KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

PASİF MİLİMETRE DALGA GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK ALICI VE ANTEN GELİŞTİRİLMESİ

MUSTAFA TEKBAŞ

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

PASİF MİLİMETRE DALGA GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK ALICI VE ANTEN GELİŞTİRİLMESİ

MUSTAFA TEKBAŞ

Prof. Dr. Gonca ÇAKIR		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Prof. Dr. Bahattin TÜRETKEN		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç Dr. Sibel ÇİMEN		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Enes YİĞİT		
Jüri Üyesi,	**Uludağ Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Muhammet Hilmi NİŞANCI		
Jüri Üyesi,	**Sakarya Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Abdurrahim TOKTAŞ		
Eş Danışman,	**Ankara Üniversitesi**	

Enstitü Yönetim Kurulunun 22/05/2019 tarih ve 2019/20 nolu toplantısında II. tez danışmanı olarak atanmıştır.

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

■ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

□ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mustafa TEKBAŞ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Mustafa TEKBAŞ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Milimetre dalga (MMD) frekanslarının kullanılma ihtiyacının artması bu frekanslarda kullanılacak devre ve sistem teknolojilerine olan ilginin artmasına sebep olmuş ve bu konuda yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Haberleşme, algılama ve görüntüleme çalışmaları ve elde edilen çıktıların kullanımı artmıştır. MMD frekanslarının yeni ve bu banda özel bir uygulaması da pasif milimetre dalga görüntüleme (PMMDG) sistemleridir. Artan güvenlik sorunlarına her hangi bir yayım yapmadan – insan sağlığına olumsuz bir etki etmeden- çözüm olabilecek durumdadır. Bu özellikleri dolayısıyla güvenlik teknolojilerinde kendine yer bulmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında PMMDG sistemleri için hassas bir alıcı ve alıcı performansını ölçebilecek seviyede PMMDG sistemi tasarlanıp gerçekleştirilmiştir.

Doktora Tez Danışmanlığımı üstlenen, her zaman kendime örnek aldığım, bana sabırla yol gösteren, emeğini esirgemeyen, saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Gonca ÇAKIR'a kariyerime yaptığı paha biçilemez katkılarından dolayı minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez izleme jürimde yer alan ve her daim desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Sibel ÇİMEN ve Doç. Dr. Enes YİĞİT'e ve tez savunma sunumumda yer alan Doç. Dr. M. Hilmi NİŞANCI`ya ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezimde kurumsal (ikinci) danışmanım olan ve tez çalışmalarıma tecrübeleri ile katkıda bulunan hocam Doç. Dr. Abdurrahim TOKTAŞ'a yardımları ve desteği için teşekkürlerimi sunarım.

MMD frekanslarında çalışmaya başlamamdaki katkı ve desteği için Prof. Dr. Alexey A. VERTIY`e; bilgi, imkân ve tecrübelerini paylaşarak bu yolda ilerlememi sağlayan Prof. Dr. Bahattin TÜRETKEN`e her zaman müteşekkirim.

Tez çalışmasının tamamlanması için desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, kontrol ve yazılım kısımlarındaki yardımlarıyla deneysel çalışmaların tamamlanmasını sağlayan Ahmet KIZILHAN`a, Lisanstan Doktora tez çalışmama kadar olan süreçte her zaman yanımda olan Atilla ÜNAL`a, MMD devre çalışmalarından dolayı M. Sercan ERDOĞAN`a, mekanik tasarım katkılarından dolayı Mustafa KILIÇ ve Sertan SÜVARİ`ye, tez ve yayın çalışmaları; tez plan, hazırlık, yazım ve düzenleme aşamalarındaki motivasyonu, sonsuz desteği ve değerli zamanını ayırdığından dolayı Dr. Seda KÜL`e teşekkürlerimi sunarım. Onlarsız bu çalışmayı tamamlayamazdım.

Son olarak, desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşim Zarife TEKBAŞ`a ve çocuklarım M.Can ile M. Furkan`a, her daim yanımda olan babam Bekir TEKBAŞ`a rahmetli annem Fikriye TEKBAŞ`a en güçlü destekçilerim oldukları, bana ve işime duydukları güven, sabır, saygı ve takdirleri için sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Mayıs-2023 Mustafa TEKBAŞ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
1.1. LiteratürTaraması 3
1.2. Tez Çalışmasının Kapsamı 9
1.3. Tez Çalışmasının Amaç ve Hedefleri 10
2. PASİF MİLİMETRE DALGA GÖRÜNTÜLEME 11
2.1. EM Spektrum ve Milimetre Dalgalar 11
2.2. MMD Frekanslarının Avantajları ve Sınırlamaları 13
2.3. MMD Uygulamaları 14
2.4. MMD Görüntüleme 15
2.5. Pasif MMD Görüntüleme 16
2.5.1. PMMDG Temelleri 18
2.5.2. PMMDG Yapısı 22
2.5.2.1. Düşük Gürültülü Radyometrik Sensor (DGAS) 24
2.5.2.2. Yarı Optik Görüntüleme Sistemi (YOG) 25
2.5.2.3. Kontrol ve Data Toplama Sistemi 27
3. MALZEME VE YÖNTEM 28
3.1. PMMDG Çalışma Bandı Belirleme 28
3.2. PMMDG Hedef Özellikleri Belirlenmesi 31
3.3. Anten Tasarımı Çalışmaları 32
3.3.1. Dual Polarize Anten 33
3.3.2. Wr-10 Horn Anten 40
3.4. DGAS Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi 43
3.5. Yarı Optik Görüntüleme Sistemi 51
3.6. Kontrol ve Data Toplama Sistemi 54
3.7. Sistem Kurulumu ve Deneysel Çözünürlük Çalışmaları 55
3.8. Kişi Üzeri Görüntüleme Çalışmaları 58
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 62
KAYNAKLAR 65
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 68
ÖZGEÇMİŞ 71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Atmosfer zayıflatması....5
Şekil 1.2. Ülkemizdeki çalışmalar....8
Şekil 2.1. EM dalga gösterimi....11
Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrumun....12
Şekil 2.3. MMD Frekanslarının frekans tahsisi....12
Şekil 2.4. ABD Tahmini MMD pazar büyüklüğü....15
Şekil 2.5. PLANCK Uydusundan Temmuz 2018`de elde edilmiş KAI (ESA)....17
Şekil 2.6. 3K için spektrum karşılaştırması....20
Şekil 2.7. Planck Kanunundan sapma karşılaştırması....20
Şekil 2.8. Sıcaklığa bağlı yayılım spektrumu....21
Şekil 2.9. Kozmik arkaplan yayılımı ölçümü ve karşılaştırma....22
Şekil 2.10. Optik kamera....23
Şekil 2.11. PMMDG Diyagramı....23
Şekil 2.12. İdeal DGAS....24
Şekil 2.13. Gerçek alıcı yapısı....24
Şekil 2.14. Dielektrik lens kullanılan YOG sistemi....26
Şekil 2.15. Reflektör kullanılan YOG sistemi....26
Şekil 3.1. RF Konektörler....29
Şekil 3.2. Dikdörtgen dalga kılavuzu....30
Şekil 3.3. MS Hat grafiği....30
Şekil 3.4. Hedef durumu....32
Şekil 3.5. DPA yapısı a) Mikroşerit devre kartı, b) Kare dalga kılavuzu levhası, c) Kısa devre boşluk, d) Piramit Horn....34
Şekil 3.6. Mikroşerit devre kartı, a) Tek hattın büyütülmüş görüntüsü, b) Devre kartı....35
Şekil 3.7. Kare dalga kılavuz levhası....35
Şekil 3.8. Kısa devre boşluk....36
Şekil 3.9. Piramit horn....36
Şekil 3.10. DPA Simulasyon sonucu, a) Geri dönüş kaydı ve izolasyon, b) Tepe kazancı, c) 95GHz E düzlem kazanç , d)95GHz H yüzey kazanç....37
Şekil 3.11. DPA için parasitik eleman ekleme a) Parasitiksiz; b) I şekil, c) T şekil, d) Y şekil, e) Kısa devre hat, f) Nötürleme hattı....38
Şekil 3.12. S Parametreleri a) Parasitiksiz; b) I şekil, c) T şekil, d) Y şekil, e) Kısa devre hat, f) Nötürleme hattı....39
Şekil 3.13. Sonuç Karşılaştırma a) S parametreler, b) Tepe Kazançlar....40
Şekil 3.14. UG387-U\M Flanş yapısı a)Çizimi, b) Fotoğrafı....41
Şekil 3.15. Horn anten benzetim ve boyutları....41
Şekil 3.16. Horn anten a) Genişlik, b)En, c)Yükseklik, d) Sistem montajı....42
Şekil 3.17. Horn anten benzetim sonuçları a) 90GHz, b) 94GHz, c) 100GHz, d) Kazanç, e) Voltaj duran dalga oranı, e) Geri dönüş kaybı....43
Şekil 3.18. Çözünürlük analizleri a) NF-τ (B=10GHz) b) B-NF (τ=1mS)....44
Şekil 3.19. DGAS Yapısı a) Blok gösterimi, b)Görsel gösterimi....47
Şekil 3.20. WR-10 Dalga kılavuzu MS hat geçiş....48

Şekil 3.21. WR-10 Dalga kılavuzu MS hat geçiş araya girme kaybı 48
Şekil 3.22. DGAS Bağlantı arayüzü 49
Şekil 3.23. DGAS Fotoğrafı a) Kasa b)İç kartı.....50
Şekil 3.24. MMD üretim fotoğrafı.....50
Şekil 3.25. Hedef senaryosu.....51
Şekil 3.26. Lens geometrisi.....52
Şekil 3.27. Teflon dielektrik lens a) Üretim öncesi teknik çizim b) Üretilen lens 53
Şekil 3.28. Kartezyen tarayıcı.....53
Şekil 3.29. Yarı optik görüntüleme sistemi 54
Şekil 3.30. Tarama ve veri toplama topolojisi 54
Şekil 3.31. PMMDG Ölçüm Senaryosu.....55
Şekil 3.32. DGAS Mesafesi Ölçüm Sonucu 56
Şekil 3.33. PMMDG a) Ölçüm düzeneği b) Yazılım arayüzü.....56
Şekil 3.34. Ölçüm Ekran Sonucu.....57
Şekil 3.35. PMMDG a) 3D/2D görüntü b) Bir satır veri (Y = 40) c) 2D gri görüntü d) Hedef.....58
Şekil 3.36. Ölçümlerde kullanılacak hedefler. Bitki çayı (Solda), metal kuru-sıkı tabanca (Sağda).....59
Şekil 3.37. Ölçüm1 sonucu. a)Ölçüm fotoğrafı. b)PMMDGS ölçüm sonucu 60
Şekil 3.38. Ölçüm2 sonucu. a)Ölçüm fotoğrafı. b)PMMDGS Ölçüm sonucu c)Hedef yerleşimi (Metal).....60
Şekil 3.39. Ölçüm3 sonucu. a) Ölçüm fotoğrafı. b) PMMDGS Ölçüm sonucu c)Hedef yerleşimi (Organik).....61

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Alıcı yapıları 4
Tablo 1.2. PMMD`ler ve özellikleri.....6
Tablo 3.1. MMD Frekansları dalga kılavuzu boyutları 29
Tablo 3.2. MMD Frekans seçim tablosu.....31
Tablo 3.3. 94 GHz MMIC LNA`lar.....45
Tablo 3.4. 94 GHz Detektör diyotlar 46
Tablo 4.1. Alıcı karşılaştırma tablosu 63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Yüzey Alanı (m^2)
B	: Bant Genişliği
b	: Wien Yerdeğiştirme Sabiti ($2,8977684x10^{-3}mK$)
B_λ	: Dalga boyuna bağlı Işıma Spektrumu (W/m^3)
c	: Işık Hızı (m/s)
ΔT	: Alıcı Hassasiyeti (K)
E	: Enerji (J)
E_λ	: Dalga Boyuna Bağlı Yayılım Enerji Spektrumu
ε	: Yayım Katsayısı (Emissivity)
ε_r	: Dielektrik Sabiti
f	: Frekans (Hz)
h	: Planck Sabiti (J.s)
J^*	: Yayılan Yayım Miktarı ($W/m2$)
k	: Boltzman Sabiti ($W.m^{-2}K$)
λ_{peak}	: Yayımın Tepe Olduğu Dalgaboyu (m)
λ	: Dalga Boyu
n	: Kırılma İndisi
s	: Saniye
σ	: Stefan – Boltzman Sabiti ($Js^{-1}\ m^{-2}\ K^{-4}$)
τ	: Entegresyon Zamanı
T	: Termodinamik Sıcaklık (K)
2B	: İki Boyut

Kısaltmalar

ADC	: Analog to Digital Converter (Analog – dijital çevirici)
Amp	: Amplifier (Yükselteç)
COBE	: Cosmic Background Explorer (Kozmik Arkaplan Kaşifi)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DGAS	: Düşük Gürültülü Radyometrik Sensör
DPA	: Dual Polarize Anten
EM	: Elektromanyetik
FCC	: Federal Communications Commission (Federal İletişim Komisyonu)
FET	: Alan Etkili Transistör
GHz	: Giga Hertz
Hz	: Hertz
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IF	: Intermediate Frequency (Ara Frekans)
ITU	: International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
LNA	: Low Noise Amplifier (Düşük Gürültülü Yükselteç)

LO	: Local Oscillator (Yerel Üreteç)
LPF	: Low Pass Filter (Alt Geçiren Filtre)
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
ME	: Malzeme Enstitüsü
MİLTAL	: Milimetre Dalga ve Terahertz Araştırma Laboratuvarı
MMD	: Milimetre Dalga
MMIC	: Monolithic Microwave Integrated Circuits (Tümleşik Mikrodalga Entegre Devresi)
MS	: Mikrostrip
NATO	: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
NTIA	: National Telecommunications and Information Administration (Ulusal Telekominikasyon ve Bilgi Kurumu)
PEC	: Perfect Electric Conductor (Mükemmel Elektrik İletken)
pF	: Piko Farad
PMMDG	: Pasif Milimetre Dalga Görüntüleme
RA	: Radyometri Tabanlı Alıcı
SAVTAG	: Savunma ve Güvenlik Teknolojileri Araştırma Destek Grubu
SLC	: Sinle Layer Capacitor (Tek Katman Kapasitör)
SNR	: Signal to Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
TA	: Anten/Ortam Sıcaklığı
TN	: Alıcı Sıcaklığı
THz	: Tera Hertz
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknoloji Araştırma Kurumu
USB	: Universal Serial Bur (Evrensel Seri Veriyolu)
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Duran Dalga Oranı)
YOG	: Yarı Optik Görüntüleme Sistemi
ZBD	: Zero Bias Diode (Sıfır Bias Diyot)

PASİF MİLİMETRE DALGA GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK ALICI VE ANTEN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Elektromanyetik dalgaların en önemli kullanım alanları uzaktan algılama ve kablosuz haberleşme sistemleridir. Özellikle algılama sistemlerinde çözünürlük ihtiyacının, kablosuz haberleşme sistemlerinde ise veri hızı ve veri miktarı ihtiyacının artması bu sistemlerde kullanılan elektromanyetik dalga frekansının artmasına sebep olmuştur. Elektromanyetik frekans spektrumunda 30GHz – 300GHz (dalga boyu: 10-1mm) aralığını kapsayan kısma Milimetre dalga (MMD) frekansları denilmektedir. Son yıllarda, haberleşme teknolojileri (uydu haberleşme, 5. nesil hücresel haberleşme – 5G), radarlar (askeri savunma, erken uyarı, füze yön, araç çarpışma önleme, radyometri) ve görüntüleme sistemleri (uzaktan algılama, güvenlik, uzaktan kişi üzeri) için MMD frekansları kullanımı artmıştır. Kullanımın ve ihtiyaçların artması MMD frekanslarına özel teknolojilerin gelişmesine sebep olmuştur. Bu teknolojilerden birisi de Pasif MMD Görüntüleme (PMMDG) sistemleridir.

PMMDG sistemleri, hedefe doğru herhangi bir işaret göndermeyen, hedeften doğal yollarla yayılan dalgaları alarak görüntüleme gerçekleştiren pasif sistemlerdir. Bu özelliği ile sağlığa zararsız olması en büyük avantajını oluşturmaktadır. Bu sistemler özellikle artan güvenlik ihityaçları nedeniyle yakın mesafe kişi üzeri görüntüleme uygulamalarında kendine yer bulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; literatürde kullanılan ve rafta hazır entegre devreler ile PMMDG sistemleri için komponentler, küçük boyutlu (kompakt) ve hassas radyometri tabanlı alıcı (RA) ile anten geliştirmek ve bunları kullanarak uzaktan görüntüleme gerçekleştirmektir.

Tez çerçevesinde MMD içerisinde yer alan 90GHz-100GHz frekanslarında ayrık komponentler (detektör, düşük gürültülü yükselteç (LNA)) ile küçük boyutlu alıcı ve anten tasarımı gerçekleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Böylece görüntüleme sistemlerinde kullanılacak bütünleşik yapıda küçük boyutlu yüksek hassasiyetli alıcı gerçekleştirildi. Çalışmada, 20mmx20mmx85mm boyutları ve 0.238K hassasiyet değerleri elde edildi. Elde edilen ölçüm sonuçlarına ve boyutlarına göre bu alıcının PMMDG sistemlerinde kullanılabileceği görüldü.

Bu çalışmada gerçekleştirilen alıcı; bütünleşik yapısı, hassasiyeti ve boyutları ile literatürde yer edinmiştir. Bu boyutlarda elde edilen hassasiyet değeri bakımından benzersizdir.

Anahtar Kelimeler: Milimetre Dalga, Pasif Milimetre Dalga Görüntüleme, Radar, Radyometri.

DEVELOPMENT OF COMPACT RECEIVER AND ANTENNA FOR PASSIVE MILLIMETER WAVE IMAGING SYSTEM

ABSTRACT

The most important usage areas of electromagnetic waves are remote sensing and wireless communication systems. In particular, the increase in the need for resolution in sensing systems and the need for data rate and data amount in wireless communication systems has led to an increase in the frequency of electromagnetic waves used in these systems. In the electromagnetic frequency spectrum, the part covering the range of 30GHz – 300GHz (wavelength: 10-1mm) is called Millimeter wave (MMD) frequencies. In recent years, MMD for communication technologies (satellite communication, 5th generation cellular communication – 5G), radars (military defense, early warning, missile direction, vehicle collision avoidance, radiometry), and imaging systems (remote sensing, security, remote person-to-person) frequencies have increased. The increase in usage and needs has led to the development of technologies specifi to MMD frequencies. One of these technologies is Passive MMD Imaging (PMMDG) systems.

PMMDG systems are passive systems that do not send any signals toward the target but receive the waves emitted naturally from the target and perform imaging. With this feature, it is the biggest advantage of being harmless to health. These systems find a place for themselves in close-range on-person imaging applications, especially due to their increased security needs.

The aim of this study; Developing rack-ready integrated circuits and components for PMMDG systems, small-sized (compact) and sensitive radiometry-based receivers (RA), and antennae used in the literature and performing remote imaging using these.

Within the framework of the thesis, the design of a small-sized receiver and antenna with discrete components (detector, low-noise amplifier (LNA)) at 90GHz-100GHz frequencies in MMD has been studied. Thus, a small-sized high-sensitivity receiver with an integrated structure to be used in imaging systems was realized. In the study, 20mmx20mmx85mm dimensions and 0.238K sensitivity values were obtained. According to the obtained measurement results and dimensions, it was seen that this receiver can be used in PMMDG systems.

As a result, the receiver realized in this study; It is in the literature with its compact structure, sensitivity and dimensions. It is unique in terms of the sensitivity value achieved in these dimensions.

Keywords: Millimeter Wave, Passive Millimeter-Wave Imaging, Radar, Radiometry.

1. GİRİŞ

Elektromanyetik (EM) Dalgaların kullanılması, uzaktan algılama ve kablosuz haberleşme teknolojilerinin varolmasını sağlamıştır. Her iki teknolojinin de kullanım alanı artmaya devam etmektedir. Günümüzde uzaktan algılama teknolojilerinin artan çözünürlük ihtiyacı ve kablosuz haberleşme teknolojilerinin artan veri miktarı ihtiyacı kullanılan EM dalga frekanslarının artmasına sebep olmuştur. EM spektrum tüm EM yayılımı içeren bir Hertz`in altından başlayıp 10^25 Hertz`in üzerine kadar çıkan frekans aralığını kapsar. Bu binlerce kilometreden bir atom çekirdeği boyutunun bir kısmına kadar olan dalga boylarına karşılık gelir. Elektromanyetik frekans spektrumunda 30GHz – 300GHz frekans (dalga boyu: 10-1mm) aralığını kapsayan kısım Milimetre dalga (MMD) frekansları olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda, yüksek veri miktarı gerektiren kablosuz haberleşme teknolojileri (uydu haberleşme, 5. nesil hücresel haberleşme – 5G), yüksek çözünürlüklü radarlar (askeri savunma, erken uyarı, füze yön, araç çarpışma önleme, radyometri) ve görüntüleme sistemleri (uzaktan algılama, güvenlik, uzaktan kişi üzeri) için MMD frekansları kullanımı artmıştır. MMD frekanslarında dalga boyu 1mm-10mm arasında olduğunda dolayı kendine özgü problemleri ve çözümleri bir arada getirmektedir. MMD teknolojilerinin kullanımı bu alandaki entegre devre, komponent ve sistem teknolojilerinin de gelişmesini beraberinde getirmektedir. Ayrıca bu sayede bu frekanslara özgü teknolojilerde geliştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi de Pasif MMD Görüntüleme (PMMDG) sistemleridir.

Dünyada artan güvenlik ihtiyaçlarından dolayı uzaktan algılama ile ilgili çalışmalar artmaktadır. Özellikle kişi üzeri uzaktan algılama sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır. Günümüzde kişi üzeri gizlenmiş gizli nesneleri uzaktan algılama sistemleri; havaalanları, garlar, okullar, alışveriş merkezleri gibi insan giriş çıkışının yoğun olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Hedefe doğru herhangi bir işaret göndermeyen, kişi üzeri gizlenmiş gizli nesneleri uzaktan algılayan ve MMD kullanılan sistemlere Pasif MMD (PMMD) görüntüleme sistemleri denir. PMMDG sistemleri, sağlığa zararsız olması nedeniyle mevcut kullanılan X-ray teknolojilerine alternatif olmuştur.

Mutlak sıfırdan farklı sıcaklığı olan her nesne milimetre dalga yayınımı yapabilir. Yayılan dalganın gücü nesnenin ısısına ve yayım (emisivity) katsayısı değerine bağlıdır. Milimetre dalgaların giysilere, metalik olmayan nesnelere, sisli bulutlu ortamlara nüfuz

edebilir. PMMDG sistemleri, nesnelerin doğal yayılımını kullanan milimetre dalga frekanslarında görüntüleme yapan sistemlerdir. Bu sistemler nesnelerden yayılan elektromanyetik dalgaları hassas radyometrik alıcı ya da alıcılar ile toplayarak görüntü elde eden sistemlerdir. Bu sistemlerde nesnelerden yayılan doğal elektromanyetik dalgalar kullanıldığı için pasif sistemlerdir. Kullanılan diğer sistemlere (backscatter x-ray ve aktif milimetre dalga) göre görüntü kalitesi göreceli olarak düşük olsa da PMMDG`lerın temel avantajı yayın yapılmadığından insan sağlığına bir zararı yoktur ve daha uzak (güvenli) mesafeden (stand off distance) görüntüleme yapabilmesidir. Ayrıca olarak PMMDG gizlenebilir veya daha geniş alanı ve hareketli kişileri de görüntüleyebilir.

PMMDG, kişi üzeri gizlenmiş objelerin görüntülemesi ile artan güvenlik sorunlarının önemli bir kımına çözüm olabilir. Her hangi bir yayım yapmadığından dolayı sağlığa olumsuz bir etkisi yoktur ve özellikle çocuklar, hastalar ve hamileler olmak üzere herkes üzerinde kullanılabilir. Görüntüleme çözünürlüğü birkaç santimetre olabilir ve görüntüleme mesafesi 0.1m`den kilometrelere çıkabilmektedir. ((Siegel, 2002) ve (Kempt, 2007)).

PMMDG sistemleri üzerine çalışmalar 1990`ların sonlarına doğru MMD frekanslarında tekparça mikrodalga bütünleşik devre (MMIC) geliştirilmesi ile hız kazandı. Locheed Martin firmasının 1996 yılında 0.4 K hassasiyete sahip tek pixel PMMD alıcı sensörü ile giysi altındaki silahların görüntüsünü elde etmesiyle milimetre dalga görüntüleyiciler geliştirilmeye başlandı (Pernande, 2013). Bu tarihten sonra güvenlik uygulamaları, uzaktan algılama ve metroloji sistemleri için çeşitli yapıda ticari PMMDG sistemleri geliştirilmeye devam etmektedir.

PMMDG sistemleri genel olarak antenler, hassas alıcı sensörler, yarı optik görüntüleme sistemi ve veri toplama birimlerinden oluşur. Görüntüleme özellikleri bu birimlerin yapısını, özelliklerine ve birbirleri ile uyumuna bağlıdır. MMD sistemlerinin gerçekleştirilmesinde genellikle MMIC olarak adlandırılan özel yapılı bütünleşik devreler ve pasif devre elemanları kullanılır. Uyumsuz MMIC yapıların birlikte kullanılması ile geliştirilen geleneksel alıcı sistemleri, bant genişliği, kazanç, gürültü değeri ve fiziksel isterileri tam olarak karşılayamamaktadır. Bu nedenle, PMMD görüntüleme sistemlerine

yönelik MMIC yapılar kullanılarak geliştirilen sistemler kompakt tasarıma ve düşük gürültülü değerlerine sahip olabilmektedir.

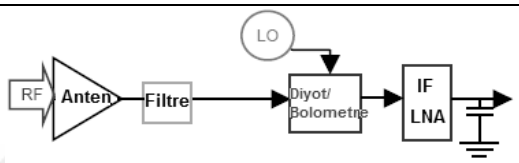
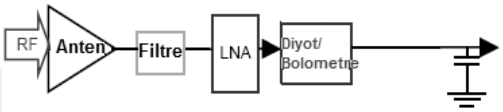
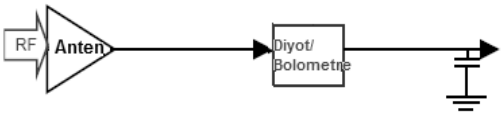
1.1. Literatür Taraması

Son yıllarda güvenlik gereksinimleri nedeniyle PMMD sisteminin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi önem kazanmıştır. Özellikle güvenli uzaklıktan kişi üzeri gizli/tehlikeli nesne görüntülemede sağlığa zarar vermemesi nedeniyle, bu sistem X-ışını teknolojisine alternatif olarak görülmektedir. Havaalanları, bina ve özel bölge girişleri kontrolü için sivil ve askeri amaçlı bir teknolojidir. PMMD algılayıcısı (sensörü) alıcı-anten çiftinden meydana gelmektedir. Alıcı ve anten özellikleri doğrudan sistemin görüntü performansını etkiler. Görüntü performansı bakımından sistemin birlikte tasarlanması önem arz etmektedir. Bu durumda alıcının hassas ve birlikte çalışacağı anten ile çalışma ve montaj özellikleri açısından uyumlu olması gerekmektedir. PMMD görüntüleme sisteminde kullanılan alıcı yapıları, sistem yapısına göre belirlenir ve sistem performansını etkileyen en önemli unsurlardır.Tablo 1.1'de gösterildiği gibi genel olarak üç alıcı yapısı vardır (Skou ve Vine, 2006). Ara katlı algılayıcı yapısında frekans düşürücü (Lokal Osilatör (LO) ile Diyot/Bolometre karıştırıcısı) kullanılarak ara frekans (IF) elde edilir ve bu çıkış algılayıcı çıkışı olarak kullanılır. Algılayıcı hassasiyeti iyi olmakla birlikte frekans dünüştürücü kısmı karmaşıklığı ve maliyeti artıran bir unsurdur. Çoklu alıcı yapıları için uygun değildir. Ön yükselteçsiz direk algılama ise antenden alınan işaretler doğrudan detektör ile gerilime çevrilerek çıktı elde edilir. Basit yapılarının yanında Detektör gürültü tabanı nedeniyle hassasiyet ve elde edilen görüntü kalitesi düşüktür. Bu yapının hassasiyeti ve elde edilen işaret seviyesinin artırılması için anten ile detektör arasına düşük gürültülü alıcı (LNA) yerleştirilerek ön yükselteçli alıcı elde edilir. Ön yükselteçli direk algılama yapısı PMMDG sistemleri için hassasiyet/maliyet dengesi en iyi çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

PMMDG sistemleri için hedef ile görüntüleyici arasındaki ortam atmosfer olduğundan hedeften gelen işaretlerin en az zayıflayacağı MMD frekans bantlarında çalışılması gerekmektedir. Böylece PMMDG sistemine gelen işaretler en yüksek güç seviyesinde gelebilecektir. MMD frekans bandlarında atmosfer kayıplarının düşük olduğu bölgeler Şekil 1.1`de görüldüğü gibi 35GHz, 94 GHz, 140 GHz ve 220 GHz frekansları civarıdır. Düşük frekanslarda yüksek bant genişliği elde etme ve çok yüksek frekanslarda ise ticari

komponent bulma zorluğu mevcuttur. Yüksek bant genişliği görüntü çözünürlüğünü ve alıcı hassasiyetini doğrudan etkileyen özellik olduğundan dolayı PMMDG sistemlerinde zorunlu bir özelliktir. Günümüzde PMMDG sistemleri düşük atmosfer frekanslarında gerçekleştirilse de 94GHz frekanslarında uygulamaların daha yoğun olduğu görülmektedir.

