyede 1 veri olarak belirlenmiş olsa da hızın artmasının gürültüye sebebiyet verdiği ve gerekli çözünürlük için kullanılacak ayna yansıtıcının çapının büyüyeceği belirtilmiştir. Benzer çalışma ayna nedeniyle 0.1 THz için uygun değildir.



Şekil 2.11 0.6THz FMCW görüntüleme sistemi ve sonuçlar.

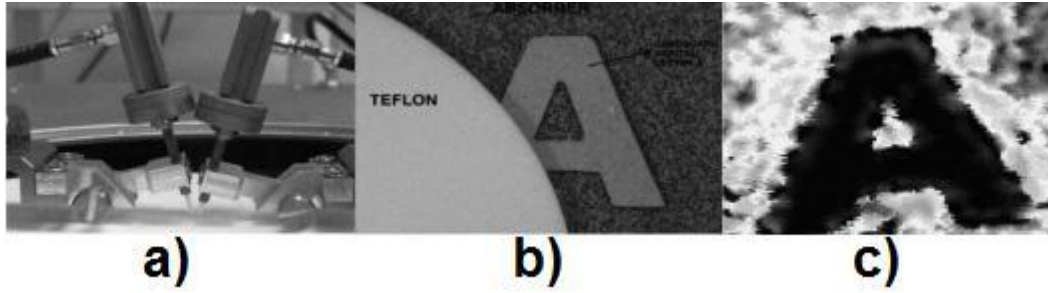
2.4.1.2 THz holografi ve THz tomografi ile görüntüleme

Holografik ve tomografik görüntüleme yöntemleri ortam içerisinde farklı malzemeleri görüntülemek için kullanılır. Yöntemler frekanstan bağımsız şekilde uygulanabilir. Bu yöntemler, THz uzaktan algılama sistemlerinde kullanılmıştır. 2 boyutlu görüntü elde edilebilmesi için alınacak veri sayısı ve elektromanyetik problemin çözülmesi, görüntüleme süresini saatler mertebesine çıkarabilir. Sistem ve çözülecek problem Şekil 2.12 de belirtilmiştir. Ayrıca mesafenin artması görüntü üzerindeki gürültüyü artırır.



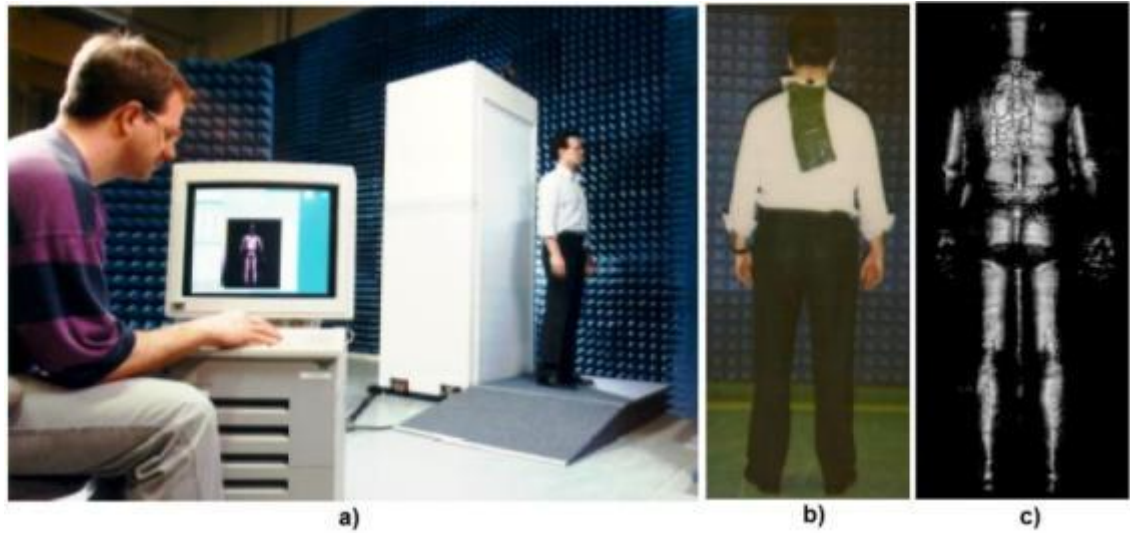
Şekil 2.12 a) Tomografi çözümü b) Holografik çözüm.

İleri Elektromanyetik Görüntüleme Projesi kapsamında MİLTAL'da gerçekleştirilen THz tomografik görüntüleme çalışmalarına ait sonuçlar Şekil 2.13'de verilmiştir. Bu çalışmada teflon yapı arkasındaki kağıt obje tomografik yöntemler ile görüntülenmiştir. Sistem yakın alan bölgesinde 0.1 THz merkez frekansında çalışmaktadır. Bu sistem ile 5.78mm × 3.83 mm alan 100 × 100 örnekleme ile taranmıştır. Tarama ve işleme süresi yaklaşık 1 saat sürmüştür. Uzak alan çalışması (>1m) için anten isteri ve gürültü problemleri nedeniyle görüntüleme gerçekleştirilememiştir (Vertii vd., 2010).



Şekil 2.13 a) THz tomografi ölçüm b)Ölçülen hedef c) Ölçüm sonucu.

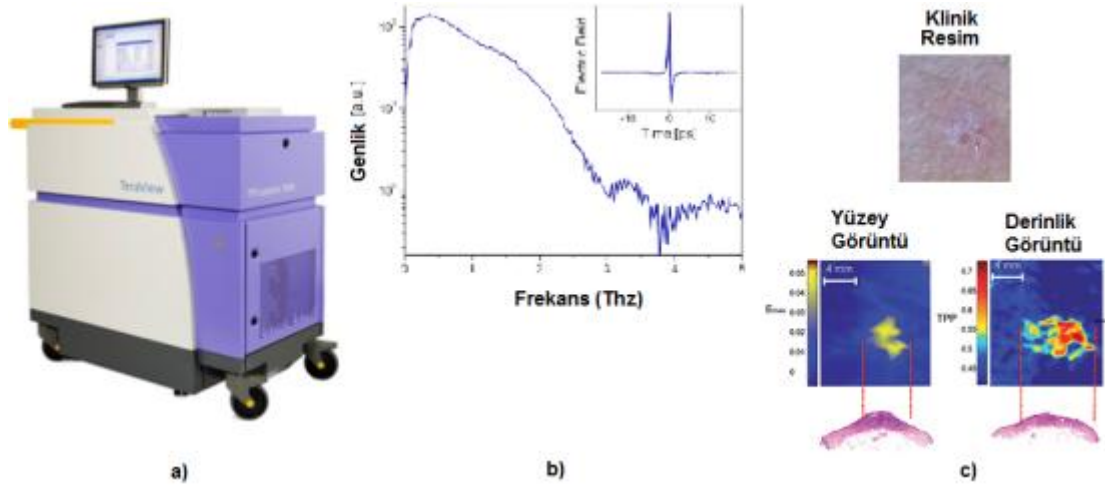
PNNL de gerçekleştirilen holografik bazlı THz (0.1 THz Merkez Frekansında) görüntüleme sistemi $1.4\text{m} \times 1.4\text{m}$ görüntüleme açıklığında 128×128 örnek alınarak 3 m mesafede yapıldı. Holografik görüntüleme teknikleri görüntü kalitesini artırmasına rağmen 7 m.'ye kadar kullanılabilceği belirtilmiştir(McMakin vd.,).



Şekil 2.14 Holografik bazlı THz görüntüleme a)Görüntüleme sistemi b)Hedef c) Sonuç.

2.4.1.3 THz spektroskopik görüntüleme

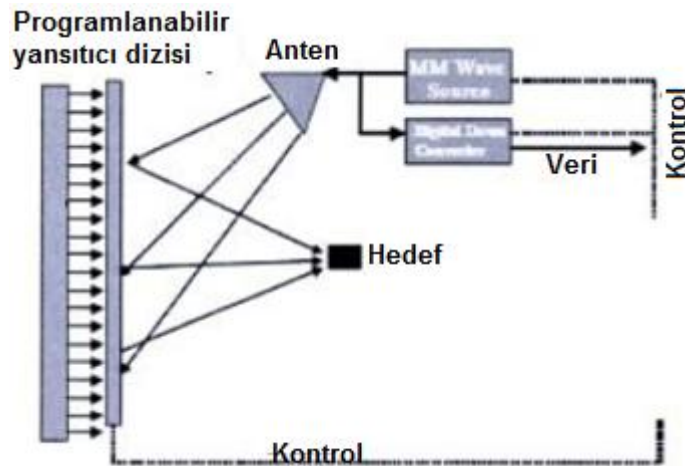
Özellikle THz işaretleri malzemelerin molekül yapısı hakkında bilgi vermesi malzeme görüntüleme alanında kullanılmasının önünü açmıştır. Malzemeye tüm THz bandı işaretleri gönderilir ve malzemedeki yansıyan/geçen işaretlerin zayıflamalarına göre görüntü elde edilir. Geniş bant çalışması ve örnek malzeme üzerinde sonuç vermesi nedeni ile uzaktan görüntüleme için uygun değildir. Özellikle tıp, ilaç, savunma ve tahribatsız muayene konularında ticari ürünler mevcuttur.



Şekil 2.15 TeraView firmasına ait THz spektroskopik görüntüleme a)Cihaz b) Uygulanan THz darbe ve spektrumu c) Elde edilen görüntü.

2.4.2 Uyumsuz (Incoherent) aktif görüntüleme

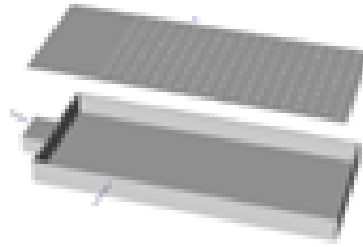
Hedefin alıcıdan bağımsız şekilde bir kaynak ile aydınlatılmasıyla gerçekleştirilen görüntülemedir. Burada önemli olan, hedefe aydınlatma enerjisinin düzgün olarak mümkün olan en geniş katı açıdan gönderilmesidir. Böylece hangi yüzeyden olursa olsun düzgün yansıma alınabilsin. Kaynaktan gönderilen ışıma olabildiğince yönsüz olmalı ve idealde belirli bir polarizasyona sahip olmamalıdır. Eğer kaynak uyumsuz ve fiziksel olarak büyük ise, yüksek sıcaklıklı arka planı kullanan pasif görüntüleme sistemine eşdeğer şekilde çalışabilmektedir. Güç seviyesi ise çözünürlüğü etkilemektedir. Yüksek SNR ile derinlik bilgisi de elde edilebilir.



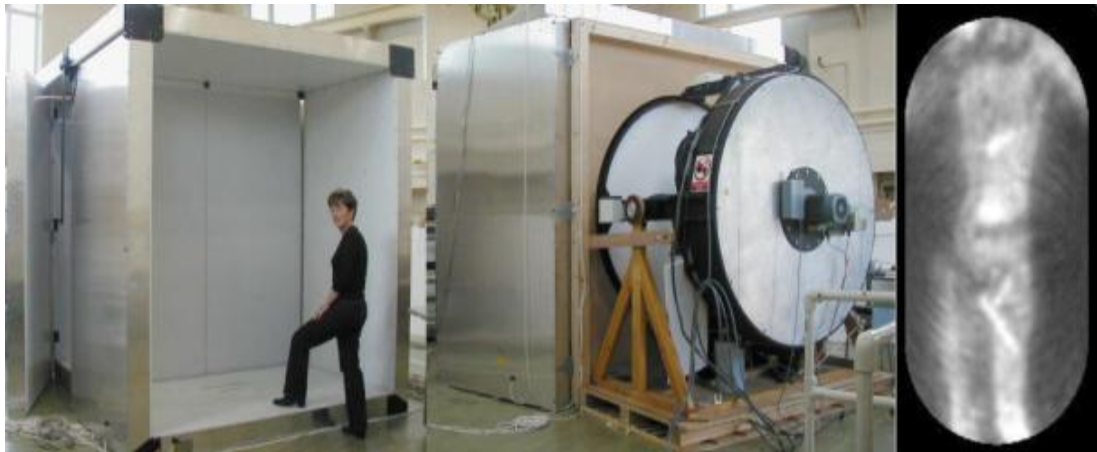
Şekil 2.16 Yansıtıcı dizili görüntüleme sistemi (Agilent).

Şekil 2.16'de Agilent tarafından gerçekleştirilen Aktif yansıtıcı görüntüleme sistem şeması görülmektedir. Hedefin her bir noktası programlanabilen yansıtıcı dizi ile aydınlatılır ve alıcı ile görüntü elde edilir. Ölçüm mesafesi 1m den kısadır. Uzak mesafeden ($>1m$) görüntüleme çalışmaları sonucunda aktif sistem, hedef aydınlatmanın polarize olmasından dolayı elde edilememektedir.

Uyumsuz aktif görüntüleme sisteminin başarısı hedefin düzgün şekilde aydınlatılması ile mümkün olabilmektedir. Literatürde bu işlem eşit yayıcı (diffuser) element kullanılarak gerçekleştirilir. Bu sadece belirli boyut ve mesafedeki hedefler için gerçekleştirilebilir. Şekil 2.17'de örnek aktif hedef aydınlatma eşit yayıcısı gösterilmiştir (Qui vd., 2010; Coward ve Appleby, 2003).



Şekil 2.17 Örnek hedef aydınlatma yöntemi için kullanılan yayıcı.



Şekil 2.18 Aktif aydınlatma kullanılan görüntüleme sistemi ve görüntü (Coward ve Appleby, 2003).

2.4.3 Aktif görüntüleme ticari ürünler

Aktif görüntüleme sistemleri yakın mesafe görüntüleme sistemleri olarak ticari pazarda yer almaktadırlar. Şekil 2.19’de L3 firmasının SafeView ürünü, kullanımını ve ekran çıktısı yer almaktadır. 1m’den daha uzaktan görüntüleme gerçekleştiren aktif görüntüleme sistemi bulunmamaktadır.



Şekil 2.19 L3 SafeView, kullanım şekli ve ekran görüntüsü.

2.5 Pasif Terahertz Görüntüleme

Maddelerin ısıdan dolayı yapısında var olan ışımanın alınması ile gerçekleştirilen görüntüleme şeklidir. “Mutlak sıfırdan farklı bir ısıya sahip olan her malzeme elektromanyetik ışımaya maruz kalır ve elektromanyetik ışımaya maruz kalan her malzeme ısınır.” fiziksel temeline dayanan görüntülemedir. Var olan ışımaya dayandığından herhangi bir suni kaynak kullanılmaz ve verici devresi bulunmaz. Sadece alıcıdan meydana gelir. Bu nedenle pasif görüntüleme olarak adlandırılır.

2.5.1 Radyometrik görüntüleme ve fiziksel arka plan

Yeryüzünde bulunan tüm nesnelere tarafından 0 Kelvin derece üzerindeki sıcaklıklarda radyasyon yayılmaktadır. Yayılan radyasyon, belirli bir ısıya sahip moleküllerin titreşimi sonucu ortaya çıkmaktadır ve elektromanyetik spektrumda geniş bir aralığı kapsamaktadır. Elektromanyetik dalgaların tüm dalga boylarını soğuran ve ısıtıldığında tüm dalga boylarında enerji yayan cisme kara cisim; ışımaya da kara cisim ışımaya denir. Kara cisimin birim alanından birim zamanda yayılan ışımaya miktarı,

sıcaklığın 4'üncü kuvveti ile doğru orantılıdır. (Stefan-Boltzman Yasası - Kara cisimden yayılan elektromanyetik enerji miktarı(Stefan,1879; Boltzman,1884) .

$$J^* = \sigma T^4 \quad (\text{E. 2.4})$$

J^* :Yayılan Işıma Miktarı (W/m^2)

T :Termodinamik Sıcaklık (K)

σ :Stefan – Boltzman Sabiti ($5,6704 \times 10^{-8} \text{Js}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$)

Işıma yapan cismin yüzey alanı A ve cismin ışıma katsayısı ε (Kara Cisim $\varepsilon=1$) ise ışıma miktarı;

$$J = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (\text{E. 2.5})$$

olur.

Işımanın frekansa göre dağılımı (tayfi, spektrumu) sıcaklığa bağlıdır. Alman fizikçi Wilhelm Wien tarafından ışımanın tepe yaptığı dalga boyu (E. 2.6) eşitliği ile bulunur. (Wien Yer değiştirme Kanunu)

$$\lambda_{tepe} = b/T \quad (\text{E. 2.6})$$

λ_{tepe} :Işımanın maksimum olduğu tepe dalgaboyu (m)

T :Termodinamik Sıcaklık (K)

b :Wien Yerdeğiştirme Sabiti ($2,8977684 \times 10^{-3} \text{mK}$)

Wien yer değiştirme yasasına göre, siyah cisim ışıması kısa dalgaboyları için deneysel verilerle uyumlu olmasına rağmen dalga boyu büyüdükçe bu uyum ortadan kalkar. Bununla birlikte Rayleigh ve Jeans, Maxwell teorisinden hareketle, kendi adlarıyla anılan Rayleigh-Jeans ışıma yasasını bulmuşlardır. Bu yasa ile cisimden yayılan ışımanın dalga boyuna göre değişimi (spektrumu) bulunur. Bu formül kısa dalga

boylarına gidildikçe yetersiz kalmaktadır. Özellikle dönemin fizikçileri tarafından ultraviyole dalga boyları için sonuç çok büyüğünden bu duruma ultraviyole felaketi denilmiştir.

$$B_{\lambda} = \frac{2ckT}{\lambda^4} \quad (\text{E. 2.7})$$

B_{λ} :Dalga boyuna bağlı Işıma Spektrumu (W/m^3)

T :Termodinamik Sıcaklık (K)

c :Işık Hızı ($\sim 3 \times 10^8$ m/s)

k :Boltzman Sabiti ($1.3806488 \times 10^{-23}$ J/K)

Alman fizikçisi Max Planck, elektromanyetik ışımanın tanımından hareketle siyah cisim ışımasının dağılım enerjisini çıkardı. Enerji miktarı;

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{E. 2.8})$$

Enerji dağılım spektrumu;

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{\exp \left[\frac{hc}{\lambda kT} \right] - 1} \right) \quad (\text{E. 2.9})$$

E_{λ} :Dalga boyuna bağlı Işıma Enerji Spektrumu

E : Enerji Miktarı (J)

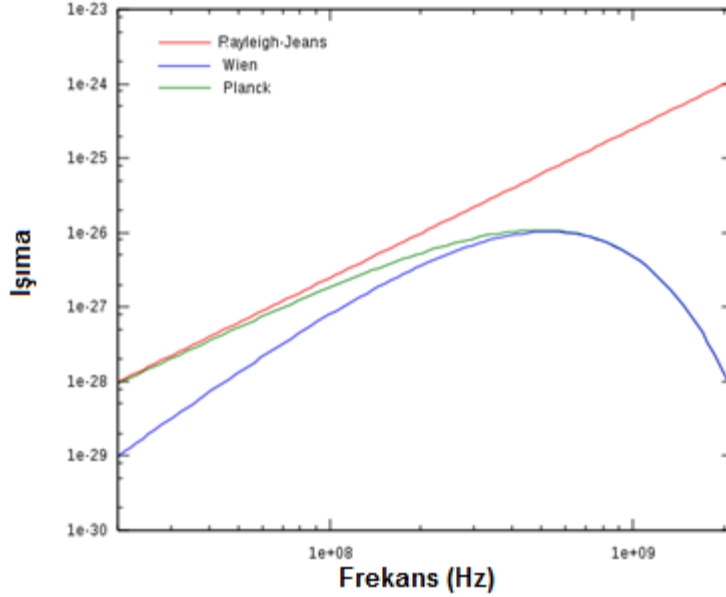
T :Termodinamik Sıcaklık (K)

c :Işık Hızı ($\sim 3 \times 10^8$ m/s)

h :Planck Sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ Js)

k :Boltzman Sabiti ($1.3806488 \times 10^{-23}$ J/K)

olarak tanımlanmaktadır. Planck, bu yasası ile, daha önce yapılan Rayleigh-Jeans ve Wien Yerdeğiştirme yasalarının eksiklerini tamamlamış ve enerji dağılımını tüm frekans spektrumu için geçerli kılacak bağıntıyı bulmuştur. Aşağıda 8mK sıcaklığındaki cisim için her 3 yasanın karşılaştırılması bulunmaktadır.



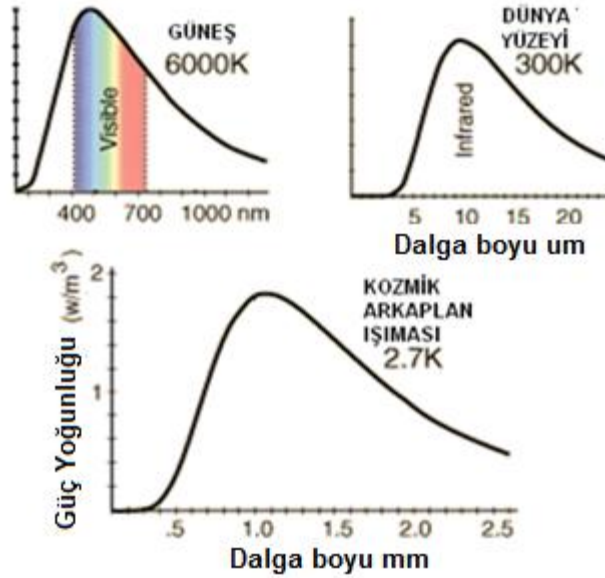
Şekil 2.20 8mK sıcaklığı için siyah cisim ışıma karşılaştırılması.

Genel olarak, cismin sıcaklığı arttıkça, yayacağı radyasyon miktarı ve radyasyonun en yüksek değerinin görüleceği zirve noktasının frekansı da artmaktadır. Bazı doğal ışımaya kaynakları ve sıcaklık değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 2.1 Bazı ışımaya kaynaklarının sıcaklık değerleri.

Işıma Kaynağı	Sıcaklık Değeri
Güneş	6000K
İnsan Vücudu	310K
Dünya Yüzeyi	300K
Kozmik Arka Plan Işıması	2,7K

Yukarıdaki doğal sıcaklık kaynaklarından kaynaklanan ışımaya dağılımları aşağıdaki Şekil 2.21’de görülmektedir. Oda sıcaklığında (300°K) bulunan bir nesnenin yaydığı radyasyon ise çoğunlukla kızılötesinde yer almaktadır.



Şekil 2.21 Doğal ısı kaynaklarının siyah cisim ışımaya spektrumları.

Şekil 2.21’de görüldüğü üzere bir nesnenin kozmik arka plan sıcaklığının etkisiyle yaydığı ışımaya 0,1 – 1 THz arasındadır. Diğer kaynakların etkisiyle yaydığı ışımaya ise kızılötesi bölgesinde yer almaktadır.

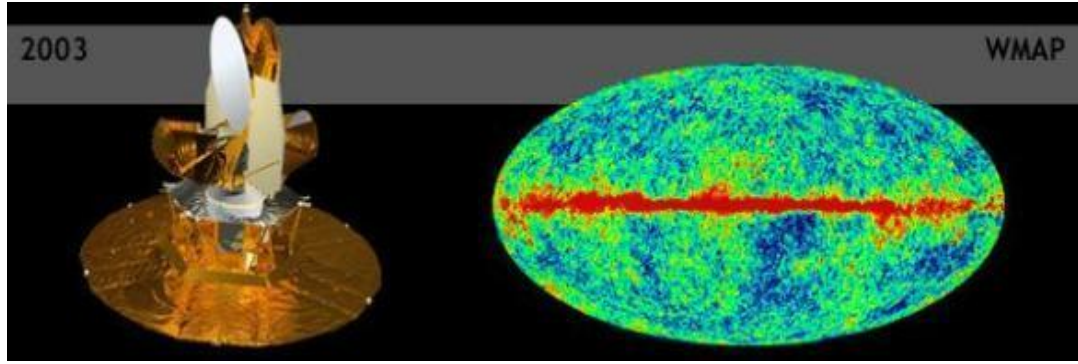
Kozmik arka plan ışımalarının varlığı, 1948 yılında George Gamow, Ralph Alpher ve Robert Herman tarafından teorik olarak öne sürülmüştü ve 5 K sıcaklığında bir siyah cismin yaydığı ışımaya ile aynı dalga boyunda olması gerektiği hesap edildi[8]. Teorik hesaplamalar ilerleyen yıllarda da devam etti. 1964 yılında Bell laboratuvarlarında çalışan bilim adamlarından Arno Penzias and Robert Wilson ilk defa kozmik arka plan ışımalarını deneysel olarak 3K olarak ölçtüler ve bu çalışmalarından dolayı 1978 Nobel Fizik ödülüne layık görüldüler [9]. 1980’ler de Sovyetler Birliği Prognoz 9 uydusu ile fırlatılan RELIKT-1 (Strukov, 1984) ile NASA ise COBE (Kozmik arka plan kaşifi) ile kozmik arka plan ışımaları ölçümlerini uzayda gerçekleştirdiler. Bu ölçümler sonucunda kozmik arka plan ışımaları 2,725K olarak hassas bir şekilde ölçülmüştür (Bennett, 1996). COBE geliştirme ekibi bu çalışmalardan dolayı 2006 yılı Nobel Fizik ödülüne layık görüldü. Şekil 5’de COBE’nin ölçüm sonucu yer almaktadır.



Şekil 2.22 Kozmik arkaplan ışınması COBE ölçüm sonucu.

Kozmik Arkaplan Işınması bütün evrende var olan bir ışımadır. 2,725 Kelvin sıcaklığındaki siyah nesnenin termal ışınımına tekabül eden 160.2 GHz frekansında ve 1.9 mm dalga boyunda olduğu COBE uydusu tarafından havaküre dışında hassas olarak ölçülmüştür.

Pasif THz görüntüleme; kozmik arkaplan nedeniyle nesnelere yansıyan ışınımın alınması ile gerçekleştirilir. THz görüntülemenin en eski yöntemi pasif alt-milimetre algılamasıdır ve bu yöntem uzay görüntüleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ara katlı algılayıcı (heterodyne detector) kullanılarak, belli uzaklıklarda bulunan galaksilerin yaydığı THz radyasyon miktarı ölçülmektedir. Sistem genellikle bir uydunun üzerine yerleştirilmektedir. Saptayıcının frekans ayarlamaları yapılarak spektrum verileri elde edilmektedir. Elde edilen spektrum belli moleküllerin galakside bulunduğunu saptayabilme amacıyla çok önemli veriler barındırmaktadır. Örneğin su moleküllerinin önemli özelliklerinden biri 0.557, 0.752, 1.097, 1.113, 1.163 ve 1.207 THz'lerde güçlü soğurum rezonansına sahip olmalarıdır. Bu frekanslarda elde edilen THz gücünün genliği ile arka plandaki radyasyonun genliğinin karşılaştırılması yapılarak, astronomlar suyun uzaktaki galaksilerde var olma olasılığını tespit edebilmektedir. Bu yöntem ana olarak dünya dışındaki yaşamların araştırılmasında kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasıyla tespiti mümkün olan diğer moleküller oksijen, karbon monoksit ve nitrojendir(Pickett, 2000)



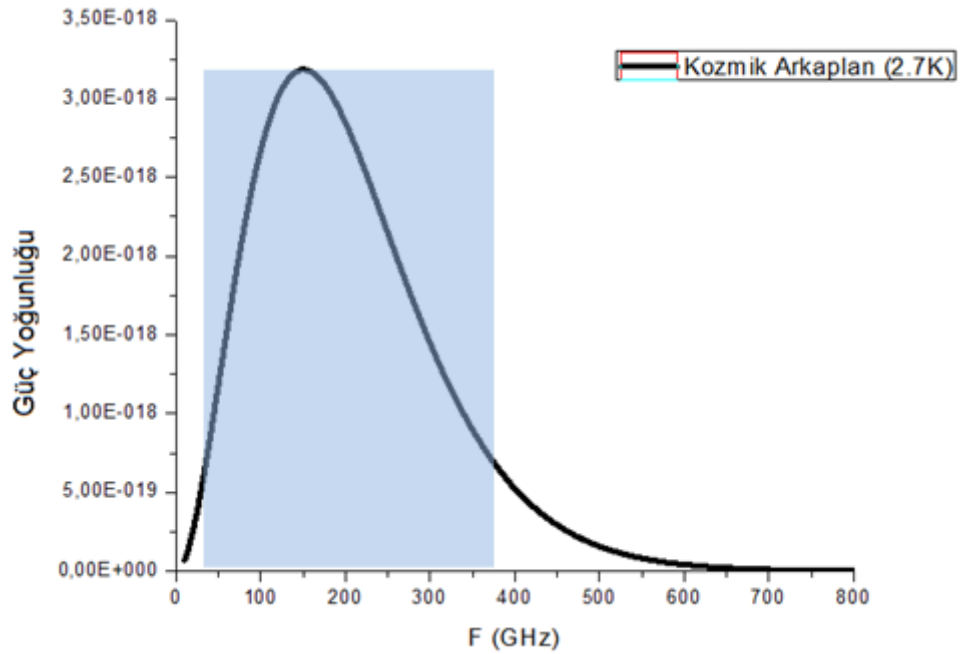
Şekil 2.23 Kozmik arka plan ışıması (WMAP uydusu, 2003).

Benzer olarak, pasif THz görüntüleme ilkeleri yeryüzündeki uygulamalarda kullanılmaktadır. Kozmik arkaplan ışıması nedeniyle yeryüzündeki her nesne elektromanyetik ışıma yapar. Bu ışıma kullanılarak pasif bir şekilde nesnelere görüntülenebilir. Günümüzde kullanılan birçok malzemenin THz frekanslardaki soğurma katsayısı çok düşüktür. Bu maddeler THz görüntüleme sistemlerine saydamdırlar. Plastik, kumaş, kağıt, karton ve inşaat malzemeleri THz frekanslarda saydam olmak ile beraber optik spektrumda tamamen opaklırlar. Bu sayede kişi üzeri kıyafet altına saklanmış metal veya tehlikeli nesnelere uzaktan görüntülenmesi mümkündür. Çoğunlukla çeşitli giysi ve malzemeler THz radyasyonu çok az soğurmaktadır ve Kozmik arkaplan nedeniyle tüm nesnelere elektromanyetik dalga yayılmaktadır. Yayılan elektromanyetik dalgalar hassas alıcılar ile alınarak görüntüleme gerçekleştirilir.

Doğal malzemedeki yayılan ışımaya benzer yüzeye sahip kara cisimden yayılan ışımaya oranına yayım etkisi (Emissivity ϵ) denir. Bu tür malzemelere “gri” malzemeler denir.

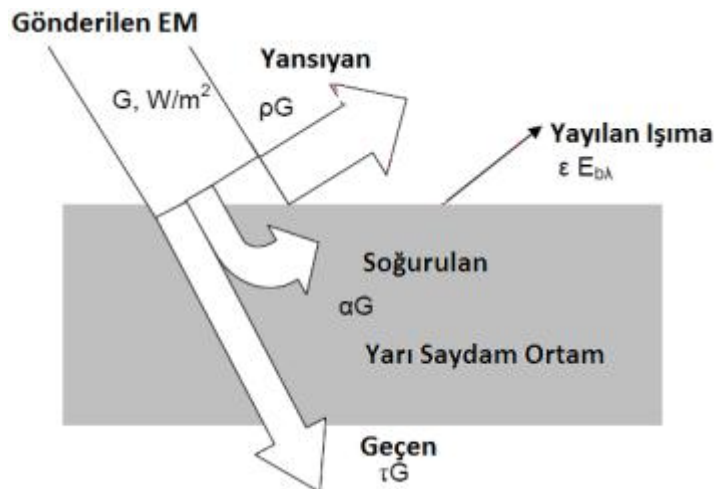
$$\epsilon_{\text{karacisim}} = \epsilon \quad ; \quad 0 \leq \epsilon \leq 1 \quad (\text{E. 2.10})$$

Aynı zamanda gri cisim parlaklık sıcaklığı (brightness Temperature) $T = \epsilon T_{\text{karacisim}}$ ile ifade edilir. Bu durumda mutlak sıfırdan farklı ısı olan her malzeme emisivite değeri ile orantılı olarak ışıma yapar. Ayrıca maruz kaldığı ışıma etkisiyle yine emisivite oranında sıcaklığı oluşur.



Şekil 2.24 Frekansa göre kozmik arka plan ışıması.

Bu durumda elektromanyetik ışıma maruz kalan bir malzemeden, malzeme özelliğine göre ışıma; yansır, geçer ve/veya soğurur. Soğurulan ışıma nedeniyle malzeme ısınır ve bu ısı nedeniyle de malzemeden ışıma meydana gelir.



Şekil 2.25 Kirchoff yasası.

- Yayım Etkisi (Emissivity ϵ)
- Soğuruculuk (α)
- Yansıtıcılık (ρ)
- Geçirgenlik (τ)

Gönderilen EM gücü G ise;

$$G = \alpha G + \rho G + \tau G \text{ ve } 1 = \alpha + \rho + \tau \quad (\text{E. 2.11})$$

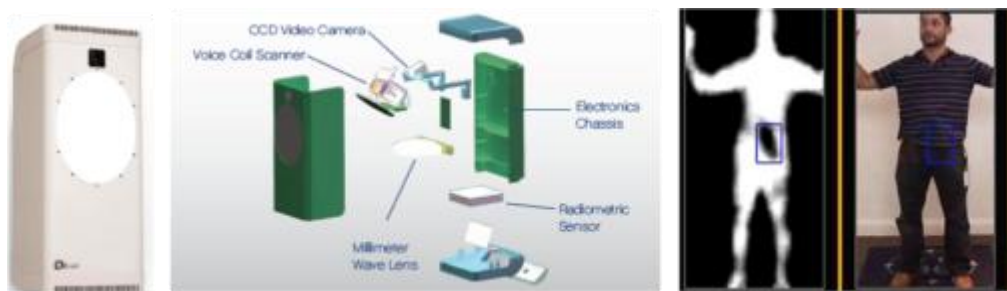
Küçük cisim ve yüzeyler için $\alpha = \epsilon$ denkliği kullanılabilir (*Kirchhoff Yasası*) (Şekil 2.25). Geçirgen olmayan yüzeyler ($\tau=0$) için $\epsilon=1-\rho$ yazılabilir. Bu durumda aktif sistemlerde cisimden yansıyan dalgalar ve pasif sistemde kozmik arkaplan ışımasından kaynaklanan yansıma (İletken malzemelerden) ve/veya ışıma (Termal etki ile yalıtkan malzemelerden) ile cisimden yayılan dalgaların ölçülmesi ile görüntüleme gerçekleştirilir.

2.5.2 Pasif görüntüleme ticari ürünler

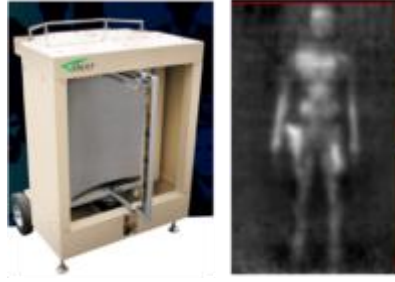
Pasif görüntüleme ürünleri uzaktan görüntüleme alanında ticari pazarda yaygın olarak bulunur. Özellikle önemli kapı karşılama ve havaalanı girişlerinde kullanımı yaygındır. Aşağıdaki şekillerde ve Çizelge 2.2’de bazı ticari görüntüleme cihazları özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.26 ThruVision T4000 ve ekran görüntüleri.



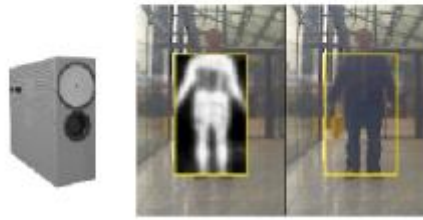
Şekil 2.27 Brijot BIS-WDS, iç yapısı ve ekran görüntüleri.



Şekil 2.28 Sago Trex ST150 ve ekran görüntüleri.



a)



b)

Şekil 2.29 a) ThruVision TS4C b) ThruVision TS4.

Çizelge 2.2 Bazı ticari THz görüntüleme cihazları ve temel özellikleri.

Adı	L3 SafeView Provision 100	Agilent	Qinetiq	Qinetiq SPO20	Smiths Tadar	Sago Trex ST150	Sago Trex Real Time Imager	Brijot BIS-WDS	ThruVision T4000
Uygulama	Kapı	Kapı	Kapı	8 – 30mt	Kapı	5mt	~5mt	3-10mt	~5mt
Yöntem	Aktif	Aktif	Pasif	Pasif	Pasif	Pasif	Pasif	Pasif	Pasif
Frekans (GHz)	24-30	24	35	94	94	75.5 – 93.5	75.5 – 93.5	90	250
Band Genişliği (GHz)					10			20	
Görüntüleme Sistemi	Kaynak ve alıcı hedefin etrafında dönerek	Aktif anten dizisi		Konikal tarama ve dönел ayna	Mekanik hareketli ve dönел ayna	Frekans taramalı anten ve yansıtıcı	Faz dizili frekans taramalı anten		
Alıcı Sensör Adeti		1	64	64	24	1	232	16	
Alıcı Teknolojisi				InP MMIC	InP	InP HEMT MMIC			GaAs Schotky mixer
Alıcı Çözünürlüğü				5K	1K	1-3K	6K	1K	1-1,5K
Spatial Çözünürlük	0,5cm yanal 1,5cm derinlik	0,5cm	0,75cm ve 2cm	0,3 derece	10mm	6mrad	6mrad 128*192	5cm	3cm
Tekrarlama	6 görüntü 3 saniyede	15Hz		15Hz	10Hz	0,5Hz	30Hz	4-10Hz	1-3Hz
Açıklık		90cm		80cm	60cm			18cm	12cm
Boyutlar (cm)	150x150x270	90x10x90			250x160x220			71x33x48	

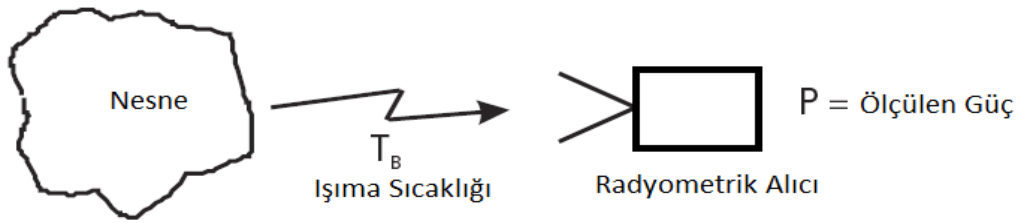
2.6 Terahertz Görüntüleme Sistem Karşılaştırması

Aktif görüntüleme sistemleri 1m'den kısa mesafelerde uygundur. Çözünürlük ve görüntü kalitesi yüksektir. Kısmen alıcı hassasiyeti ve gürültüsünden bağımsızdır. SNR değeri ve çözünürlük mesafe ile kötüleştiğinden ayrıca hedeften yansımalarda oluşacak kırımın etkilerinden dolayı 1m'den uzak mesafeler görüntüleme için uygun değildir. Ayrıca hedef tarama temelli çalıştığından dolayı, alıcı hareketi yada dizi mesafesi kırımın limitinden küçük olamaz. Bu nedenlerden dolayı kompakt aktif görüntüleyici çalışmaları 0.5 THz - 1 THz arası yapılmaktadır. Pasif sisteme göre maliyeti fazladır(Appleby, 2008).

Pasif görüntüleme sistemleri 1m'den uzun mesafelerde uygundur. Çizelge 2.2'den görüldüğü üzere mevcut ticari ürünlerde güvenli uzaklıktan görüntüleme cihazlarının tamamı pasif yapıdadır. Alıcı çözünürlüğü, alıcı sıcaklığına ve bant genişliğine bağlıdır. Genellikle çalışma frekans aralığı 30GHz – 400GHz arasındadır. Dış ortam çalışması iç ortam çalışmasına göre daha başarılıdır. Görüntüleme sistemi hedef tarama veya sanal görüntü tarama şeklinde olabilir.

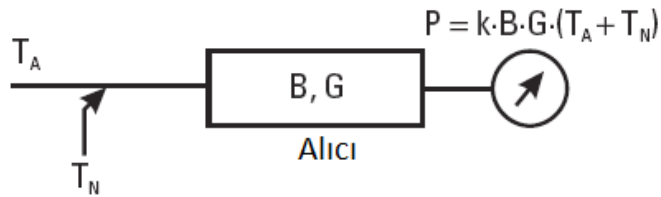
2.7 Terahertz Görüntüleme Sisteminde Alıcılar

Termal elektromanyetik yayılımı alacak şekilde düşük gürültülü alıcı yapıları kullanılır. Bu alıcılar aktif sistemlerde de kullanılabilirler. Görüntüleme sisteminde kullanılacak alıcılar toplam güç ölçen alıcı yapılarıdır. Şekil 2.30'de pasif sistemler için ideal ölçüm alıcısı görülmektedir.



Şekil 2.30 İdeal alıcı(Skou, 2006).

Gerçek durumda ise alıcı elektronik devrelerden oluştuğundan kendi gürültüsü de mevcuttur. Bu durumda alıcı Şekil 2.31'deki gibi modellenilebilir ve bu modele uyan hassas alıcı tipleri Çizelge 2.3'te yer almaktadır.



Şekil 2.31 Gerçek alıcı(Skou, 2006).

k: Boltzmann Sabiti ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

B: Alıcı Bant Genişliği (Hz)

G: Alıcı Kazancı

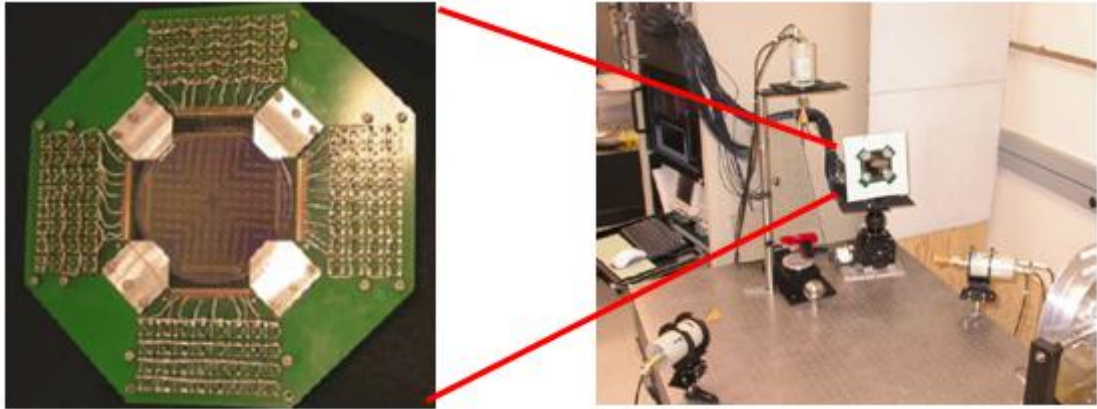
T_A : Alıcı Giriş Sıcaklığı (Anten) (K)

T_N : Alıcı Sıcaklığı (K)

P: Alıcı Çıkış gücü (Watt)

2.7.1 Mikrobolometre tipi alıcı

Mikrodalga ve kızılötesi bölgesi ışınımını, ısıya bağımlı hassas direnç değişiminden faydalanarak ölçmekte kullanan alıcı dizileridir. Özellikle kızılötesi bölgesi sensör yapıları geliştirilmiştir. Günümüzde MEMS teknolojisinin gelişmesi ile birlikte mm dalga ve terahertz bölgelerinde çalışan öncül alıcı sistemleri de mevcuttur (Şekil 2.32).



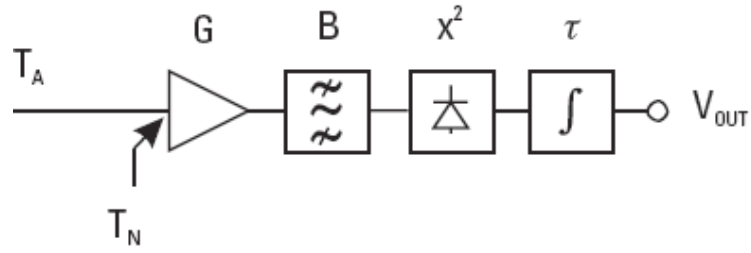
Şekil 2.32 Mikrobolometre tip alıcı.

2.7.2 Ön yükselteçsiz direkt algılama

Antenden algılanan işaretin direkt olarak gücünün doğrultucu ya da bolometre ile ölçüldüğü sistemlerdir. Pasif sistemlerde giriş işaretleri çok düşük olduğundan pasif görüntüleme için uygun değildir.

2.7.3 Ön yükselteçli direkt algılama

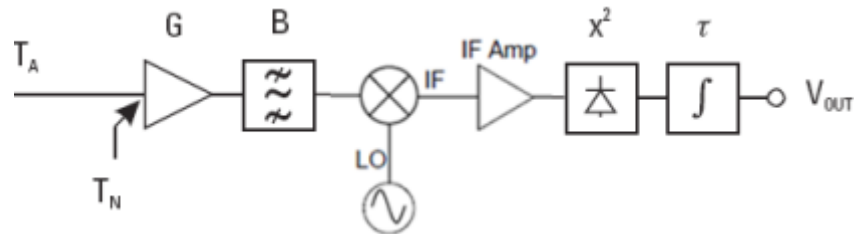
Direkt algılamadan farkı anten ile detektör arasında yükselteç bulunmasıdır. Böylece daha düşük işaretler ölçülebilir. (Şekil 2.33)



Şekil 2.33 Direkt alıcı (Skou, 2006).

2.7.4 Ara katlı alıcı ile algılama

Alıcıda işaret frekansının karıştırıcı yardımıyla daha düşük bir frekansa düşürüldüğü ve ölçme işleminin bu frekans ile gerçekleştirildiği sistemlerdir. Özellikle haberleşme sistemlerinde kullanımı yaygındır. Harici bir üreteç gerektirdiğinden maliyeti yüksektir. Ayrıca girişte anten ile karıştırıcı arasında yükselteç kullanılabilir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34 Ara katlı alıcı (Skou, 2006).

2.7.5 Diğer Sistemler

Yukarıda açıklanan alıcı tiplerinin dışında uzaydan ve havadan görüntüleme için, gürültü sistemlerinin kalibrasyonu için, ozon ve atmosfer sistemlerinin kontrolü ve radyo teleskoplar için kullanılan Dicke Radyometresi, Gürültü eklenmiş Radyometre, palorimetrik Radyometre gibi özel alıcı yapıları da mevcuttur. Bu yapılar güvenli mesafeden görüntüleme için kullanılmadığından açıklanmamıştır.

Çizelge 2.3 Alıcı yapıları ve genel özellikleri.