Tablo 1.1. Alıcı yapıları

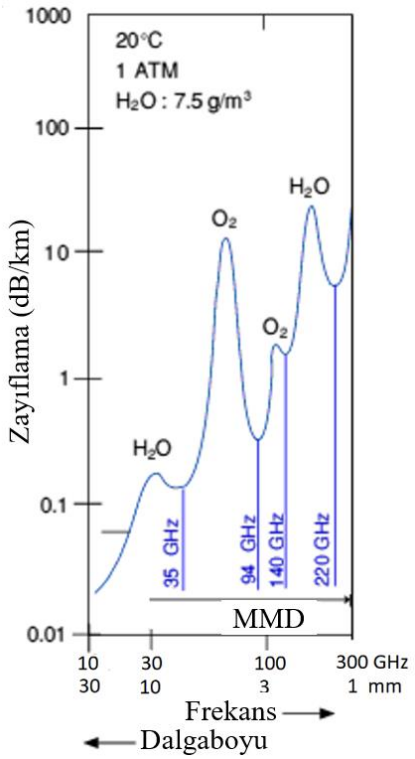
Yapı	Hassasiyet	Maliyet	Blok Diyagram	Frekans Limiti
Ara katlı Algılayıcı (Heterodin)	İyi	Yüksek		1 THz
Direkt algılama (Ön yükselteçli)	İyi	Fazla		200 GHz
Direkt algılama (Ön yükselteçsiz)	Kabul edilebilir	Düşük		600 GHz

Alıcı hassasiyeti görüntü kalitesi açısından çok önemlidir. Buradaki hassasiyet alıcı tarafından algılanabilecek en küçük giriş gücü değişimidir ve termal değer ΔT (K: Kelvin) olarak ifade edilir.

PMMD alıcılarda hassasiyet, çalışma bandının geniş olması ve düşük gürültü figürü gibi parametrelerle değerlendirilmektedir. Bu nedenle, alıcıların hassas, basit, küçük yapılı ve düşük maliyetli olması tercih sebebidir.

Alıcılar, ticari MMIC'ler kullanılarak özel olarak tasarlanırlar. PMMD ve sistem parçaları ile ilgili çalışmalar, 2000`li yıllardan itibaren ağırlık kazanmıştır. Bu çalışmaların çıkışı güvenlik, askeri ve savunma amaçlı olduğundan dolayı sadece temel özellikleri paylaşılmıştır. Teknolojik üstünlükleri yada teknoloji ile birlikte elde ettikleri kazanımlar bilimsel ve ticarı kaygılardan dolayı ayrıntılı açıklanmamıştır. Bununla birlikte literatürde

yer alan en başarılı ticari ve/veya geliştirilen çalışılan erişilebilir uygulamalar incelenmiştir. PMMDG uygulamalarını içeren çalışmalar ve temel özellikleri Tablo 1.2' de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Atmosfer zayıflatması

Qinetiq firmasının kamu ve üniversiteler ile yaptığı çalışmaların sonucu elde ettiği çıktılar, bu teknolojiye öncülük etmiştir. İlk çalışmalar Sinclair ve arkadaşları tarafından 35 GHz frekansında güvenli uzaklıktan araç içi görüntülemek için yapılmıştır. 35 GHz sistem ile ilgili alıcı, MMIC tabanlı alıcı dizisi kullanılmıştır (Sinclair ve diğ., 2001).Alıcı çıkışı, dalga kılavuzu olduğundan anten olarak buna uygun dielektrik çubuk anten kullanılmıştır. Elde edilen görüntü kalitesi düşük olduğundan alıcıya ait hassasiyet değeri çizelgede verilmemiştir.

Qinetiq firmasının ikinci ürünü Appleby ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olan SPO20 sisteminde ise daha iyi görüntü elde etmek için çalışma frekansı 94GHz'e çıkarılmıştır. Sistem alıcısında MMIC tabanlı ön yükselteçli alıcı yapısı kullanılmıştır. Alıcı hassasiyeti 5K civarına yükseltilmiştir (Appleby, 2008). Bu nedenle görüntü kalitesi iyileşmiş ve görüntüleme sistem boyutu küçülmüştür. Alıcı hassasiyetinin yeterli

olmaması nedeniyle, SPO20 ürünü ancak düşük çözünürlüklü görüntü üretebilmiştir (Appleby, 2008).

Tablo 1.2. PMMD`ler ve özellikleri

No	PMMDG Adı	Frekans	Hassasiyet	Kaynak
1a	Qinetiq	35 GHz	0.28	(Sinclair ve diğ., 2001)
1b	QinetiqSPO Serisi	94 GHz	5K	(Appleby, 2008)
2a	Sago Trex ST150	75GHz– 93GHz	2-5K	(Clark ve diğ., 2003)
2b	Sago Trex RTI	94 GHz	6K	(Lovberg ve diğ., 2007)
3	Northrop Grumman	84GHz – 94GHz	2K	(Yujiri, 2006)
4	Farran Technology	94 GHz, 140 GHz	1K	(Vizard ve Doyle, 2006)
5	Tohoku University	77 GHz	1K	(Sato ve diğ., 2009)
6	ThruVision T Serisi	250 GHz	1-1.5K	(Mann, 2009),(Mann 2014)
7a	TÜBİTAK MRC	94 GHz	0.67K	(Vertiy ve diğ., 2011)
7b	Tekbaş Yüksek Lisans Tez	82-102 GHz	0,24K	(Tekbaş, 2014)
8	Alfa Imaging (7FP)	94 GHz	0.7K	(Alexander ve diğ., 2013)
9	Manchester Metropolitan University	22 GHz, 94 GHz, 183 GHz	-------	(Salmon 2014, Salmon 2015)
10	TeraScreen	360 GHz	-------	(URL-1)
11	Helical Scanning	94 GHz	-------	(Meng ve diğ., 2018)
12	Direct-Conversion Focal-Plane Array Receiver	94 GHz	-------	(Korolyov ve diğ., 2022)

Clark ve arkadaşları tarafından geliştirilen Sago Trex PMMD sisteminde, tarama hızı nedeniyle alıcı yapılarının gürültü değeri yüksek olduğundan hassasiyeti düşük olmuştur. Bu problemin üstesinden gelmek için çalışmada mekanik tarama yerine dalga kılavuzu slot (yarık) anten kullanılmıştır (Lovberg ve diğ., 1996), (Clark ve diğ., 2003) ve (Lovberg ve diğ., 2007). Slot Anten ile veri toplama yöntemi dizi yapıları için uygun olmasına rağmen tek sensör uygulamaları için uygun değildir.

Yujiri ve arkadaşları tarafından bildirilen Northrop Grumman (NGC) firmasının ürünlerinde MMIC tabanlı ön yükselteçli alıcılar ile birlikte mikroşerit lineer slot anten kullanılmış ve alıcı hassasiyeti 2K'ya kadar düşürebilmişlerdir (Yujiri, 2006).

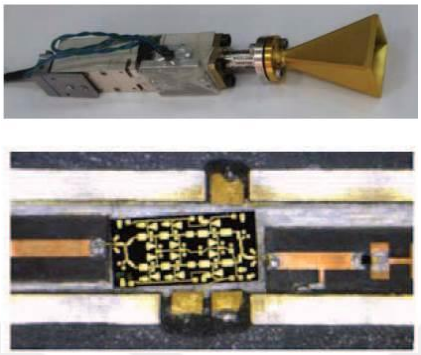
Vizard ve arkadaşları tarafından bildirilen Farran Technology firmasının sistemi 77GHz, 94 GHz ve 140 GHz pasif alıcılardan oluşturulmuş bir görüntüleme sistemidir. 94 GHz alıcı yapısı, kaskat bağlanan 3 adet düşük gürültülü yükselteçden (LNA) ve diyot detektörden oluşmaktadır. Alıcının toplam kazancı 45 dB ve gürültü figürü 5.5 dB olmasına rağmen büyük yapısından dolayı pratik kullanıma elverişli değildir (Doyle ve diğ., 2004) ve (Vizard ve Doyle, 2006).

Sato ve arkadaşları Tohoku Üniversitesinde 77GHz de çalışan bir PMMDG sistemi gerçekleştirdiler. Dieletrik Lens tabanlı görüntüleme sistemini kullanan bu yapıda alıcı dizisi ve hareketli metal plaka kullanılmıştır. Saniyedeki 4 adet görüntü alması ve 1K civarında elde edilen hassasiyete rağmen görüntü çözünürlüğü yetersiz kalmıştır.

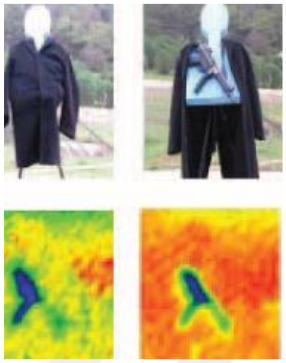
Ülkemizdeki ilk çalışmalar TÜBİTAK MAM ME MİLTAL`da 2009 yılında başlamıştır. Gerçekleştirilen ilk alıcı ön yükselteçli direkt algılama modül tip alıcıdır ve W bantta gerçekleştirilmiştir (Vertiy ve diğ., 2011). Alıcı ve anten ticari modüllerden oluştuğu için görüntüleme sistemi için nispeten büyüktür. Birçok modülün birleştirilmesinden oluşması, her modülün ayrı ayrı güç besleme ihtiyacı ve sadece dalga kılavuzu antenlerin kullanılması gibi dezavantajları vardır. Diğer alıcı ise yurt dışından temin edilmiştir. Alıcı kompakt olmasına rağmen kendisinden oldukça büyük bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Ancak burada sistem ve antenin uyumsuz olmasından dolayı ek kayıplar oluşmuştur. Alıcı ve antenlerin bu dezavantajına rağmen elde edilen ilk görüntüler Şekil 1.2`de verilmiştir. Bu çalışmalardan sonra Prof. Dr. Bahattin TÜRETKEN yürütücülüğünde SAVTAG tarafından desteklenen "Terahertz Teknolojisinin Kazanımı Projesi" kapsamında ilk alıcı ve görüntüleme cihazı ülkemizde geliştirilmiştir (URL-2).

Alexander ve arkadaşları tarafından bildirilen Alfa Imaging PMMD Alıcı sisteminde alıcı tasarımı, ön yükselteçli algılama tipindedir. Kullanılan çok katlı PCB ve pirinç alttaş ile kompakt yapıdadır. Kullanılan MMIC LNA ve detektör diyot bu proje sayesinde geliştirilmiştir. Böylece 0.7 K hassasiyet elde edilmiştir (Alexander ve diğ., 2012) ve (Alexander ve Allona., 2013). Ön yükselteç kazancının yeterli olmaması nedeniyle

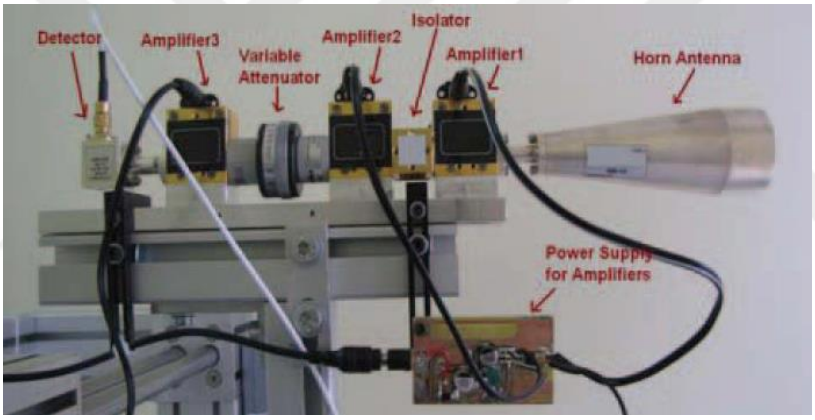
yüksek kazançlı corrugated konik huni anten kullanılmıştır. Anten ve alıcı ikilisinin bütünleştirilmesi görüntüleme sistemine montajda dezavantaj oluşturur. Antenin alıcıdan daha büyük olması, kompakt yapıyı bozmaktadır. Bu sistem için görüntü değerlendirmesine göre tek ön yükselteç yeterli değildir.



a)Yurt dışı temin edilen alıcı ve MMIC



b) İlk Görüntüler



c) Modüller ile gerçekleştirilen alıcı

Şekil 1.2. Ülkemizdeki çalışmalar (Vertiy ve diğ., 20119) ve (Tekbaş, 2014)

Manchester Metropolitan Üniversitesinde Salmon ve arkadaşları çalışmalarında 22 GHz, 94 GHz ve 183 GHz frekanslarında farklı sayılarda alıcı kullanarak 3 boyutlu görüntü elde etmeyi amaçlamışlardır (Salmon 2014, 2015). Üç boyutlu görüntüleme henüz gerçekleştirilememiş olmakla birlikte çalışmaları hala devam etmektedir. Sistemde karmaşık bir donanım yapısı ile birlikte özel işaret işleme teknikleri kullanılmıştır.

TeraSCREEN, Avrupa Birliği 7nci çerçeve destek kapsamında 54 ay süre ile 4.8M€ bütçeli 11 ortaklı PMMDG geliştirme projesidir. Proje kapsamında özel algılayıcılar ile

360GHz frekanslarında karmaşık yapılı bir PMMDG gerçekleştirilmiştir. Özellikle bu proje sayesinde 100GHz ve üstü MMD komponent geliştirilmesi hızlanmıştır.

Korolyov ve arkadaşları 94 GHz merkez frekansında görüntüleme sistemi gerçekleştirdiler. Bu çalışmada PMMDG sistemi pasif olmak ile birlikte görüntü kalitesini artırmak için hedef üzerine MMD işaret üreteci ile aydınlatma yapılmıştır. Bu kullanım bazı görüntülerde başarılı olmak ile birlikte saçılma problemleri ve sistemde fazladan kaynak ihtiyacını beraberinde getirmiştir.

Bu çalışmalar değerlendirildiğine tasarlanan alıcıların yeterli hassasiyete sahip olmadıkları, hassas olan alıcıların ticari olarak elde edilemeyeceği, bazı PMMDG sistemlerinin karmaşık ve büyük yapılı oldukları ve görüntü çözünürlüklerinin nispeten düşük olduğu gözlenmektedir. Ayrıca sunulan bu çalışmalar da hızlı hareketten kaynaklı bozulmaların giderilmesine dair herhangi bir sinyal işleme veya optimizasyon tekniğinin kullanılmadığı görülmektedir. Günümüzde de hem donanım hem mekanik tarafta PMMDG sistemlerinde çalışmalar devam etmektedir. Kontrol ve yazılım tarafında ise elde edilen görüntü verilerinin görüntü işleme, yapay zeka gibi yazılım araçları ile iyileştirilmesi devam etmektedir.

1.2. Tez Çalışmasının Kapsamı

PMMDG sisteminin tasarımından kaynaklı gürültüler ve tarama mekanizmasından kaynaklı bozulmaların önlenebilmesi için sistem parçalarının bütün olarak ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada yüksek hassasiyete sahip kompakt PMMD alıcının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Hedeflanan alıcı hassasiyeti görüntüleme çalışmalarında kullanılabilecek seviyede ve benzer boyutlu alıcılardan daha iyi değerde olması sağlanacaktır. Bu çalışmada, geniş bant, düşük gürültülü, yüksek hassasiyetli kompakt PMMD alıcı donanımının tasarlanması, gerçekleştirilmesi ve buna uyumlu bağlantı arayüze sahip en az 15 dBi kazanca sahip ve çalışma bandında en fazla 3dB kazanç değişimi olan bir antenin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca çalışmada geliştirilecek PMMDG sistemiyle metal ve metal olmayan test hedeflerine ait görüntülerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylece gerçekleştirilecek hassas alıcı ve anten yapılarının görüntüleme özellikleri ölçülebilecektir.

1.3. Tez Çalışmasının Amaç ve Hedefleri

Düşük gürültü oranına sahip yüksek çözünürlüklü PMMDG sisteminin tasarlanıp üretilmesinin planlandığı bu çalışmanın amaçları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Yüksek hassasiyetli, kompakt PMMD alıcı donanımının tasarlanması ve gerçekleştirilmesi,
- Alıcı ile fiziksel olarak uyumlu geniş bant bir anten tasarlanması,
- Geliştirilecek olan PMMDG sistemiyle test hedeflerine ait pasif radar görüntülerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.
- Bu çalışmada dört ana hedef bulunmaktadır;

Kompakt Yapı: Mevcut sistemler farklı yapıların bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu çalışmada birbirine uyumlu MMIC yapıların kullanılmasıyla hem kompakt bir yapı hem de yüksek hassasiyetli bir sistem geliştirilecektir.

MMD Komponent: PMMDG sistemi için gerekli olan Anten, detektör, LNA gibi komponentlerin çalışma içerisinde alıcıyı en optimum gerçekleştirecek şekilde tasarlanıp gerçekleştirilmesi.

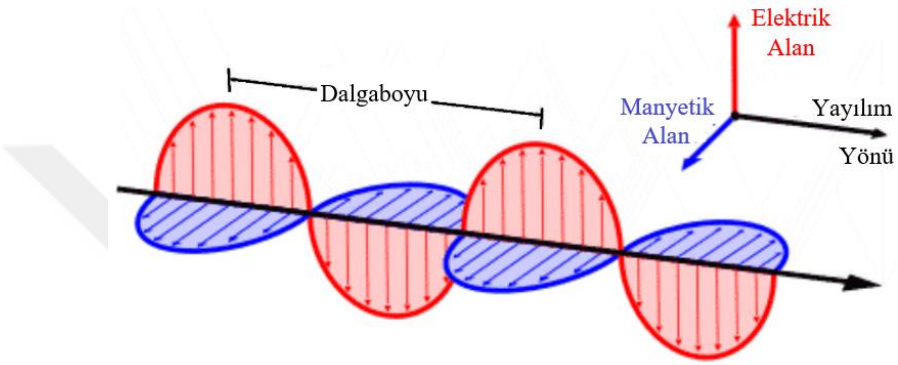
Yüksek Hassasiyet: Günümüze kadar yapılan çalışmalarda sistem hassasiyeti en fazla 0,67 K değerine kadar düşürülmüştür. Bu çalışma ile 0,5 K değerinin altı hedeflenmektedir.

PMMDG Sistemi: Tek bir alıcıdan görüntü elde edebilecek en az 300mm x 300mm 2D hareket edebilen deneysel görüntüleme sisteminin gerçekleştirilmesi.

2. PASİF MİLİMETRE DALGA GÖRÜNTÜLEME

2.1. EM Spektrum ve Milimetre Dalgalar

Elektromanyetik (EM) dalgalar, elektronların ya da fotonların yüksek hızlarla hareket etmeleri sonucunda oluşur. Manyetik alan ve Elektrik alan bileşenlerinden meydana gelir. Serbest uzayda bu iki alan birbirine diktir ve elektromanyetik dalgalar her iki alana dik bir doğrultuda yayılır. Şekil 2.1`de bir gösterimi verilmiştir.



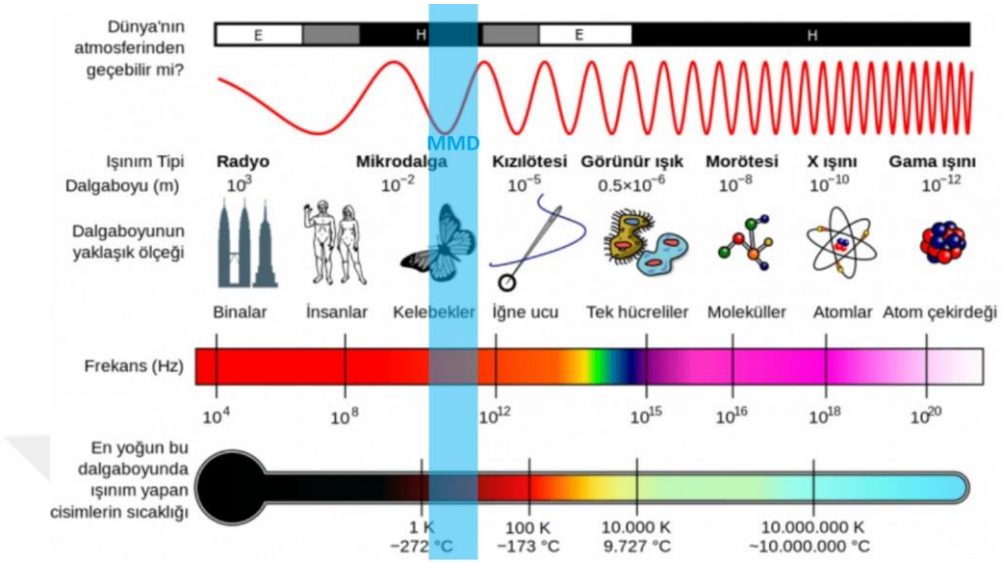
Şekil 2.1. EM dalga gösterimi

Elektromanyetik spektrum terimi, tüm frekanslar için elektromanyetik yayılıma karşılık gelir; elektromanyetik yayılım, enerji taşıyan hareketli fotonlar tarafından oluşturulur ve hem dalga hem de parçacık olarak hareket ederler. Elektromanyetik yayılımın ilk keşfi William Herschel tarafından yapılmış ve Elektromanyetik dalgalarını tanımlayan yasalar, Hertz, Faraday, Ampere, Coulomb ve Maxwell gibi bilim insanlarının çalışmaları sayesinde 20nci yüzyılın başlarında belirlenmiştir. Her biri bu yasalara kendi katkısını yapmıştır ancak modern elektromanyetik teorinin temeli olan sonuçları bir araya getiren James Clerk Maxwell olmuştur. EM dalgalar serbest uzayda ışık hızında (c= 3.00 x 10^8 m/s) hareket ederler. Böylece bir periyodunun boyu dalga boyu (λ) olarak tanımlanır. Ayrıca bir saniyedeki tekrar sayısı frekansını (f) verir ve birimi Hertz (Hz)`dir. Bu durumda EM dalga ışık hızı, frekans ve dalga boyu ilişkisi Denklem (2.1) ile gösterilir.

$$c = \lambda f \tag{2.1}$$

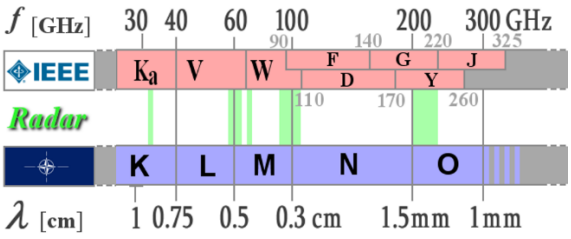
EM spektrum tüm EM yayılımı içeren bir Hertz`in altından başlayıp 10^25 Hertz`in üzerine kadar çıkan frekans aralığını kapsar. Bu binlerce kilometreden bir atom çekirdeği

boyutundan daha küçük olan dalga boylarına karşılık gelir. Tüm spektrumun örnek bir gösterimi ve MMD`nin spektrumdaki yeri (mavi çubuk) Şekil 2.2`de verilmiştir.



Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrumun

EM frekans spektrumunda 30GHz – 300GHz frekans (dalga boyu: 10mm -1mm) aralığını kapsayan kısım Milimetre dalga (MMD) frekansları olarak adlandırılmaktadır. Bu adlandırma dalga boyu seviyesinin milimetre boyutunda olmasından kaynaklanmaktadır. MMD ilk olarak 1894-1896'daki deneyler sırasında 60 GHz'e kadar frekans dalgaları üreten Hintli fizikçi Jagadish Chandra Bose tarafından araştırıldı (Bose 1896). Uluslararası Telekomünikasyon Birliğine (ITU) göre Son derece yüksek frekans (EHF) olarak isimlendirilmektedir. MMD frekanslarının Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) ve Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) standartlarında frekans tahsisi ve isimlendirilmesi Şekil 2.3`de verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.3 üzerinde uzaktan algılama için yoğun kullanılan frekanslar RADAR olarak yeşil ile işaretlenmiştir.



Şekil 2.3.MMD Frekanslarının frekans tahsisi

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulusal Telekominikasyon ve Bilgi Kurumu (NTIA) ile Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından 2022 yılında yayımlanan frekans tahsisi tablosunda (FCC Online Table Of Frequency Allocations) MMD frekanslarının tüm tahsisi verilmiştir. Tüm bant; haberleşme, araştırma uygulamaları, radyoastronomi ve radarlar için ayrılmıştır. Bunun sonucunda MMD frekanslarında komponent, devre ve sistem geliştirmekte giderek artmaktadır. 5nci nesil hücresel haberleşme frekanslarının bir kısmı, otomobil radarları, milimetre dalga görüntüleyiciler, uydu haberleşmesi, noktadan noktaya yüksek hızlı veri uygulaması ve askeri radarlar olmak üzere birçok uygulama için artarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalrdan bir tanesi de PMMDG sistemleridir. PMMDG sistemleri için kullanılan frekansların birçoğu (35GHz, 77GHz, 94GHz, 140GHz ve 220GHz) MMD içerisinde yeralmaktadır.

2.2. MMD Frekanslarının Avantajları ve Sınırlamaları

EM frekans spektrumunda 30GHz – 300GHz frekans aralığını ifade eden MMD frekanslarının avantajları; geniş bant genişliği, küçük bileşen boyutları, daha yüksek çözünürlük, düşük parazit ve artırılmış güvenlik olarak verilebilir.

Geniş Bantgenişliği: Haberleşmede veri aktarım hız, radarlarda ve görüntüleme sistemlerinde ise çözünürlük bantgenişliğine bağlıdır. MMD sistemleri mikrodalga sistemlerine göre daha yüksek frekanslar olduğundan dolayı daha geniş bantgenişliği imkânı sunarlar. Bu sayede daha yüksek veri hızına çıkılabilir. Bu nedenle 5G ve gelecek nesil haberleşme frakansları, Atomotiv çarpışma önleme radarları, gizli nesneleri görüntüleme radarları MMD frekansları içerisinde yeralmaktadır.

Küçük Komponent Boyutları: MMD dalga boyu küçük olduğundan bu frekanslardaki antenler ve dalga kılavuzları gibi temel elemanlar küçük boyutludur. Bu kompakt boyutlu sistem gerçekleştirmeyi mümkün kılar.

Avantajlarının yanında MMD`lerin başlıca sınırlamaları atmosferik kayıplardan dolayı sınırlı menzil ve haberleşme için görüş hattı gerektirmesidir.

MMD bandında bazı frekansların atmosferik kaybı diğerlenrinden daha düşüktür. Ayrıca atmosferik olaylardan (yağmur, kar, yoğun sis vb.) etkilenir, kaybı artar. Özellikle Şekil 1.1`de verilen düşük kayıplı bölgelerdeki frekanslar kullanılarak (uygulamaya bağlı) bu

sınırlama bir miktar aşılabilir. Özellikle radar uygulamaları ve PMMDG çalışmaları bu frekanslarda yoğunlaşmıştır. Görüş açısı ise noktadan noktaya haberleşme için gereklidir ve genelde enten boyutları büyültülerek aşılmaktadır.

2.3. MMD Uygulamaları

MMD uygulamalı genel EM dalgaların uygulamaları ile hemen hemen aynıdır. Bu banda özgü ve mevcut uygulamaları; IEEE 802.11ad WiGig teknolojisi, uydu iletişimi, otomotiv uygulamaları, radar uygulamaları, 5G ve akıllı hücre konsepti, MMD tedavisi gibi tıbbi uygulamalar, PMMD vücut taraması, sanal gerçeklik kulaklıkları ve HD video uygulamaları olarak verilebilir. Bu uygulamaların temelinde MMD frekanslarının band genişliği ve küçük boyutlu komponentler gibi avantajları bulunmaktadır. Özel bazı uygulamaları aşağıda açıklanmıştır;

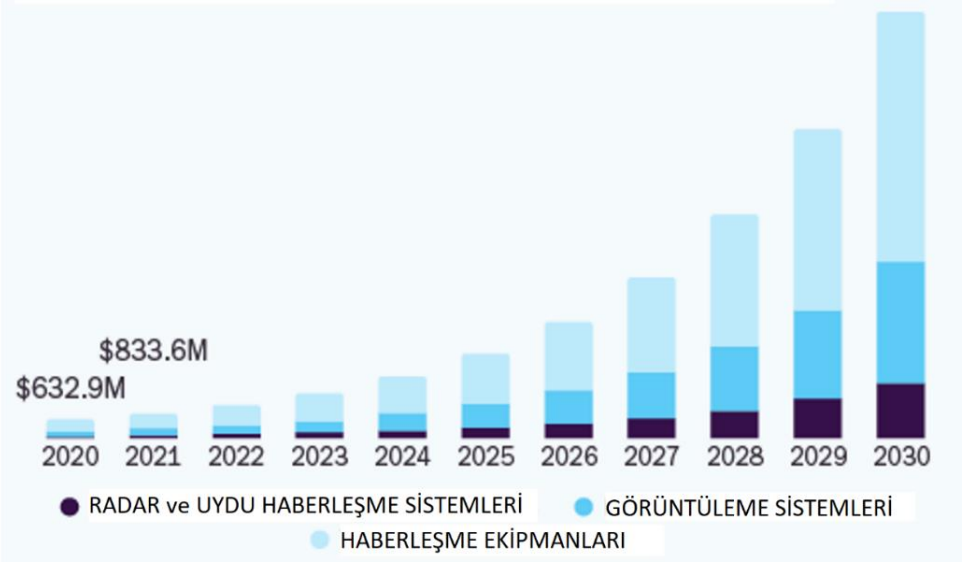
Haberleşme**:** MMD frekansları içerisinde önemli bir kısım geleceğin yüksek hızlı veri transferi için haberleşme teknolojilerine ayrılmıştır. IEEE 802.11ad and IEEE 802.11ay standdartlarında veri transferinde sırasıyla 7 Gbit/s ve 20Gbit/s başarılmştır. Ayrıca 5G hücresel ve noktadan noktaya haberleşme yüksek hızlı veri kanallarının da bir kısmı MMD bandında yeralmaktadır.

Bilimsel Araştırmalar: Oksijen emilimi ve yayımı özelliklerinden dolayı MMD içerisinde yeralan 57-59.3GHz bandı meteorolojik ve iklim algılama için kullanılır. Ayrıca 60 GHz bandı oksijen moleküllerinden kaynaklı soğurma meydana getirdiği için atmosfer ölçümlerinde kullanılır. (ECC Report 176, 2012).

Savunma Sistemler: MMD bandları yüksek çönürlük ve hız isteyen savunma radarlarında kendine yer bulmuştur. Kısa mesafe atış kontrol radarları, füze algılama ve kilitlenme radarları MMD frekanslarını (94GHz) kullanmaktadır.

Ticari Algılama Sistemleri: MMD bandları yüksek çönürlük ve hız isteyen ticari radar uygulamalarında da yer almaya başlamıştır. Özellikle otomobil çarpışma radarları, silo seviye kontrol radarları, hız ölçme radarları ve kişi üzeri uzaktan algılama radarları bunun en büyük örnekleridir.

MMD frekansları uygulama alanlarına göre gelecek 10 yıl için ABD pazarının büyüklüğü Şekil 2.4`te verilmiştir. Bu da teknolojinin özellikle haberleşme ve görüntüleme alanlarında kullanımının giderek artacağını göstermektedir.



Şekil 2.4. ABD Tahmini MMD pazar büyüklüğü (M$)

2.4. MMD Görüntüleme

MMD görüntüleme, görüntüleme çalışmaları için MMD frekanslarını kullanan sistemlerin tümüne denir. EM spektrumda dalgaboyu 10mm ila 1mm (30GHz – 300GHz) arasındaki freknaslar MMD olarak isimlendirilir. Bu çalışmada MMD gönrüntüleme ile kişi üzeri güvenli mesafeden görüntüleme incelenecektir. MMD gönrüntüleme öncesinde diğer görüntüleme çalışmalarından bahsedersek; MMD frekansları öncesi (<30GHz) radyo frekansı ve mikrodalga frekansı olarak adlandırılır. Bu bölgede pasif görüntüleme –çözünürlük – nedeniyle uygun değildir ve kullanılamaz. Fakat aktif görüntüleme için 20GHz üstü günümüzde kullanılmaktadır. (l3,2018). MMD frekansları sonrası (>300GHz) atmosferk kayıp olduğu için pek tercih edilmez. Yinede çok yakın mesafe aktif ve pasif 300GHz üstü (mmdalga altı yada THz frekanslarında) görüntüleme çalışmaları mevcuttur. Fakat teknolojik limit ve atmosfer kayıpları nedeniyle laboratuvar prototipi seviyesinden ileri gidilememiştir (380 ve 600GHz sistemler). Bunlar dışında X-ışınları ile görüntüleme mevcuttur. Fakat X ışınları iyonlaştırıcı özelliği olduğundan dolayı canlı sağlığı için tehlikeleri mevcuttur. Optik dalga boylarında (Görünür ve

kızılötesi) görüntüleme uygulaması mevcuttur fakat bu uygulamalar duman, sis, yağmur gibi ortamlarda kolayca saçıldıklarından ve zayıfladıklarından etkili değildirler. Ayrıca gizlenmiş objeler için görntü elde edilmesi zayıftır. Radyo frekansları ve Mikrodalga frekansları ise atmosfer ortamlarda yayılabilir fakat dalga boylarından dolayı komponent ve anten boyutlarıda büyük olmakta ve pasif görüntüleme uygulamaları için görüntü çözünürlüğü düşmektedir.

MMD ise, dalga boyundan dolayı saçıcı ortamlarda çok fazla etkilenmeden ilerleyebilecek büyüklüktedir. Ayrıca görüntü çözünürlüğünü artıracak kadar küçük kompakt alıcı ve antenler gerçekleştirilebilir. Bu sayede taşınabilir sistemler gerçekleştirmek mümkündür. Elektriksel iletken malzemeler ve su dışında hemen hemen tüm dielektrik malzemelerden geçebilmesi, iyonize olmaması uzaktan pasif görüntüleme için kullanım avantajı sunar. Böylece güvenlik uygulamaları için kullanılabilir. MMD frekans bandında çalışan görüntüleme sistemleri henüz gelişme aşamasındadır ve genellikle atmosfer zayıflamasının düşük olduğu frekans bandları çalışmalar için kullanılır. Şekil 1.1`de görüldüğü üzere en uygun freknaslar 35GHz, 94GHz, 140GHz ve 220GHz`dir.

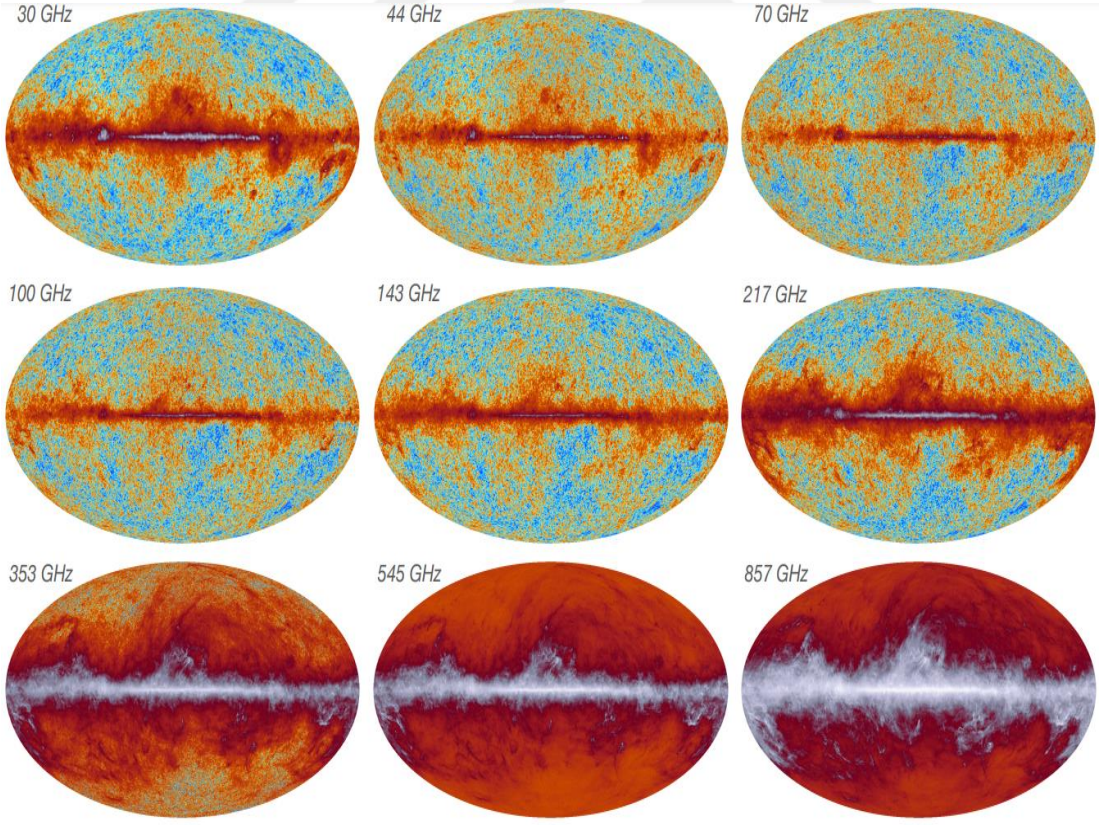
Günümüzde MMD görüntüleme uygulamaları; güvenlik, malzeme, medikal ve savunma alanlarında kendine yer bulmaktadır. Temelde kaynak kullanım durumuna göre aktif ve pasif görüntüleme olmak üzere ikiye ayrılır. MMD kaynağı kullanan sistemler aktif MMDG sistemleridir. Mevcut RADAR teknolojileri ve görüntüleme algoritmaları kullanılır. Genel olarak verici (kaynak) ve alıcı (detektör) kısımlarından meydana gelir. Görüntüleme için elde edilen verilerin radar algoritmaları gibi çözümlenmesine/trasnformlara ihtiyaç duyar. Bu anlık görüntüleme için yüksek bir işlem gücü gerektirir. Aktif kaynak kullanıldığı için hedef üzeri saçılmalardan etkilenmekte ve hedef yüzeyi görüntülerinde yanılma payı artmaktadır. Güvenli uzaklık yerine yakın mesafe anlık görüntüleme sistemlerinde kullanım alanı vardır. (l3,2018)

2.5. Pasif MMD Görüntüleme

MMD frekanslarında görüntüleme yapan ve bunun için maddenin doğal yapısından dolayı oluşan yayılan işaretleri alarak görüntüleme gerçekleştiren sistemlere pasif MMD

görüntüleme sistemleri denilmektedir (Tekbaş M.2014). Sistem pasif olarak görüntüleme gerçekleştirdiğinden dolayı sadece alıcı kısımdan meydana gelmektedir.

PMMDG sistemi iki boyutlu (2B) bir görüntüleme sistemidir. Görüntüler optik görüntülemede olduğu gibi en ve boy bilgilerini içerir. Aktif görüntülemede olduğu gibi derinlik/mesafe bilgisi mevcut değildir. Görüntüleme kaynağı için; maddedin doğal yayılımından elde edilen işaretlerin sistem tarafından toplanmasıdır. Sıcaklığı 0 K`den büyük sıcaklığı olan her madde yayılım yapar. Bu içerisinde bulunduğumuz uzay içinde geçerlidir. Uzayda da büyük patlama sonucunda oluşan kozmik arkaplan ışıması (KAI) mevcuttur. Farklı frekanslar için Temmuz 2018`de PLANCK uydusundan elde edilimiş KAI ölçümü Şekil 2.5`de verilmiştir. Pasif MMD görüntüleme için ana kaynaklar genel olarak bu doğal ışımalardır. PMMDG sisteminin çalışma bandı görüntü için kullanılacak yayılımı belirler.



Şekil 2.5. PLANCK Uydusundan Temmuz 2018`de elde edilmiş KAI (ESA)

2.5.1. PMMDG Temelleri

PMMDG sistemlerinin çalışma prensiplerinden önce sıcaklığı olan maddelerin EM yayılımını fiziksel kavramların açıklanmasına ihtiyaç vardır. Bu temel olarak sıcaklığı 0 K`den yüksek olan maddelerin EM yayımının fiziksel olarak açıklanmasını içerir.

Üzerine gönderilen tüm ışımayı soğuran ama hiç birini yansıtmayan cisimler kara cisim olarak adlandırılır. Termodinamik açıdan dengede bulunan bir kara cisimin sıcaklığından dolayı yaptığı yayılıma kara cisim yayılımı denir. İdeal cisim olduğundan dolayı yayılım katsayı değeri (emissivity) 1 olarak alınır. Gerçekte olmayan bu cisim fiziksel temelleri açıklamada ve ideal durumu göstermede kullanılır. Herhangi bir maddeden yapılan doğal yayılım benzer yüzeye sahip kara cisimden yayılan yayılıma oranı ile göreceli olarak ifade edilebilir. Bu oran yukarı parakrafta bildirilen yayılım katsayı değeridir ve ε ile ifade edilir. Kara cisim için değeri 1`dir. Bu durumda gerçek maddeler için değeri $0 \leq e \leq 1$ arasında değişir.

0 K`den sıcaklığı yüksek olan bir kara cisimden yayılan yayımın enerji miktarı sıcaklığın 4ncü kuvveti ile orantılıdır ve Stefan-Boltzman yasası kullanılarak Denklem (2.2) ile hesaplanır (Stefan,1879; Boltzman,1884).

$$J^* = \sigma T^4 \tag{2.2}$$

J^* :Yayılan Yayım Miktarı (W/m^2)

T :Termodinamik Sıcaklık (K)

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

Yayım yapan maddenin yüzey alanı A (m^2) ve yayım katsayısı ε ise yayım miktarı (J) Denklem (2.3) ile hesaplanır.

$$J = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (W) \tag{2.3}$$

olur.

εA değeri enerji formüllerine eklenerek gerçek maddeler için yayım miktarı bulunabilir.

Yayım enerjisinin frekansa bağlı dağılımı uniform değildir. Yayım enerjisinin tepe (peak) yaptığı değer Wilhelm Wien tarafından Wien yer değiştirme kanunu ile Denklem (2.4)`te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\lambda_{peak} = b/T \tag{2.4}$$

λ_{peak} :Yayımın tepe olduğu dalgaboyu (m)

b :Wien Yerdeğiştirme Sabiti (2,8977684x10^{-3}mK)

Wien yer değiştirme kanunu deneysel veriler ile karşılaştırıldığında özellikle uzun dalga boylarında hesaplama ile deneysel veriler arasında fark olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan sonra ilk olarak Rayleigh ve Jeans, Maxwell teorisinden hareketle, maddeden yayılan yayılımın dalga boyuna göre spektrumunu kendi adları ile anılan kanunu açıklamışlardır. Bu kanun Denklem (2.5) `de verilmiştir.

$$B_\lambda = \frac{2ckT}{\lambda^4} \tag{2.5}$$

B_λ :Dalga boyuna bağlı Işıma Spektrumu (W/m^3)

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

Rayleigh-Jeans kanunu incelendiğinde dalga boyu kısaldığında enerji miktarının artması gerekmektedir. Ultraviole gibi çok yüksek frekans değerlerine çıkıldığında hesaplanan enerji değeri çok büyüdüğünden bu kısım ultraviole felaketi olarak adlandırılmıştır. Kısa dalga boyları için bu durum Wien kanunu ile de çelişmektedir. Alman fizikçi Max Planck yaptığı çalışmalar ile kara cisim yayılımının dalga boyuna bağlı enerji dağılımını çıkarmıştır. Bu durumda enerji miktarı Denklem (2.6) ve enerji dağılımı Denklem (2.7)`de verilmiştir.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.6}$$

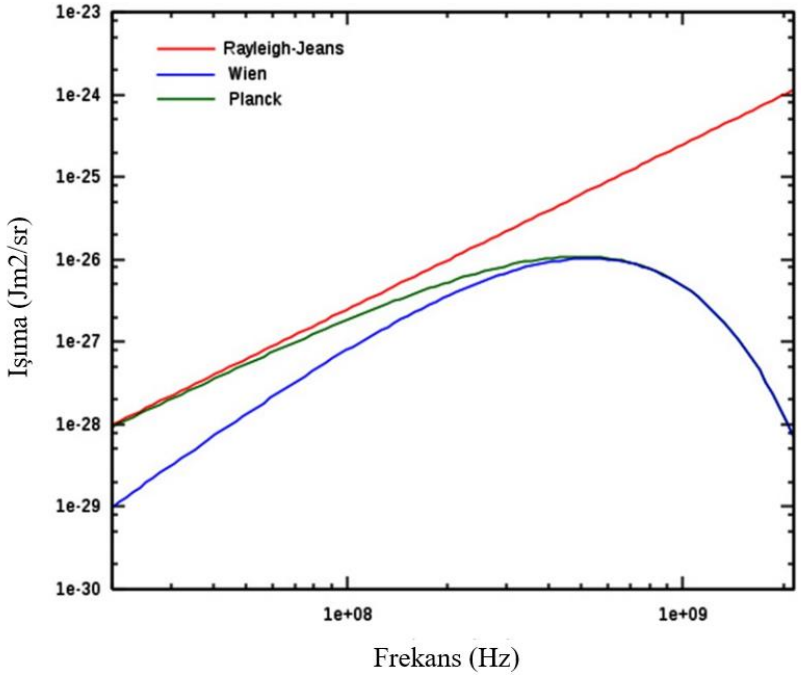
$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\left(\frac{1}{exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right]-1}\right) \tag{2.7}$$

E :Enerji Miktarı (J)

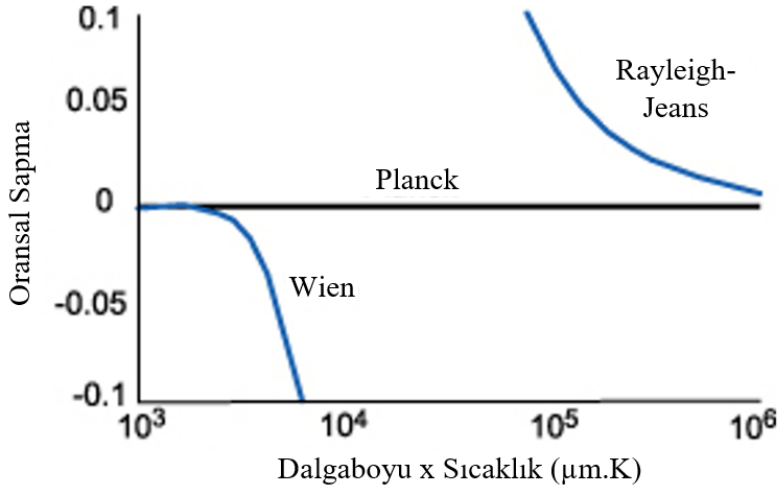
E_λ :Dalga boyuna bağlı Yayılım Enerji Spektrumu

h : Planck Sabiti (6.626×10^{-34}Js)

Planck kanunu ile, Rayleght-Jeans ve Wien Yerdeğiştirme kanunlarının farklılıklarını ve uyumsuzluklarını ortadan kaldırarak enerji dağılımını tüm frekans spektrumu için geçerli olan denklemi bulmuştur. 8mK sıcaklığındaki cisim için her 3 kanunun karşılaştırılması Şekil 2.6`da verilmiştir. Rayleigh-Jeans ve Wien kanunlarının frekansa bağlı olarak Planck kanunundan sapması Şekil 2.7`da verilmiştir.

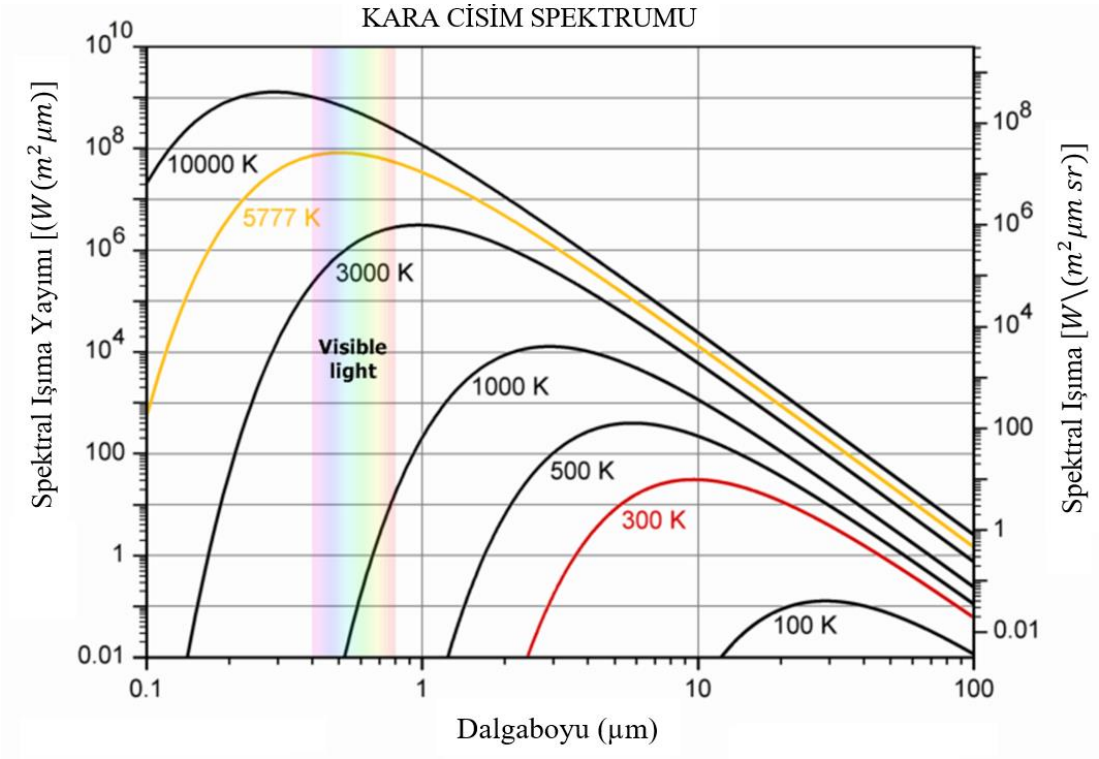


Şekil 2.6. 3K için spektrum karşılaştırması



Şekil 2.7.Planck Kanunundan sapma karşılaştırması (Grant, B.B., 2011)

Yapılan çalışmalar ve kanunlardan elde edilen denklemler incelendiğinde maddenin sıcaklığı arttığında yayılan enerji miktarı da doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Şekil 2.8`de bu farklılık görülmektedir.



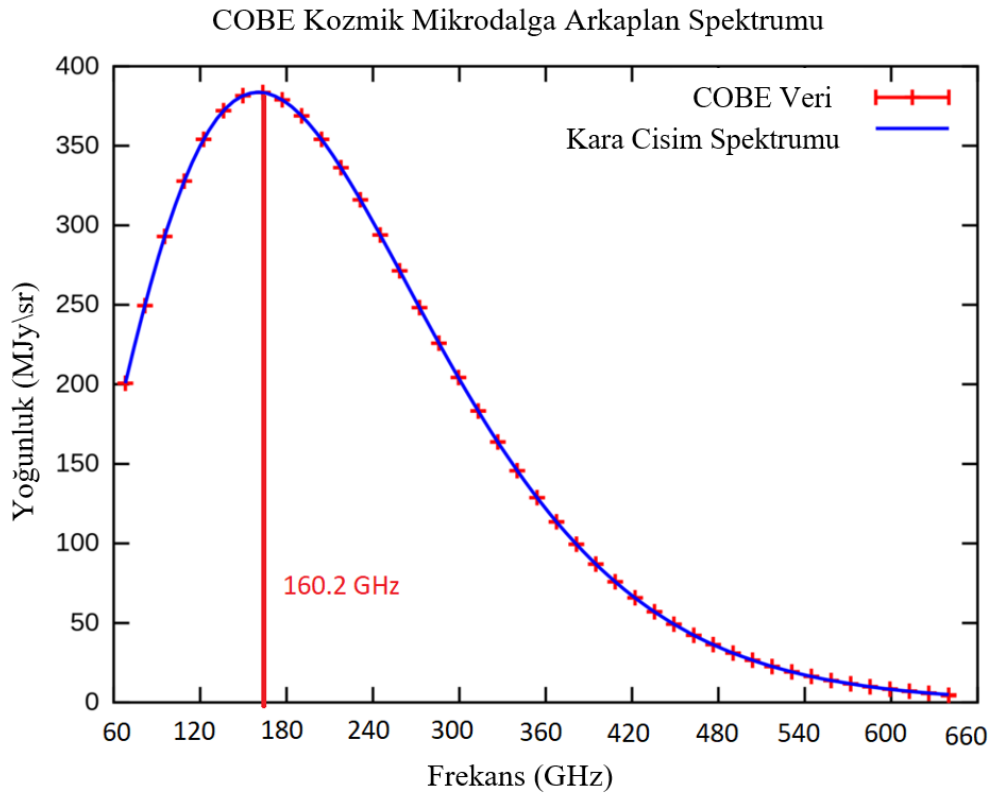
Şekil 2.8. Sıcaklığa bağlı yayılım spektrumu

Bilinen bazı doğal yayılım kaynakları olarak güneş, insan vücudu, dünya kara yüzeyi ve kozmik arkaplan yayılımı verilebilir ve bu kaynakların Kelvin (K) cinsinden sıcaklık değerleri sırasıyla 6000K, 310K, 300K ve 2.7K`dır. Bu durumda güneş yayılımın en yüksek değeri görünür bölgede bulunmaktadır. Böylece nesneleri gözümüz ile görebiliriz. Aslında gözümüz görünür ışık bölgesi için pasif bir alıcı gibi çalışmaktadır.

Kozmik Arkaplan yayılımı ise MMD frekanslarına denk gelmektedir. 2.7 K ısısının yayılımı ve COBE uydusunun ölçümleri incelendiğinde yansımanın tepe değerinin 160.2 GHz (1.9mm) frekansında olduğu görülmüştür. Ölçüm ve karşılaştırma sonucu Şekil 2.9`da verilmiştir.

Sıcaklığı Mutlak 0`dan (0 K) farklı olan her madde yayılım yapar. Ayrıca bunun tersi de geçerlidir yani EM dalga uygulanan her madde de soğurduğu EM dalga gücü miktarınca ısınır.