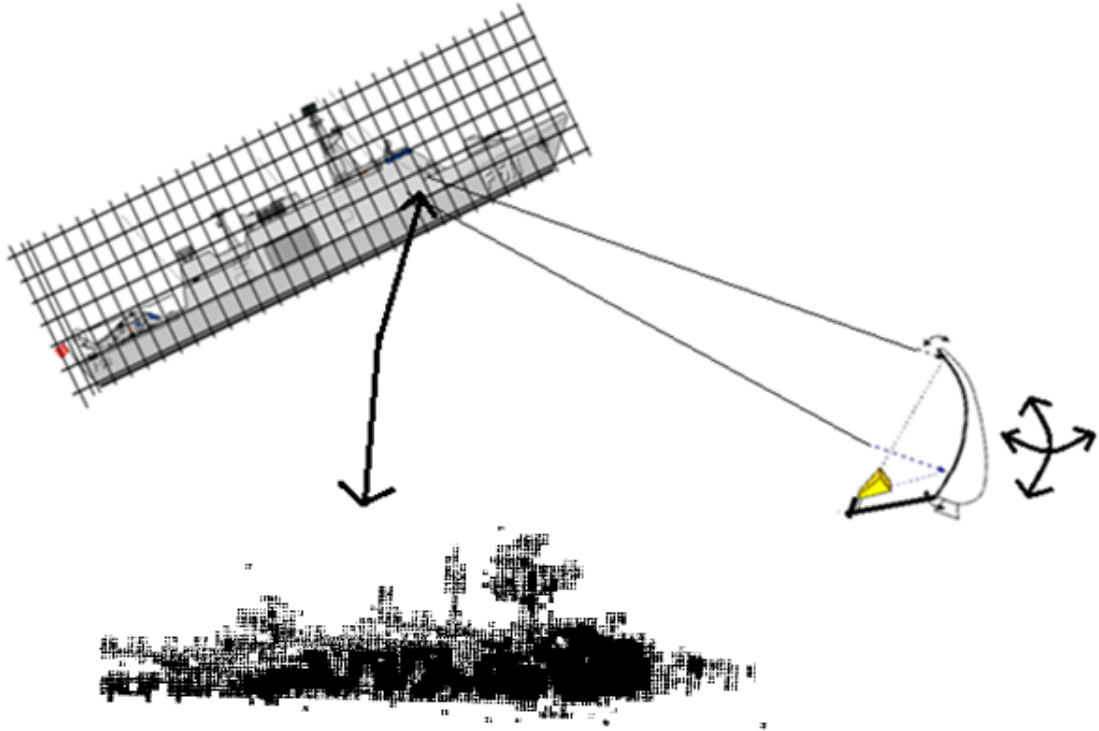
Teknoloji	Hassasiyet	Maliyet	Devre Yapıları	Azami Frekans
Ara katlı Algılayıcı (Heterodin)	İyi	Yüksek		1 THz
Direkt Algılama (Ön Yükselteçli)	İyi	Fazla		200 GHz
Direkt Algılama (Ön Yükselteçsiz)	Kabul edilebilir	Düşük		600 GHz
Mikro bolometre	Zayıf (Aktif)	Çok Düşük		1 THz

2.8 Terahertz Görüntüleme Sisteminde Tarayıcılar

Terahertz görüntüleme sistemleri iki boyutlu veya üç boyutlu görüntüleme sistemleridir. Bu ve benzeri çok boyutlu görüntüleme sistemlerinde, optik sistemlerde olduğu gibi, hedefin tüm görüntüsünü kaplayarak, direkt görüntüleme yapacak şekilde çoklu alıcı sistemlerinin bulunması yapı itibari ile zordur. Kullanılan dalga boyu ve elektromanyetik problemler nedeniyle optik sensörler gibi küçük sensör yapıları bolometreler dışında gelişmemiştir. Bu nedenle görüntülemelerde yarı optik ve/veya elektro-optik tarama sistemleri kullanılmaktadır. Tarama yüzeylerine göre isimlendirilirler.

2.8.1 Hedef yüzeyi tarayan görüntüleme sistemleri (Direkt görüntüleme)

Görüntüleme sisteminde bulunan alıcı antenin hüzme hareketi ile hedef görüntüsünün elde edildiği sistemlerdir. Yüksek çözünürlük için dar hüzmeli antenler tercih edilir. Hüzme hareketi ise mekanik ya da elektronik olarak sağlanır. Bu yöntem ile hedeften ışıyan işaretlerin güç yoğunluğu alınarak konumsal koordinatlarda gösterilerek görüntü elde edilir. Anten hüzmesi ile hedef taraması gerçekleştirildiğinden, mesafeye göre hüzme genişliği izi değişmeyen açıklık (Lens, Parabolik Reflektör, Çift Reflektörlü) antenleri kullanılır.



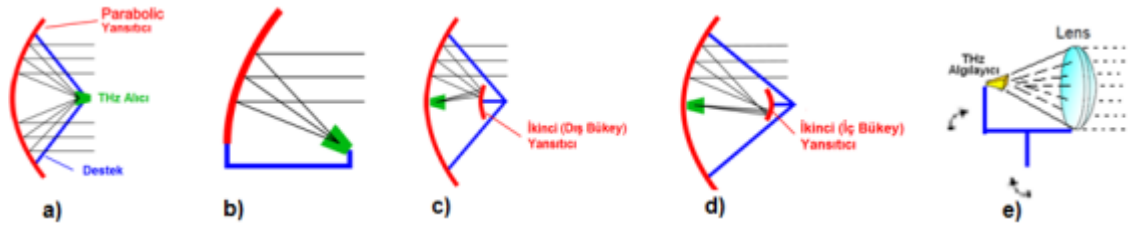
Şekil 2.35 Doğrudan görüntüleme (Hedef tarama).

Açıklık anten tarafından alınan güç açıklık antenin etkin alanı ile doğru orantılıdır.

$$\text{Alınan Güç } (W) = \text{Hedef Güç Yoğunluğu} \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot \text{Alıcı Anten Etkin Alanı } (m^2) \quad (\text{E.2.12})$$

Bu durumda alıcı anten açıklığı ne kadar büyük olursa alınan toplam güç o kadar fazla olur. Bununla birlikte hedef, anten açıklığı ile tarandığından çözünürlük düşer. İstenen görüntü çözünürlüğü için alıcı hassasiyetine bağlı olarak açıklık büyüklüğü ve tarama çözünürlüğü seçilir.

Alıcı, açıklık antenin besleme (odak) merkezinde yer alır. Böylece açıklıkta toplanan güç alıcı tarafından alınır.



Şekil 2.36 Kullanılabilir bazı açıklık anten yapıları **a)**Parabolik anten **b)** Off-Set parabolik anten **c)**Cassegrain anten **d)**Gregorian anten **e)**Lens anten.

D , anten açıklığı; R , antenden hedef mesafesi ve θ_{3dB} anten 3 dB huzme genişliği olmak üzere hedef üzeri anten iz alanı (E. 2.13)' de verilmiştir.

$$\text{Hedef Üzeri Anten İz Alanı (m}^2\text{)} = \frac{\pi}{4} \cdot (R\theta_{3dB})^2 \quad (\text{E. 2.13})$$

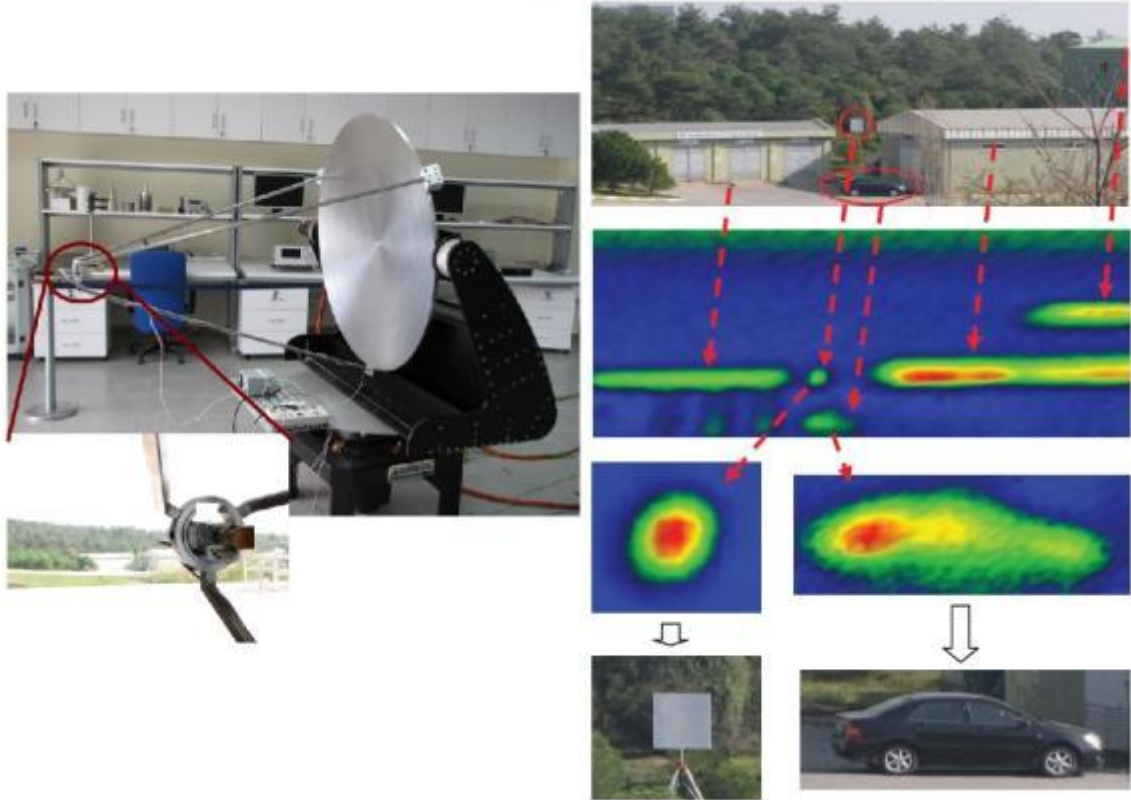
$$\text{Anten 3dB Hüzme Açısı } (\theta_{3dB}) = \frac{1,22\lambda}{D}, \text{ radyan} \quad (\text{E. 2.14})$$

Görüntü matrisi θ ve φ açılarındaki yapılan tarama ile oluşturulur. $\Delta\theta$ ve $\Delta\varphi$ adım açısı ve θ_{max} ve φ_{max} maksimum tarama açıları olmak üzere görüntü matrisi eleman sayısı;

$$\text{Görüntü Matrisi Eleman Sayısı (N)} = \frac{\theta_{max}}{\Delta\theta} * \frac{\varphi_{max}}{\Delta\varphi} \quad (\text{E. 2.15})$$

Çok az miktarda veri toplanması ve basit görüntü işleme işlemleri ile görüntü oluşturulur. Hedef konumsal seçiciliği; alıcı çözünürlüğüne, antenin huzme genişliğine ve açısal harekete bağlıdır. Hüzme genişliğinin istenen çözünürlüğü sağladığı mesafeye kadar kullanılması başlıca dezavantajıdır. Gerekli güç için büyük açıklığa, iki boyutlu

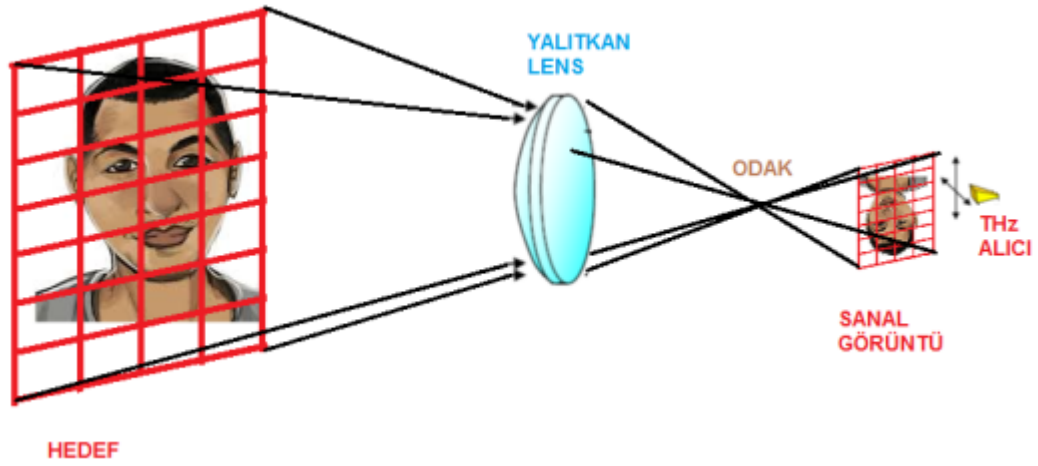
görüntü için iki boyutlu taramaya ihtiyaç olması nedeniyle kompakt yapıda değildirler. Alıcı dizisi kullanılamaz. Özellikle uzak mesafe ($\geq 50m$) görüntüleme için uygundur.



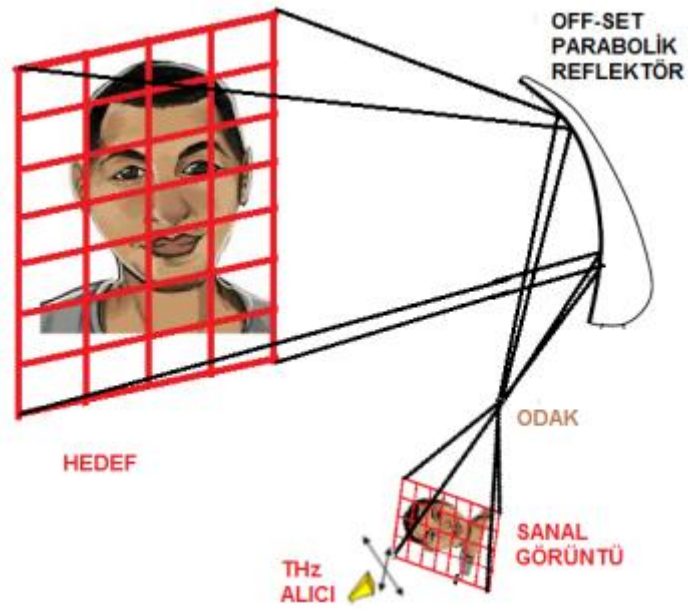
Şekil 2.37 MİLTAL Bünyesinde gerçekleştirilen parabolik yansıtıcı kullanılan doğrudan görüntüleme sistemi ve sonuçları(Vertiy vd., 2011).

2.8.2 Sanal görüntü görüntüleme sistemleri (Sanal görüntüleme)

Sanal görüntüleme sistemi; yarı optik görüntüleme sistemiyle elde edilen sanal hedef görüntüsünü alıcı yardımı ile görüntüleyen sistemdir. Çalışma sistemleri optik sistemler ile aynı olmasına rağmen THz ışınımı kullanan sistemler olduğundan yarı optik sistemler olarak isimlendirilir.

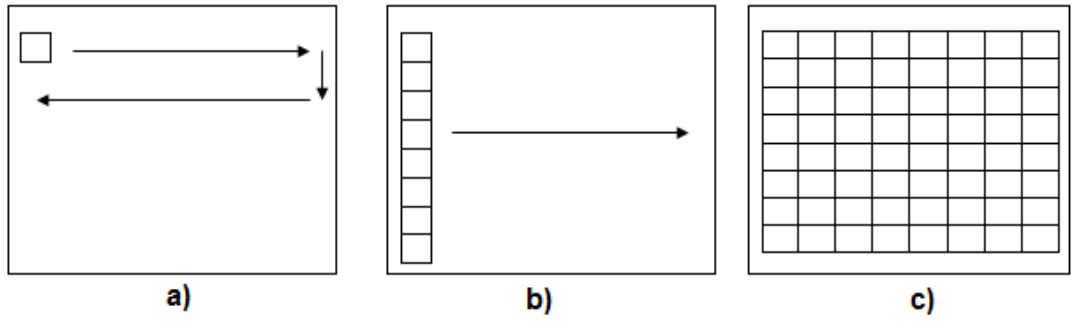


Şekil 2.38 Yalıtkan lens kullanılan yarı optik görüntüleme sistemi.



Şekil 2.39 Yansıtıcı (Reflektor) kullanılan yarı optik görüntüleme sistemi.

Elde edilen sanal görüntü tek alıcı için iki eksen tarama ile, bir boyutlu alıcı dizisi için bir eksen mekanik tarama ile yada tüm görüntüyü kapsayan iki boyutlu alıcı dizisi ile alınabilir. Tarama kartezyen olabileceği gibi açısall, silindirik gibi tüm bölgeyi kapsayan diğer tarama sistemleri gibi de olabilir.

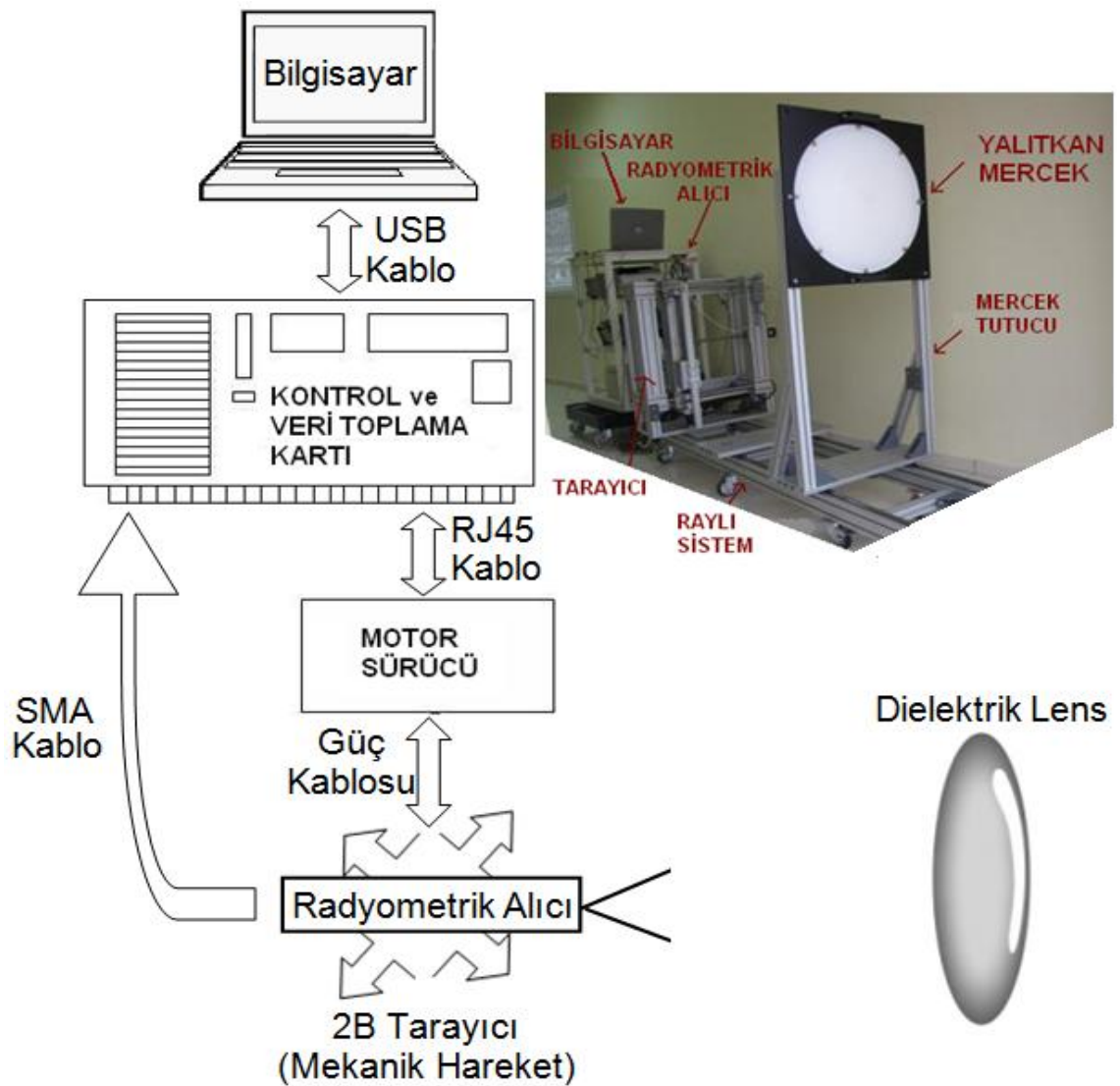


Şekil 2.40 a) Tek alıcı ile iki boyutlu tarana sistemi b) Tek boyutlu alıcı dizisi ile tek boyutlu tarama sistemi c) İki boyutlu alıcı dizisi.

3. TERAHERTZ PASİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

3.1 Genel Yapı

Deneysel çalışma için oluşturulan görüntüleme sistemi dört ana parçadan oluşur. Bu ana parçalar; **tarayıcı**, **radyometrik alıcı**, **yalıtkan mercek (Dielektrik lens)**, **kontrol ve veri toplama** kısımlarıdır. Aşağıda sistemin genel yapısı ve fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 3.1 Sistem şema ve fotoğrafı.

Görüntüleme sistemi raylı bir taşıyıcı üzerinde yer alır. Bu sayede ölçüm alanı değiştirilmekte ve sisteme hareket kabiliyeti sağlanmaktadır.

3.2 Tarayıcı

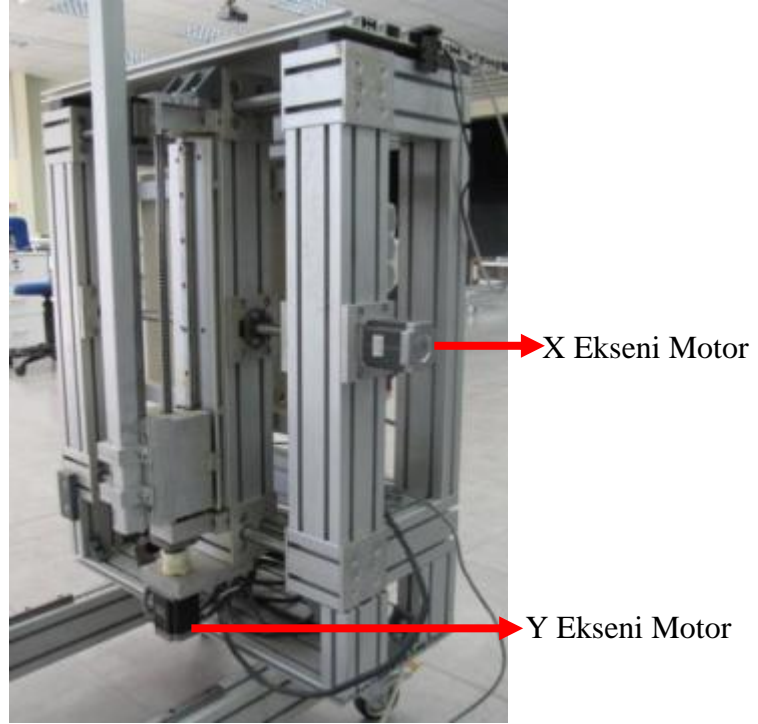
Tarayıcı; görüntüleme sistemi için Radyometrik alıcısı iki boyutlu (kartezyen koordinat sisteminde X-Y) hareket ettiren kısımdır. Tarayıcı sistem; mekanik hareket eksenleri, bu eksenlerin hareket etmesini sağlayıcı motorlar ile bu motorların sürülmesi için kullanılan motor sürücülerinden ve alüminyum profil gövdeden oluşmaktadır.

Aşağıda tarama sisteminde kullandığımız adım motor ve genel özellikleri yer almaktadır.