Bu durumda sıcaklığı mutlak sıcaklıktan yüksek olan her madde sıcaklığına, yüzey alanına ve yayım katsayısına bağlı olarak yayılım yapar. Bu yayılımın MMD frekanslarında olan kısmını alıp görüntüleme yapan sistemlere PMMDG denir. PMMDG sistemleri ile farklı sıcaklık, büyüklük ve yayılım katsayısı (emisiviti) olan maddeler görüntülenebilir. Bu özelliği ile kişi üzeri gizli nesnelerin görüntülenmesi ve sağlığa zararı olmamasıyla güvenlik uygulamaları için aktif mikrodalga görüntüleme sistemlerine ve X ışını görüntüleme sistemlerine alternatif olmaktadır.

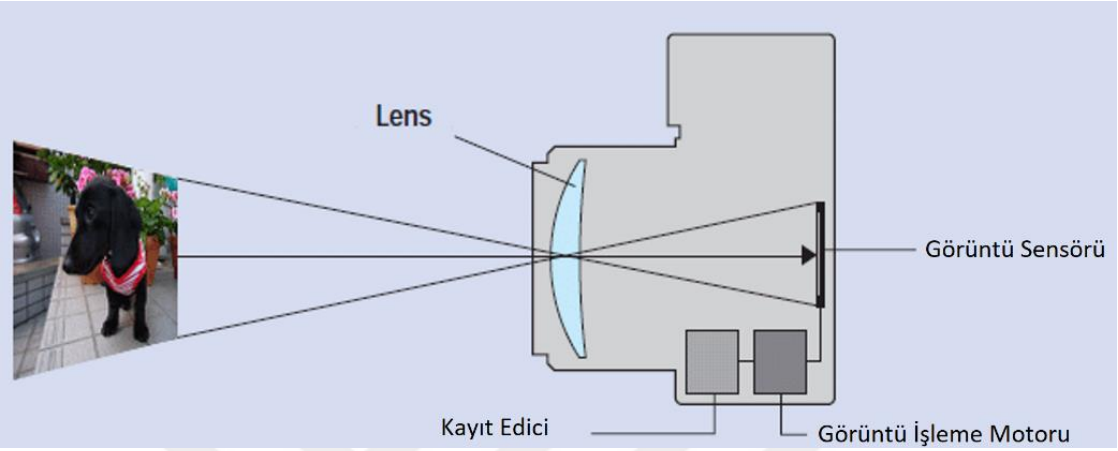


Şekil 2.9. Kozmik arkaplan yayılımı ölçümü ve karşılaştırma

2.5.2. PMMDG Yapısı

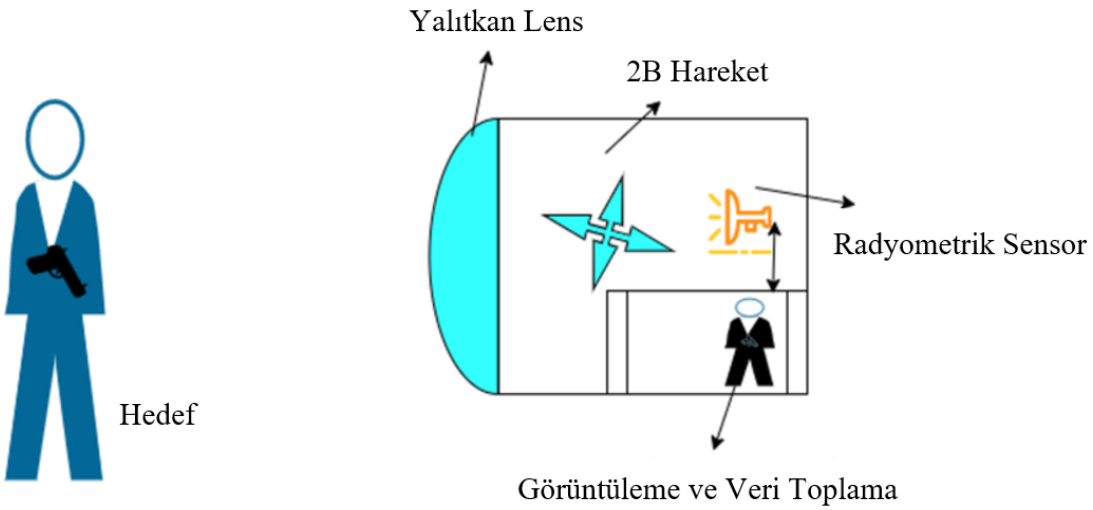
Tipik bir optik görüntüleme sistemi Şekil 2.10`de verilmektedir. Optik sistemin çalışması; hedeften gelen ışınlar optik lens vasıtasıyla optik sensör dizisinin üzerine yönlendirilir. Sensörde elde ede edilen görüntü kayıt edilir. Görünür ışık ortamında çalışan dijital optik kameralar bu şekilde çalışır. Görüntü mesafesi ve görüntülenecek alan lens yada lensler yardımıyla belirlenir. Lensler hedeften gelen ışık hatlarını görüntüleme sensörü üzerine düşürür. Sensör bu ışık demetini elektriksel işarete çevirir ve bir işlemci vasıtasıyla

görüntü elde edilir. Elde edilen görüntü bilgisi hafızaya kayıt edilir. Sistem görüntü çözünürlüğü sensör adet görüntü kalitesi ise sensör büyüklüğü ile ilintilidir. Benzer şekilde optik düzenek ve sensör; MMD frekanslarında çalışırsa hedeften yayılan MMD dalgaları alınıp görüntü elde edilirse bu sistem PMMDG sistemi olur.



Şekil 2.10. Optik kamera

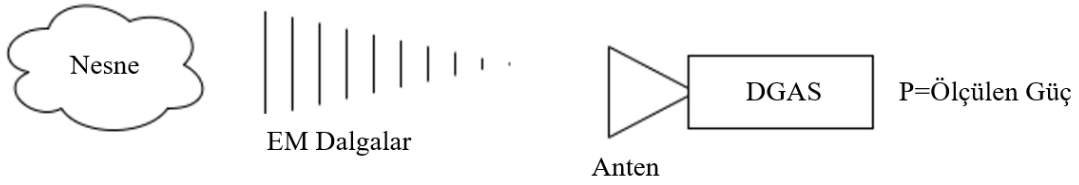
Genel olarak PMMDG sistemi üç ana bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler düşük gürültülü alıcı sensör (DGAS), yarı optik görüntüleme (YOG) sistemi ve her iki sistemi kontrol eden kontrol ve data toplama biriminden meydana gelir. Sistem diyagramı Şekil 2.11`de verilmiştir.



Şekil 2.11. PMMDG Diyagramı

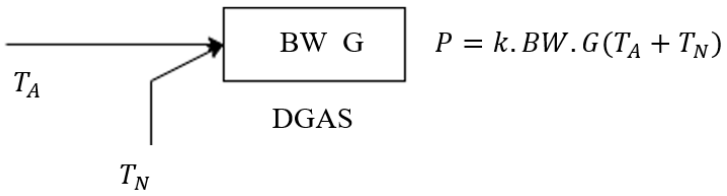
2.5.2.1. Düşük Gürültülü Radyometrik Sensor (DGAS)

Düşük gürültülü radyometrik sensör, PMMDG sisteminde hedeften yayılan yarı optik görüntüleme sistemi tarafından toplanan EM dalgaları elektriksel işarete çeviren hassas kısımdır. İdeal durumda Şekil 2.12`de gösterildiği gibi DGAS`in ışıma yapan bir cisimden yayılan elektromanyetik enerjinin tümünü alması beklenir. Böylece yayılan enerjinin güç değeri DGAS ile ölçülür ve alınan işaretler yarı optik sisteme göre anlamlandırılarak görüntüleme elde edilir.



Şekil 2.12. İdeal DGAS

Gerçek durumda her elektronik devre gibi DGAS`lerde kazanç değerine, çalışma band genişliklerine ve kendi oluşturdukları gürültü değerlerine sahiptirler. Bu durum elektronik devre içeren DGAS Şekil 2.13`deki gibi modellenebilir. Burada; k Boltzman sabiti ($1.38\ x\ 10^{-23} J/K$), G alıcı kazancı, BW, alıcı çalışma band aralığı, P alıcı çıkış gücü (Watt), T_A alıcı anten sıcaklığı (K), T_N alıcı sıcaklığı (K)`dır.



Şekil 2.13. Gerçek alıcı yapısı

Bu durumda DGAS hassasiyeti; girişindeki T_A değişimini; çıkışına ölçülebilecek kadar anlamlı şekilde aktarmasına (çözünürlük) bağlıdır ve ΔT ile gösterilir. Denklem (2.8)`de verilmiştir. Burada τ integrasyon zamanıdır (saniye) ve sistemin veri örnek tutması olarak tanımlanabilir (Skou & Vine, 2006).

$$\Delta T = \frac{(T_A + T_N)}{\sqrt{BW\tau}} \tag{2.8}$$

Burada DGAS çalışma band genişliği, integrasyon zamanın yüksek olması ve gürültü değerinin düşük olması termal çözünürlüğün iyi olmasını sağlar. MMD frekansları geniş bant çalışmaya izin verir. Tablo 1.1 incelendiğinde komponent ve MMIC ile oluşturulabilecek DGAS tasarımı için üç temel alıcı yapısı görülmektedir. (Bolometre yapılar henüz komponent bazında mevcut değildir.) Görüntüleme için çözünürlük, maliyet ve çıkış işaret gücünün yüksekliği açısından ön yükselteçli direkt algılama yapısı DGAS için seçilmiştir. Bu yapı temelde anten, düşük gürültülü yükselteç (LNA) ve Detektör diyot içermektedir. DGAS yapısında kullanılacak anten, MMIC LNA ve detektör parametrelerin belirlenmesi, en önemli tasarım aşamasıdır. DGAS parametreleri belirlenirken Denklem (2.8)'den faydalanılacaktır. DGAS için ilk parametre çalışılacak frekans bandının belirlenmesidir. Daha sonra içeren bileşenler çalışma frekansına göre belirlenir/oluşturulur. Anten işareti alan ve LNA`a aktaran kısım olduğu için kazanç ve açıklık değerleri çok önemlidir. Kazanç ve açıklık elde edilecek güç miktarını ve çözünürlüğü belirleyen en önemli özelliktir. Bununla birlikte LNA yapısı ile de uyumlu olmalıdır. Ayrıca kompakt bir DGAS yapısı tasarlanırken içerisindeki ihtiyaç duyulan besleme devrelerini ve işaret filtreleme yükseltme devrelerini içermelidir. Kompakt olmayan yapılarda bu birimler DGAS dışarısında olabilir.

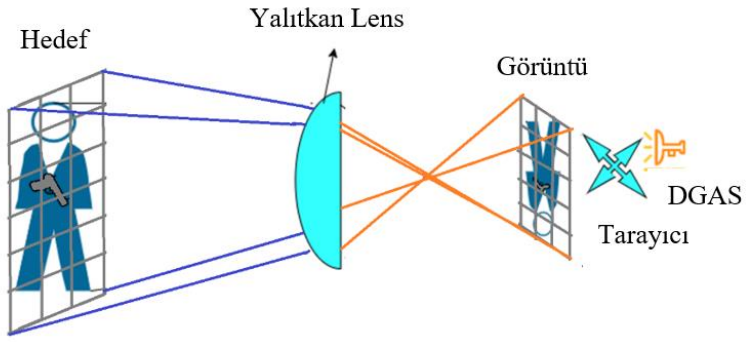
2.5.2.2. Yarı Optik Görüntüleme Sistemi (YOG)

Optik görüntüleme sistemleri görüntünün sensör üzerine düşürülmesi için nasıl lens yada lens sistemine ihtiyaç duyuyorsa; PMMDG sisteminde DGAS ile görüntü elde etmek için quasi optik görüntüleme sistemine ihtiyaç duyar. Görüntüleme alanı, görüntüleme mesafesi, imaj alanı ve görüntü çözünürlüğü gibi parametreler quasi optik sistem tarafından belirlenir. Rayleigh kriterine göre yarı optik görüntüleme sisteminin çözünürlüğü s Denklem (2.9)`da verilmiştir. Burada R hedef mesafesi, D reflektör yada lensin çapı, λ ise çalışma merkes frekansı dalga boyudur.

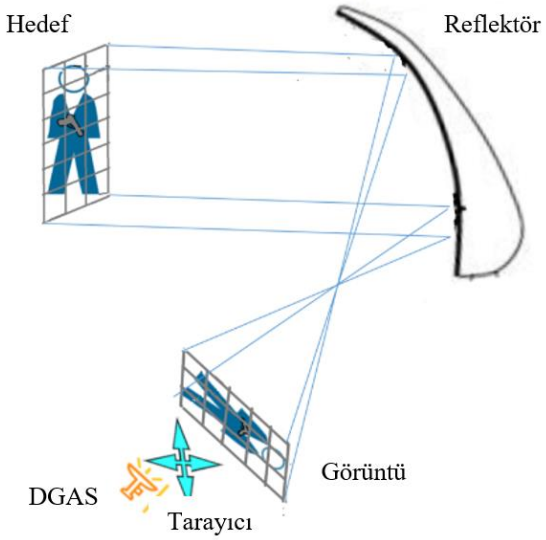
$$s = R\frac{1.22\lambda}{D} \tag{2.9}$$

DGAS yapıları optik sensörlere oranla daha büyük boyutlu oldukları için iki boyutlu (2B) dizi oluşturulmaları zordur ve büyük yer kaplarlar. Bu nedenle quasi optik görüntüleme sistemleri görüntü elde etmek için görüntü odaklayıcı eleman (lens yada reflektör ayna) ile birlikte tek yada iki boyutlu hareket sağlayan düzenekler içerirler. Şekil 2.14`de

dielektrik lens içeren yapı gösterilmiştir. Lens arasında oluşan image üzeri DGAS ile taranarak görüntüleme gerçekleştirilir. Şekil 2.15`de ise reflektörlü sistem yapısı gösterilmiştir. Burada da odak öncesi yada odak sonrası oluşturulan image bölgesini DGAS ile taranarak görüntü elde edilir. Ayrıca reflektörlü sistemlerin kendisi de hedefi tarayarak görüntü elde edilebilir. Dielektrik lens içeren görüntüleme sistemleri, reflektör içeren görüntüleme sistemlerive her ikisini içeren görüntüleme sistemleri literatürde mevcuttur. Bu sistemlerde görüntü elde etmek için sistemin 2B hareketi, DGAS ve/veya sistemin hareketi yada sistem içerisinde aynaların hareketi ile image yada hedef taraması gerçekleştirilmiştir. Eğer DGAS ile 2B dizi oluşturulmuş ise görüntü elde etmek için tarama yada herhangi bir harekete ihtiyaç yoktur. Çünkü oluşan 2B görüntü 2B DGAS dizisi tarafından kapsanmış olur. Bu görüntüleme için yeterlidir.



Şekil 2.14.Dielektrik lens kullanılan YOG sistemi



Şekil 2.15. Reflektör kullanılan YOG sistemi

YOG sisteminin en öenmli bileşeni lens yada reflektördür. Optik görüntüleme sistemlerinde olduğu gibi PMMDG sisteminde de hedef görüntüleme alanının boyutları ve gerekli tarama alanı boyutlarını dielektrik lens yada reflektör özellikleri belirler. Bu optik odaklayıcıları hedef alanının tamamını optik (MMD frekanslarının optik frekanslara yakın olması nedeniyle geometrik optik yakınsamalar bu band için hatalı olmaz.) olarak kapsamalıdır ve en az kayıpla hedeften yayılan işaretleri DGAS antenine gönderebilmelidir.

2.5.2.3. Kontrol ve Data Toplama Sistemi

YOG sisteminin görüntü oluşturabilmesi için gerekiyorsa mekanik hareketi sağlayan ve mekanik hareket konumuna göre DGAS dan gelen işaretleri en az kayıpla alıp kaydeden birimdir. Özellikle veri toplama süresi çözünürlüğü doğrudan etkiler. Ayrıca 2B görüntünün hedef ile aynı olması için DGAS pozisyon bilgisi gerekmektedir. Mekanik hareket için güç kaynakları, sürücüler, hassas düşük işaret yükselteçleri ve bunları yönlendiren yazılımın çalıştığı bir bilgisayardan meydana gelebilir.

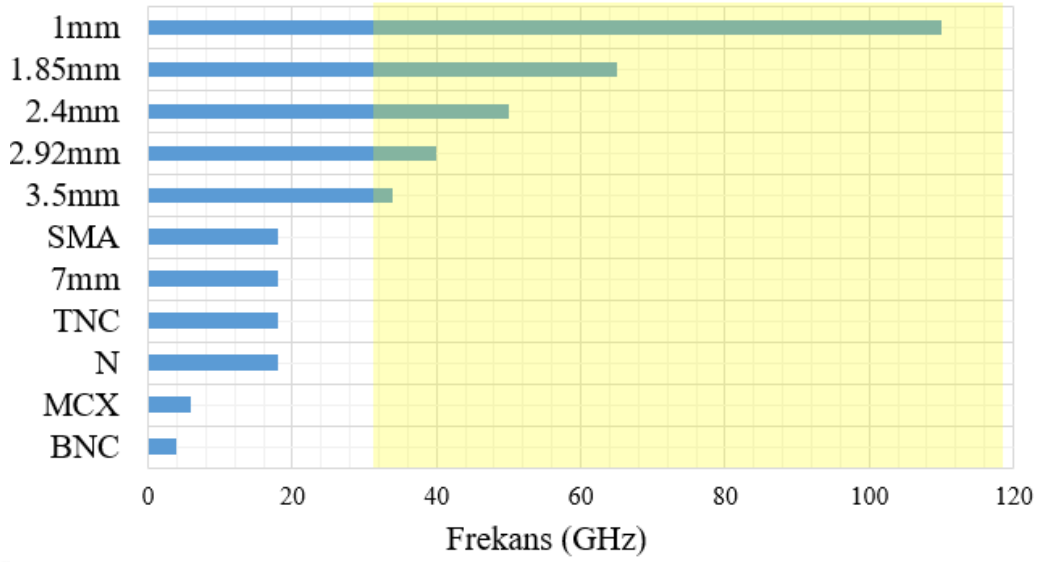
3. MALZEME VE YÖNTEM

Tezin ilk bölümünden de belirtildiği üzere bu çalışmanın amacı yüksek hassasiyetli, kompakt PMMD alıcı donanımının tasarlanması ve gerçekleştirilmesi, alıcı ile fiziksel olarak uyumlu geniş bant bir anten tasarlanması ve geliştirilecek olan PMMDG sistemiyle çalışmada elde edilen DGAS ile görüntü elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca ulaşabilmek için öncelikle çalışılacak MMD frekansının ve görüntülenecek hedef özelliklerini belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen özelliklerden sonra ise DGAS ve PMMDG sistemi gerçekleştirilecektir.

3.1. PMMDG Çalışma Bandı Belirleme

PMMDG uygulaması yapılacak ortam (iç yada dış) dünya yüzeyi (MMD frekansları uzay ve atmosfer araştırmaları için de yoğun olarak kullanılmaktadır.) ve hedef güvenli mesafede bulunacak insan olduğundan atmosferik zayıflaması düşük olan bantların kullanılmasının avantajı olacaktır. Bu frekanslar Şekil 1.1`de de görüleceği üzere 35 GHz, 94 GHz, 140 GHz ve 220 GHz`dir. Sırasıyla bu frekanslara ait dalga boyları 8.57mm, 3.19mm, 2.14mm ve 1.36 mm`dir. Bu boyutlar doğrudan anten boyutunu ve sistem boyutu ile görüntü çözünürlüğünü belirlediğinden olabildiğince küçük olan seçilmelidir. Ayrıca seçilecek frekansta deneysel çalışma yapmaya uygun olmalı seçilecek freknas bandında LNA ve detektör yongaları bulunmalıdır. Çalışma kapsamında rafta hazır LNA ve detektör kullanılacaktır. Literatürde çalışmalar olmasına rağmen ticari olarak 110 GHz üstü frekanslarda MMIC LNA oldukça kısıtlı bir uygulama alanına sahip olduğundan birkaç firma tarafından üretilmektedir (MKR-R). Otomotiv radarları, E band noktadan noktaya haberleşme ve savunma amaçlı radr uygulamaları göz önünde bulunduğunda 110 GHZ e kadar MMIC LNA ve Detektör yongaları daha çok üretici tarafından üretilmektedir.

Anten ile bağlantı göz önünde bulundurulduğunda konektör dalga kılavuzu yada mikroşerit bağlantının uygulanabilirliği değerlendirilmelidir. Günümüzde koaksiyel RF konektörler 110 GHz e kadar uygulama alanı bulmaktadır. Şekil 3.1`de en çok kullanılan RF konektörler ve çalışma frekansları verilmiştir. Grafikte sarı ile gösterilen kısım MMD frekanslarında (30GHz-110GHz arası) kullanılabilir. Daha yüksek frekanslar için koaksiyel bağlantı ve kablo mümkün olmayacaktır.

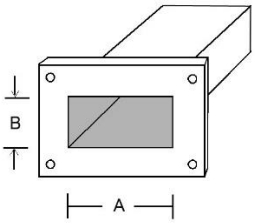


Şekil 3.1.RF Konektörler

Bağlantı diktörgen dalga kılavuzu şeklinde de olabilir. Özellikle MMD frekansları için dalga kılavuzu bağlantı tercih edilir. Koaksiyel konektörün bulunmadığı frekanslar için dalga kılavuzu bağlantı tek çözümdür. Dalga kılavuzu çizimi Şekil 3.2`de ve MMD frekansları dalga kılavuzları özellikleri Tablo 3.1`de verilmiştir.

Tablo 3.1. MMD Frekansları dalga kılavuzu boyutları

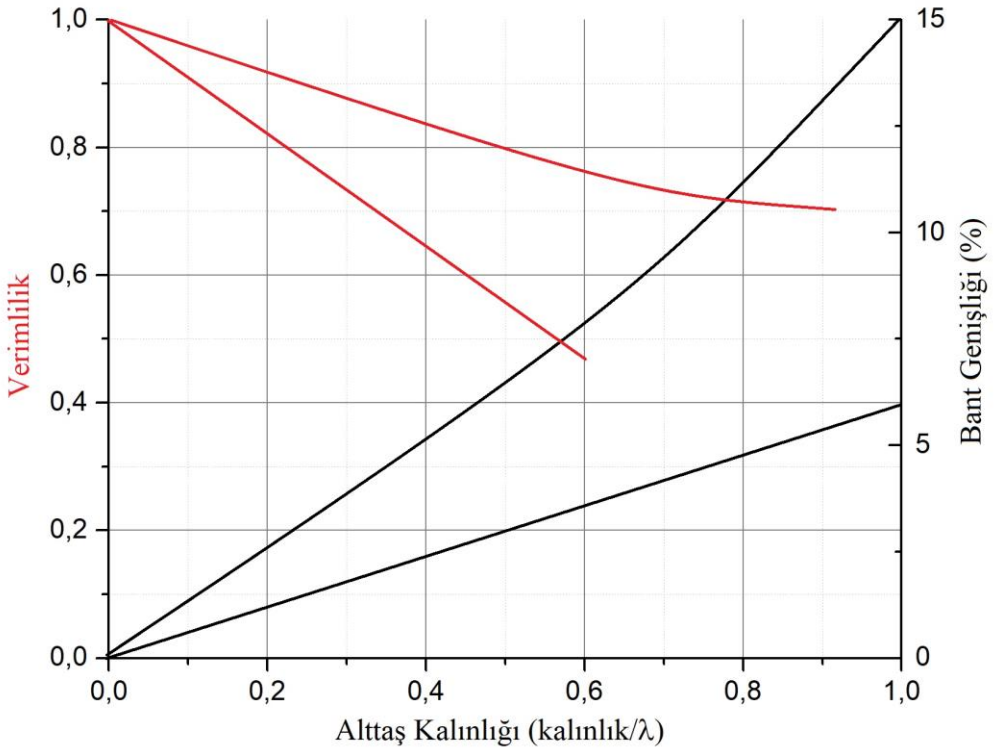
Dalga Kılavuzu Adı (EIA)	Çalışma Frekansı (GHZ)	Kesim Frekansı (GHz)	Dalga Kılavuzu iç Boyut A Inch [mm]	Dalga Kılavuzu iç Boyut B Inch [mm]
WR28	26.50 - 40	21.077	0.28 [7.112]	0.14 [3.556]
WR22	33.00 - 50	26.346	0.224 [5.6896]	0.112 [2.8448]
WR19	40.00 - 60	31.391	0.188 [4.7752]	0.094 [2.3876]
WR15	50.00 - 75	39.875	0.148 [3.7592]	0.074 [1.8796]
WR12	60 - 90	48.373	0.122 [3.0988]	0.061 [1.5494]
WR10	75 - 110	59.015	0.1 [2.54]	0.05 [1.27]
WR8	90 - 140	73.768	0.08 [2.032]	0.04 [1.016]
WR6	110 - 170	90.791	0.065 [1.651]	0.0325 [0.8255]
WR7	110 - 170	90.791	0.065 [1.651]	0.0325 [0.8255]
WR5	140 - 220	115.714	0.051 [1.2954]	0.0255 [0.6477]
WR4	172 to 260	137.243	0.043 [1.0922]	0.0215 [0.5461]
WR3	220 to 330	173.571	0.034 [0.8636]	0.017 [0.4318]



Şekil 3.2. Dikdörtgen dalga kılavuzu

Burada dalga kılavuzu isimlendirmesi Elektronik Endüstrisi Birliğine (EIA) göre verilmiştir. IEEE`ye göre WR-10 yerine W band isimlendirilmesi kullanılır. Tablo 3.1 incelendiğinde WR-8 den sonraki dalga kılavuzu boyutları 1mm`nin altına düşmektedir. Bu dalga kılavuzundan mikroşerit (MS) hatta geçildiğinde uygulama zorluğu getirecetir.

MMD frekanslarında devre yada MS hat kullanılması gerektiğinde MS hat devre kartının frekansa göre seçilmesi gerekmektedir (Wadell, 1981). Şekil 3.3`de MS hat grafiğinde verimlilik ve daha geniş çalışma band genişliği için dieletrik katsayısının (ε_r) düşük olması ve MS hat devre kart kalınlğının çalışılacak dalga boyunun 1/10 u yada daha düşük olması gerektiği görülmektedir.



Şekil 3.3. MS Hat grafiği (Bahl, 1980)

Devre kartı üreticilerinde standart olarak bulunmayan yada devre kartı üreticilerinin üretemeyeceği kadar ince olan kartlar seçilmemelidir. Çok ince kartlar için devre değil yonga üreticileri ile çalışmak gerekebilir. Standart üreticilerde bulunan en ince RF devre kartı kalınlığı 0.127mm`dir. Fakat uygulama için özel cihazlar gerekebilir. Birçok üretici için proseslerinde kullanacakları en ince devre kartı bunun iki katı olan 0.254 mm`dir.

Elde edilen bilgiler Tablo 3.2`de olduğu gibi özetlenirse günümüzde bu çalışma için komponent bulma, devre gerçekleştirme ve yüksek çözünürlük göz önünde bulundurulduğunda en uygun frekans 94 GHz olarak görülmektedir. Bu nedenle çalışmada gerçekleştirilecek alıcı ve diğer tasarımlar 94 GHz merkez frekansı üzerine yapılacaktır.

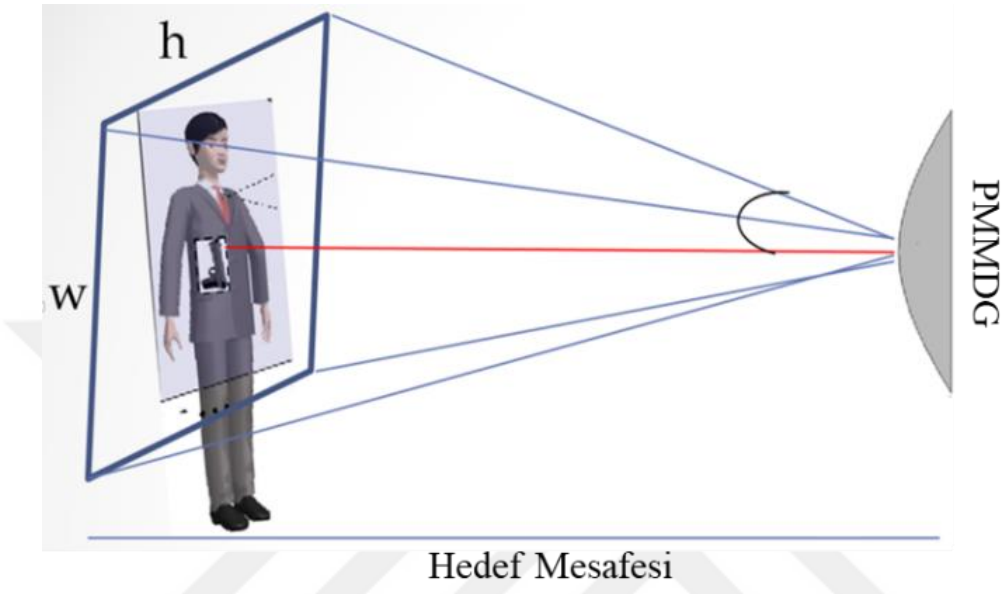
Tablo 3.2.MMD Frekans seçim tablosu

	35 GHz	**94 GHz**	**140 GHz**	**220 GHz**
Dalga Boyu	8.57 mm	3.19 mm	2.14 mm	1.36 mm
Koaksiyel Konektör	2.92mm, 2.4mm, 1.85mm, 1mm	1 mm	--------	---------
Dalga Kılavuzu	WR28, WR22	WR-10, WR-8	WR-6, WR-7	WR-4
Komponent Bulunabilirlik	Kolay	Orta	Az	Az
Devre Kartı Kalınlığı	<0.85mm	<0.31mm	<0.21mm	<0.13mm

3.2. PMMDG Hedef Özellikleri Belirlenmesi

PMMDG sisteminin amacı pasif bir şekilde hiçbir yayım yapmadan görüntüleme gerçekleştirmektir. Bu çalışmamızda hedefimiz kişi üzeri gizlenmiş nesneleri güvenli mesafeden görüntülemektir. Hedef olarak kişi üzeri gizli nesnelerin görüntülenmesi belirlendiğinden dolayı hedef insan seçilmiştir. Ortalama bir insan boyu birçok ülke için 1.75m civarındadır (Özer, B.K.). Gizli nesne görüntüleneceği için boy olarak diz ile baş arası mesafeyi genişlik olarak omuzların genişliğini alabiliriz. Bu durumda hedef boyutları (en (h) x boy(w)) 1.5m x 1.5m olarak belirlenebilir. Yolcu geçiş alanları

koridorlar gibi kullanım yerleri göz önünde bulundurulduğunda ve hedef ile PMMDG arası boş olması gerektiğinden görüntüleme için güvenli hedef mesafesi (T) 3 ila 5 metre arası yeterlidir. Bu durumda hedef senaryosu Şekil 3.4`deki gibi olmaktadır.



Şekil 3.4.Hedef durumu

3.3. Anten Tasarımı Çalışmaları

Bu çalışmada DGAS yapısı ile uyumlu bütünleşik yapıda anten tasarlandı. İlk olarak DGAS yapısında kullanılabilecek antenler incelendi. Görüntüleme uygulaması için tasarlanancak antenin DGAS ile bütünleşik olması gerekmektedir. Bu nedenle anten bağlantı arayüzü ile DGAS bağlantı arayüzünün uyumlu olması gerekmektedir. DGAS arayüzü WR-10 dalga kılavuzu olarak belirlendiğinden, anten bu arayüz ile uyumlu olmak zorundadır. DGAS boyutu göz önünde bulundurulduğunda görece küçük boyutlu tasarlanacaktır. Görüntüleme uygulaması için yüksek kazançlı (en az 20 dBi) ve dar hüzmeli (en fazla 20 º) anten olması gerekmektedir. Anten kazancı ve hüzmesi alıcıya girecek işaretin gücünü böylece görüntü çözünürlüğünü belirler.

DGAS için tasarım parametrelerine uyumlu olarak; horn, yama, vivaldi ve dielektrik çubuk anten kullanılabilir. Bu antenlerden dielektrik çubuk anten boyut avantajına rağmen istenenden daha düşük kazanç değerlerine sahiptir. Vivaldi anten ise çalışma

frekanslarında kullanılacak alttaş kalınlığının inceliği ve üretim zorluğu nedeniyle tercih edilmemiştir. Yama antenlerin ise hüzme daraltma ve kazanç artırma için fazladan müdahalelere ihtiyaç vardır. O nedenle bu çalışmada çift polarize horn anten ve Wr-10 horn anten olmak üzere iki adet anten tasarımı üzerine çalışılmıştır.

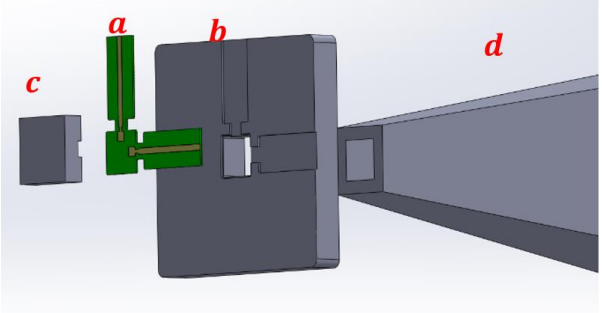
3.3.1. Dual Polarize Anten

İkinci anten çalışması ise dual polarize anten (DPA) olarak tasarlanıştır. Üzerinde kazanç artırma ve couplink engelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 80GHz – 100GHz çalışma frekanslarında yeni kompakt port izolasyonu artırılmış mikroşerit hat beslemeli dual polarize horn anten öneriyoruz. Her bir port için birbirinin aynısı 50 Ω mikroşerit hat beslemeli kare yama kullanılır. Bunlar milimetredalga kare dalga kılavuzuna birbirine dik olarak yerleştirilir. Besleme hat genişliği 50Ω olacak şekilde mikroşerit hat empedans formülünden hesaplandı. Kılavuz üzeri arka tarafı kısa devre boşluk ile kapatılır. Diğer tarafta ise horn piramidi bulunmaktadır. Önerilen antenin, yaygın olarak kullanılan elektromanyetik simülasyon yazılımı CST Microwave Studio kullanılarak benzetimi yapıldı. Piramit horn ve yama boyutları yazılımın optimizasyonu kullanılarak en düşük geri dönüş kaybı ve 20dBi kazanca göre bulundu. Benzetim sonuçlarına göre en fazla port izolasyona sahip antenin kazanç ve paterni incelendi. Sonrasında bu yapının port izolasyonunu artırmak için yamalar arasında çeşitli parastik devre elemanları eklendi ve etkileri incelendi. Böylece DPA`ın çalışma bandında port izolasyonu artırılması hedeflendi.

Şekil 3.5, önerilen DPA yapısını açılmış şekilde göstermektedir. DPA, üzerinde iki adet mikroşerit hat ile beslenen yama bulunan devre kartından, bir kare dalga kılavuzundan, kılavuzu kapayan kısa devre boşluktan ve bir piramidal horndan oluşur. Mikroşerit devre kartı kare dalga kılavuzu üzerine montajlanacağı için kılavuz levhası büyütülmüştür. Benzetimde, mikroşerit hat kartı için kalınlığı 127um dielektrik katsayısı 2.2 olan pcb seçildi. Dalga kılavuzu, arka kısa devre boşluğu ve pyramid horn malzemesi de benzetimi hızlandırması açısından PEC olarak seçildi.

Devre kartının alt yüzeyi dalga kılavuzuna gelen kısmı hariç PEC malzemeden toprak yüzeyidir. Dalga kılavuzu üzerindeki kısım ise boştur. Devre kartının üst yüzeyinde ise bir birine dik yerleştirilmiş iki adet 50 Ω mikroşerit beslemeli kare yama vardır. Böylece

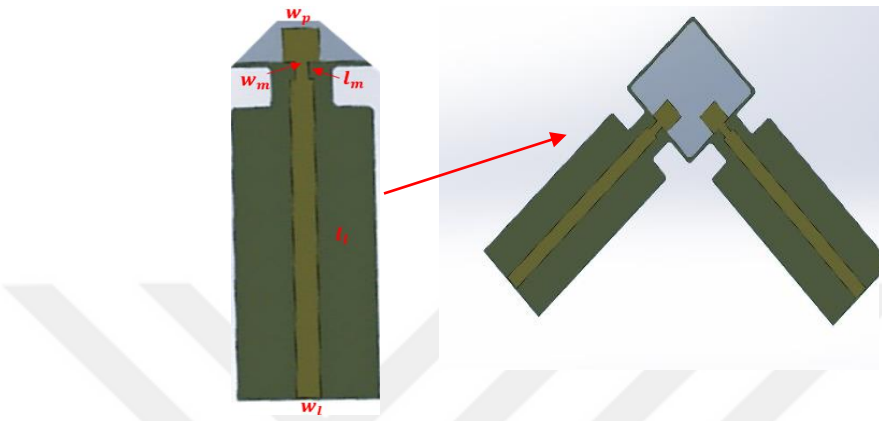
yamalar tarafından kare dalga kılavuzu temel modlarda uyarılır. Daha sonra yamalar arası isolasyonu artırmak için parasitik elemanlar yapılarına göre yamalar arasına toprak yüzeye yada yama yüzeyine eklenecektir.



Şekil 3.5. DPA yapısı a) Mikroşerit devre kartı, b) Kare dalga kılavuzu levhası, c) Kısa devre boşluk, d) Piramit Horn

DPA`yı oluşturan devre kartı Şekil 3.6`de gösterilmektedir. Devre kartı, kare dalga kılavuzundan MS hatta geçişi sağlar ve kalınlığı Şekil 3.3`de verilen MS hat verimlilik ve çalışma bant genişliği grafiği göz önünde bulundurularak seçildi. Tez çalışmasında çalışılan 10GHz band genişliği (~%10 band genişliği) için devre kartı dielektrik kalınlığı 127um ve dielektrik geçirgenlik katsayısı (ε_r) 2.2 olarak seçildi. Dalga kılavuzundan geçiş için kare yama, 50 Ω MS hat ve kare yama ile MS hat arasında empedans uygunlaştırma hattından meydana gelen iletim hattı kullanıldı. Devre kartı toprak yüzeyi ve iletim hatları için benzetimde PEC kullanılır. Bu benzetimin hızlı olmasını sağlar. Gerçekleştirme durumunda toprak yüzeyi ve iletim hattı PEC yerine bakır olacaktır. Bakır elementinin elektriksel iletkenliği yüksek olduğundan ve devre yapısının karmaşık olmamasından dolayı benzetimde PEC seçilmesi gerçekleştirme durumunda benzetim sonuçları ile gerçek sonuçlar arasında kayda değer farklılık oluşturmayacaktır. İletim hattının besleme kısmı hat genişliği 50 Ω karakteristik empedansı sağlayacak şekilde w_l=0.39mm`dur ve hat uzunluğu kare dalga kılavuzu boyutlarına uygun olarak $l_l$=3.42mm`dir. İletim hattı sonunda kare dalga kılavuzundan MS hatta geçişi sağlayan kare yama bulunur. Kare yama, horn antenin beslemesi durumunda kulunan bir yama anten gibi davranır. Yama antenin hüzmesi bağlı olduğu horn tarafından şekillendirilir ve ayrıca istenen kazanç değeri elde edilir. Kare Yama bir kenar uzunluğu ortam

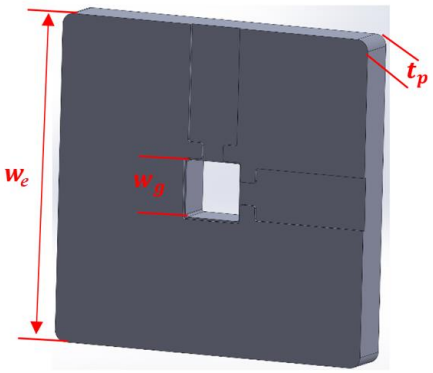
karakteristik empedansı olan 377 Ω`u sağlayacak şekilde $w_p$=0.6mm seçilir. Böylece en az kayıplı geçiş sağlanır. 50 Ω MS hat ile 377 Ω kare yama arasında en az kayıplı geçiş için empedans uyumluluğu gerekmektedir. Bu nedenle araya uyumlaştırma hattı eklenir. Bu hattın genişliği $w_m$=0.22mm, uzunluğu $l_m$=0.6mm`dir.



a b

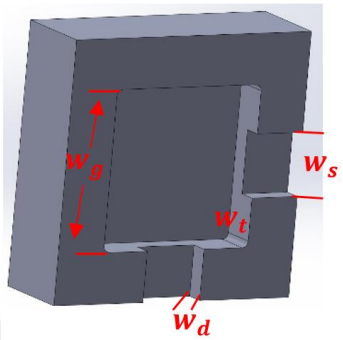
Şekil 3.6. Mikroşerit devre kartı, a) Tek hattın büyütülmüş görüntüsü, b) Devre kartı

Bu kart Şekil 3.7`deki kare dalga kılavuz levhası üzerine yerleştirilir. Kılavuz levhası ortasında kare dalga kılavuzu olan bir tarafına mikroşerit devre kartı ile kısa devre boşluğun diğer tarafına ise piramit hornun montajlandığı PEC levhadır. Standart W band (wr-10) dikdörtgen dalga kılavuzu boyutları 1.27mm*2.54mmdir. Bu nedenle kare dalga kılavuzu bir kenar boyutu w_g=2.54mm seçilmiştir. Bu boyut anten çalışma frekansında (80GHz – 100 GHz) temel mod yayılımları için yeterlidir. Levha karedir ve bir kenar uzunluğu w_e=10mm kalınlığı t_p=1mm`dir.



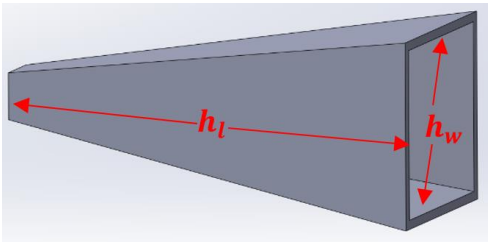
Şekil 3.7. Kare dalga kılavuz levhası

Yamalardan yayılımın piramit horna doğru olması ve duran dalga oranının (VSWR) minimum olması için dalga kılavuzunun diğer tarafının $\lambda/4$ uzunluğundan sonra kısa devre edilmesi gerekir. Bunun için Şekil 3.8`da gösterilen kısa devre boşluk parçası kullanılır. Kare dalga kılavuzu derinliği $w_t$=0.6mm uzunluğundan sonra kısa devre sonlandırılır. Mikroşerit hatların geçtiği yerde çentikler mevcuttur. Çentik genişliği $w_s$ =1mm ve çentik derinliği $w_d$=0.3mm`dir.



Şekil 3.8. Kısa devre boşluk

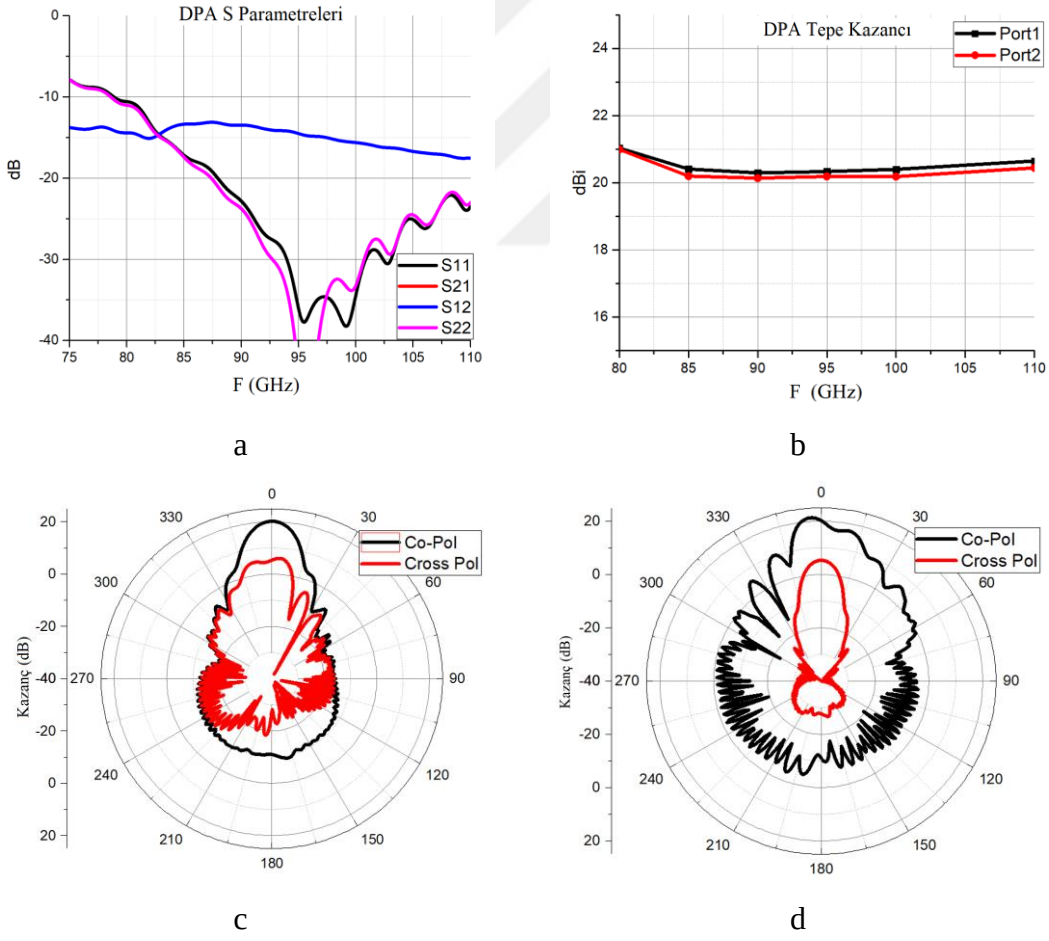
Kare dalga kılavuzu levhasının diğer tarafına Şekil 3.9`de gösterilen piramit horn yerleştirilir. Horn da dalga kılavuzu şekli nedeniyle kare piramittir. Montaj tarafı iç ölçüleri kare dalga kılavuzuna eşittir. Horn piramit uzunluğu ve açıklığı değiştirilerek istenen kazanç değeri elde edilebilir. Bu çalışmada horn piramit boyutları DPA kazancı minimum 20 dBi olacak şekilde optimize edilmiştir. Bu durumda horn uzunluğu h_l=40mm ve horn genişliği h_w=15mm olur.



Şekil 3.9. Piramit horn

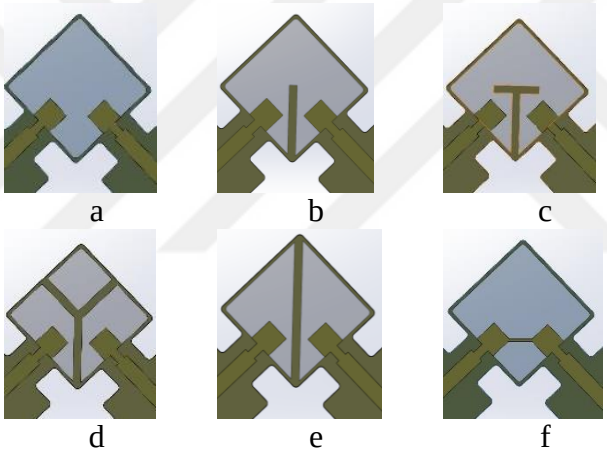
DPA sistemi yukarıdaki bileşenlerin uygun montajından oluşur ve CST Microwave Studio ile benzetimi yapılır. Şekil 3.10`da, tasarlanan DPA nın her bir portuna ait geri yansıma kayıpları (RL) (S11 ve S22), portlar arası izolasyon (S21=S12), maksimum kazanç değerleri ve 95GHz de kazanç paternleri görülmektedir. DPA, 80GHz -110GHz

frekansları arasında −10 dB'den daha düşük bir RL ye sahiptir. Özellikle RL, 93GHz – 100GHz frekansları arası −30 dB'den daha düşük değere sahiptir. Her iki port RL değerleri (S11~S22) yaklaşık olarak eşittir. Portlar arası izolasyon değeri (S21=S12) ise çalışma bandında 13dB ile 17dB arasında değişmektedir. Portlara ait maksimum kazanç değeri ise hedeflenen 20 dBi`ın üzerindedir. Her iki port arasındaki kazanç farkı en fazla 0.2 dBi gibi küçük bir değerdir. DPA simetrik yapıda olduğundan port 1 E düzlem Port 2 H düzlem ile port 1 H düzlem Port 2 E düzlem ile hemen hemen aynı kazanç patern yapısına sahiptir. Bu nedenle DPA çalışma bandının içerisinde bulunan 95 GHz için Port 1 e ait E düzlem ve H düzlem co planar ve cross planar kazanç paternleri çizdirildi. 10dB hüzme genişliği E düzlem için 27º ve H düzlem için 33º`dir. Mikroşerit hatların kare dalga kılavuzunda aynı düzlemde olmasından dolayı H düzlemi yan kulakçıklar 10dB`ye yükselmiştir.



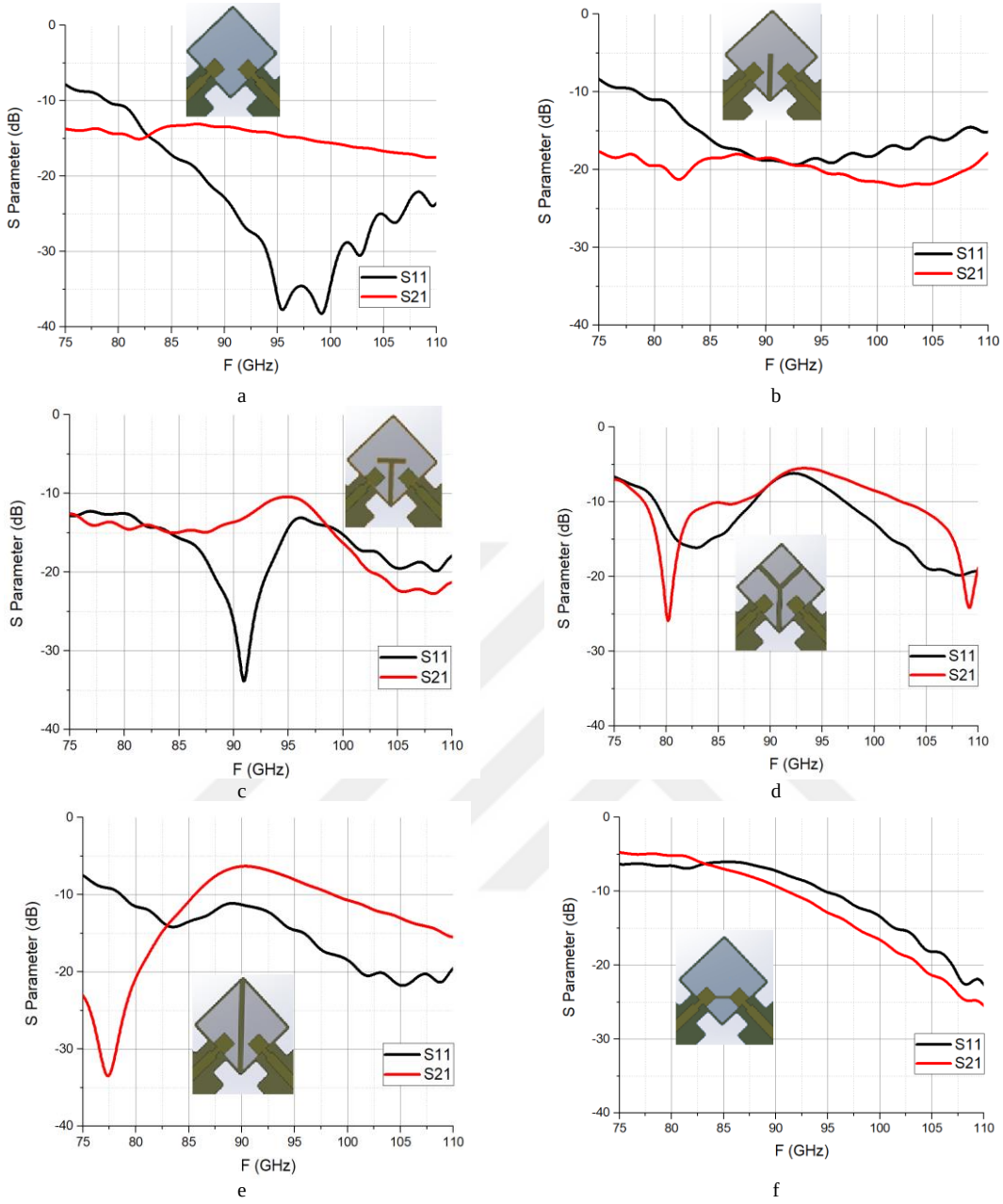
Şekil 3.10. DPA Simulasyon sonucu, a) Geri dönüş kaydı ve izolasyon, b) Tepe kazancı, c) 95GHz E düzlem kazanç , d)95GHz H yüzey kazanç

Geri dönüş kayıplarını artırmadan ve kazaç değerini düşürmeden portlar arası izolasyon artırılmak istenmektedir. Bu nedenle yamalar arasına Şekil 3.11`da gösterilen parasitic yapılar kullanıldı. Nötürleştirme hattı hariç diğer tüm parasitik yapılar toprak düzleminde yamaların arasında yeralmaktadır. Böylece yamalar ile toprak arasında alternatif bir yol oluşturarak ortak bağlantıyı azaltır. Monopol yapı, kılavuz boşluğu ortasından yamalar arasındaki toprak ile birleşen uzunluğu 1.75mm genişliği 0.2mm olan bir hattır. T şekil, monopole dik şekilde yerleştirilen 1.2 mm uzunluğunda 0.2mm kalınlığında hat ile oluşturulur. Y şekil, monopol ucundan 0.2mm kalınlığında hatlar ile kenarlara yapılan dik bağlantılar ile oluşturuldu. Short line, monopolün karşı köşe ile birleştirilmesinden elde edildi. Nötürleştirme hattında ise yama düzleminde, yamalar arası 0.05mm kalınlığında hat oluşturularak elde edilir. Bu hat üzerinden akan akım ile ortak bağlantı azaltılır.



Şekil 3.11. DPA için parasitik eleman ekleme a) Parasitiksiz; b) I şekil, c) T şekil, d) Y şekil, e) Kısa devre hat, f) Nötürleme hattı

Parasitik yapı eklenmiş devre kartları ile DPA sistemi CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak benzetimi yapıldı. İlave yapıların saçılma parametreleri üzerindeki etkileri Şekil 3.12'da incelendi. Port1 ve Port2 simetrik olduğundan, S11 ve S21 parametreleri dikkate alınmaktadır. S11 geri dönüş kaybını, S21 ise portlar arası bağlantıyı temsil eder. Pozitif S21 ise izolasyon seviyesini gösterir.