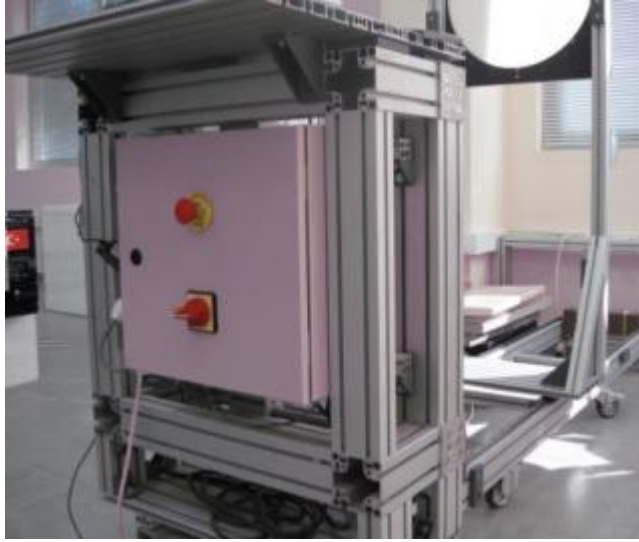
Şekil 3.2 Sistemde kullanılan adım motor.

Marka Model	:Minebea-Matsushita 23KM-K723-05
Adım Açısı (Derece)	:1,8
Besleme Gerilimi (V)	:24
Çalışma Akımı(A/Phase)	:1
Tutma Torku (Kg-cm)	:1,2
Rotor Ataleti (gcm ²)	:20,3
Faz	: 2
Ağırlık (Kg)	:1,05



Şekil 3.3 Tarayıcı hareket sağlayıcısı motor.

İki yatay doğrusal eksen ile oluşturulan tarayıcı sistem, her eksenini hareket ettiren bir motor ve bu motoru enerjilendiren motor sürücüsüne sahiptir. Hareket sağlayıcı olarak, yapılan hareketin ölçülebilirliği ve istenilen pozisyona kolaylıkla ilerletilebilmesi amacıyla, adım motorları kullanılmıştır (Şekil 3.3). Adım motorlarının hareketlendirilebilmeleri için adım motor sürücüleri kullanılmıştır(Şekil 3.5).

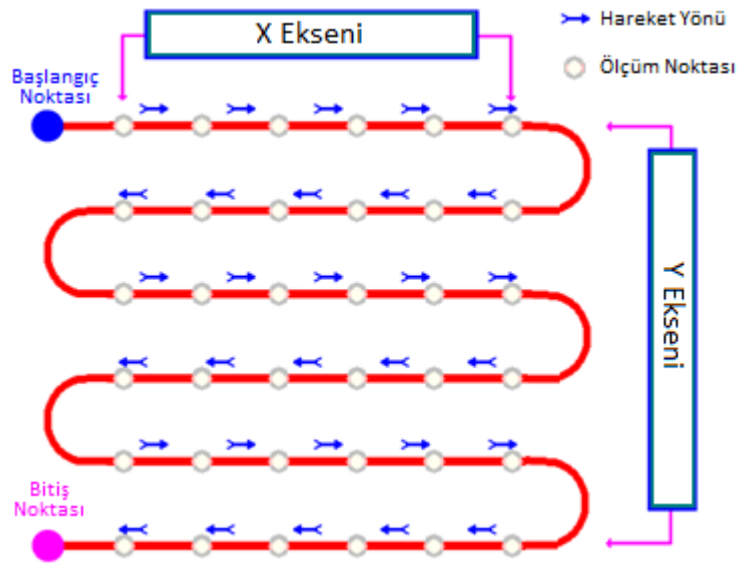


Şekil 3.4 Motor sürücü kutusu.



Şekil 3.5 Motor sürücüleri.

Tarayıcı ile ölçüm alınırken, başlangıç noktasından harekete başlanılır ve hareket edilmesi istenilen mesafe ve bu mesafedeki ölçüm aralıkları kadar noktalarla ölçümler alınır. X eksenindeki ölçüm noktalarının ölçülmesi sonrasında Y ekseninde hareket edilerek tekrar X ekseninde önceki ölçüme paralel olarak ölçümler alınır(Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Tarayıcı sistemin ölçüm sırasında izlediği yol.



Şekil 3.7 Tarayıcı ön görünüm.

3.3 Kontrol Ve Veri Toplama

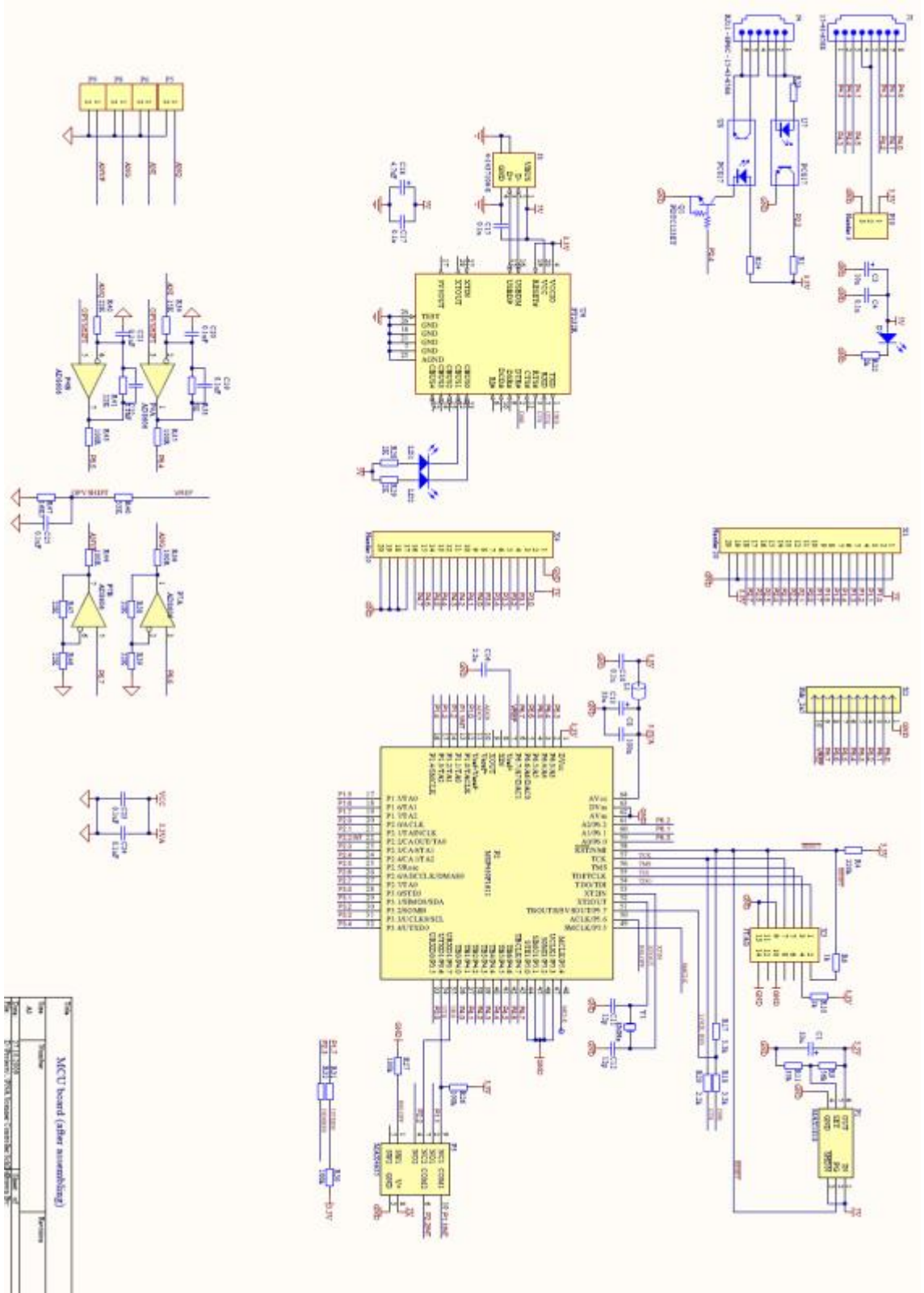
Terahertz algılayıcı ve motor sürücülerinin bilgisayar tarafından kontrol edilebilmesi amacıyla bir kontrol ünitesi geliştirilmiştir (Şekil 3.8). Kontrol ünitesi ile alıcıdan gelen ölçüm sonuçları olan analog işaret ölçülür ve bilgisayara aktarılır. Tarayıcı sistemi hareket ettiren motor sürücülerin kontrol sinyalleri de kontrol ünitesi tarafından sağlanır. Kontrol ve veri toplama kısmı donanım ve yazılım olmak üzere iki kısımdan oluşur.

3.3.1 Elektronik donanım

Bilgisayar kontrol ünitesi içerisinde, kontrol işlevlerini sağlamak amacıyla Texas Instruments firmasının MSP430F1611 serisi mikro denetleyicisi kullanılmıştır (Şekil 3.9). Bu mikrodenetleyici içerisinde, ölçüm sinyallerinin dijital bilgiye dönüştürülmesinde kullanılan, analog sinyalleri dijital bilgiye dönüştüren 12 bit çözünürlüklü ADC barındırmaktadır. Tarayıcı sistemin kontrolünde ise, hareket bilgilerini zamana bağlı olarak üretilebilmesi için zaman (timer) kesmeleri kullanılmıştır. Bilgisayar ile mikrodenetleyicinin haberleştirilmesi amacıyla, FTDI firmasının FT232RL USB - RS232 çevirici entegresi kullanılmıştır (Şekil 3.9). Ölçüm sırasında alınan işaretler ölçülmüş ve ölçme gürültüsünü azaltmak için ölçüm noktalarında 16 ölçüm alınıp bu değerlerin ortalama değeri bir ölçüm noktası değeri olarak üretilmiştir. Bilgisayar kontrol ünitesinin tüm bu görevleri gerçekleştirmesi amacıyla, IAR firmasının geliştirdiği “Embedded Workbench for MSP430” yazılım geliştirme platformu ile mikro denetleyici üzerinde çalışan bir program yazılmıştır.



Şekil 3.8 Bilgisayar kontrol ünitesi ve bağlantı noktaları.



Şekil 3.9 Bilgisayar kontrol ünitesi devre şeması.

3.3.2 Kontrol ve Veri Toplama Yazılımı

Bu yazılım; tarayıcıları kontrol etme ve kendine bağlı algılayıcılardan verileri alma amaçları için MİLTAL’ da görsel programlama ortamı olan Borland C++ Builder ile kullanıcı ara yüzü olarak geliştirilmiştir(Şekil 3.10). MİLTAL’da bulunan ölçüm sistemlerinde veri toplama ve tarayıcı kontrol amacı için kullanılan genel yazılımdır. Mevcut ölçüm sisteminin bilgisayar ile kontrol edilebilmesi, ölçüm sonuçlarını alabilmesi için de bu yazılım kullanılacaktır. Aşağıda yazılımın sadece ölçüm sisteminde kullanılan kısımları açıklanmıştır.



Şekil 3.10 Bilgisayar kontrol yazılımı.


Arayüz üç farklı pencere ile kontrol edilmektedir. Bunlar;

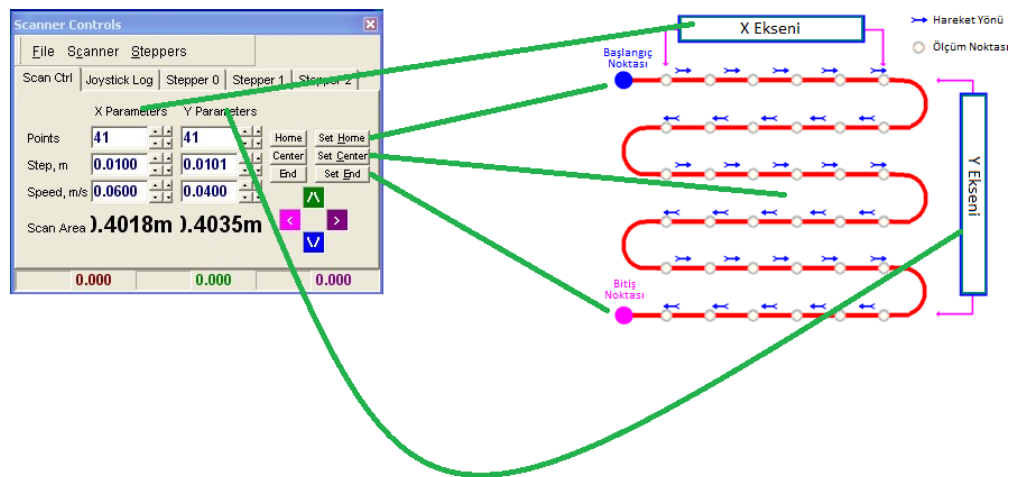
- Bilgisayar kontrol yazılımı ana penceresi
- Tarayıcı kontrol penceresi
- Ölçüm görüntüleme penceresi

Bilgisayar kontrol yazılımı ana penceresi; yazılımın çalıştırılması ile açılan penceredir(Şekil 3.11) ve diğer pencerelerin açılması işlemi bu pencere sonrasında gerçekleşir.



Şekil 3.11 Bilgisayar kontrol yazılımı ana penceresi.

Tarayıcı kontrol penceresi, programın başlatılması sonrasında otomatik olarak açılır. Bilgisayar kontrol yazılımı üzerindeki  butonu ile de ayrıca aktif hale getirilebilir. Pencere aktif iken tekrar bu butona basılması durumunda pencerenin tekrar kapatılıp açılması gerekebilir. Tarayıcı kontrol penceresinin tarayıcı mekanizması ile çalışma biçimi Şekil 3.12' de verilmiştir.



Şekil 3.12 Tarayıcı kontrol penceresi ve tarayıcı konumlandırma ilişkisi.

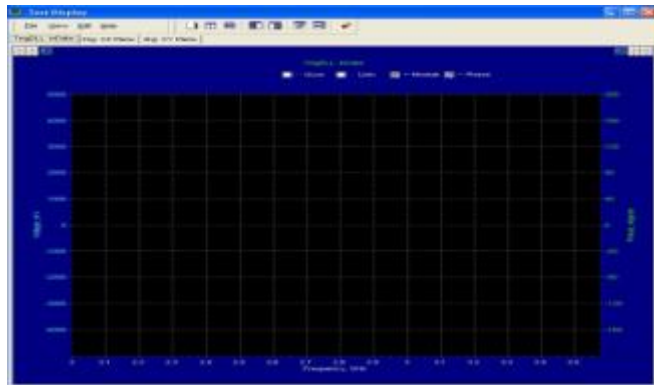
	X Parameters	Y Parameters
Points	41	41
Step, m	0.0100	0.0101
Speed, m/s	0.0600	0.0400
Scan Area).4018m).4035m	

Şekil 3.13 Ölçüm alanı tanımlama bilgileri.

Ölçüm alanının tanımlanırken (Şekil 3.13), "Toplam Ölçüm Mesafesi" (Scan Area) **Scan Area**, ölçüm yapılan alandaki X veya Y eksenlerindeki yapılacak toplam hareketi, "Nokta Sayısı"(Points) **Points**, ölçüm eksenindeki toplam ölçüm sayısını, "Noktalar Arası Mesafe" (Step) **Step, m** ölçüm yapılan noktalar arasındaki mesafeyi gösterir.

Tarayıcı X ve Y doğrultusunda tanımlanan alan içerisinde ölçüm yapar. Bu alan tanımlanırken, her doğrultudaki ölçüm başlangıcı ve bitişi noktaları da sayıldığından, herhangi bir eksende, ölçüm noktaları sayısı ve bu noktalar arasındaki mesafenin çarpımı toplam ölçüm mesafesini verir. Örnek olarak, 0.01m aralıklarla, 0.1m ve 0.1m ölçüm alanı için girilmesi gereken nokta sayısı 11 dir.

Ölçüm sırasında, alıcı tarafından alınan işaretler veri toplama kartında işlendikten sonra bilgisayar ekranında ölçüm görüntüleme ekranında görüntülenir. Ekranda gösterilen veriler zamana göre toplanan verilerdir. Bu durumda X eksen zamanı ve Y eksen de işaret genliğini verir. Eksen başlangıç ve ilerleme değerleri ekrandaki yön tuşları ile ayarlanabilir. Ölçüm görüntüleme ekranı Şekil 3.14 de verildi.



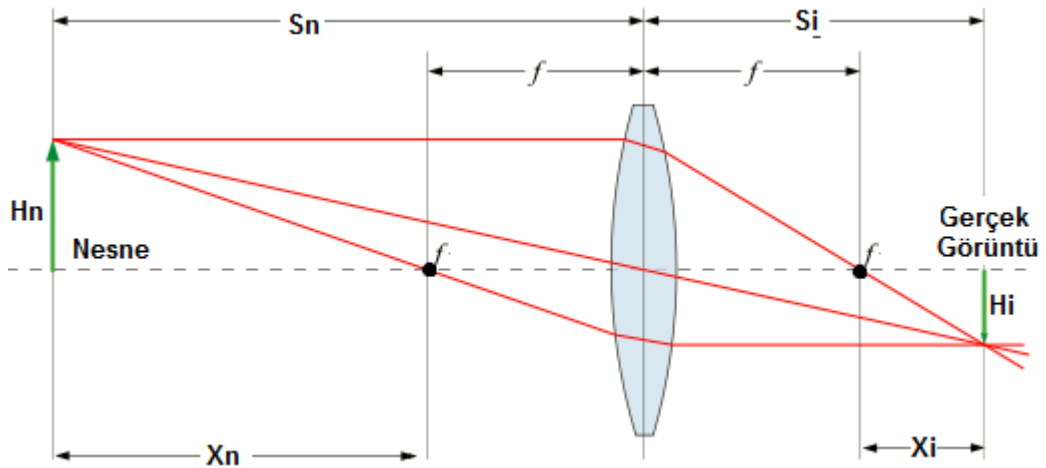
Şekil 3.14 Ölçüm işaret görüntüleme penceresi.

3.4 Yalıtkan Mercek (Dielektrik Lens)

3.4.1 Optik ve geometrik yalıtkan mercek eşitlikleri

Yalıtkan mercek; ışıyan elektromanyetik dalganın anten ya da yansıtıcı yüzey üzerinde toplanması için kullanılır. Bu nedenle hedeften yansıyan ışımının radyometrik alıcıda toplanması için yalıtkan mercek tasarlandı.

Yalıtkan mercekler optik merceklere benzerler. Geometrik optiğin ışık analiz yöntemleri ile hesaplanabilirler. Mercek boyunca ilerleyen dalgalar gecikmeye uğrarlar ve aynı ortamda farklı yolları izleyerek ayrılırlar. Çıkışta kaynaktan itibaren alınan yol elektriksel olarak eşit olur. Buna elektriksel (veya optik) yol uzunluğunun eşitlenmesi prensibi veya Fermant prensibi denir. Mercekte görüntü oluşumu ve mercek denklemleri;



Şekil 3.15 Mercek ve görüntü oluşumu.

- f :Odak Noktası/Mesafesi
- S_n :Mercek-Nesne Mesafesi
- S_i :Mercek - Görüntü Mesafesi
- X_i :Odak-Görüntü Mesafesi
- X_n :Odak -Nesne Mesafesi
- H_i : Görüntü Boyu
- H_n :Nesne Boyu

Gaussian Mercek Denklemi;

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{S_i} \quad (\text{E. 3.1})$$

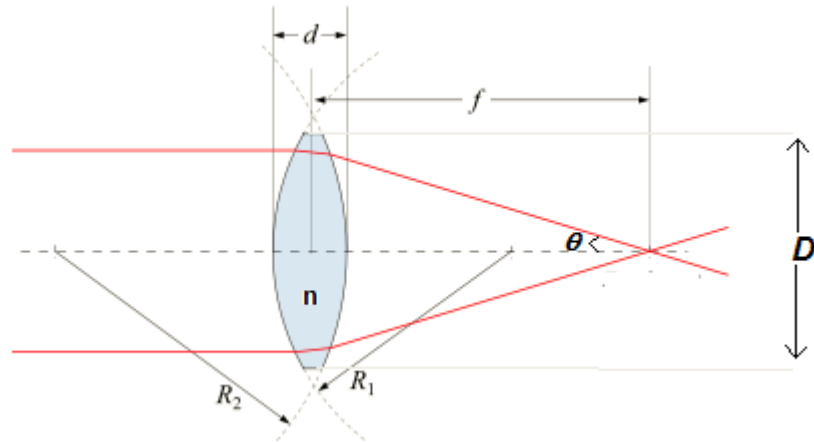
Newton Mercek Denklemi;

$$f^2 = X_n X_i \quad (\text{E. 3.2})$$

Büyütme (M);

$$M = \frac{H_i}{H_n} = -\frac{S_i}{S_n} \quad (\text{E. 3.3})$$

Büyütme denklemdeki eksi, görüntünün ters oluştuğunu belirtir. Mercek denkleminde mercek kalınlığı da işleme katılırsa;



Şekil 3.16 Mercek kalınlığının etkisi.

d :Lens Kalınlığı

n :Malzeme Kırılma indisi

R_1 :Hedefe Yakın olan yüzey Eğrisi yarıçapı

R_2 :Hedefe Uzak Olan Yüzey Eğrisi Yarıçapı

Herhangi bir eğri yarıçapı (R_1, R_2) sonsuz seçilirse o yüzey düz yüzey olur.

Kalınlık dahil edilen yalıtkan mercek denkleminin (E. 3.4) de verilmiştir.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (\text{E. 3.4})$$

Yukarıdaki yöntemler ile odak noktası ve hedef mesafesi bilinen bir sistem için oluşacak görüntü mesafesi ve boyutu bulunabilir. Ayrıca buradan lens ile ilgili diğer optik parametreler belirlenebilir. Sayısal Açıklık (NA) değeri lensin enerji toplama kapasitesinin sayısal ifadesidir. Büyük olması daha fazla enerji toplanmasını sağlar.

$$\text{Sayısal Açıklık (NA)} = n \sin\theta \quad (\text{E. 3.5})$$

Odak uzaklığının lens çapına oranı odak oranı verir; N yada f/# ile gösterilir. Bu değer bize alıcıda ne kadar enerji odaklandığıyla ilgili bilgi verir.

$$\text{Odak Oranı (N)} = \frac{f}{D} \quad (\text{E. 3.6})$$

Bu oran sonsuz uzaklıkta bulunan hedefler için geçerlidir. Belirli bir uzaklıkta bulunan hedefler için Çalışan Odak Oranı (Nw) tanımlanır.

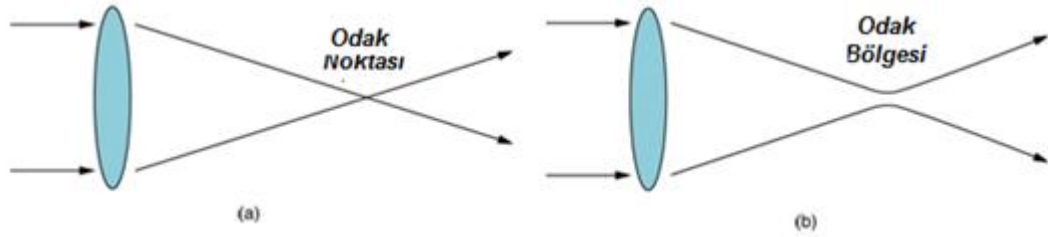
$$\text{Çalışan Odak Oranı (Nw)} = \frac{1}{2NA} = (1 - M)N \quad (\text{E. 3.7})$$

Lens sisteminde açısal çözünürlük θ_{lim} (sadece alıcı yer alan sistemler için,);

$$\theta_{\text{Lim}} = 2,44\lambda/D \quad (\text{E. 3.8})$$

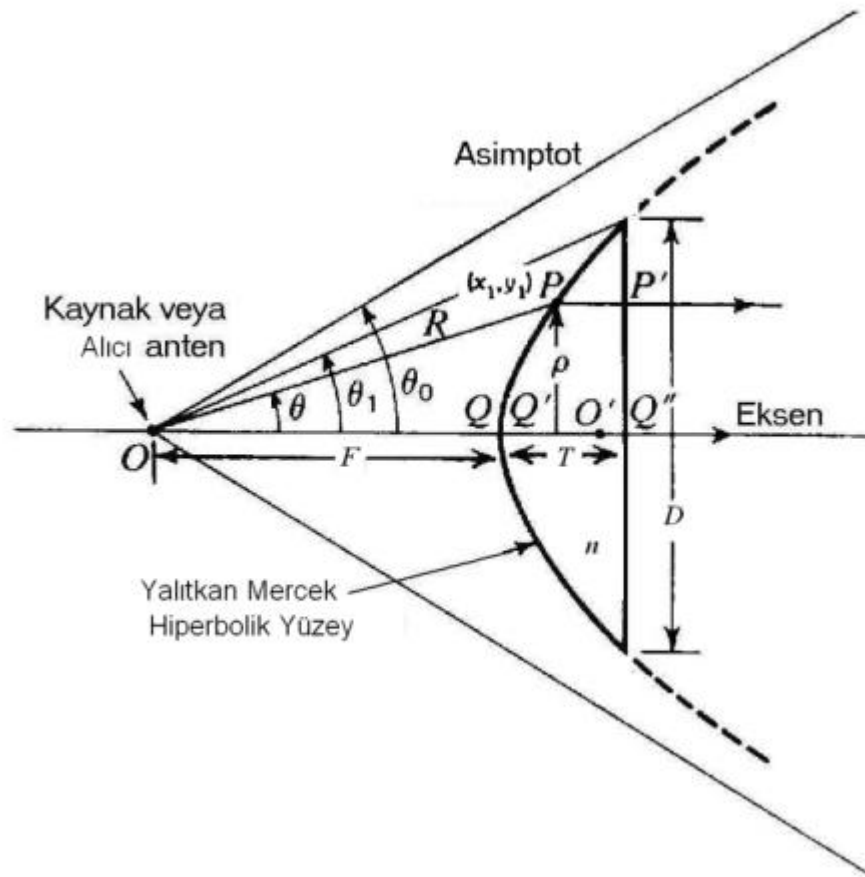
olarak belirlenir. Böylece bir lens sisteminde iki hedefin ayırt edilebilmesi için hedefler arası θ_{lim} den daha fazla açısal açıklık (mesafe) bulunmalıdır. Ayrıca bu değer Rayleigh Kriteri olarak da adlandırılır.

Lens tasarımlarında geometrik ve dalga yaklaşımları kullanılır. Geometrik yaklaşımlar da kırınım ve sapınç (aberasyon) gibi etmenler hesaba katılmaz. Şekil 3.17'de odak durumu gösterilmektedir.



Şekil 3.17 a) Geometrik optik b) Dalga optiği.

Yalıtkan merceğin tasarlanma bilmesi için geometrik tasarım denklemlerine ihtiyaç vardır. Şekil 3.18 kullanılarak tasarım denklemleri elde edilir (Lee, 1993).



Şekil 3.18 Geometrik yöntem ile mercek tasarımı.

Şekil 3.18'de ki düzenek için OP yolu elektriksel olarak OQ' ne eşit olması gerekir. $OQ=L$ ve $OP=R$ ve mercek çevresi hava veya boşluk kabul edilirse,

$$\frac{R}{\lambda_0} = \frac{L}{\lambda_0} + \frac{R \cos \theta - F}{\lambda_d} \quad (\text{E. 3.9})$$

olur. Burada λ_0 serbest uzaydaki dalgaboyu, λ_d mercekteki dalgaboyudur. Düzenlemeler yapılırsa,

$$R = F + n(R \cos \theta - F) \quad (\text{E. 3.10})$$

elde edilir. Buradan,

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_d} = \frac{\sqrt{\mu \varepsilon}}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (\text{E. 3.11})$$

olur.

$\mu = \mu_0 \mu_r$ merceğin manyetik geçirgenliği

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ merceğin yalıtkanlık sabiti

μ_0 serbest uzayın manyetik geçirgenliği ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/M)

ε_0 serbest uzayın yalıtkanlık sabiti ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/M)

μ_r merceğin bağıl manyetik geçirgenliği

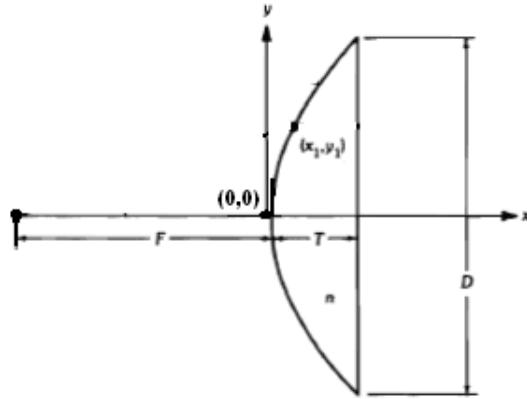
ε_r merceğin bağıl yalıtkanlık sabiti.

Genellikle yalıtkan malzemeler için $\mu_r = 1$ olduğundan, $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ dir ve yalıtkan malzemenin kırılma indisidir. (E. 3.10)'dan R çözümlerse,

$$R = \frac{(n-1)F}{n \cos \theta - 1} \quad (\text{E. 3.12})$$

merceğin geometrik şeklini veren eşitlik bulunur. Şekil 3.18'de F merceğin odak uzunluğudur. Bu çözüm kullanılarak Kartezyen koordinatlar için mercek yüzey eğrisi denklemi (mercek tepe noktası (0,0) olmak üzere Şekil 3.19 de gösterildiği gibi (E. 3.13'' da elde edildi.

$$y_1 = \left[(n^2 - 1)x_1^2 + 2(n-1)Fx_1 \right]^{1/2} \quad (\text{E. 3.13})$$



Şekil 3.19 Kartezyen çizim.

Hiperbolün asimptotu eksene göre θ_0 açısındadır. Bu açı $R = \infty$ kabul edilerek (E. 3.12)'den

$$\theta_0 = \arccos \frac{1}{n} \quad (\text{E. 3.14})$$

şeklinde belirlenir. Bu durumda mercek kalınlığı (T), mercek Açıklığı (D) ve mercek odak uzaklığı (F) arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde olur;

$$T = \frac{1}{n+1} \left[\sqrt{F^2 + \frac{(n+1)D^2}{4(n-1)}} - F \right] \quad (\text{E. 3.15})$$

$$D = \sqrt{4T(n-1)[T(n+1) + 2F]} \quad (\text{E. 3.16})$$

$$F = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2(n-1)T} - \left(\frac{n+1}{2}\right)T \quad (\text{E. 3.17})$$

3.4.2 Yalıtkan mercek tasarımı ve gerçekleştirilmesi

Sistemimizde kullanılmak üzere Teflon ve Polietilen malzemelerden yalıtkan mercek tasarlandı. Yalıtkan merceği yerleştireceğimiz düzenek 50cm çapında ve 5cm kalınlığında olduğundan tasarıma bu bilgiler ile gerçekleştirildi.

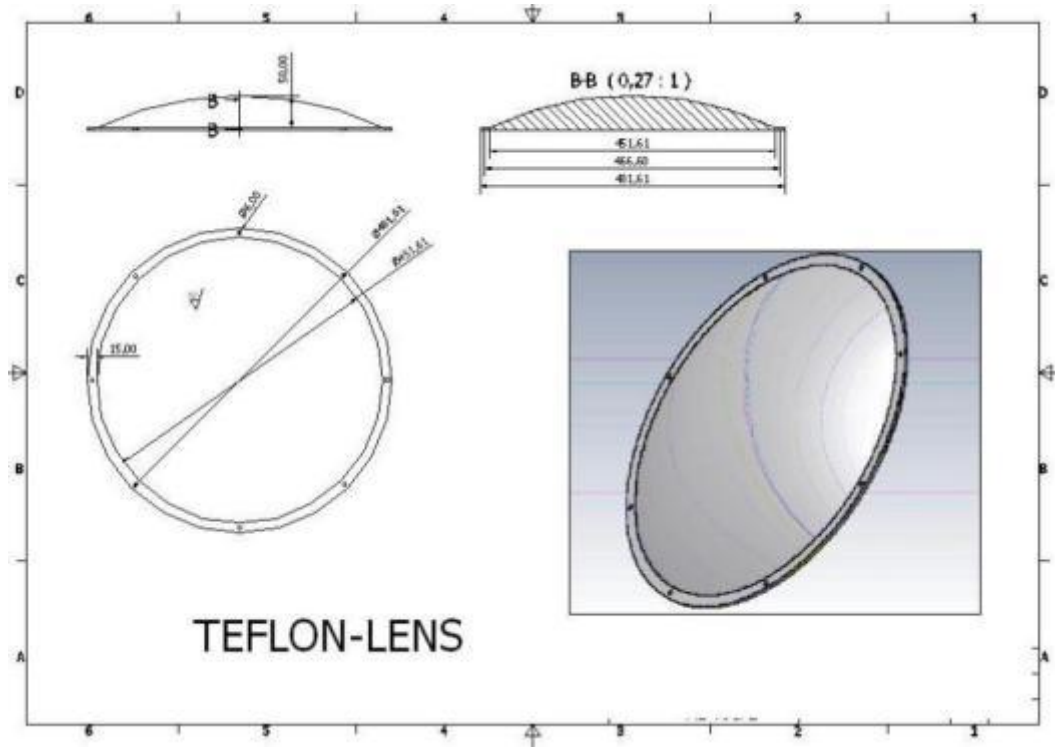
Çizelge 3.1 Yalıtkan mercek tasarım parametreleri.

Malzeme	TEFLON	POLİETİLEN
Kalınlık (T)	50mm	50mm
Çap (Açıklık, D)	500mm	500mm
Bağıl Yalıtkanlık Katsayısı (ϵ_r)	2.2	2.08
Kırılma İndisi (n) $\sqrt{\epsilon_r}$	1.48	1.44
Odak Mesafesi (F) (E. 3.17 den)	1231mm	1352mm

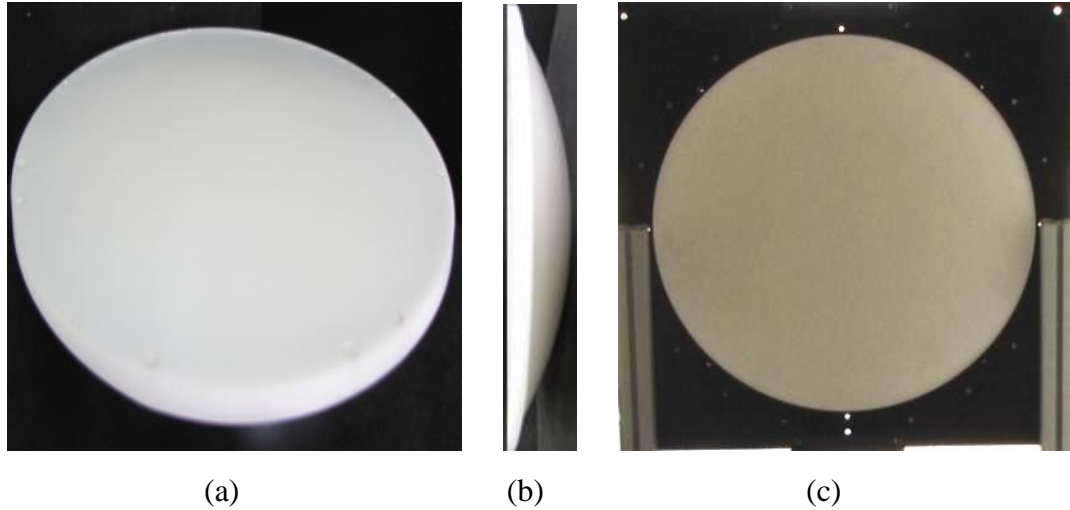
Teflon mercek için yüzey eğri eşitliği (E. 3.13) 'den

$$y_1 = [1, 2x_1^2 + 1181, 76x_1]^{1/2} \quad \text{olur.}$$

Yukarıda hesaplanan değerlere göre yalıtkan lensin “SolidWorks” programında montaj için gerekli eklemeleri ve vida delikli çizimi yapıldı (Şekil 3.20) ve CNC de üretildi(Şekil 3.21).



Şekil 3.20 Yalıtkan lens çizimi.

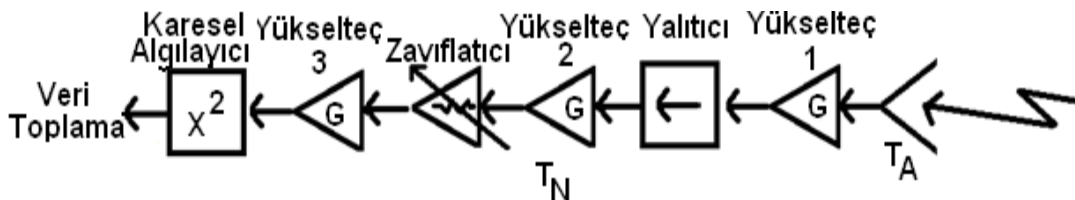


Şekil 3.21 Üretilen mercek (Lens) fotoğrafları a)Üstten b) Yandan c) Yerine montajlı

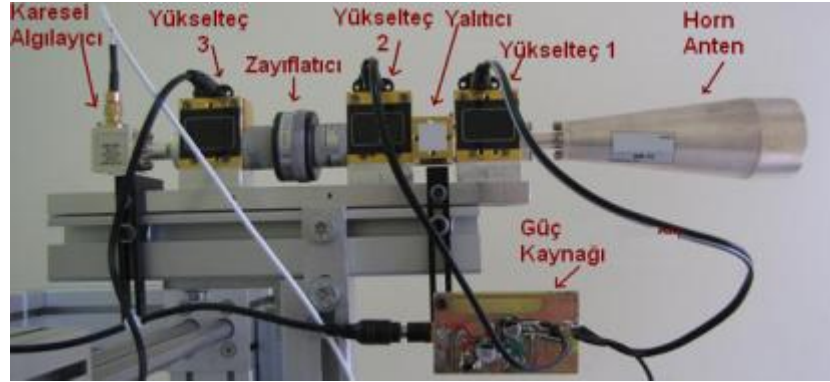
3.5 Radyometrik Alıcı

3.5.1 Radyometrik alıcı sistem

Deneyisel çalışmalarda kullanılmak üzere Toplam Güç (Total Power) Radyometrik alıcı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen alıcı önyükselteçli direk alıcı tipindedir. THz ışınımı alacak şekilde gerçekleştirilen alıcı kısmı anten, düşük gürültülü yükselteç, THz detektör, DC video yükselteç kısımlarından oluşmuştur. DC video yükselteç kısmı Veri toplama ve kontrol kartı içerisinde AD8606 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece ADC öncesinde gerekli DC kazanç ayarı gerçekleştirilebilmektedir. Alıcı diyagramı Şekil 3.22’de ve alıcı fotoğrafı Şekil 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.22 Radyometrik alıcı (Dairesel huni anten ile).



Şekil 3.23 Alıcı sistem.

3.5.2 THz anten

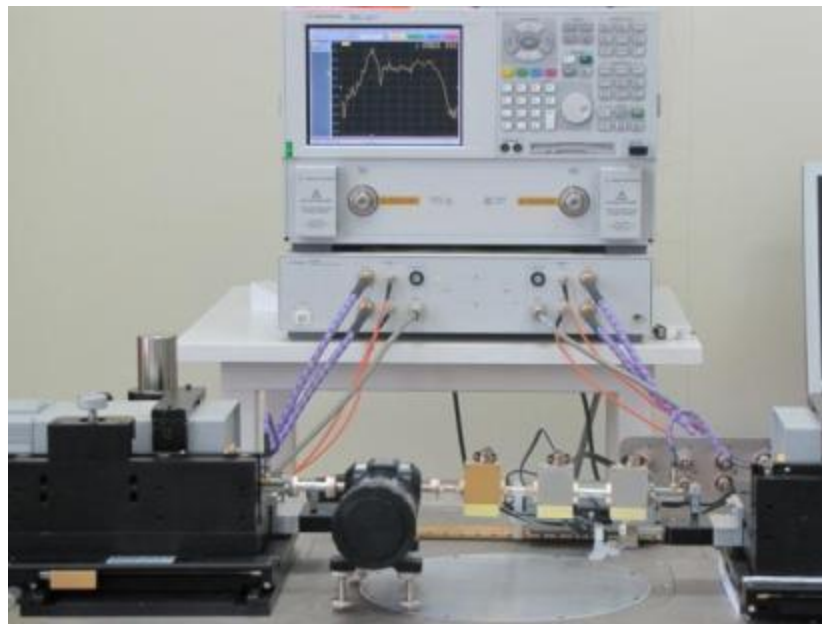
THz ışınımın alınması sağlayan devre elemanıdır. Görüntüleme sistemi için sanal görüntü tarandığından kazanç ve fiziksel büyüklük parametreleri önemlidir. Ticari olarak satın alınan huni (Horn) anten tipleri ve MİLTAL bünyesinde daha önce gerçekleştirilen antenler karşılaştırma amaçlı sistemde kullanılmıştır. Kullanılan antenler ile ilgili sonuçlar deneysel çalışmalar kısmında verilecektir.



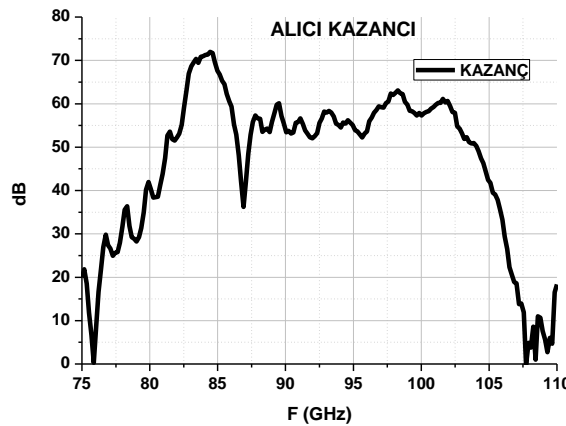
Şekil 3.24 Kullanılan antenler.

3.5.3 THz düşük gürültülü yükselteç

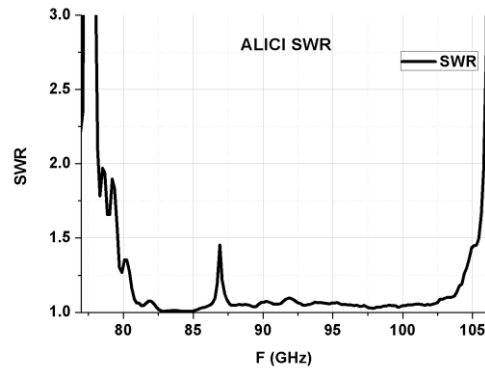
Üç adet düşük gürültülü yükselteç (HXI Terabeam Firmasına ait) ardı ardına eklenerek alıcı katı meydana getirildi. Katalog değeri olarak her bir yükselteç kazancı 20dB ve gürültü faktörü 5.5dB'dir. Bu durumda 3 katlı alıcı yükselteç katının ağ analizöründe ölçümü Şekil 3.25'de gösterildiği gibi gerçekleştirildi. Kazanç ölçüm sonucu Şekil 3.26'da ve giriş duran dalga oranı (SWR) Şekil 3.27'de verilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarına göre Alıcı Kazancı ortalama 60dB ve alıcı band genişliği 20GHz (SWR 1:1,2) olarak ölçüldü.



Şekil 3.25 Alıcı yükselteç katının kazanç ölçümü.



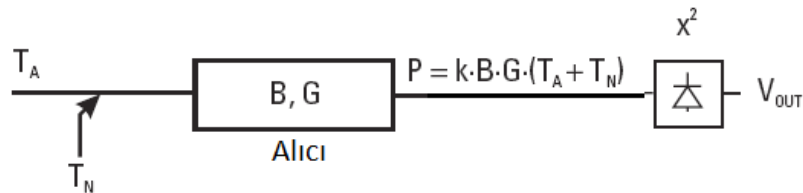
Şekil 3.26 Alıcı yükselteç kazancı.



Şekil 3.27 Alıcı yükselteç giriş duran dalga oranı.

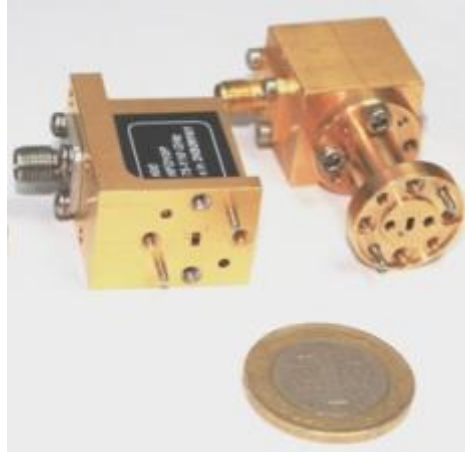
3.5.4 THz detektör ve entegratör

Anten tarafından alınan THz ışınım düşük gürültülü yükselteçte yükseltildikten sonra işaret gücüne göre gerilim çıktısı veren diyot bazlı devre elemanıdır. Bu kısım da Elmika firmasının ve HXI firmasının ticari detektörleri kullanılmıştır. Bu detektörlere ait fotoğraflar Şekil 3.29`da ve 94GHz hassasiyet ölçüm sonuçları Şekil 3.30 verilmiştir. Detektör hassasiyeti (C), detektörü tanımlayan parametredir ve birimi V/W`dır. Grafikten de görüleceği üzere HXI detektor hassasiyeti 7mV/mW; Elmika detektör hassasiyeti 100mV/mW`dır. Bu değerler firmalardan alınan katalog değerleri ile aynıdır. Ölçüm sisteminde hassasiyet değeri yüksek olan Elmika firmasının detektörü kullanılmıştır. Bu ölçüm sonucuna göre video yükselteç olarak kullanılan AD8606 devresi kazancı belirlenmiştir.