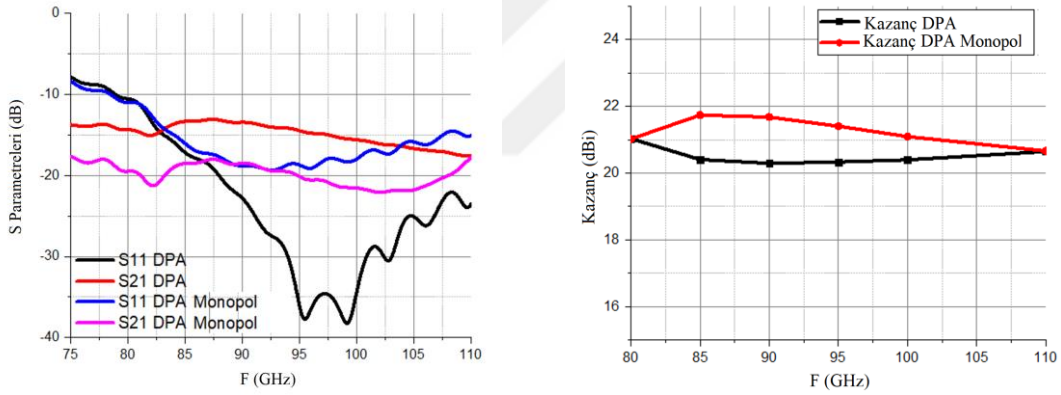


Şekil 3.12.S Parametreleri a) Parasitiksiz; b) I şekil, c) T şekil, d) Y şekil, e) Kısa devre hat, f) Nötürleme hattı

Eklenen tüm yapıların geri dönüş kaybını artırdığı görüldü. Y shape ve nötür hat geri dönüş kaybını daha fazla artırdı ve çalışma bant genişliğini azaltı. Ayrıca izolasyon seviyesini de düşürdü. Monopol, T şekil ve short line yapılarında geri gönüş kaybı artsa da çalışma frekans bandında -10dB`nin altında kaldığından kabuledilebilir seviyededir. T shape ve short line bazı frekanslarda izolasyon seviyesinde artış sağlasa da çalışma bandının tümü gözönüne alındığında maalesef iyileştirme sağlamadı. Monopol yapı,

çalışma bandında izolasyon seviyesini 5dB artırarak 18dB – 22dB seviyesine çıkarmıştır. Kazançta ise 1dB civarında artış meydana getirmiştir. Şekil 9`da frekansa bağlı karşılaştırmalı sonuçlar eklenmiştir. Monopol yapı, DPA çalışma bandında kabul edilebilir geri dönüş kaybı ve izolasyon seviyesinde sağladığı artış ile başarılıdır. DPA sisteminde monopol yapı kullanılabilir.

Bu çalışmada MMD bandında 80GHz – 100GHz frekans aralığında mikroşerit hat beslemeli yeni kompakt dual polarize horn anten tasalandı. Portlar arası izolasyon monopol eklentisi ile 5 dB artırılarak çalışma bandında 18 dB – 22 dB arasına çıkartılmıştır. Piramit horn ile kazanç seviyesi 20dBi üzerinde tutulmuştur. Pramit horn değiştirilerek kazanç değeri değiştirilebilir. Mikroşerit hattı üzerinden kolaylıkla mikrodalga devrelere, devre elemanlarına yada baskı devre kartlarına kolayca bağlantı yapılabilir. Böylece PMMDG sistemi için tasarlanacak DGAS yapısında kullanılabilir. Aynı anda iki adet DGAS bağlanarak polarimetrik veri elde edilebilir.



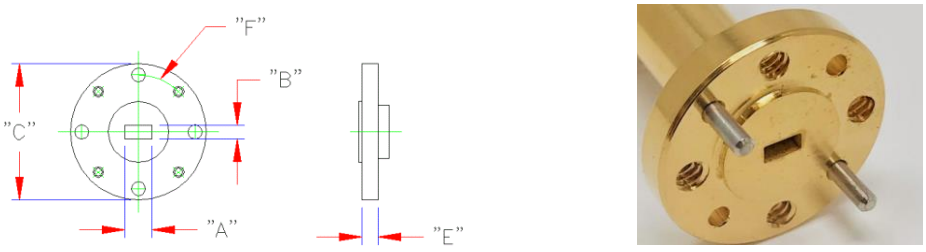
a b

Şekil 3.13. Sonuç Karşılaştırma a) S parametreler, b) Tepe Kazançlar

3.3.2. Wr-10 Horn Anten

DPA antenin iki adet DGAS ile kullanılma zorunluluğu ve üretim karışıklığı nedeniyle tez sonrası gelecek çalışmalar için değerlendirilmesi uygun görüldü. DPA çalışmasında elde edilen çıktılar kullanılarak benzer boyutlarda piramid yapıya sahip horn anten tasarlandı. DGAS RF bağlantı arayüzü çalışma frekansı nedeniyle Wr-10 dalga kılavuzu olarak belirlenmiştir. Dalga kılavuzlarının birbirine montaj olabilmesi bağlanabilmesi için flanş parçalarına ihtiyaç duyar. Wr-10 (W band 75GHz – 110GHz) dalga kılavuzu

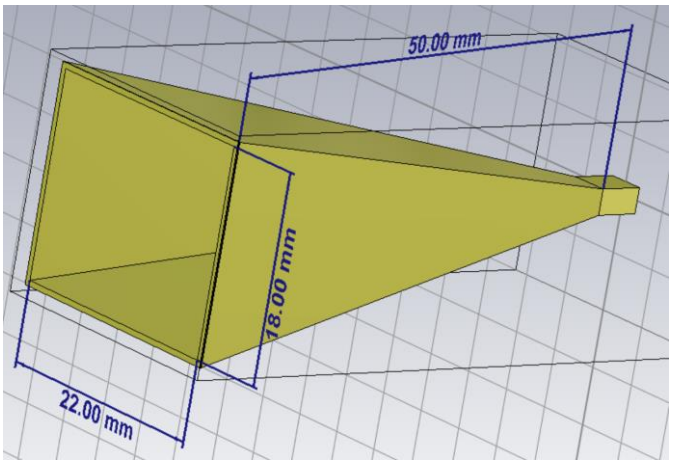
için UG387-U\M standart yapısı kullanılır. Bağlanacak her iki arayüz de UG387-U\M flanşlı ise birbirine uyumlu şekilde bağlanır. Şekil 3.14`de çizim ve fotoğrafı verildi. Şekil üzerinde gösterilen A, B, C, F ve E boyutları sırasıyla 2.54, 1.27, 19.05, 14,27 ve 4.06 mm`dir. A ve B boyutları burada Wr-10 için verildi.



a b

Şekil 3.14. UG387-U\M Flanş yapısı a)Çizimi, b) Fotoğrafı

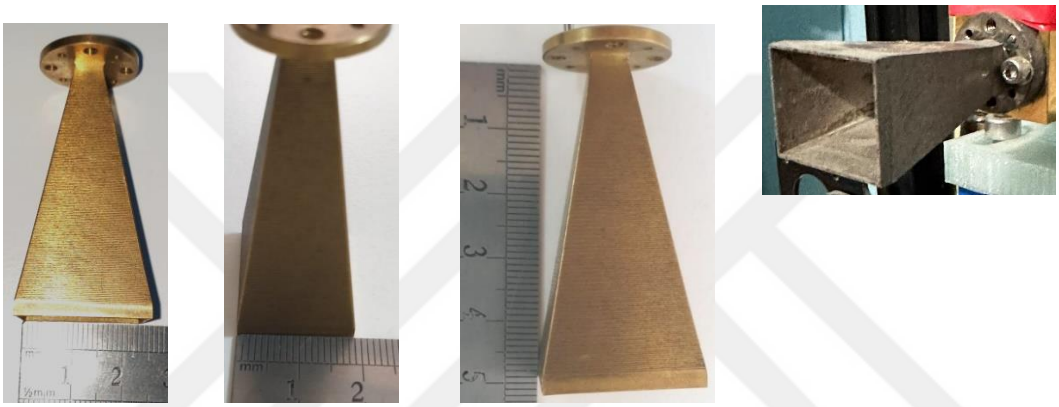
Piramit horn antenin giriş kısmı Wr-10 dalga kılavuzu olduğundan dolayı iç ölçüleri 1.27mm x 2.54mm olacaktır. Horn piramidin boyu ve açıklığı kazanç ve hüzme genişliğini ayarlar. Bu nedenle DPA anda kullanılan Horn anten boyutları optimize edilerek piramit boyu daha yüksek kazanç için artırılarak 50mm yapıldı. Açıklık boyutları ise kare yapıdan giriş dalga kılavuzu yapısına uygun şekilde dikdörtgen hale getirildi ve boyutları 23mm x 18mm olarak güncellendi. Bu boyutlar ile kazancın 20dBi üzeri ve 3dB hüzme genişliğinin 15° altında olması hedeflendi. Piramit Horn üretilmeden önce CST yazılımı ile benzetimi yapıldı. Benzetim şekli ve boyutları Şekil 3.15`de verilmiştir.



Şekil 3.15. Horn anten benzetim ve boyutları

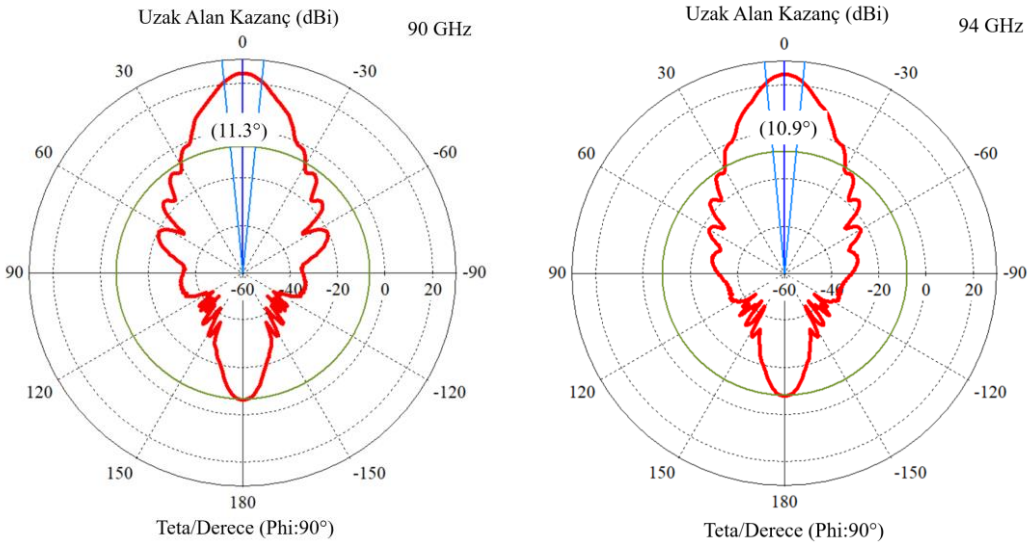
Horn anten benzetin sonuçlarınan sonra tel erezyon ve talaşlı imalat teknolojisi kullanılarak pirinç malzemeden üretildi. Üretilen Horn anten fotoğrafları ve monjlı hali Şekil 3.16`de verilmiştir.

Çalışma bandında (90GHz – 100 GHz) geri dönüş kaybı (S11) -25dB`den küçüktür ve voltaj duran dalga oranı 1.2`nin altındadır. Kazanç ise 24 dBi`den büyüktür. Çalışma frekans alralığında hüzme genişlikleri 11° civarındadır. Böylece hedeflenen değerler benzetim ortamında sağlanmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 3.17`de verilmiştir.



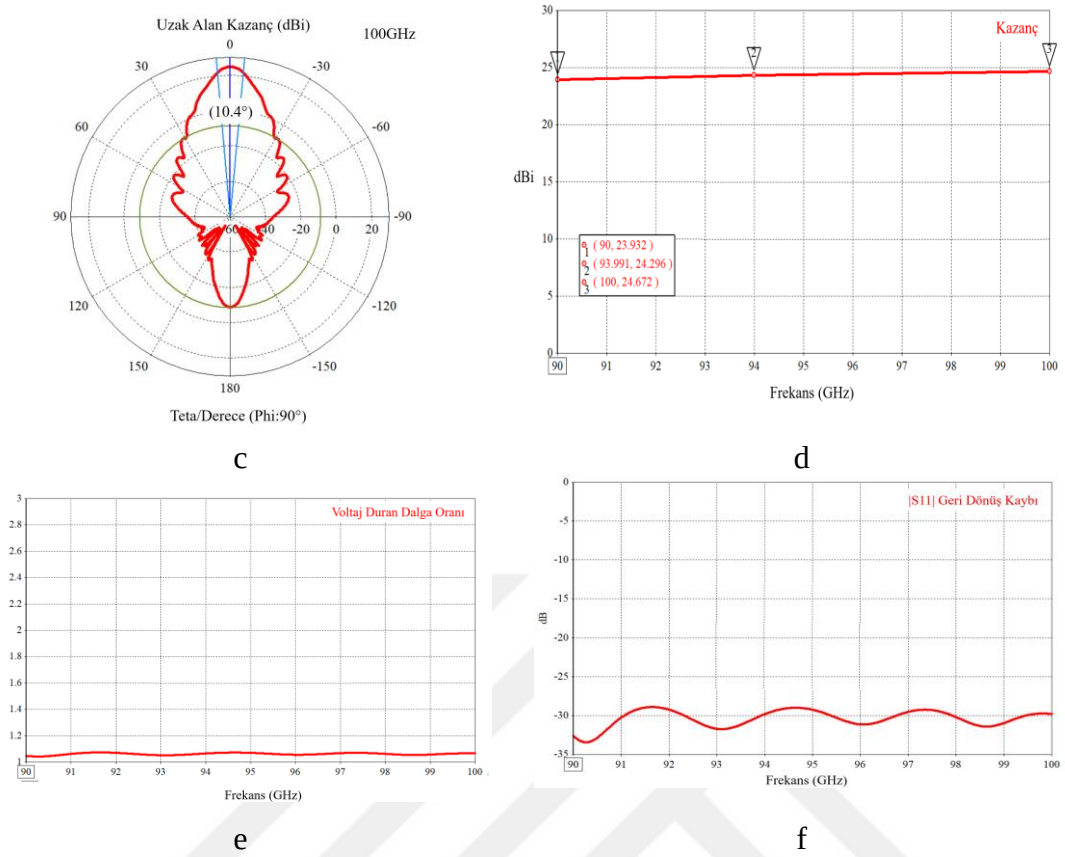
a b c d

Şekil 3.16. Horn anten a) Genişlik, b)En, c)Yükseklik, d) Sistem montajı



a b

Şekil 3.17. Horn anten benzetim sonuçları a) 90GHz, b) 94GHz, c) 100GHz, d) Kazanç, e) Voltaj duran dalga oranı, e) Geri dönüş kaybı



Şekil 3.17. (Devam) Horn anten benzetim sonuçları a) 90GHz, b) 94GHz, c) 100GHz, d) Kazanç, e) Voltaj duran dalga oranı, e) Geri dönüş kaybı

3.4. DGAS Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

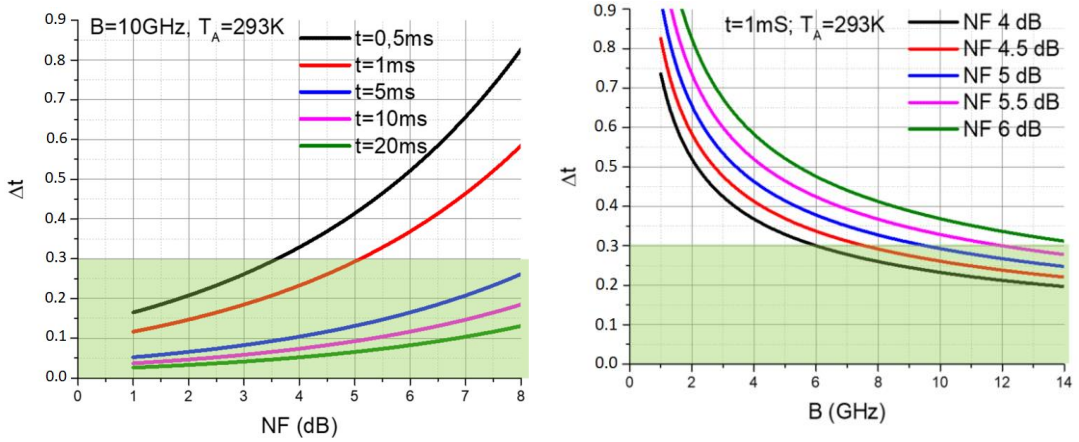
PMMDG çalışma bandı 94 GHz olarak belirlendi. DGAS bu frekans bandında kişi üzeri görüntüleme yapabilecek hassasiyette olmalıdır. Tablo 1.2`de verilen mevcut çalışmalar incelendiğinde bu çalışmalardan daha iyi olan ve tez hedefi olarak belirlenen yüksek hassasiyet değeri 0.5 K`dir. Bu hedef için öncelikle DGAS yapısı ve içerecek komponentler belirlenmelidir. Tablo 1.1 incelendiğinde komponent ve MMIC ile oluşturulabilecek DGAS tasarımı için üç temel alıcı yapısı görülmektedir. (Bolometre yapılar henüz komponent bazında mevcut değildir.) Görüntüleme için çözünürlük, maliyet ve çıkış işaret gücünün yüksekliği açısından bu çalışmada ön yükselteçli direkt algılama yapısı DGAS için seçilmiştir. Bu yapı temelde LNA ve Detektör diyot içermektedir. DGAS yapısında kullanılacak MMIC LNA ve detektör parametrelerin belirlenmesi, en önemli tasarım aşamasıdır. DGAS parametreleri belirlenirken Denklem (2.8)'den faydalanılacaktır. Bunun için ortam sıcaklığı 293 K (20°C) için aşağıdaki öncül

analizler gerçekleştirilmiştir. Burada, B, τ, T_A ve T_N parametrelerinin birbirine göre durumu incelenmiştir. T_N, alıcı sıcaklığı olarak ifade edilir ve alıcı gürültü değerinin (F)in bir fonksiyonudur. F ise Noise Figure(NF)`in linner değeridir (NF=10Log(F)). Alıcı ve LNA gibi komponentlerin genellikle NF(dB) değeri verilir. NF ile $T_N$ arasındaki ilişki Denklem (3.1)`de verilir.

$$T_N = Ortam\ Sıcaklığı\ (K) * \left(10^{\frac{NF}{10}} - 1\right) \tag{3.1}$$

Bu durumda çalışma hedefi 0.5 K çözünürlük değeri için; Şekil 3.18`de elde edilebilecek çözünürlük değeri yeşil alan ile gösterilir. Gerçekleştirme durumu için 0.5 K hedefi olduğundan hesaplama hedefi 0.3 K seçilmiştir. Böylece hesaplamada olabildiğince iyi değer hedeflenmiştir. Bu hedef için buna göre ilk analizler için tasarım B>10 GHz, τ> 1ms ve NF< 4 dB değerleri olarak belirlenebilir.

Özellikle son yıllarda otomobil Radar`larının, E band haberleşme sistemlerinin ve MMD 5G sistemlerinin geliştirilmesi bu frekanslardaki MMIC üretimini ve üreten firma sayısı artırmıştır. Yine de birçok durumda 94 GHz MMIC`ler gerek ihraç izin istenmesi gerekse en az alım isterleri gibi şartlar nedeniyle teminde sıkıntı olabilecek olan kritik ürünlerdir. Ticari olarak temin edilebilecek 94 GHz MMIC LNA listesi Tablo 3.3`da verilmiştir. DGAS analiz şartımız olan B>10 GHz ve NF< 4 dB şartını sağlayanlar tabloda yeşil ile işaretlenmiştir.



a b

Şekil 3.18. Çözünürlük analizleri a) NF-τ (B=10GHz) b) B-NF (τ=1mS)

Tablo 3.3. 94 GHz MMIC LNA`lar

Üretici	Menşei	Üretici Kodu	Kazanç dB	Gürültü Figürü (NF) dB	Çalışma Frekansı GHz	Max. Çıkış Gücü dBm
Northrop Grumman	ABD	ALH495-LN	18	4.3	80 - 100	4
		ALH497-LN	17	4.2	80 - 100	1
		ALH503-LN	16	4.2	80 - 100	1
		ALH504-LN	18	4.1	82 - 102	4
		ALP280	29	2	80-100	3
		ALP283	29	2.5	80-100	3
HRL	ABD	LN4-110	22	3.5	75 - 110	3
		LN5-100	24	3	70 - 100	3
UMS	Almanya	CHA1008-99F	16	5	80 - 105	6
OMMIC	Fransa	CGY2190UH/C1	25	3	75 - 110	5
MKR-R	Çin	MKR-65LNA	20	2.3	65 - 110	0
MKR-R	Çin	MKR-75LNA	22	3.6	75 - 110	0
MKR-R	Çin	MKR-90LNA	23	3.6	90 - 110	0
Gotmic	İsveç	gANZ0017	17	5	75 - 110	10
Reliasat	İngiltere	W-LNA-9296	25	5	92-96	3

DGAS yapısı MMIC LNA ve diyot detektörden meydana gelmektedir. Ticari olarak temin edilebilecek 94 GHz diyot detektör listesi Tablo 3.4`de verilmiştir. Hassasiyet özellikleri birbirine benzeyen diyotlarda seçim yapılırken LNA üreticisi olaması da göz önünde bulundurulmuştur. Bu durumda tasarımda aynı firmanın ürünleri kullanılabilecektir. Özellikle OMMIC, MKR-R ve HRL firmalarının ürünleri istenen özelliklerde MMIC LNA ve diyot detektör çözümünü bir arada sunmaktadır.

DGAS için yukarıda belirlenen tasarım değerlerini sağlayabilecek şekilde; MMIC LNA olarak OMMIC firmasının CGY2190UH/C2 MMIC`si kullanılacaktır. Detektör olarak da yine aynı firmanın CGY2870AUH/C1 zero bias detektör (ZBD) diyotu kullanılacaktır. Bu durumda DGAS yukarıda belirtilen MMIC LNA ve diyot detektör ile birlikte bu devrelerin çalışmasını sağlayacak güç ve dc devreler ile anten bağlanabilecek giriş

arayüzüne sahip olacaktır. DGAS yapısı tasarım blok gösterimi ve görsel gösterimi Şekil 3.19`de verilmiştir.

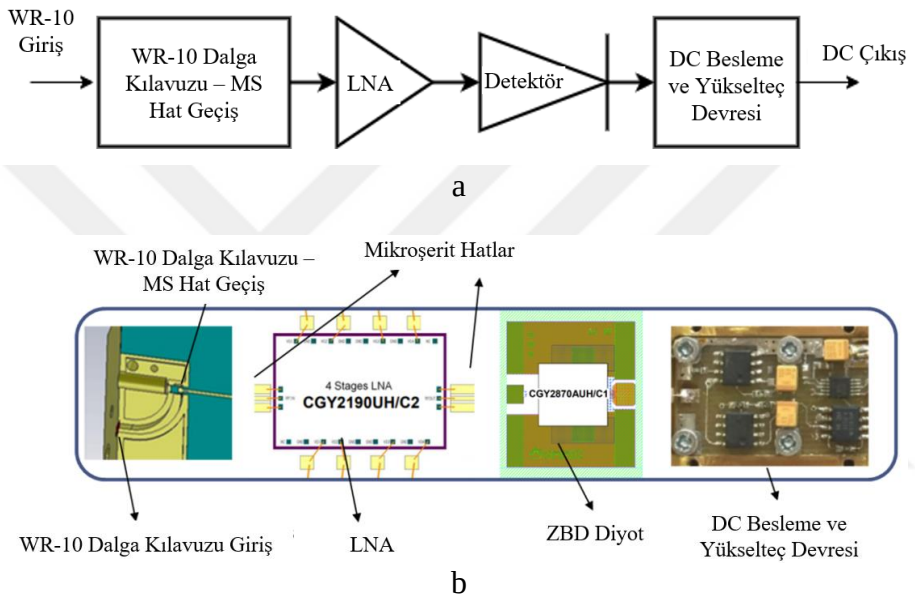
Tablo 3.4. 94 GHz Detektör diyotlar

Üretici	Menşei	Üretici Kodu	Hassasiyet (mV/mW)	Cut off Frekansı GHz	Input Power (dBm)
Agilent	ABD	HSCH-9161	500	>200	+20 (burn)
OMMIC	FRANSA	CGY2870AUH/C1	9000	>110	+20 (burn)
HRL	ABD	V1A	~10000	>200	-10
HRL	ABD	DD2	~10000	>200	-30
Virginia Diodes	ABD	W band ZBD	2000	>125	
Skyworks	ABD	DMK2790		>150	
Gotmic	İsveç	gDPZ0011	3000	170	
MKR-R	Çin	MKR-0110ZBD	600	110	-50
MKR-R	Çin	MKR-70ZBD	3000	130	-50
MKR-R	Çin	MKR-90ZBD	2500	170	-50
Micran	Rusya	ZB-28		110	

Seçilen bu LNA (NF:3dB) için integrasyon zamanı 1mS ve alıcı bant genişliğinin 10GHz olması durumunda 23°C ortam sıcaklığı için Denklem 3.1 ve Denklem 2.8 kullanılarak alıcı termal çözünürlüğü hesaplanabilir. Bu durumda teorik olarak alıcı çözünürlüğü $\Delta T = \sim 0.187K$'dir. Bu tasarım aşamasında hedeflenen 0.3K değerinden iyi bir değerdir ve hedeflenen NF değerinden daha düşük NF değerli bir LNA seçerek gerçekleştirilmiştir.

DGAS kasası için talaşlı imalat ile kolay işlenebilmesi ve doğrudan elektroliz ile altın ile kaplanabilmesi nedeniyle brass seçilmiştir. Kasa yüzeyinin iletkenliğinin artması ve korozyona karşı dirençli olması nedeniyle altın kaplama tercih edildi. DGAS, brass kasa, DC devre kısmı ve MMD devre kısmı olarak 3 kısımdan meydana gelir. Brass kasa üzerinde DC besleme konektörü, işaret çıkış konektörü montajlanır. MMD işaret girişi W band antenlerin bağlanacağı şekilde WR-10 UG387/U-M flanş standartında dalga

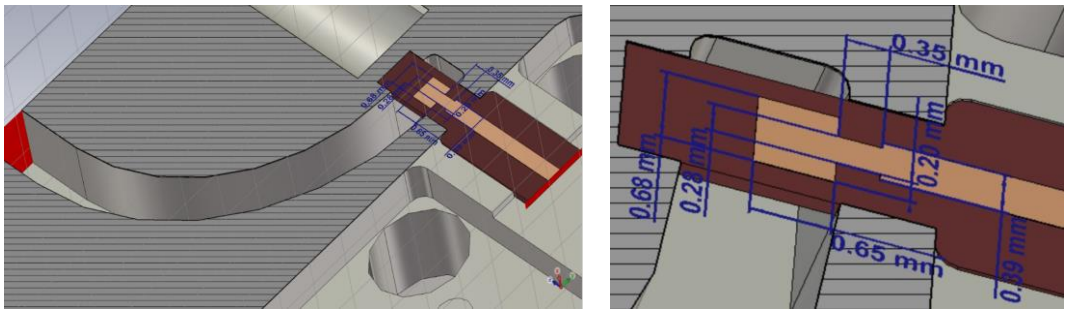
kılavuzu girişli olacaktır. Bu dalga kılavuzu ise kasa parçalarına işlendiğinden bütünleşik halde bulunur. Wr-10 dikdörtgen dalga kılavuzu iç boyutları 2.54mm x 1.27mm`dir. Dalga kılavuzu girişten itibaren E plane'de 90° bend edilerek sonlandırılır. Buraya mikroşerit hat ile yapılan prob yerleştirilerek dalga kılavuzundan MMD devreye geçiş sağlanır. MMD devre kısmında sırasıyla; MS prob, LNA, MS line ve detektör bulunur. Ayrıca LNA için gerekli single layer capacitors (SLCs) bulunur. Bu elemanlar kasaya epoxy yapıştırıcı ile montajlanır. Birbirlerine ve DC devreye ise bond wires kullanılarak bağlanır.