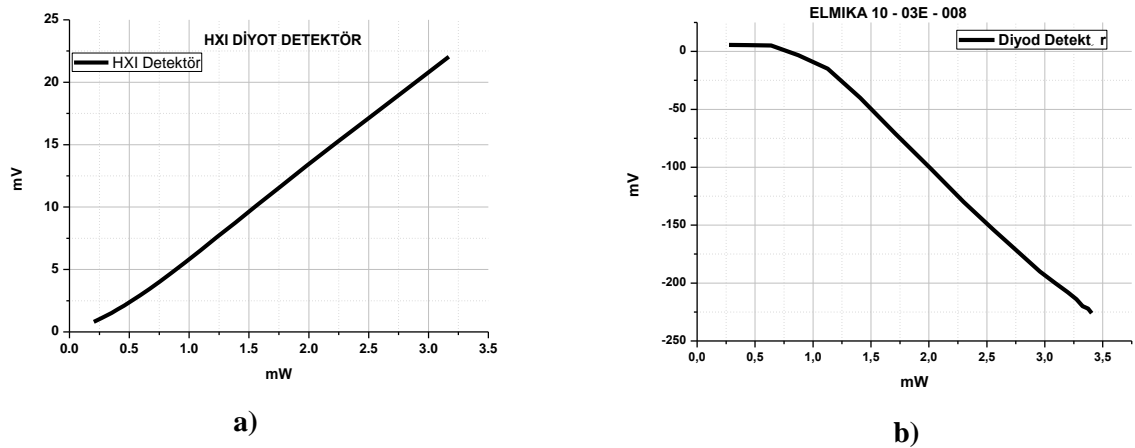


Şekil 3.28 Ön yükselteçli alıcı.

$$V_{OUT} = C(kBG(T_A + T_N)) = CP \quad (E. 3.18)$$



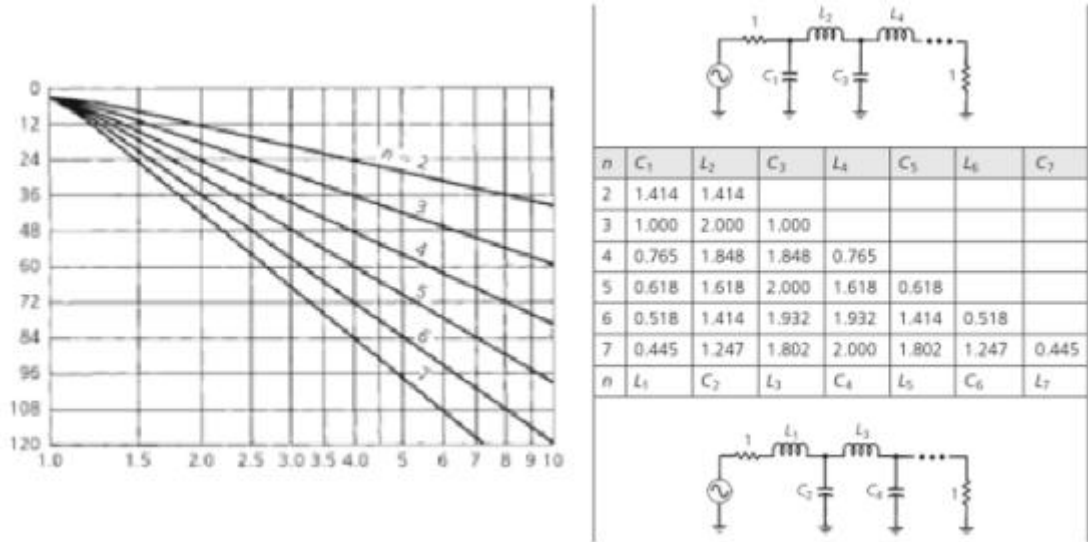
Şekil 3.29 HXI ve ELMİKA WR-10 Detektör



Şekil 3.30 Detektör hassasiyet ölçüm sonuçları a) HXI b)Elmika

Entegratör olarak yedinci dereceden alçak geçiren filtre (LPF) kullanılmıştır. Butterworth alçak geçiren filtre katsayıları eşitlik (E. 3.19)'den hesaplanır. Hesaplanan değerlerden oluşturulan tablo Şekil 3.31b' de verilmiştir. Burada filtre derecesi n ve empedans oranı R olarak verilmiştir.

$$A_k = 2 \sin \left(\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right); k = 1, 2, 3 \dots n \quad (\text{E. 3.19})$$



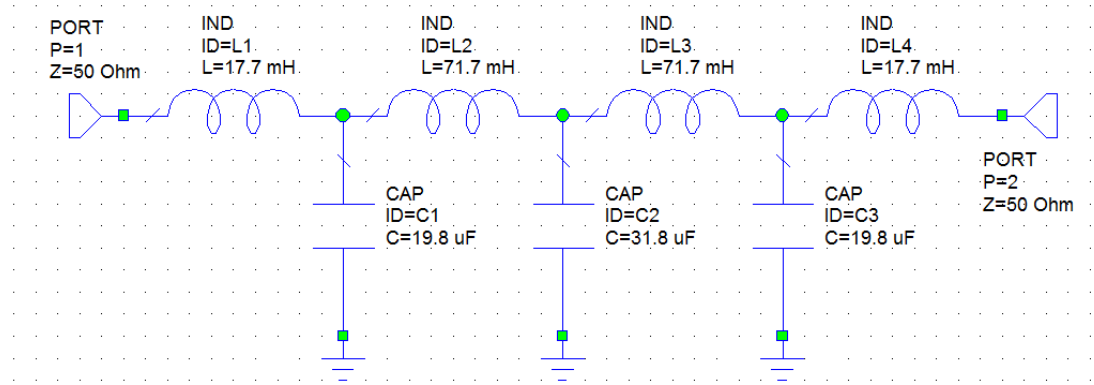
Şekil 3.31 Hesaplama da kullanılan Butterworth eşit bağlantı Alçak Geçiren Filtre parametreleri **a)** Zayıflatma **b)** Katsayı tablosu.

Bu durumda bobin değerleri (E. 3.20)'den kapasitör değerleri ise (E. 3.21)'den hesaplanır.

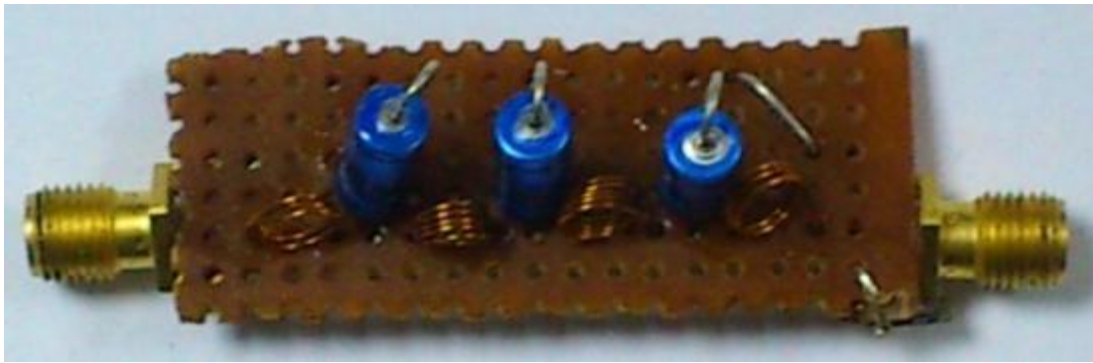
$$L = \frac{L_k R}{2\pi f_c} \quad (\text{E. 3.20})$$

$$C = \frac{C_k}{2\pi f_c R} \quad (\text{E. 3.21})$$

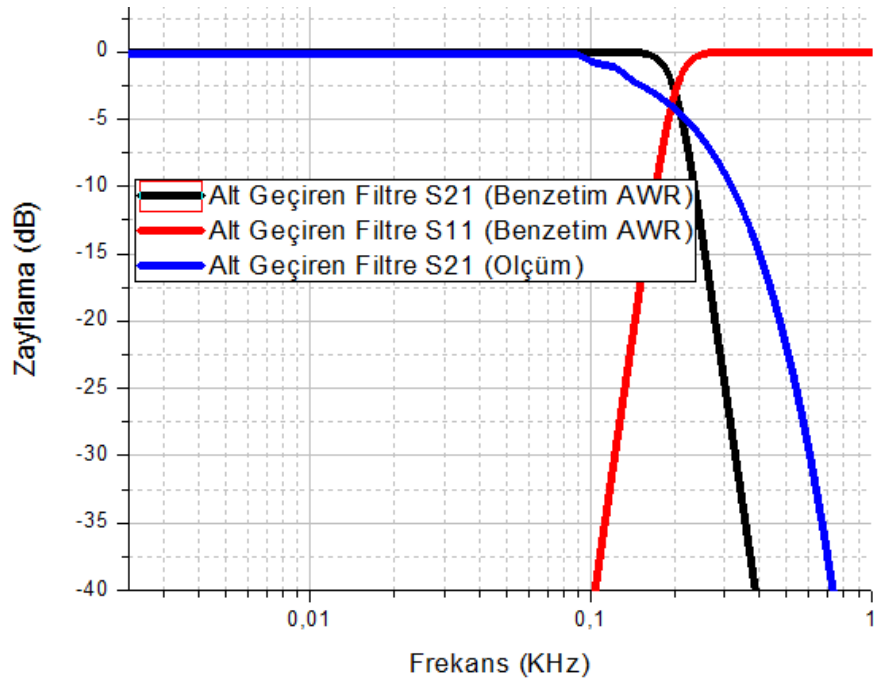
Yukarıdaki eşitliklerden hesaplanan kesim frekansı (f_c) 200 Hz olan yedinci dereceden butterworth alt geçiren filtre devresi Şekil 3.32'de ve gerçekleştirilmiş hali Şekil 3.33'te verilmiştir. Hesaplanan değerler en yakın eleman değerine yuvarlatılarak devre gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ve benzetim sonuçları Şekil 3.34'da verilmiştir.



Şekil 3.32 Alçak geçiren filtre devresi.



Şekil 3.33 Alçak geçiren filtre.



Şekil 3.34 Alçak geçiren filtre sonuçları.

3.5.5 Alıcı entegrasyon zamanı

Detektörden sonra zarfı alınan gürültü işaretinin, dalgalanmaları azaltmak için belli bir zaman değeri için ortalama değerinin ölçülmesi işlemidir. Bu zaman alçak geçiren filtrenin kesim frekansına bağlıdır.

$$\tau = \frac{1}{2B_{AGF}} \quad (\text{E. 3.22})$$

200 Hz kesim frekansına sahip alçak geçiren filtre için $\tau = 2.5$ ms olur.

3.5.6 Alıcı sıcaklığı

Alıcı sıcaklığı, alıcı gürültü faktörüne bağlıdır ve alıcı çözünürlüğünü etkileyen en önemli parametredir. Alıcı gürültü faktörü yükselteçlerin her birinin gürültü faktörü katalog değeri kullanılarak Friis formülünden hesaplanır. 3 katlı yükselteç için gürültü faktörü hesabı (E. 3.23)'de verilmiştir.

$$F_{Toplam} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \quad (\text{E. 3.23})$$

$$\text{Gürültü Figürü (NF)} = 10 \text{Log}(F) \quad (\text{E. 3.24})$$

Bu durumda Alıcı Gürültü Figürü (E. 3.23) ve (E. 3.24) kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır,

Düşük Gürültülü Yükselteç Kazancı : 20 dB (Lineer Kazanç : 100)

Düşük Gürültülü Yükselteç Gürültü Figürü: 5.5dB (Gürültü Faktörü 3.55)

$$\text{Gürültü Faktörü (} F_{Toplam} \text{)} = 3.55 + \frac{3.55 - 1}{100} + \frac{3.55 - 1}{100 * 100}$$

$$F_{Toplam} = 3.58$$

$$\text{Gürültü Figürü (NF)} = 10\text{Log}(3.58)$$

$$NF = 5,54 \text{ dB}$$

Benzer alıcıların ardı ardına eklenmesi ile meydana gelen alıcılarda alıcı Gürültü Figürünü ilk yükseltecin gürültü figürü belirleyici olur.

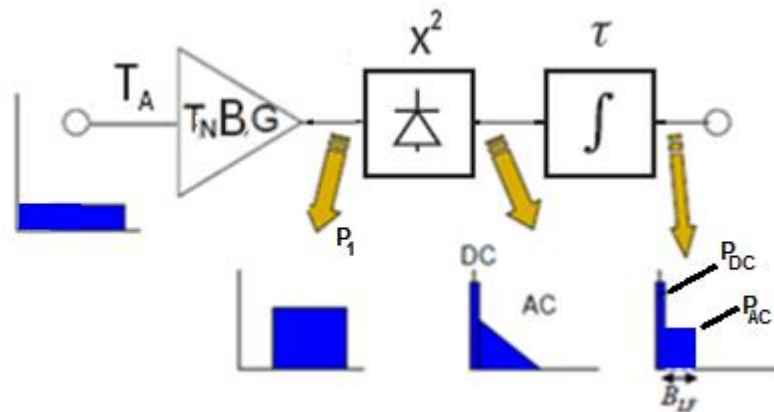
$$\text{Alıcı Sıcaklığı (} T_N \text{)} = \text{OrtamSıcaklığı} * (F_{\text{Alıcı}} - 1)$$

$$\text{Alıcı Sıcaklığı (} T_N \text{)} = 296\text{K} * (3.58 - 1) = 763.68\text{K}$$

Ortam sıcaklığı normal şartlar altında 23°C olarak kabul edilebilir. Bu durumda ortam sıcaklığı Kelvin cinsinden 296K olur.

3.5.7 Alıcı hassasiyeti hesaplama

Alıcı tarafından algılanabilecek en küçük giriş güç değişimidir. Termal değer (K) olarak ifade edilir.



Şekil 3.35 Alıcı işaretleri.

k: Boltzmann Sabiti ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

B: Alıcı Bant Genişliği (Hz)

G: Alıcı Kazancı

T_A : Alıcı Ortam/Anten Sıcaklığı (40° yarıiletken malzemeler için) (313K)

T_N : Alıcı Sıcaklığı (K)

P: Alıcı Çıkış gücü (Watt)

τ : Entegrasyon Zamanı (s)

ΔT : Alıcı Çözünürlüğü (K)

Alıcı girişinde bulunan gürültü işareti yükselteç katı tarafından yükseltildikten sonra oluşan işaret gücü;

$$P_1 = kBGT_A + T_N \quad (\text{E. 3.25})$$

Karesel diyot detektörden sonra ise işaret (giriş işaretinin zarfının karesi) DC bileşen ve DC bileşen çevresinde oluşan üçgensel AC bileşenden meydana gelir. Alçak geçiren filtreden geçen işaretin DC bileşeni değişmez fakat bant genişliğine bağlı olarak AC bileşen azalır. Çünkü filtre bant genişliği sistem bant genişliğinden çok küçüktür.

$$P_{DC} = \left(\frac{kBG(T_A + T_N)}{2} \right)^2 \quad (\text{E. 3.26})$$

$$P_{AC} = 2 \left(\frac{kG(T_A + T_N)}{2} \right)^2 BB_{AGF} \quad (\text{E. 3.27})$$

Buradan AC gücün DC güce oranı yazılırsa;

$$\frac{P_{AC}}{P_{DC}} = \frac{2 \left(\frac{kG(T_A + T_N)}{2} \right)^2 BB_{AGF}}{\left(\frac{kBG(T_A + T_N)}{2} \right)^2} = \frac{2B_{AGF}}{B} \quad (\text{E. 3.28})$$

Eşitlik (E. 3.28) voltaj cinsinden yazılırsa;

$$\frac{V_{AC}}{V_{DC}} = \sqrt{\frac{2B_{AGF}}{B}} \quad (\text{E. 3.29})$$

Radyometrik alıcı sistemlerde giriş sıcaklık değişimi ΔT , V_{AC} ile ölçülebilir ve alıcı anten sıcaklığı T_A ile alıcı sistem sıcaklığının T_N toplamı V_{DC} ' yi tanımlar. (E. 3.29) sıcaklıklar cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta T}{T_A + T_N} = \sqrt{\frac{2B_{AGF}}{B}} \quad (\text{E. 3.30})$$

$$\Delta T = (T_A + T_N) \sqrt{\frac{2B_{AGF}}{B}} \quad (\text{E. 3.31})$$

(E. 3.22) kullanılırsa sistem hassasiyeti aşağıdaki eşitlikte ifade edilir.

$$\Delta T = \frac{(T_A + T_N)}{\sqrt{B\tau}} \quad (\text{E. 3.32})$$

Bu durumda mevcut alıcı hassasiyeti;

$$\Delta T = \frac{(313 + 763,68)}{\sqrt{20 * 10^9 * 2,5 * 10^{-3}}} = 0,152K \quad (\text{E. 3.33})$$

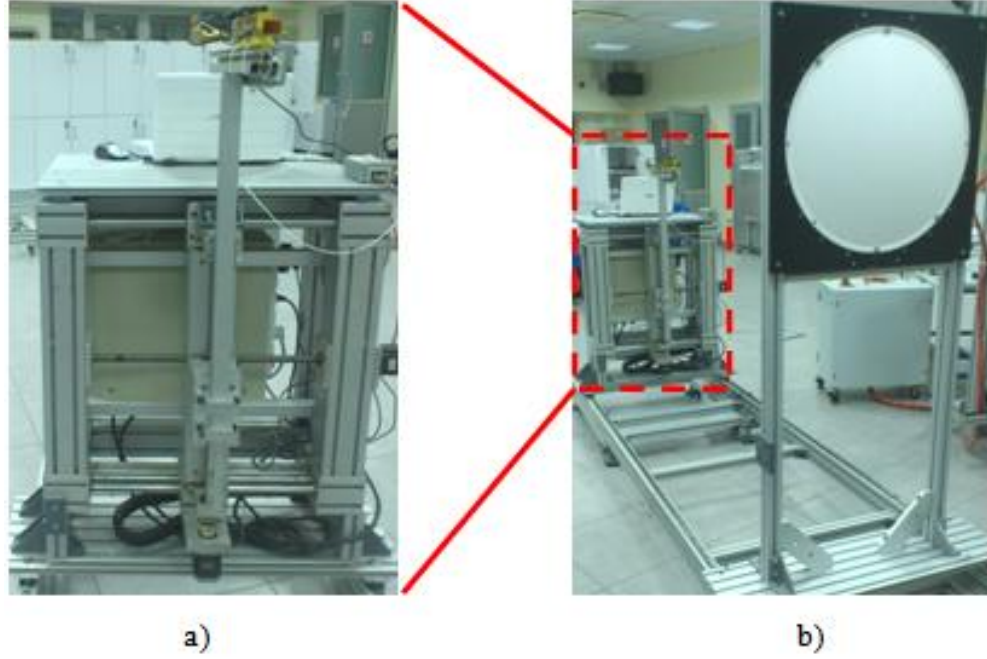
olur. Bu hesaplamada devre elemanları arası uyumsuzluk kayıpları dikkate alınmamıştır. Bu nedenle (E. 3.32) ideal durumdaki alıcı hassasiyetini verir. Bu durumda alıcı özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Alıcı özellikleri.

Alıcı Kazancı	~60 dB (Ölçülen)
Alıcı Band Genişliği	~20 GHz (Ölçülen; SWR1:1.2)
Alıcı Gürültü Figürü	5,54 dB (3,58) (Katalog değeri)
İntegrasyon Zamanı	2,5 mS
Detektör Hassasiyeti	100mV/mW (Ölçülen ELMİKA)
Alt Geçiren Filtre Kesim Frekansı	200 Hz
Alıcı Hassasiyeti	0,152 K (Hesaplanan)

3.6 Terahertz Görüntüleme Sistemi Gerçekleştirme

Terahertz görüntüleme sistemi; geliştirilen alıcı, yalıtkan mercek, tarayıcı, veri toplama kartı ve bilgisayarın alüminyum profiller ve bağlantı elemanları görüntüleme gerçekleştirebilecek şekilde birleştirilmesiyle gerçekleştirildi.



Şekil 3.36 Terahertz görüntüleme sistemi a) Tarayıcı kısmı b) Mercek tarafından görünüm c) Ön taraf

4. TERAHERTZ PASİF GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İLE YAPILAN ÖLÇÜM VE GÖRÜNTÜLEME ÇALIŞMALARI

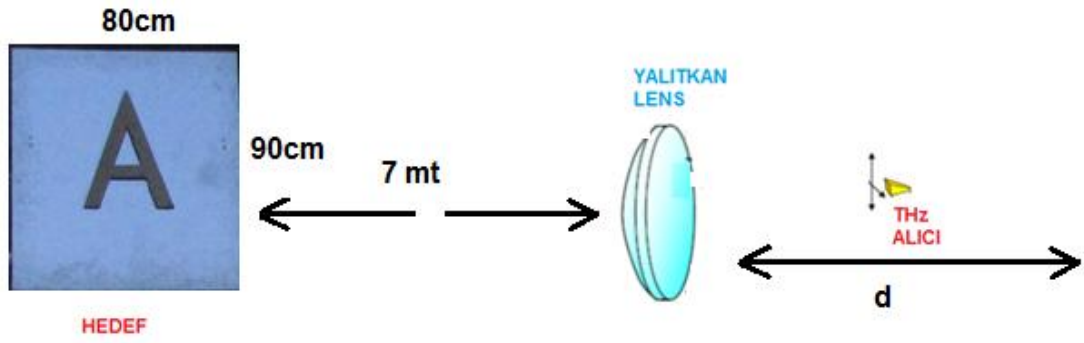
4.1 Deneysel Çalışma Yöntemleri

Deneysel çalışmalar iki şekilde gerçekleştirildi. İlk olarak görüntülemeyi gerçekleştirmek için tasarlanan sistem parçalarının (yalıtkan mercek, alıcı, anten) ikinci bölümde hesaplanan değerlerini ölçme çalışmaları gerçekleştirildi. Bu sayede tasarımda kullanılan katalog değerlerin ve yapılan üretimlerin sisteme uygun olup olmadığı gözlemlendi. Son olarak sistem ile kişi üzeri gizli nesne görüntüleme deneysel çalışması gerçekleştirildi.

4.2 Yalıtkan Mercek Odak Noktası, Büyütme Oranı ve Güç Yoğunluğu Ölçümleri

İkinci bölümde yalıtkan mercek tasarımı ve gerçekleştirilme çalışması yapıldı. Orada da açıklandığı gibi tasarımlarda geometrik eşitlikler kullanıldı. Bu nedenle elektromanyetik dalga etkileri hesaplanamadı. Ayrıca malzeme kırılma indisi için kullanılan değer, 10 MHz için verilen değerdir. Fakat sistem frekansı 100GHz olduğundan bu değer farklı olabilir. O nedenle yalıtkan mercek için hesaplanan odak mesafesi ve büyütme oranı deneysel çalışma ile belirlendi.

Ölçme işlemi için 7m mesafeye hedef yerleştirildi. Hedef olarak 80cm × 90cm boyutlarında alüminyum plaka ve üzerine yerleştirilmiş “A” şeklinde soğurucu (Eccosorb AN72) kullanıldı. Ölçüm şekli ve düzeneği sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 verilmiştir.

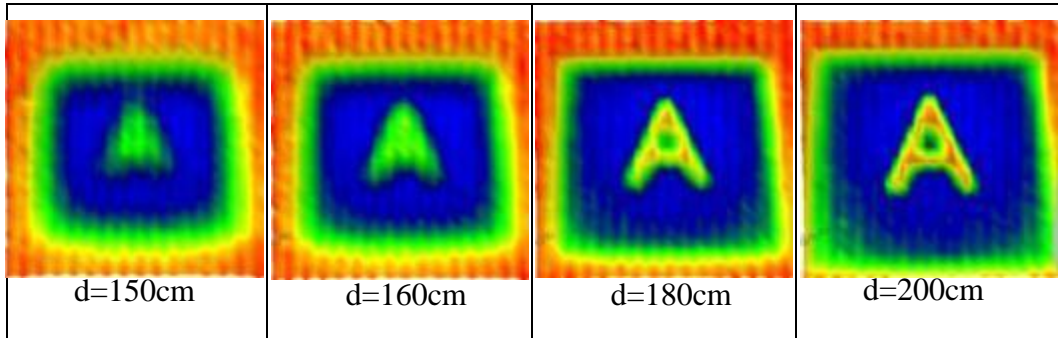


Şekil 4.1 Yalıtkan mercek ölçüm şekli.



Şekil 4.2 Yalıtkan mercek ölçüm düzeneği.

Alıcı mercekten uzaklaştırılarak çeşitli mesafelerde Kartezyen tarama (2 boyutlu) ile görüntü elde edildi. Alıcı ile mercek arası mesafe “ d ” ile gösterilmiştir. Tarama alanı $32\text{cm} \times 32\text{cm}$ ve tarayıcı çözünürlüğü 0.4cm olarak alındı. Sonuçlar “Intel Array Viewer” yazılımında görüntüldü (Şekil 4.3). Bu görüntüler ile sistemin gerçek odak mesafesi, büyütme oranı ve güç yoğunluğu dağılımı belirlendi.



Şekil 4.3 Yalıtkan mercek ölçüm sonuçları.

Bu görüntüler incelendiğinde en iyi görüntünün, alıcı mercekten 200cm uzakta olduğu zaman elde edildiği görülür. Alıcı ile elde edilen metal hedefin sanal görüntüsünün boyutları yaklaşık 26cm × 23cm dir. Bu deneysel sonuçlar ile (E. 3.1) kullanılarak odak mesafesi ve (E. 3.3) kullanılarak büyütme oranı hesaplanabilir. Bu durumda;

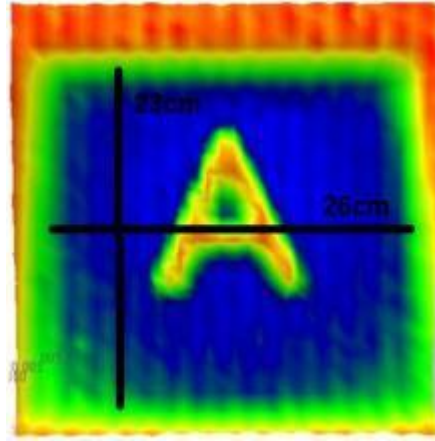
$$\text{Odak Mesafesi } (f) = \frac{S_i \cdot S_n}{S_n + S_i} = \frac{200 \cdot 700}{200 + 700} = 155,5 \text{ cm} \quad (\text{E. 4.1})$$

$$\text{Büyütme } (M) = \frac{H_{iBoy}}{H_{nBoy}} = \frac{26}{90} = 0.288 \quad (\text{E. 4.2})$$

$$\text{Büyütme } (M) = \frac{H_{iEn}}{H_{nEn}} = \frac{23}{80} = 0.287 \quad (\text{E. 4.3})$$

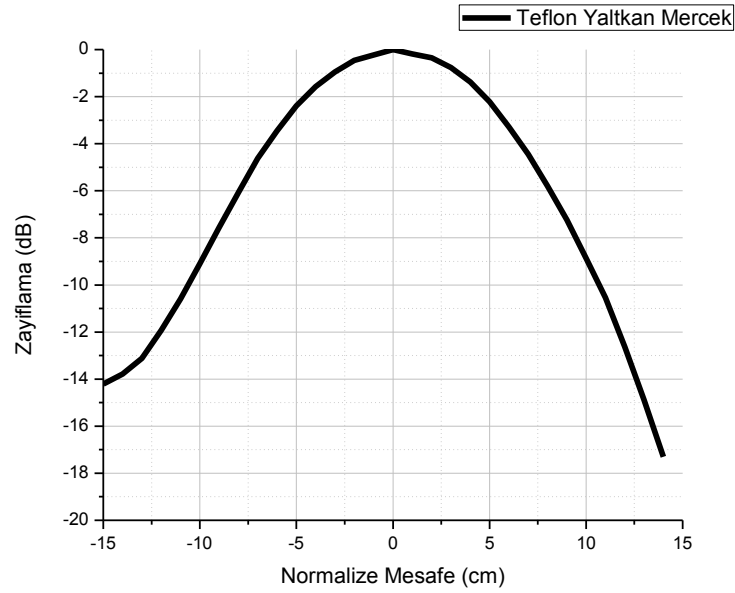
$$\text{Büyütme } (M) = -\frac{S_i}{S_n} = \frac{200}{700} = -0.285 \quad (\text{E. 4.4})$$

Odak mesafesi hesaplanan değerden (Hesaplanan Değer:1231mm) 324mm daha fazla çıkmıştır. Bu farklılık malzeme kırılma indisinden (Hesaplamada kullanılan 10MHz için verilmişti.), malzeme üretiminden ve mercek üretim hatalarından kaynaklanabilir. Sistemde kullanılacak Teflon yalıtkan mercek için odak mesafesi 1555mm'dir. Büyütme oranı mesafe bilgisinden, hedef en ve boy oranlarından olmak üzere üç şekilde hesaplanmıştır. Sonuçlar görüleceği üzere birbirine çok yakındır. Aradaki farklar ölçme ölçme okuma hataları nedeniyle gerçekleşmiş olabilir. Yalıtkan merceğin büyütme oranı 0.287 olarak alınabilir.



Şekil 4.4 En iyi görüntü.

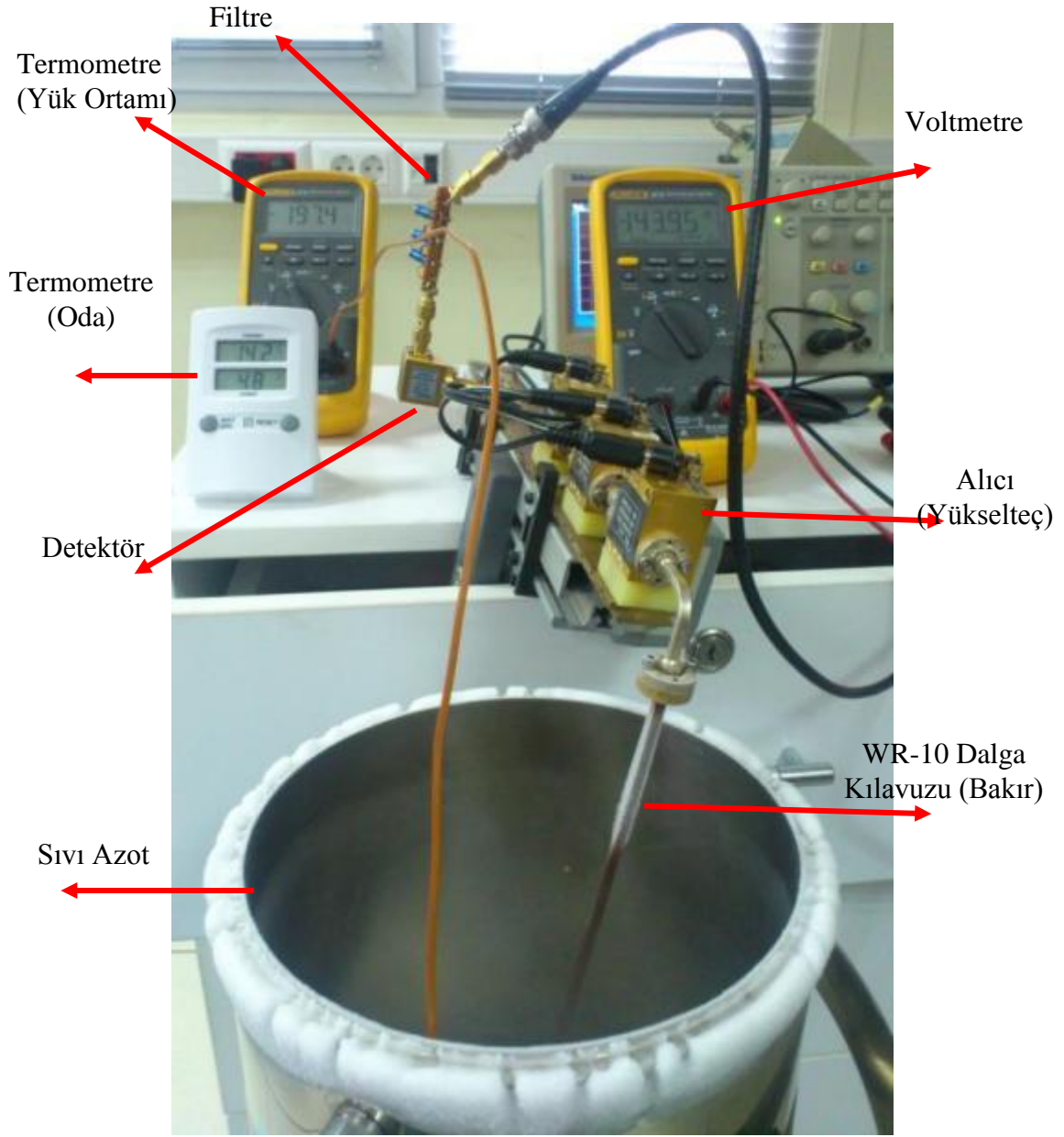
Yalıtkan mercek güç dağılımı, alıcı mercek merkezinden uzaklaştırılırken elde edilen güç dağılımını gösterir. Dar olan dağılım gücün bir merkezde toplandığını gösterir. Görüntü düzleminden uzaklaştıkça elde edilen güç azalır, böylece görüntü bulanıklaşır ve zayıflar. Ölçüm sonucu Şekil 4.5’de verilmiştir.



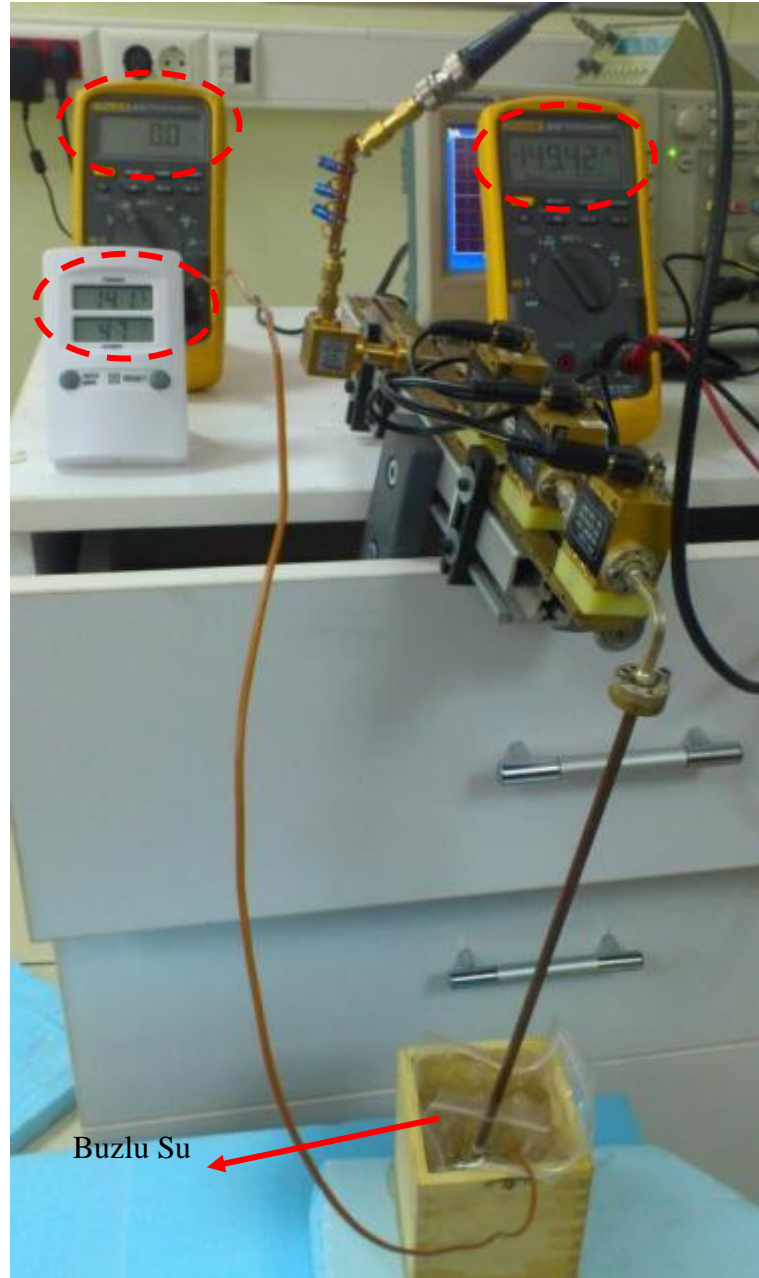
Şekil 4.5 Yalıtkan mercek güç dağılımı.

4.3 Alıcı Çözünürlük Ölçümleri

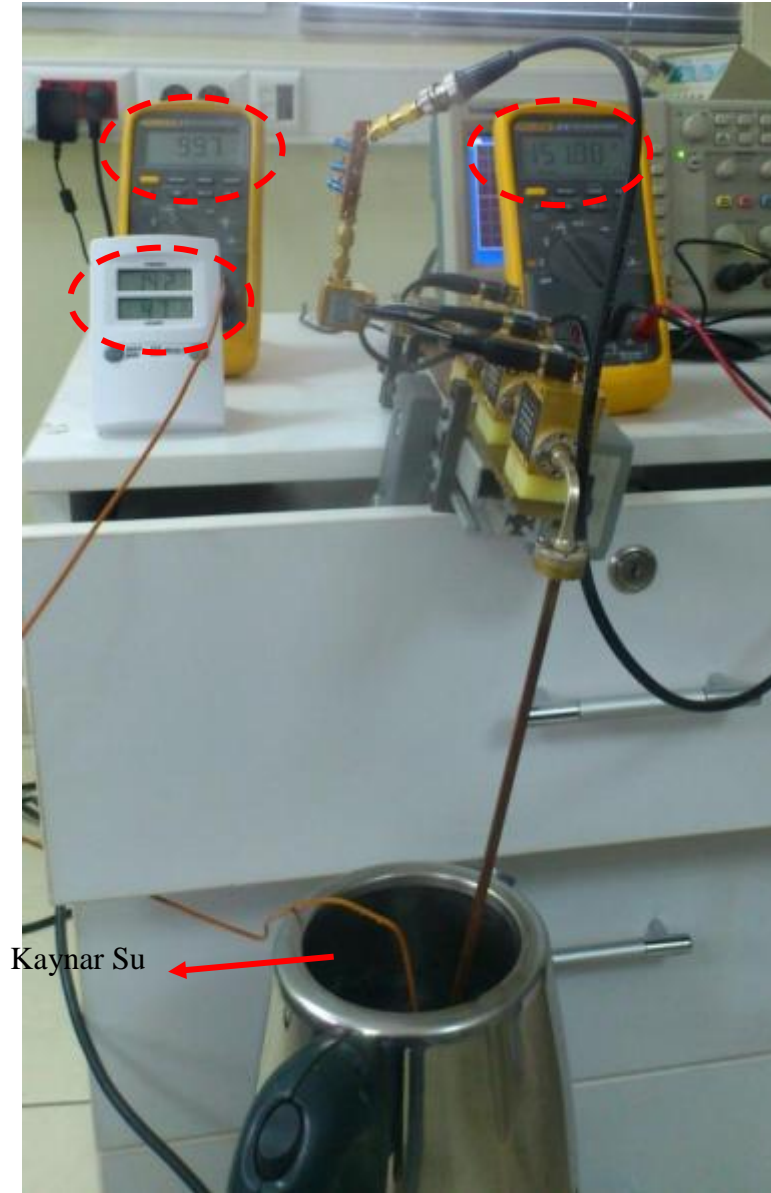
Alıcı için en önemli parametre alıcı çözünürlüktür. Elde edilecek görüntü ve ölçüm kalitesini görüntülenebilecek nesnelere belirler. Devre elemanlarının birbirlerine bağlantısı sonucu oluşan yansıma kayıpları, dış ısı etkileri hesaba katılmadı. Alıcı çözünürlük ölçümleri özel ortamlarda (Klimatik, Krayojenik) ve kalibrasyonlu yükler ile gerçekleştirilir. Yük ile alıcı arası ısı transferi olmaması için ısı geçirgenliği zayıf olan paslanmaz çelik gibi dalga kılavuzları kullanılır. Bu deneysel çalışmamızda ortam etkilerine açık bir şekilde alıcı çözünürlüğü belirlendi. Bizim amacımız alıcının çalışma koşullarındaki tepki ve çözünürlüğünü görebilmektir. Değişik sıcaklıktaki ortamlar için azot (-196°C , 77K), buzlu su (0°C , 273K) ve kaynar su (100°C , 373K) kullanıldı. Alıcı çözünürlüğü belirlemek için alıcı girişine 50Ω yük bağlandı ve yükün değişik sıcaklık ortamlarında alıcı çıkışı ölçüldü ve çözünürlük hesaplandı. Ayrıca aynı anda termometre yardımı ile yük ortam sıcaklığı da ölçüldü.



Şekil 4.6 Sıvı azot ile ölçüm.



Şekil 4.7 0°C (Buzlu su ile) ölçüm.



Şekil 4.8 100°C (Kaynayan su ile) ölçüm.

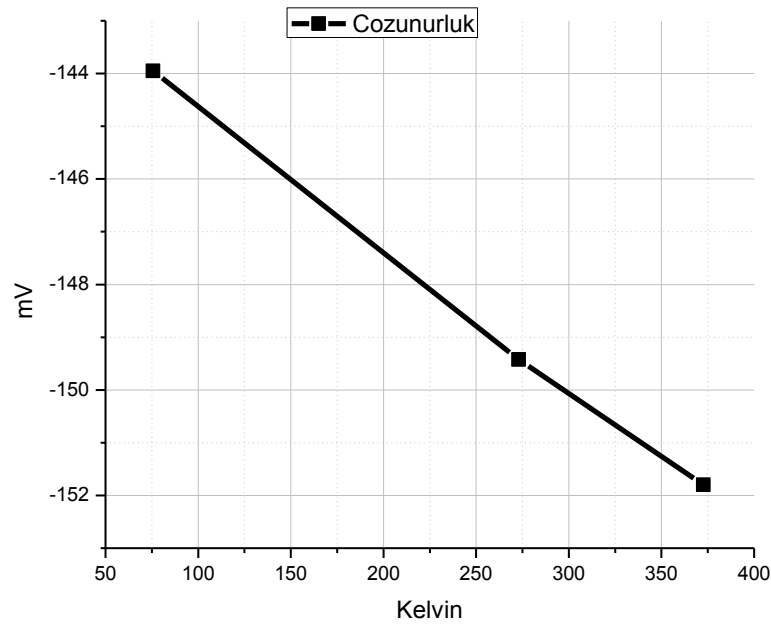
Bu deneysel çalışma, ısınan direncin gürültü gerilimi oluşturma fiziksel kuralına göre çalışır. Bu gürültüye Johnson–Nyquist gürültüsü de denir. Yük üzerinde oluşan gerilim eşitliği (E. 4.5)’’de ve elde edilen güç (E. 4.6)’’da verilmiştir.

$$v = \sqrt{4kTRB} \quad (\text{E. 4.5})$$

$$P = \frac{v^2}{R} = 4kTB \quad (\text{E. 4.6})$$

Çizelge 4.1 Alıcı çözünürlük ölçümleri.

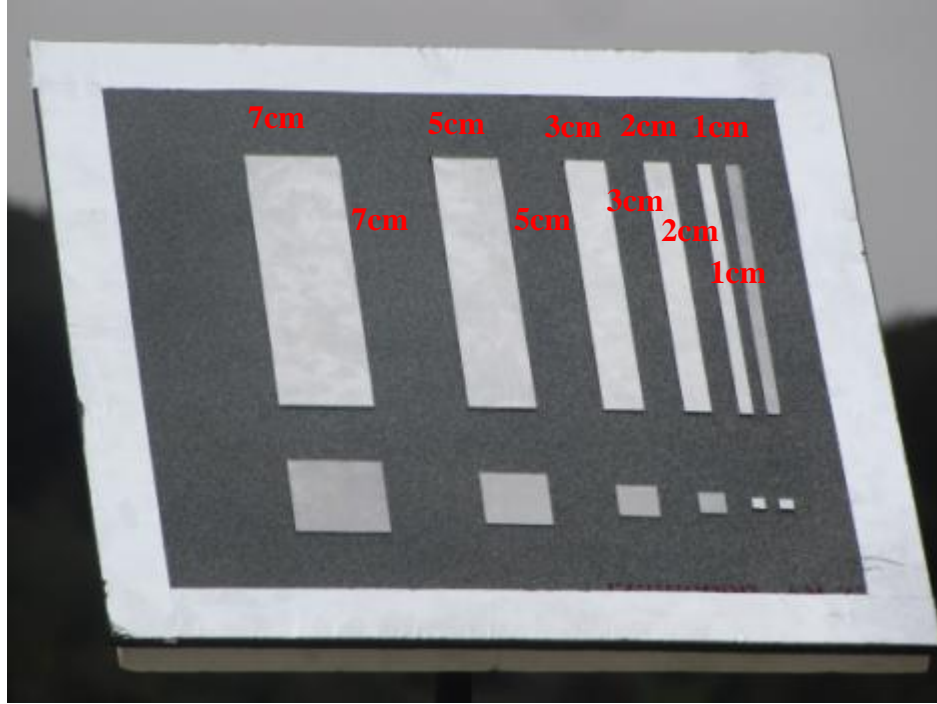
Sıcaklık °C (°K)	Alıcı Çıkışı (mV)	Hesaplanan Yük Gücü (W)
99,7 °C (372,7 °K)	-151,80	4,11654E-10
0 °C (273 °K)	-149,42	3,01534E-10
-197,4 °C (75,6 °K)	-143,95	8,35016E-11

**Şekil 4.9** Alıcı çözünürlük grafiği.

Yukarıdaki grafiğe göre alıcı çözünürlüğü 0.023mV/K'dir.

4.4 Alıcı Anten – Tarayıcı Adımı Görüntü Çözünürlüğü İlişkisi

Alıcı iki boyutlu tarayıcı ile hareket ettirildiğinden tarayıcı adım adedi toplanan veri miktarını belirler. Görüntüleme için sanal görüntü üzerinde ne kadar fazla nokta alınırsa görüntü ile ilgili o kadar çok bilgiye sahip olunur. Alıcı sanal görüntüyü oluşturan elektromanyetik dalgaları anten yardımıyla alır. Bu nedenle kullanılacak anten ve parametreleri toplanacak veriyi etkilediğinden önemlidir. Bu deneysel çalışma için özel bir hedef hazırlanmıştır.







Şekil 4.10 Anten ve tarayıcı ölçümü için hedef.