Şekil 3.19. DGAS Yapısı a) Blok gösterimi, b)Görsel gösterimi

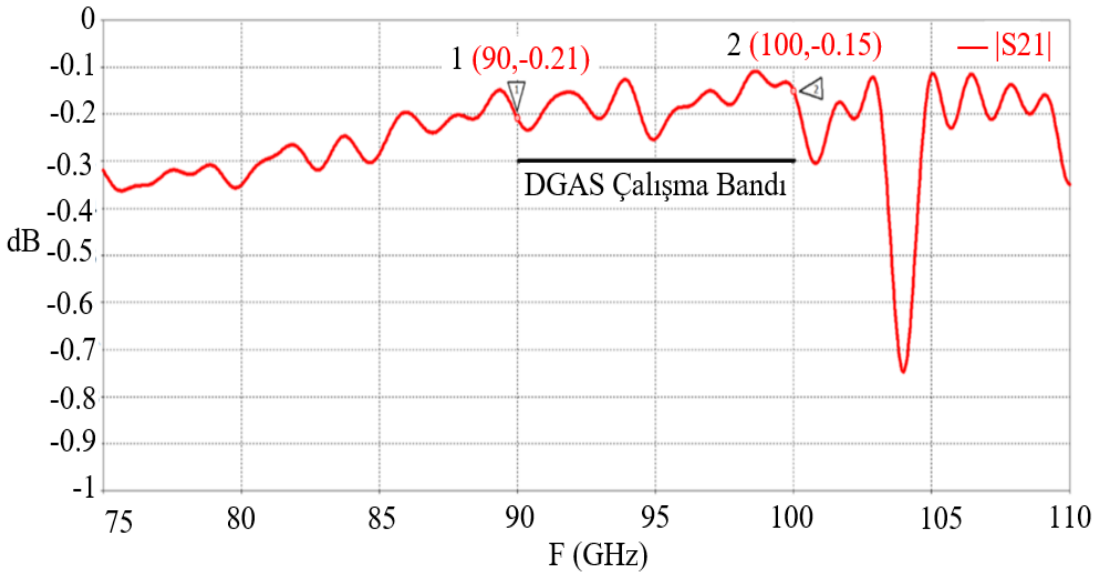
MS Prob ve MS line için düşük kayıplı olması nedeniyle substrat olarak Rogers RO5880 duroid dielektrik katmana sahip baskı devre kartı kullanılmıştır. Kullanılan kartın dielektrik kalınlığı 127um ve bakır kalınlığı 8um`dir. Dielektrik sabiti 2.2 ve loss tangent 0.0009`dur. MS prob; WR-10 dalga kılavuzundan mikroşerit hatta geçiş için kılavuz içerisine yerleştirilmiştir ve üzerindeki yama boyutları 0.68mm*0.65mm ve bu yamayı 50 Ω mikroşerit hatta bağlayan empedans uyumlama hattı boyutları 0.20mm*0.35mm`dir. 50 Ω hattın hat genişliği ise 0.39mm`dir. Yapı çizimi Şekil 3.20`de verilmiştir. Bu yapı; 3 boyutlu elektromanyetik çözümleme yazılımı olan CST Microwave Studio yazılımında simule edilmiştir. Benzetim sonucuna göre kullanılacak

yapının çalışma bandında geçiş kaybı >0.3dB`dir. Benzetim sonucu Şekil 3.21`de verilmiştir. Mikroşerit prob devresi kasa yüzeyine iletken epoxi yapıştırı ile montajlanır.



a b

Şekil 3.20. WR-10 Dalga kılavuzu MS hat geçiş.

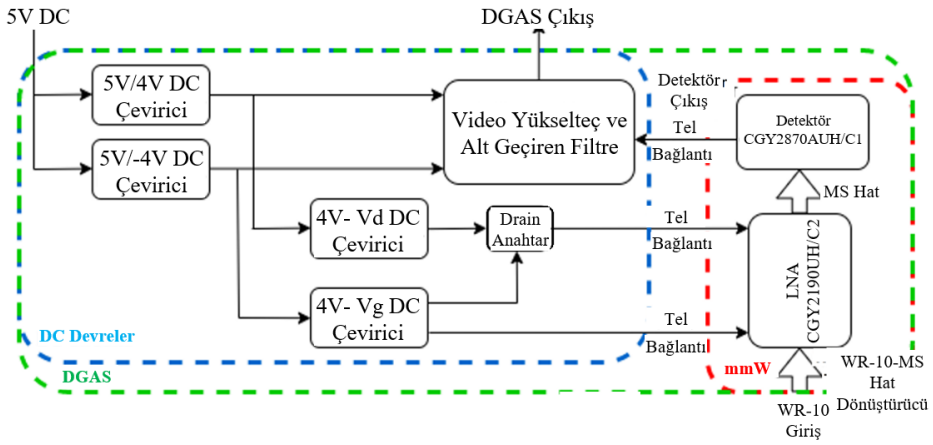


Şekil 3.21.WR-10 Dalga kılavuzu MS hat geçiş araya girme kaybı

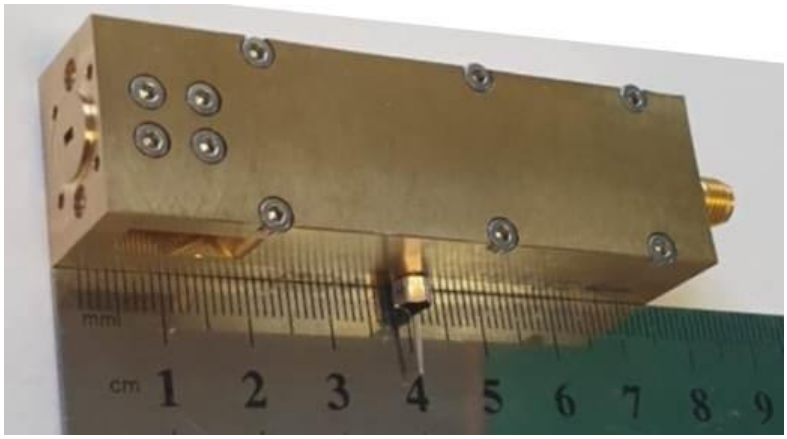
Mikroşerit hat sonrasına kasa yüzeyine CGY2190UH/C2 MMIC LNA epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılarak eklenir. Mikroşerit hat ve LNA RF hattı 25um çapında altın tel ile wire bond yapılarak birleştirilir. Ayrıca LNA`nın her iki tarafına drain ve gate gerilim hatları ile kasa arasına paralel 4er adet 47pF single layer capacitorlar yerleştirilir. LNA arkasına 50 Ω mikroşerit hat devresi montajlanır. Hat sonrasına CGY2870AUH/C1 detektörü montajlanır. Detektör DC padı DGAS içerisinde yer alan DC devre kısmının giriş padine bond wire ile birleştirilir. Böylece DGAS içerisindeki MMD devresi tamamlanır.

DGAS DC devresi ise LNA için gerekli besleme gerilimleri ile detektör çıkış işaretini filtreleyen ve yükselten devrelerden oluşur. Sistemin çalışması için gerekli olan besleme gerilimi 5V DC`dir ve kasaya montajlı feed thru konektörü ile alınır. DC to DC çeviriciler kullanılarak yükselteç ve filtre devresi için gerekli +4V ve -4V DC gerilimleri elde edilir. Yükselteç ve low pass filtre (LPF), işlemsel yükselteç ile gerçekleştirildi. Yükselteç kazancı ve LPF kesim frekansı devre üzerinden direnç ve kondansator değerleri ile ayarlanabilir. Bu çalışma için kazanç 15 ve LPF kesim frekansı 1KHz olarak ayarlandı. Filtrelenen ve yükseltilen işaret SMA female konektör ile kasa dışına aktarılır. Ayrıca +4V gerilimden DC -DC converter kullanılarak LNA için gerekli olan drain gerilimi (V_d =1V) elde edilir. Bu gerilim FET (Field effect Transistor) tabanlı bir switch üzerinden bond wires kullanılarak SLCler üzerinden LNA drain padlerine verilir. -4V gerilimden DC to DC converter kullanılarak LNA için gerekli olan gate gerilimi (V_g =-0.1V) elde edilir. Bu gerilim bond wires kullanılarak SLCler üzerinden LNA gate padlerine verilir. Ayrıca bu DC to DC converter çıkışı ile drain switch kontrol edilir. Çünkü LNA`nın çalışması için drain geriliminin gate geriliminden sonra verilmesi gerekmektedir. Aksi durumda LNA zarar görebilir. DGAS elektriksel bağlantı arayüzü Şekil 3.22 ve fotoğrafı Şekil 3.23`da verilmiştir.

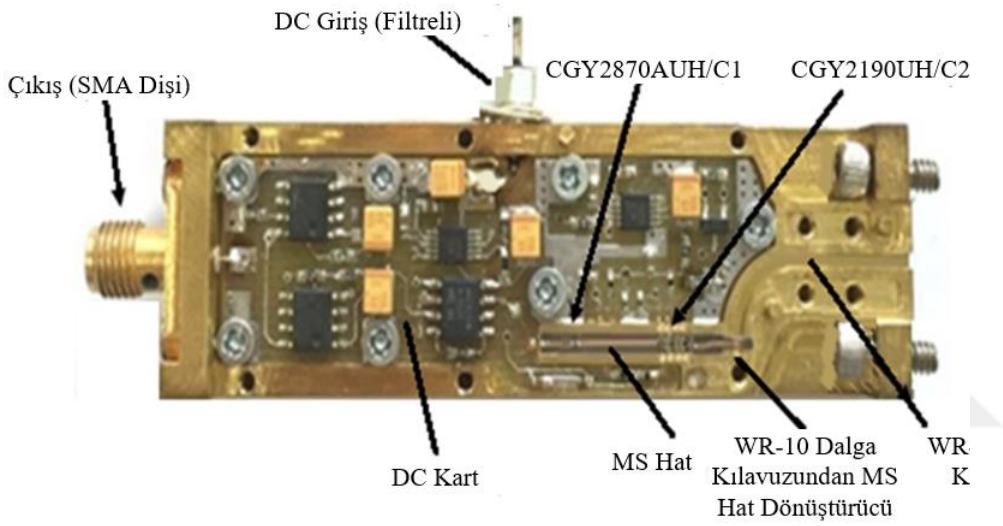
DGAS, kompakt yapıda olup anten hariç SMA konektör dâhil boyutları 20 mm x 20mm x 85 mm`dir. MMD devre kısmını MS geçiş hattı, MMIC LNA, MMIC detektör, tek katmanlı kondansatörler ve tel bağlantı elemanları oluşturur. Bu kısma ait üretim fotoğrafı Şekil 3.24`te verilmiştir. Böylece tasarlanan hattın ve temin edilen MMIC yongaların montajı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.22.DGAS Bağlantı arayüzü

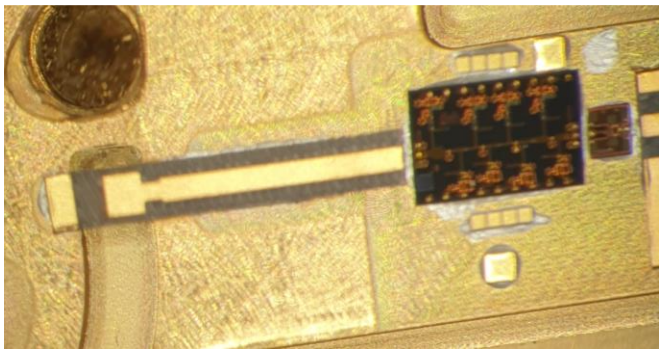


a



b

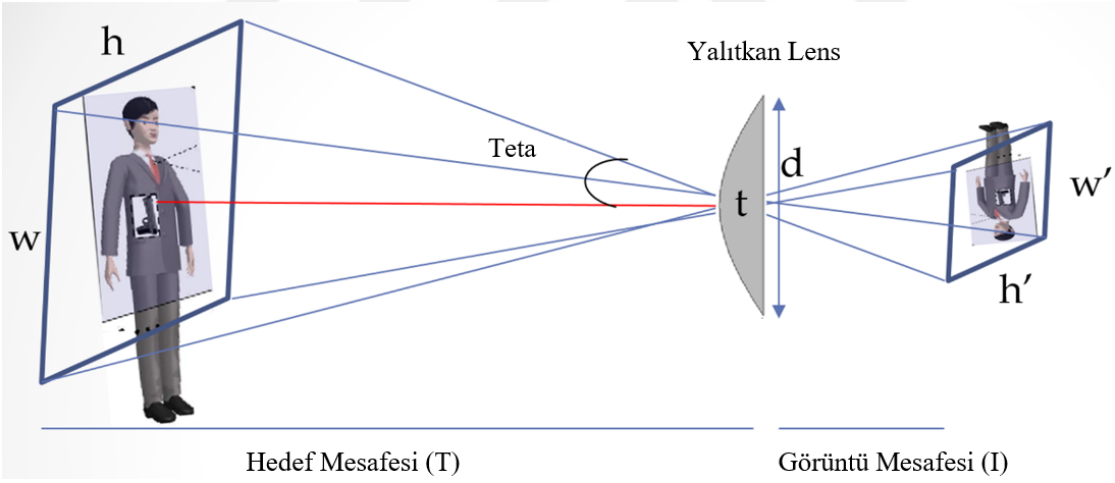
Şekil 3.23. DGAS Fotoğrafı a) Kasa b)İç kartı



Şekil 3.24. MMD üretim fotoğrafı

3.5. Yarı Optik Görüntüleme Sistemi

Bu çalışmada tek DGAS kullanabilen ve bu nedenle Kartezyen koordinatlarda tarama yapabilen dielektrik lens tabanlı quasi optik görüntüleme sistemi gerçekleştirildi. Quasi optik görüntüleme sistemi dielektrik lens ve Kartezyen tarayıcı olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelmektedir. Dielektrik lens görüntüleme yapmak için gerekli işaretlerin alınması ve DGAS üzerine iletilmesi için gerekli birimdir. Optik görüntüleme sistemlerinde olduğu gibi PMMDG sisteminde de hedef görüntüleme alanının boyutları ve gerekli tarama alanı boyutlarını dielektrik lens özellikleri belirler. Bu tersi içinde geçerlidir. Lens parametrelerinin belirlenmesi ve lens tasarımı için öncelikle görüntüleme senaryosunun belirlenmesi gerekmektedir. Hedef senaryomuz bir önceki bölümde hedef 1.5m x1.5m boyutlarında ve 3-5m uzaklıkta yer alacağı belirlenmişti. Bu durumda Lens büyütme katsayısı (M) -0.08 olarak seçilirse (- oluşan görüntünün ters olduğunu işaret eder) idealde görüntüleme için 12cm*12cm alan yeterli olur. Hedef senaryosu Şekil 3.25`de verildi.



Şekil 3.25. Hedef senaryosu

Lens malzemesi olarak bu çalışmada Teflon (PTFE) kullanıldı. PTFE lens dielektrik malzemesi kırılma indisi (n) 1.4213`dir ve görüntüleme için uygundur. 94 GHz frekansında tanδ= 0.0003 and $\varepsilon_r$ = 2.02). Belirlenen bu parametrelere göre lens özellikleri geometrik optik eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir. f odak mesafesi olmak üzere Denklem (3.2)`deki gibi Gaussian lens denklemi yazılabilir.

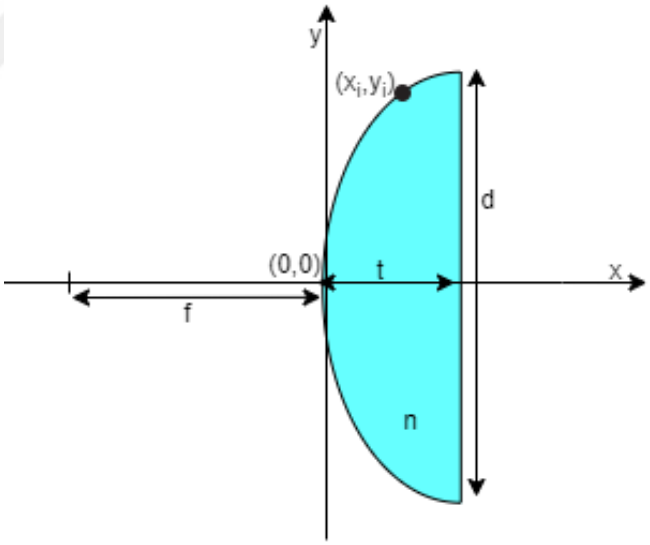
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{T} + \frac{1}{I} \tag{3.2}$$

$I = M * T$; Denklem (3.2)`de yerine yazılırsa $f = \frac{M*T}{M+1}$ olarak elde edilir (T=5m için).

Yukarıda açıklanan senaryoya göre f=~37.3cm olur. Böylece Şekil 3.26`de gösterildiği şekilde konvex olan lens yüzeyi Denklem (3.3)`yı kullanarak elde edilir.

$$y_i = [(n^2 - 1)x_i^2 + 2(n-1)fx_i]^{0,5} \tag{3.3}$$

Burada 0<x<-t aralığında (t=lens kalınlığı) olmak üzere, 0<y<+d/2 aralığında (d=lens çapı) olur. Hesaplamalar gerçekleştirildiğinde d=24cm ve t=3.49cm elde edilir. Hesaplanan yüzey formülüne göre lens yüzey şekli elde edilir. Yüzey şekline montaj için gerekli olan deliklerin yerleşeceği 1cm genişliğinde montaj yeri eklenir. Böylece üretim çapı 26cm olur. Elde edilen bu şekil bilgisayar kontrollü hassas bir latte makinesinde teflon malzeme kullanılarak Şekil 3.27`da olduğu gibi üretilir.



Şekil 3.26.Lens geometrisi

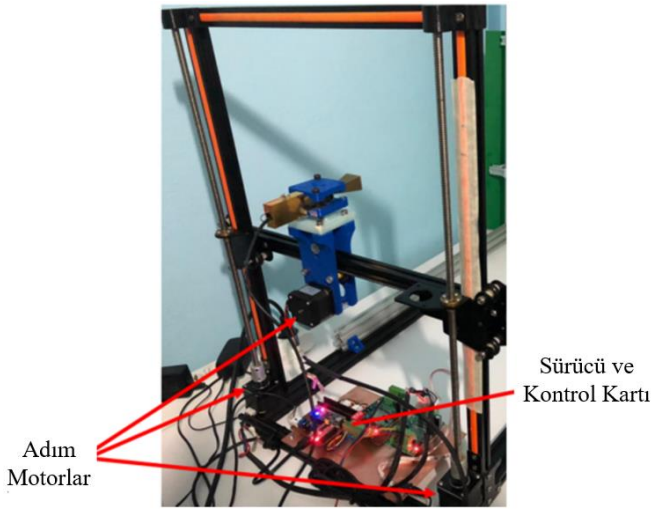
Kartezyen tarayıcı; Şekil 3.28`de gösterildiği gibi x ve y ekseninde maksimum 30cm iki boyutlu lineer hareket edebilecek şekilde rafta hazır ürünlerden gerçekleştirildi. Her bir eksen bilgisayar kontrollü step motorlar ile hareket ettirilmektedir. Hareket çözünürlüğü 1mm`dir. Hareket kafasına DGAS ve lazer pointer montajlamak için 3D yazıcı ile rig

yapıldı. Ayrıca tarayıcı üzerine mesafesi elle ayarlanabilecek şekilde alüminyum sigma profillerden gerçekleştirilmiş dielektrik lens çerçevesi yerleştirildi. Step motor sürücü kartları ve data toplama kartları tarayıcının uygun bir bölgesine montajlandı. Böylece Şekil 3.29`de gösterilen 1mm hareket çözünürlüğü olan yarı optik görüntüleme sistemi gerçekleştirildi. Yarı optik görüntüleme sistemi uzamsal çözünürlüğü Denklem (2.9) kullanılarak (94 GHz frekansı hedef mesafesi 3m için) 45mm olarak hesaplanır. Lens çapı büyültülerek bu çözünürlük küçültülebilir. Bu değer fiziksel olarak algılanabilecek en küçük hedef boyutudur.

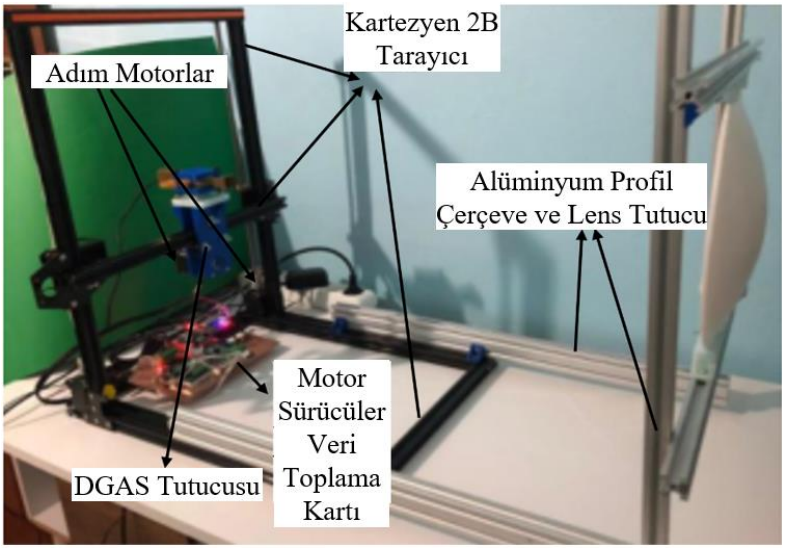


a b c

Şekil 3.27. Teflon dielektrik lens a) Üretim öncesi teknik çizim b) Üretilen lens



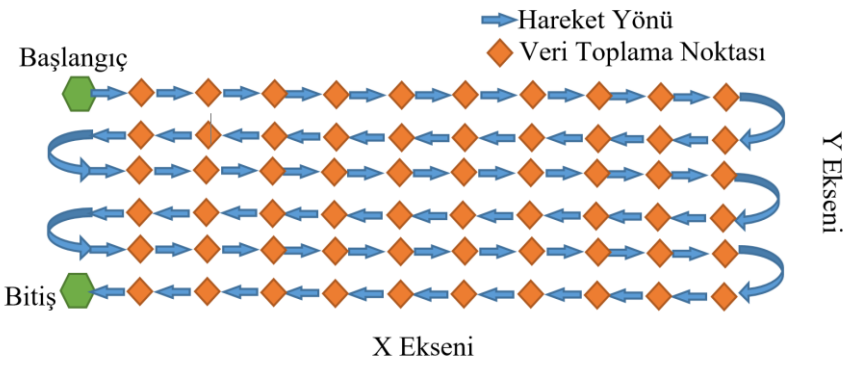
Şekil 3.28. Kartezyen tarayıcı



Şekil 3.29. Yarı optik görüntüleme sistemi

3.6. Kontrol ve Data Toplama Sistemi

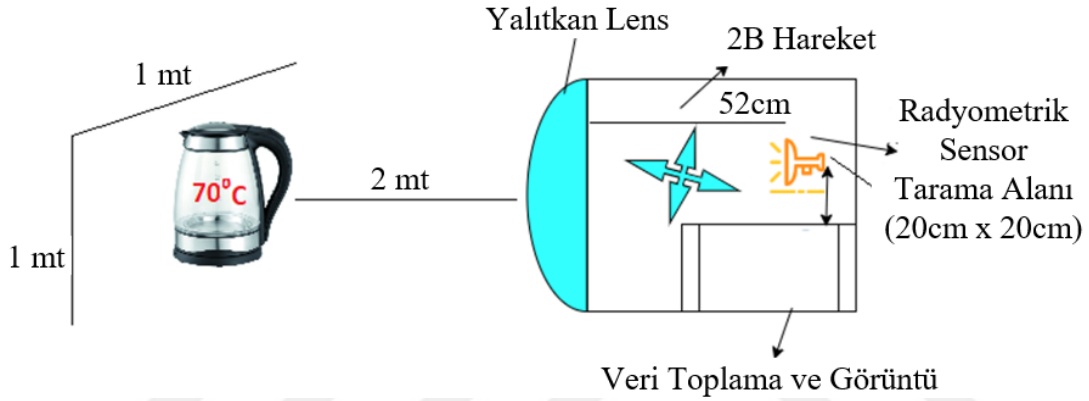
Tarayıcı sistemin istenen koordinata gitmesi için step motorların hareketi gereklidir. Bu hareket MCU kontrollü bir sürücü devre üzerinden gerçekleştirilir. Gidilen her koordinat noktasının kayıt edilmesi gerekmektedir. Ayrıca her koordinat noktası için DGAS çıkış işaretinin kaydedilmesi gerekmektedir. Tarama ve data toplama topolojisi Şekil 3.30`de verildi. Sistem x ekseninde her iki yönde de data toplamaktadır. Koordinat noktalarına göre kayıt edilen veri ile PMMDG görüntüsü elde edilecektir. Bu nedenle kontrol ve veri toplama sistemi, tarayıcı sürücülerini kontrol edebilecek ve DGAS datasını alabilecek bir donanım ile bu donanım üzerinde ve bilgisayar üzerinde çalışan yazılımlardan oluşur. Bu birim için EBTRO firmasının veri toplama ve tarayıcı kontrol yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Tarama ve veri toplama topolojisi

3.7. Sistem Kurulumu ve Deneysel Çözünürlük Çalışmaları

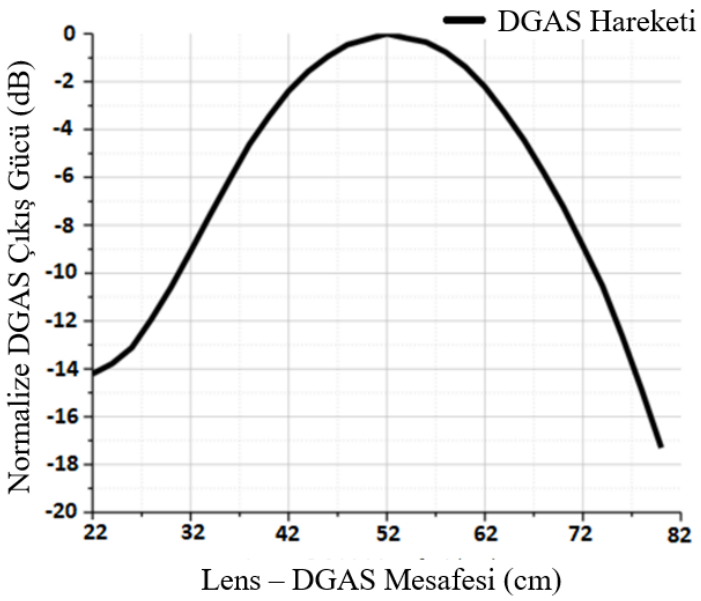
Bu çalışma ile gerçekleştirilen DGAS ile görüntü elde etmek için; DGAS girişine WR-10 dalga kılavuzu girişli 20dBi kazançlı standart gain horn anten montajlandı. Böylece DGAS anten ile birlikte tarayıcı üzerinde hazırlanan rige yerleştirildi. Ölçüm senaryosu olarak ortam sıcaklığı 23°C iç ortamda su ısıtıcısında 70°C sıcaklıkta su (Hot sample) kullanıldı. Su ısıtıcı şekli silindirik yapıda ve su dolu kısım 14cm taban çapı ve 22cm yükseklik boyutlarındadır. Sıcak örnek, PMMDG`dan 2mt mesafeye yerleştirildi. Böylece Şekil 3.31`da gösterilen ölçüm senaryosu hazırlandı.



Şekil 3.31. PMMDG Ölçüm Senaryosu

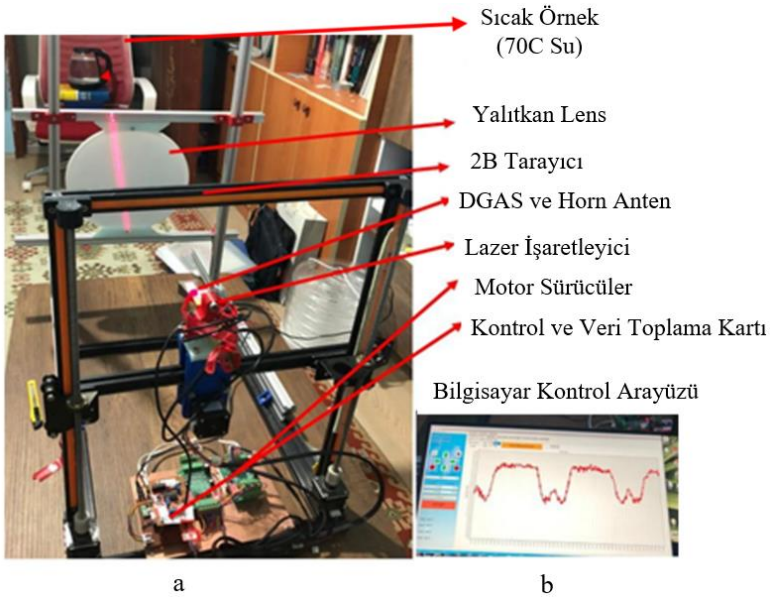
DGAS mesafesi Denklem (3.2) kullanılarak hesaplanır. Bu durumda T=2m ve f=0.373m için I=0.455m olarak elde edilir. Geometrik olarak hesaplanan bu değer lens işlemesi, malzeme toleransları ve oluşan aberationlar dikkate alındığında ölçülerek belirlenmesi gerekmektedir. Ölçüm için DGAS, hesaplanan mesafe civarında lense yaklaştırılarak ve uzaklaştırılarak kesin çalışma mesafesi bulunur. Bu mesafe en yüksek çıkış işareti alınan mesafedir. Normalized ölçüm sonucu Şekil 3.32`de verilmiştir. Bu durumda DGAS mesafesi 0.52m olarak belirlenir ve lens frame kullanılarak bu mesafe ayarlanır.