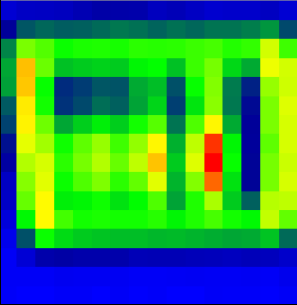
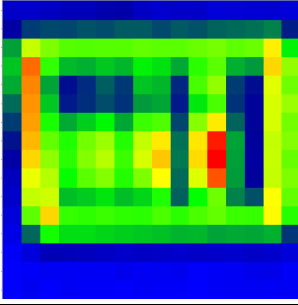
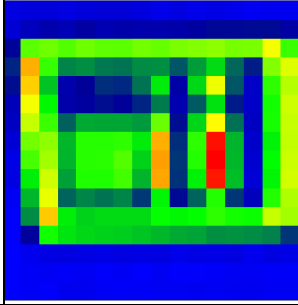
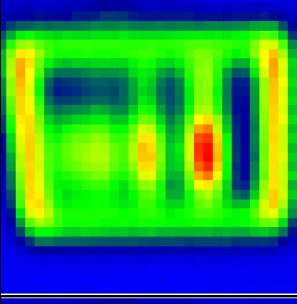
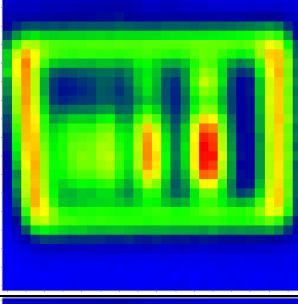
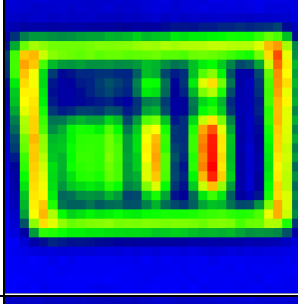
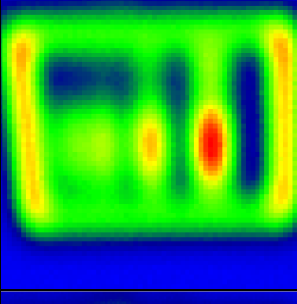
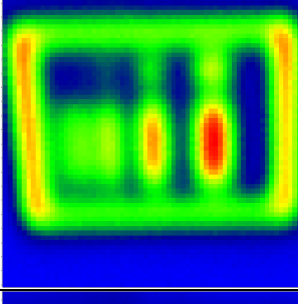
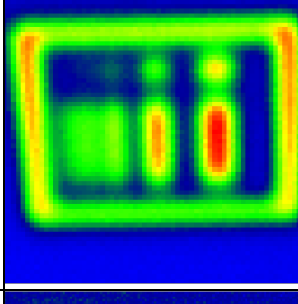
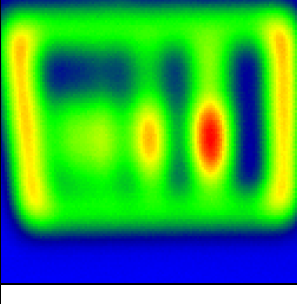
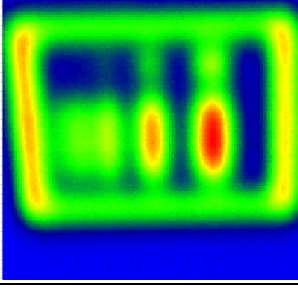
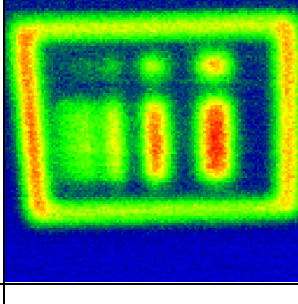
Hedef, 60cm × 60cm Eccosorb AN-73 elektromanyetik dalga soğurucu malzeme üzerine çeşitli boyutlarda metal parçadan oluşmuştur. Ölçüm alanının belirlenmesi için soğurucu çevresi 5cm genişliğinde metal bant ile kaplanmıştır. Buradaki amaç hangi anten ve tarayıcı adımı ile en iyi görüntü çözünürlüğü yakalamak olacaktır. Şekil 4.10 üzerinde hedef ile ilgili ölçümlendirmeler verilmiştir. Her metal plakadan sonra metal plaka genişliği kadar boşluk bırakılmıştır. Ayrıca her plakanın altına bir de genişlik boyutunda kare plaka eklenmiştir.

Çizelge 4.2 Kullanılan ticari antenler.

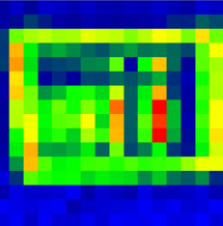
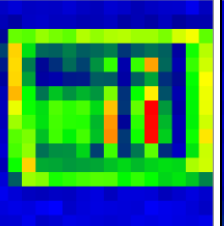
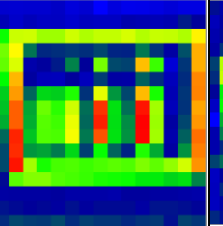
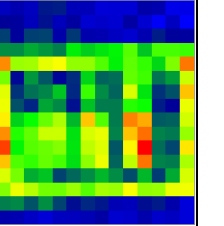
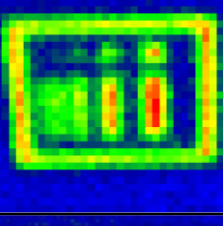
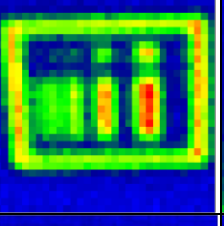
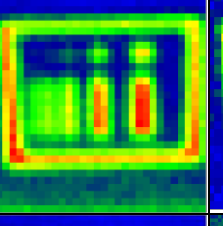
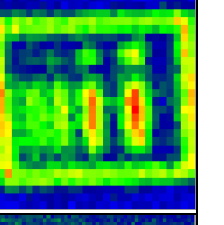
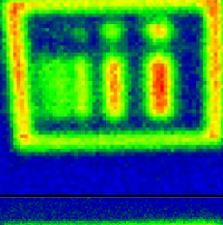
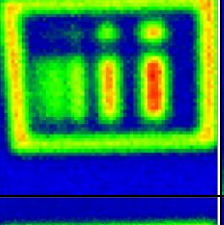
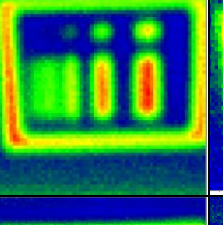
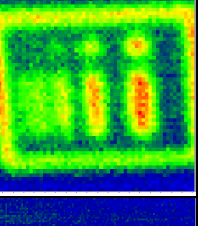
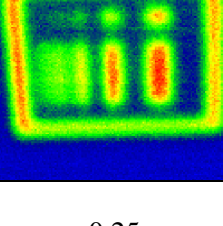
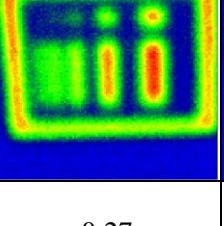
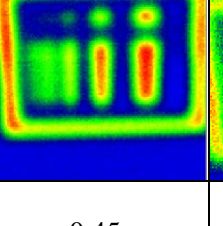
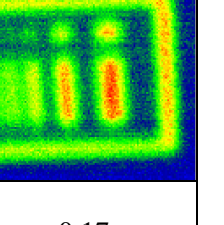
	Dairesel Horn 1	Dairesel Horn 2	Piramit Horn 1
Resim			
Açıklık Alanı (mm ²)	7854	1256	448,6
VSWR (80GHz - 100GHz)	1,1	1,1	1,15
Kazanç (dB)	35	27	23
E Alan HPBW (°)	3,5	6	10
M Alan HPBW(°)	3,5	6	12

Çizelge 4.3 MİLTAL antenler

	Piramit Horn 2	Piramit Horn 2 Dielektrik Anten ile birlikte	Dielektrik Anten	Açık Dalga Klavuzu
Resim				
Açıklık Alanı (mm ²)	14,6	110,4	95,3	3,2
VSWR (80GHz -100GHz)	1,25	1,3	1,5	1.5
Kazanç (dB)	12	14	16	8
E Alan HPBW (°)	40	40	28	65
M Alan HPBW(°)	45	40	28	75

Tarayıcı Adımı	Dairesel Horn 1	Dairesel Horn 2	Piramit Horn 1
5mm			
2,5mm			
1,2mm			
0,6mm			
En Yüksek Çıkış (V)	1,27	1,25	1,18

Şekil 4.11 Ticari antenler ölçüm sonuçları.

	Piramit Horn 2	Piramit Horn 2 Dielektrik Anten ile birlikte	Dielektrik Anten	Açık Dalga Kılavuzu
5mm				
2,5mm				
1,2mm				
0,6mm				
En Yüksek Çıkış (V)	0,25	0,27	0,45	0,17

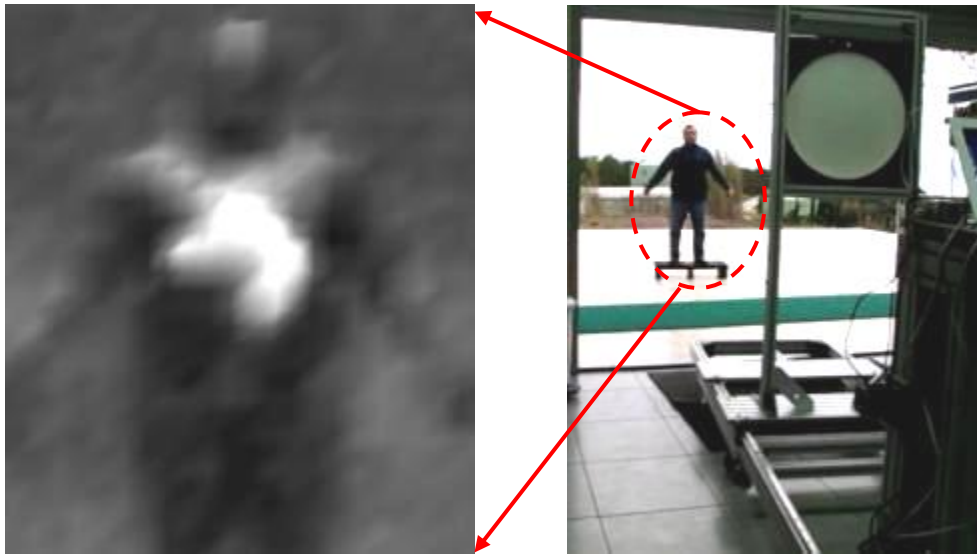
Şekil 4.12 MİLTAL antenleri ölçüm sonuçları.

Yapılan deneysel çalışmalarda görüldüğü üzere tarayıcı adımının küçülmesi ile hedef ile ilgili daha detaylı bilgilere sahip olunuyor. Ayrıca tarama adımının 1,2 mm ve daha küçük olması durumunda 3cm çözünürlükteki hedeflerin görüntülenmesi mümkün olacaktır. Kullanılan antenlere göre elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Özellikle kazancı yüksek antenlerden yüksek çıkış gerilimi elde edilmesine rağmen açıklık alanları büyük olduğundan görüntü detay bilgisi elde edilememektedir. Bu nedenle alıcı için gerekli kazançta sahip (12dB ve üzeri) ve açıklık alanı pirmit horn 2'ye yakın olan antenler sistemimizde kullanılabilir. Sistemde antenler yakın alan sonda (prob) gibi kullanıldıklarından sistem çözünürlüğü anten açıklık alanı ile doğrudan bağlantılıdır.

4.5 Kişi Üzeri Gizli Obje Görüntüleme

Bu çalışmamızda gerçekleştirilmek istenen hedef, kişi üzeri gizlenmiş objelerin güvenli bir uzaklıktan görüntülenmesinde THz dalgaların kullanılabilirliğini deneysel bir düzenek ile gerçekleştirmektir. Gerçekleştirilen deneysel ölçüm düzeneği ile 6-10 m arası insan üzeri 5cm'den büyük metal nesnelerin pasif yöntem ile görüntülenmesi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.14'de hedef giysi altına yerleştirilmiş 30 cm uzunluğunda metal (Alüminyum) model silah yer almaktadır. Şekil 4.13'de 7mt mesafeden insan üzerine gizlenmiş metal model silah tespit edilmiştir. Ölçüm sistemi bir alıcı ve iki boyutlu Kartezyen tarayıcıdan meydana geldiğinden 64 x 64 nokta alınmıştır ve 4:30 dakika sürmüştür.



Şekil 4.13 Ölçüm sonucu ve ölçüm fotoğrafı.



Şekil 4.14 Hedef üzerine yerleştirilen metal model (30cm uzunlukta)

Bir diğerk çalışma Şekil 4.15`de gösterildiği şekilde gerçek silah ile yapıldı. Üzerindeki giysisi altında MP5 silah bulunan güvenlik görevlisi ile 7m uzaklıktan gerçekleştirildi. 64 x 64 nokta gerçekleştirilen ölçüm 4:30 dakika sürdü.



Şekil 4.15 Güvenlik görevlisi ölçümü

Yukarıdaki görüntülerden de görüldüğü üzere kişi üzeri gizlenmiş metal obje görüntülemesi pasif Terahertz yöntemle başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada tarayıcıdan hızından kaynaklanan nedenle görüntüleme süresi uzundur fakat alıcı dizisi ve hızlı tarayıcı ile saniyeden daha kısa sürede görüntü alınabilir. Optik görüntüleme ve kızılötesi (IR) görüntülemeye göre çözünürlük düşük olsa da kıyafet altı gizlenmiş objeleri optik kamera ile göremeyiz. Isı farkı yok ise de IR kamera ile görmek imkansızdır. X-Ray ile uzaktan görüntüleme kişi sağlığına zarar verdiğinden kullanılmamaktadır. Gelişimi devam eden terahertz kameralar yakın gelecekte özellikle havaalanları, bina ve alan girişleri gibi yerlerde kullanılabilir, ayrıca herhangi bir yayım yapmadığından sağlığa zararı yoktur.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, THz görüntüleme ve tanımlama sistemlerini öğrenmek, THz teknolojilerini kavramak ve uygulamak ilk hedefimiz olurken, THz alıcı ve yarı optik görüntüleme sistemlerinin ayrıntılı incelenmesi ve güvenlik uygulamalarında kullanılabilecek alternatif bir görüntüleme sistemi gerçekleştirilmesi tez çalışmasının diğer hedefidir.

Bu nedenle ilk olarak THz bölgesi ve THz dalgaların atmosferde yayılımı incelenmiş ve güvenli uzaklıktan görüntüleme gerçekleştirilmesi için kullanılacak bölge tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgede gerçekleştirilen tüm görüntüleme sistemleri ayrıntılı olarak incelenerek deneysel olarak gerçekleştirilecek yöntem olan pasif sisteme karar verilmiştir. Pasif sistem ile kullanılabilecek görüntüleme, tarayıcı ve THz alıcı yapıları incelenmiştir.

Sistem inceleme ve yöntem seçim aşamalarından sonra yapılacak deneysel çalışmanın gerçekleştirileceği deneysel görüntüleme düzeneği gerçekleştirildi. Bu düzende kullanılacak olan yarı optik görüntüleme sistemi için yalıtkan mercek geometrik optik eşitlikleri kullanılarak gerçekleştirildi. THz alıcı olarak ön yükselteçli doğrudan alıcı ticari olarak temin edilen THz düşük gürültülü yükselteç ve detektör ile gerçekleştirildi. Deneysel çalışma özelliklerine uygun Kartezyen tarayıcı ve veri toplama sistemi temin edildi. Teorik ve deneysel sonuçların değerlendirilmesi için gerçekleştirilen yalıtkan mercek ve alıcının parametreleri oluşturulan görüntüleme sistemi üzerinde ölçüldü. Ayrıca görüntü çözünürlüğünü iyileştirmek için tarayıcı adımı ve kullanılacak antenlerle ölçümler gerçekleştirildi ve ölçüm sonuçları en iyi görüntü çözünürlüğü için kıyaslama gerçekleştirildi.

Gerçekleştirilen deneysel düzenek ile güvenli uzaklıktan kişi üzeri gizlenmiş metal silah ve nesnelere görüntülendi. Elde edilen ham görüntü verileri incelendiğinde THz görüntüleme sistemlerinin uzaktan görüntüleme amacıyla güvenlik uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca elde edilen görüntü çözünürlüğü (3cm) benzer çalışma frekansını kullanan ticari ürünlerden (Brijot Gen2) daha iyidir. Mevcut sistemde görüntü elde etme süresi 4:30 saniyedir ve oldukça uzun

bir süredir. Tarayıcı sistemi değiştirerek ve alıcı dizileri oluşturarak görüntü süresinin saniyenin altına indirmek mümkündür.

Güvenlik görüntüleme uygulamalarında THz görüntülemenin X-Ray ve IR görüntüden daha kötü çözünürlükte görüntü elde edilmesine karşın bazı avantajları vardır. X-Ray ile uzaktan görüntüleme gerçekleştirilmesi zordur ve insan üzerine uygulaması sağlık açısından tehlikelidir. Yine vücut üzerinde aynı ısıya sahip bir metal IR kamerada görüntülenememektedir. Bu açıdan uzaktan görüntüleme de X-Ray öncesi ve IR`ın yetersiz olduğu durumlarda kullanılabilir.

Anten açıklığının görüntü çözünürlüğüne etkisi ile ilgili bir çalışma bu tez kapsamında ilk kez yapıldı. Literatürde anten açıklığının çözünürlüğe etkisi ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bakımdan çalışmanın THz görüntüleme sistemlerinde anten seçimi ve çözünürlük alanına katkı sunduğu düşünölmektedir. Ayrıca dünyada benzer çalışmalar olmasına rağmen bu tez kapsamında ölkemizde ilk kez THz görüntüleme teorik ve deneysel çalışması gerçekleştirildi. Tez kapsamında yapılan yalıtkan mercek ve düşük gürültölü THz alıcı yapıları da yine ölkemizde gerçekleştirilen ilk THz elektronik ve elektro-optik yapılarıdır. Bu bakımdan çalışmanın ölkemizde THz teknolojisi konularında katkı sağladığı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

- Appleby, R., "The History of Passive Millimeter Wave Imaging at QinetiQ" *Proceedings of the SPIE*, 7117:711702-711702-7 (2008).
- Arnone, D. "10 Emerging Technologies That Will Change Your World - T-Rays", *Technology Review* ,Şubat, 40 (2004).
- Bennett, C.L.; et al. "Four-Year COBE DMR Cosmic Microwave Background Observations: Maps and Basic Results". *Astrophysical Journal Letters*, 464: L1–L4(1996).
- Bjarnason, J.E., Chan, T.L.J., Lee, A.W.M., Celis, M.A., and Brown, E.R., "Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing", *Applied Physics Letters*, 85:4-26(2004).
- Boltzmann, L., "Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie", *Annalen der Physik und Chemie*, 22: 291-294(1884).
- Cheng, D.K., "Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri", (Editörler)Köksal, A., Saka, B., *Palme Yayıncılık*, Ankara, 2009.
- Committee on Assessment of Security Technologies for Transportation, National Research Council, "Assessment of Millimeter-Wave and Terahertz Technology for Detection and Identification of Concealed Explosives and Weapons", *The National Academies Pressy*, Washington, D.C.,2007.
- Coward, P.R., and Appleby, R., "Development of an illumination chamber for indoor millimeter-wave imaging". *Proceeding SPIE*,5077: 54-61(2003).
- Çetinkaya, H., Kizilhan, A., Tekbas, M., Demirci, S., Yigit, E., Ozdemir, C., Vertiy, A., "The Millimeter-wave ISAR Imaging of Concealed Objects", *XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, İstanbul,2011.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Daniels, D.J., “EM Detection of Concealed Targets”, **Wiley**, USA, 2009.
- Dengler, R.J., Cooper, K.B., Chattopadhyay, G., Mehdi, I., Schlecht, E., Skalare, A., Chen, C., Siegel, P.H., “600 GHz Imaging Radar with 2 cm Range Resolution”, **Microwave Symposium, IEEE/MTT-S**, Honolulu, 1371–1374(2007).
- Fleming, J.W., “High resolution submillimeter-wave Fourier-transform spectrometry of gases”, **IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques** 22: 1023–1025(1974).
- Grossman, E., Popovic, Z., “Terahertz metrology and instrumentation”, **Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)**, Washington, 264–265(2012).
- Kemp, M.C., “Millimetre Wave and Terahertz Technology for the Detection of Concealed Threats – A Review”, **Proceeding of SPIE**, 6402, 2006.
- Lee, J.J., “Lens Antennas”, **Antenna Handbook-Volume II Antenna Theory**, (Editörler) Lo, Y.T., Lee, S.W., **Van Nostrand Reinhold**, New York, 771-830(1993).
- Liu, H. B., “Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications”, **Proceedings of IEEE**, 95: 1514-1517(2007).
- Maagt, P.D., Haring P.B., and Mann, C., “Terahertz science, engineering and systems- from space to earth applications,” **Encyclopedia of RF and Microwave Engineering**, (Editör)Cheng, D.K., **John Wiley & Sons, Inc**, USA, 5175-5194 (2005).
- McMakin, D.L., Sheen, D.M., and Collins, H.D., “Remote Concealed Weapons and Explosive Detection on People Using Millimeter-wave Holography”, **Pacific Northwest National Laboratory, USA**, 2008.
- Özdemir, C., “Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms”, **Wiley**, New Jersey, 2012.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Özyüzer, L., “Terahertz Dalgaları Nedir?”, <http://web.iyte.edu.tr/~lutfiozyuzer/thz-tr.html>, 2009.
- Pergande, A.N., "History and challenges of passive millimeter wave imaging", *Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VI , Proceeding of SPIE* ,Salt Lake,8900: 2013.
- Pickett, H.M., Poynter, R.L., Cohen, E.A., Delitsky, M.L., Pearson, J.C., H.S.P. Müller, H.S.P., “Submillimeter, Millimeter, And Microwave Spectral Line Catalog”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 5(60):883–890 (1998).
- Qi, F., Tavakol, V., Schreurs, D., and Nauwelaers, B. “Limitations Of Approximations Towards Fourier Optics For Indoor Active Millimeter Wave Imaging Systems”, *Progress In Electromagnetics Research*, (109): 245-262(2010).
- Sato, M. And Mizuno, K., “ Millimeter-Wave Imaging Sensor”, *Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications*, (Editör)Minin, I., 2010.
- Siegel, P.H., "Terahertz Technology", *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 3(50), 2002
- Sinclair, G.N., Coward, P.R., Anderton, R.N., Appleby, R., Seys, T., and Southwood, P., “Detection of illegal passengers in lorries using a passive millimetre wave scanner”. *International Carnahan Conferance on Security Technology*, 167-170 (2002).
- Skou, N., Vine, D.L., “Microwave Radiometer Systems Design and Analysis”, *Artech Hause*, Boston,2006.
- Stefan, J., “ Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur”, *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*,(79):391-428(1879).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Strukov, I. A. and Skulachev, D. P., “Deep-Space Measurements of the Microwave Background Anisotropy”, *First Results of the Relikt Experiment, Moscow*, 1984.
- Sura, “Terahertz Poter”, <http://www.sura.org/commercialization/terahertz.html>, 2009.
- Vertii, A.A., Cetinkaya H., Tekbas M., “SUBSURFACE TOMOGRAPHY IMAGING AT SUB-TERAHERTZ AND TERAHERTZ FREQUENCY”, *International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, Kharkov, 2010.
- Vertiy, A.A., Ozbek, S. ; Pavlyuchenko, A. ; Tekbas, M. ; Kizilhan, A. ; Cetinkaya, H. ; Unal, A. ; Panin, S., “Passive Radiometric Imaging Systems in Millimeter Wavelength Range”, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Spokane, 2011.
- Yiğit, E., Unal, A., Demirci, S., Vertiy, A., Ozdemir, C., “An Adapted Matched Filter Algorithm for Millimeter Wave Ground Based Squint Mode SAR Applications”, *36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Houston, 2011.
- Yujiri, L., “Passive millimeter Wave Imaging”, *Microwave Symposium Digest (IEEE MTT-S International)*, San Francisco, 2006.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : MUSTAFA TEKBAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Turhal 10.06.1981

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce (ÜDS-51,25)
Bilimsel Faaliyetleri :

Cetinkaya H., **Tekbas M.**, Kızılhan A., Vertiy A., "Active Microwave and Millimeter-Wave ISAR Imagine and Millimeter-Wave Passive Radar Receiver Design", **RMSW-2010**, 2010.

Vertiy A., **Tekbas M.**, Kızılhan A., Panın S., Ozbek S., "Sub-Terahertz Imaging System for Concealed Weapon Detection", **PIERS-2010 Cambridge**, July 2010.

Vertiy A., Ozbek S., Pavlyuchenko P., Panin S., **Tekbas M.**, Kizilhan A., Cetinkaya H., Unal A., "*Short and Long Range Passive Imaging in Millimeter-wave Band*", **URSI GASS 2011**

İş Deneyimi

Stajlar : Buga OTIS Asansör A.Ş
Projeler : İleri Teknoloji Elektromanyetik Tomografi Görüntüleme Sistemi Geliştirilmesi (5075519)
Gizleme Ağı Sistemi (5075525)
Terahertz Teknolojisinin Kazanımı Projesi (5085513)
Çalıştığı Kurumlar : pvd Proses Ltd. Şti (2007 - 2008)
TÜBİTAK MAM ME (2008 – Devam ediyor)

İletişim

Adres :Gaziler M. 1761 S. No:29/2 Gebze-KOCAELİ
Tel :0536 234 65 61
E-Posta Adresi : mustafa_tekbas@msn.com

Tarih:
İmza