DGAS mesafesi ayarlandıktan sonra ölçüm düzeneği lazer pointer ile kontrol edilir. Güç ve kontrol bağlantıları yapılarak bilgisayar yazılımı üzerinden sistem çalıştırılır ve PMMDG ile USB üzerinden bağlantı kurulur. Yazılım üzerinden tarama alanı (10cm*10cm), hız (0.1m/s) ve adım mesafesi 1mm olarak girilir. Hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 3.33`de görülmektedir ve bu durumda ölçümler gerçekleştirildi.

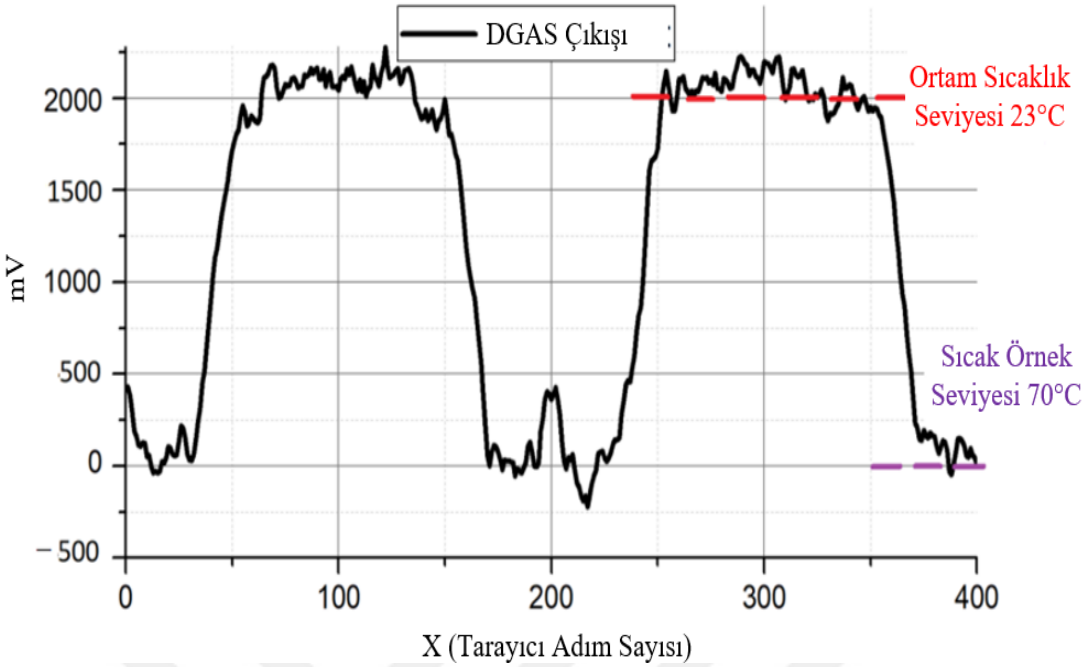


Şekil 3.32. DGAS Mesafesi Ölçüm Sonucu

Ortam ile sıcak örnek (Sıcak su) arasındaki 47°C`lik (70°C-23°C) fark; DGAS çıkışındaki gerilim farkı olarak alınması gerekmektedir. Bu fark sistemin uygulama çözünürlüğüdür. Denklem (2.8) ve (3.1) kullanılarak DGAS`nin termal çözünürlüğü $\Delta T = 0{,}187K$ (Ortam Sıcaklığı 23°C (296K), B=10GHz, $\tau = 1ms$, NF=~3dB) olarak hesaplanır. PMMDG sistemi ise bir bütün olarak ele alınıp çıktısına göre değerlendirilmelidir. Ölçüm ekranında 3 sıra tarama sonrası ekran görüntüsü Şekil 3.34`de verilmiştir.



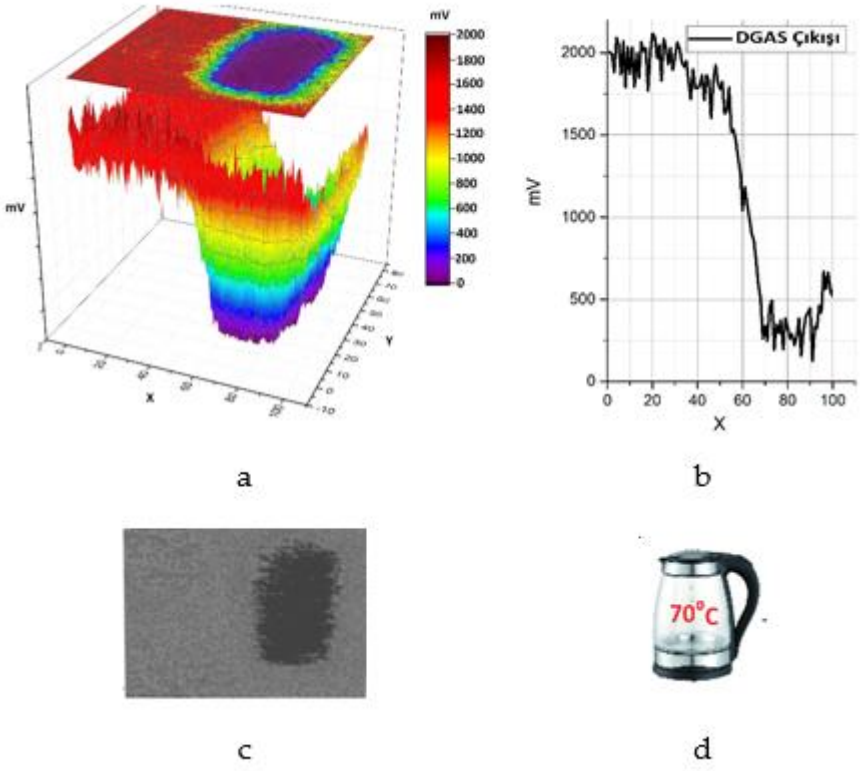
Şekil 3.33.PMMDG a) Ölçüm düzeneği b) Yazılım arayüzü



Şekil 3.34. Ölçüm Ekran Sonucu

Şekil 3.34 incelendiğinde; ortam sıcaklığında ve sıcak örnekte DGAS çıkışından sırasıyla +2V ve 0V çıkış alınmıştır. Bu durumda 47°C sıcaklık farkının 2V olarak algılandığı görülmektedir. Sistem hassasiyeti 2V/47°C oranından 42mV/°C ya da 42mV/K olarak ifade edilebilir. Alıcı yapısı, kullanılan detektör parametreleri ve alıcının güvenlik görüntüleme amacı ile ortam sıcaklığında kullanılacağı gözönünde bulundurulduğunda sürekli doğrusal bölgede çalışır. Ayrıca gerilim gürültüsü tepeden tepeye değeri yaklaşık 10mV seviyelerindedir. Bu durumda AC gürültünün DC işarete oranı sistemin termal çözünürlüğünü deneysel olarak verir. Böylece $\Delta T = 10mV/42mVK^{-1}$'den $\Delta T = 0{,}238K$ olarak hesaplanır. Bu teorik olarak hedeflenen 0,3K değerinden iyidir ve teorik hesaplanan 0,187K değerine oldukça yakın bir değerdir.

Tarama boyunca toplanan veriler, tarama bittiğinde matris olarak kayıt edilir. Kayıt edilen datalar OriginLab yazılımında çizdirilerek Şekil 3.35`de verilmiştir. Burada hem görüntü (a) hemde x ekseni bir satır tarama için ekran verisi (b) verilmiştir. Görüntü üzerinde 45 x 80 nokta aralığında sıcak örnek görüntülendi. Adım sayısı 1mm olduğundan 4,5cm x 8cm lik bir tarama alanıma denk gelmektedir. Bu da gerçek boyutların yaklaşık 1/3 üne denk gelmektedir.

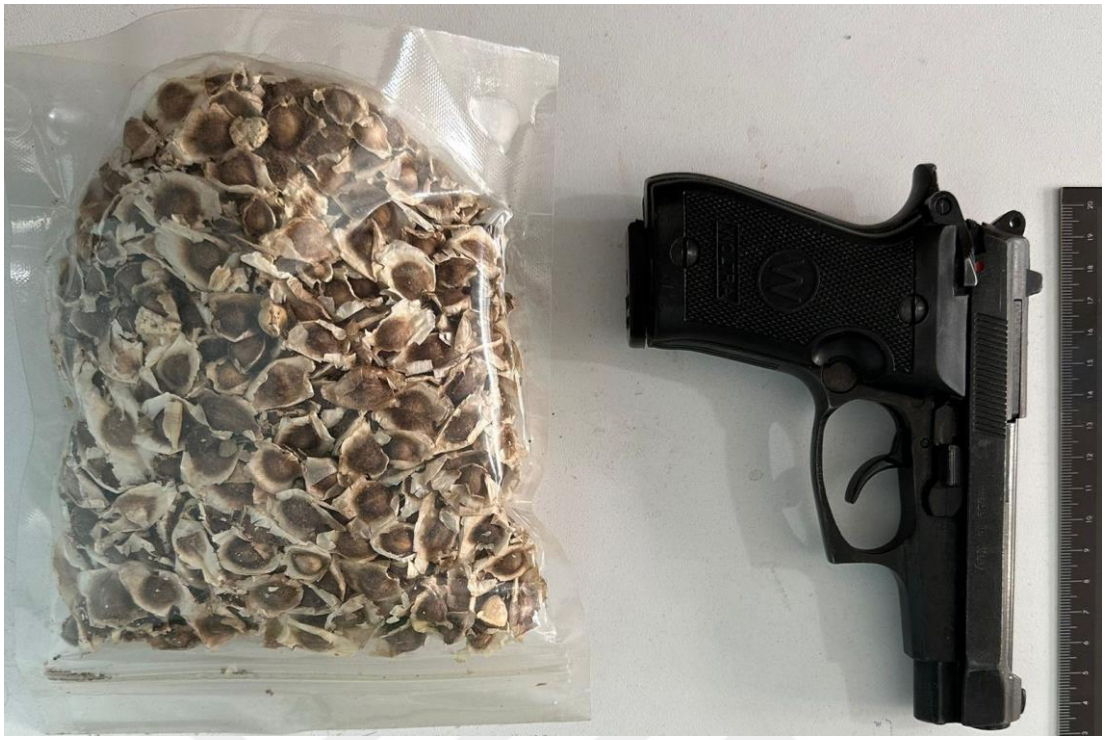


Şekil 3.35. PMMDG a) 3D/2D görüntü b) Bir satır veri (Y = 40) c) 2D gri görüntü d) Hedef.

3.8. Kişi Üzeri Görüntüleme Çalışmaları

Yarı optik görüntüleme sistemi ve alıcı veri toplama sistemi en uygun değerlere ayarlanıp çözünürlük ölçümleri gerçekleştirildikten sonra sistemin kişi üzeri görüntüleme performansı gözlemlendi. Bu ölçümler için 20cm boyutlarında metal bir kuru-sıkı tabanca (Metal örnek) metal ve benzeri iletken malzemeler için ve benzer büyüklükte bitki çayı (organik Örnek) ise metal olmayan organik ve plastik malzemeleri benzetimi için seçildi. Seçilen malzemelerin fotoğrafları Şekil 3.36`da verilmiştir. Böylece her iki durum için sistemin görüntüleme performansı ile ilgili deneysel çalışma gerçekleştirildi.

Ölçümlerde 2.5mt mesafede bulunan 130mm x 130mm alan 6dk sürede yarı optik görüntüleme sistemi ile 1mm hassasiyetle taranarak görüntü elde edilmiştir. Tarama alanı içerisinde canlı insan hedef olarak kullanıldı. Hedefler pamuk giysi altında gizli olarak görüntülendi. Ölçümler iç ortamda ve 23°C sıcaklıkta gerçekleştirildi.



Şekil 3.36.Ölçümlerde kullanılacak hedefler. Bitki çayı (Solda), metal kuru-sıkı tabanca (Sağda)

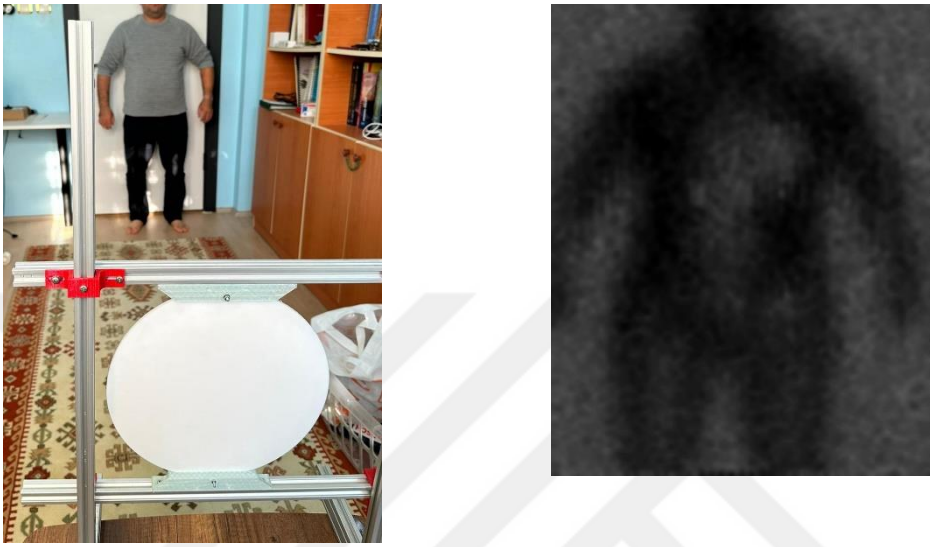
Ölçüm1: İlk ölçümde insan üzerinde herhangi bir hedef mevcut değilken gerçekleştirildi. Ölçüm fotağrafı ve PMMDGS ölçüm sonucu Şekil 3.37`de verilmiştir.

Ölçüm2: İkinci ölçümde insan üzerinde giysi altına gizlenmiş metal kuru-sıkı tabanca yerleştirilerek gerçekleştirildi. Ölçüm fotağrafı ve PMMDGS ölçüm sonucu Şekil 3.38`de verilmiştir.

Ölçüm3: Üçüncü ölçümde insan üzerinde giysi altına gizlenmiş bitki çayı yerleştirilerek gerçekleştirildi. Ölçüm fotağrafı ve PMMDGS ölçüm sonucu Şekil 3.39`de verilmiştir.

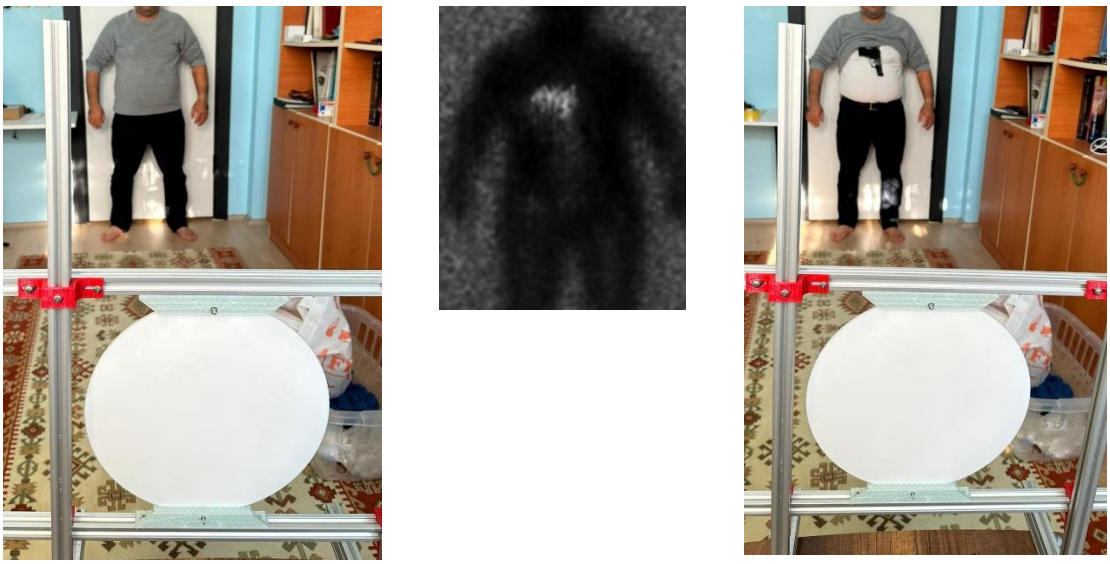
PMMGS ile yapılan bu ilk çalışmalar ile elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir. Bu çalışma görüntüleri elde eden PMMGS tez çalışmasında gerçekleştirildi. Yarı optik sistemi boyutları göz önünde bulundurulduğunda gezgin olarak kullanılabilir. Görüntünün elde edildiği bütünleşik anten ve kompakt yüksek hassasiyetli alıcı bu tez çalışması ile gerçekleştirildi.

Elde edilen bu ilk görüntüler bütünleşik hassas alıcı ve anten ile PMMDGS`nin beklendiği gibi çalıştığını göstermektedir. Giysi altında yer alan metal ve metal olmayan nesneler bu tez çalışmasının hedefi doğrultusunda iç ortamda görüntülenmiştir.



a b

Şekil 3.37. Ölçüm1 sonucu. a)Ölçüm fotoğrafı. b)PMMDGS ölçüm sonucu



a b c

Şekil 3.38.Ölçüm2 sonucu. a)Ölçüm fotoğrafı. b)PMMDGS Ölçüm sonucu c)Hedef yerleşimi (Metal)



a b c

Şekil 3.39.Ölçüm3 sonucu. a) Ölçüm fotoğrafı. b) PMMDGS Ölçüm sonucu c)Hedef yerleşimi (Organik)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde artan güvenlik ihtiyacı nedeniyle algılama ve görüntüleme sistemlerine olan ihtiyaç giderek artnaktadır. Özellikle insanların büyük kalabalaıklar halinde bulunduğu havaalanları, garlar, toplanma alanları vb alanlarda oluşabilecek tehlikeli durumların ve saldırıların önlemede kişi üzeri tehlikeli nesneleri güvenli uzaklıktan algılama ve görüntüleme önem arzetmektedir. Bu amaçla özellikle MMD frekanslarında pasif görüntüleme sistemleri geliştirilmektedir. Bu sistemlerin çözünürlükleri optik görüntüleme sistemleri gibi yüksek değildir. Artan güvenlik ihtiyacından dolayı literadürde daha yüksek çözünürlüklü alıcılar gerçekleştirmek için yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir.

Bu çalışmada düşük gürültülü MMIC`ler kullanılarak bütünleşik bir yapıda daha yüksek çözünürlük hedefleyen bir alıcı ile bu alıcının görüntüleme parametrelerinin belirleneceği deneysel bir PMMDGS gerçekleştirilimiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasında hedef uygulama ve literatürde gerçekleştirilen diğer çalışmalar ile karşılaştırılabilecek tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu tasarım parametreleri kullanılarak hedef çıktılar tasarlanıp gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada iç ortam ve dış ortamlarda uzaktan görüntüleme yapabilen pasif milimetre dalga görüntüleyicileri için düşük maliyetli ve kompakt yapıda DGAS gerçekleştirildi. Ayrıca DGAS`nin özelliklerini belirlemek ve onunla görüntü elde etmek için tek pixel PMMDG gerçekleştirildi. DGAS; 20mmx20mmx85mm boyutlarında olmasından dolayı kompakt yapıdadır ve bu yapısı sayesinde dizi yapılabilir. Milimetre devre kısmı sadece bir LNA ve bir detektörden ibarettir. LNA için gerekli besleme devreleri ve detektör çıkışının herhangi bir ADC tarafından algılanması için gerekli olan devreleri içerisinde barındırır. Böylece kullanım için karmaşık elektronik devrelere ihtiyaç duymaz. Termal çözünürlüğü 0.187K olarak hesaplanan DGAS ölçümlerde görüldüğü üzere yaklaşık 0.238K olarak gerçekleştirildi. Bu sonuç literatürde görüntüleme için kullanılan en iyi alıcı sensörden daha iyi bir değerdir. PMMDG sistemi 24cm çapında bir lense ve 30cmx30cm boyutlarında 0.1mm hassasiyetinde bir tarayıcıya sahiptir.

Bu çalışmada tasarlanıp gerçekleştirilen alıcı; literatürdeki diğer görüntüleme çalışmalarında kullanılan alıcılar ile çözünürlük kıyaslaması Tablo 4.1`de verilmiştir. Bu

çalışma, kıyaslanan alıcılara göre daha iyi çözünürlüğe sahiptir. Ayrıca boyut olarak birçok alıcıdan daha küçüktür. Kendisinden küçük boyutlu alıcılar ile kıyaslandığınıda çözünürlük açısından çok üstündür.

Tablo 4.1. Alıcı karşılaştırma tablosu

No	PMMDG Adı	Frekans	Çözünürlük
1a	Qinetiq	35 GHz	0.28
1b	QinetiqSPO Serisi	94 GHz	5K
2a	Sago Trex ST150	75GHz– 93GHz	2-5K
2b	Sago Trex RTI	94 GHz	6K
3	Northrop Grumman	84GHz – 94GHz	2K
4	Farran Technology	94 GHz, 140 GHz	1K
5	Tohoku University	77 GHz	1K
6	ThruVision T Serisi	250 GHz	1-1.5K
7a	TÜBİTAK MRC	94 GHz	0.67K
7b	Tekbaş, YL Tez	82-102 GHz	0,24K
8	Alfa Imaging (7FP)	94 GHz	0.7K
9	Bu Çalışma	90-100GHz	0.238K

Sonuç olarak; DGAS; kompakt yapısı, yüksek çözünürlüğü ve kullanım kolaylığı ile birçok pratik uygulama ve deneysel çalışmada kullanılabilecek yapıdadır.

Bu çalışma sadece tek bir konu olarak değil birçok farklı problem çözülerek istenen hedefler doğrultusunda sistem gerçekleştirme çalışmasıdır.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Çalışmalar sonucunda elde edilen DGAS kompakt yapıdadır. Sadece 20mmx20mm*85mm boyutlarındadır.
- DGAS Anten bağlantısı WR-10 dalga kılavuzu yapısı ile standarttır. Ticari antenler ile kullanılabilir.
- DGAS termal çözünürlüğü 0.237K dır. Bu çalışmada hedeflenen değerden 2 kat daha iyidir.

- PMMDG sistemi tek pixel çalışma yapabilecek seviyededir ve deneysel uygulamalar için kullanılabilir. DGAS çözünürlüğü için gerekli olan ölçüm gerçekleştirilmiştir.
- PMMDG sistemi 26cm lens çapı ile endüstriyel hale getirilmesi durumunda elde taşınabilecek bir sistem durumundadır. Uzamsal çözünürlüğü 45mm`dir ve bu sayede 45mm`den büyük nesneleri görüntüleyebileceğini gösterir.
- Anten çalışmaları sonucunda Antipodal Vivaldi ve Dual polarize olmak üzere 2 adet anten tasarlanmıştır.
- Her iki anten de DGAS çıkışına uygun olmadığından dolayı üretilmemiştir.
- Dual Polarize anten izolasyon ve kazanç artırma teknikleri ile MMD frekanslarda öncü yapıdadır.

Elde edilen bu çalışma MMD frekanslarında görüntüleme üzerine tümleşik yapıların bir uygulaması oldu. Bu çalışma ile elde edilen bilgiler kullanılarak gelecekte aşağıdaki çalışmalar yapılabilecektir;

- Gelişen MMIC teknolojisi ile daha yüksek frekansta, daha küçük boyutlu ve daha yüksek çözünürlüklü bütünleşik alıcılar yapılacaktır.
- Lens çapı küçültülerek ve odak noktası kısaltılarak taşınabilir görüntüleme sistemleri geliştirilecektir.
- DPA gerçekleştirilecek ve böylece polarimetrik alıcı gerçekleştirilecektir.
- Tarama yapısı ve dizi teknolojisi kullanılarak video hızı ve uzamsal çözünürlüğü artıtılacaktır.
- Yapay zeka algoritmaları kullanılarak görüntü işleme ve görüntü tanıma özellikleri kazandırılacaktır.

KAYNAKLAR

Appleby, R. (2008). The History of Passive Millimetre-Wave Imaging at QinetiQ. *Millimetre Wave Terahertz Sens. Technol.*, *7117,02*, 1–7, DOI:10.1117/12.800369.

Bahl, R. E. and P. Bhartia, (1980). *Microstrip Antennas*, Artech House, Inc., Dedham, MA.

B. C. Wadell, (1981). *Transmission Line Design Handbook*, Artech Hause, Inc., Boston, Massachusetts.

Bose, J.C., (1894). *Milestones:First Millimeter-wave Communication Experiments by J.C. Bose*, 1894-96 Date Dedicated 2012-09-15 Dedication # 128, Kolkata

Chen, Q., Fan, Y., Zhou, J., Song, K. (2015), *Design of Quasi-Optical Lens Antenna for W-Band Short Range Passive Millime-ter-Wave Imaging*. J. Comput. Commun., 3, 3. DOI:10.4236/jcc.33016.

Fetterman, M.R., Grata, J., Jubic, G., Kiser, J.W.L., Visnansky, A. (2008). *Simulation, Acquisition and Analysis of Passive Millimeter-Wave Images in Remote Sensing Applications.* Opt. Express., 16, 20503–20515. DOI:10.1364/oe.16.020503.

Garcia-Rial, F., Montesano, D., Gomez, I., Callejero, C., Bazus, F., Grajal, J. (2018). *Combining Commercially Available Active and Passive Sensors Into a Millimeter-Wave Imager for Concealed Weapon Detection.* IEEE Trans. Microw. Theory Technol., 67, 1167–1183. DOI:10.1109/tmtt.2018.2880757.

Gong, J., Chen, X., He, W., Altaf, A., Hu, A., Miao, J. (2022). *A V-Band Integrated Receiver Front-End Based on 0.15 μm GaAs pHEMT Process for Passive Millimeter-Wave Imaging.* IEEE Access, 10, 59933–59941. DOI:10.1109/access.2022.3175367.

Grant, B.G. (2011). *Field Guide to Radiometry*, Spie, Bellingham, Washington, 98227-0010 USA. DOI:10.1117/3.903926.ch40

Guo, L., Qin, S. (2019). *High-Performance Detection of Concealed Forbidden Objects on Human Body with Deep Neural Networks Based on Passive Millimeter Wave and Visible Imagery.* J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 40, 314–347. DOI:10.1007/s10762-018-0558-3.

Huguenin, G.R. (1997). *Millimeter-wave concealed weapons detection and through-the-wall imaging systems. Command*. Control. Commun. Intell. Syst. Law Enforc., 2938, 152–159. DOI:10.1117/12.266735.

Kempt, M. C. (2007). *Millimetre Wave and Terahertz Technology for the Detection of Concealed Threats-A Review.* 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics. Cardiff, UK. doi:10.1109/ICIMW.2007.4516664

Kemp, M.C. (2006). *Millimetre wave and terahertz technology for the detection of concealed threats: A review*. Opt. Pho-Tonics Count. Crime Fight. II, 6402, 64020D. DOI:10.1117/12.692612.

Korolyov, S., Goryunov, A., Illarionov, I., Parshin, V., Zemlyanukha, P. (2022). *Millimeter-Wave Imaging System Based on Direct-Conversion Focal-Plane Array Receiver.* Sensors, 22, 7132. DOI:10.3390/s22197132.

Li, R., Li, C., Li, H., Wu, S., Fang, G. (2018). *Study of Automatic Detection of Concealed Targets in Passive Terahertz Images for Intelligent Security Screening.* IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 9, 165–176. DOI:10.1109/tthz.2018.2889407.

Lo, Y.T., Lee, S.W. (1988). *Antenna Handbook*, (1st ed.). (Ch. 16. Lee, J.J. Lens Antennas) New York: Springer. 1073–1131. DOI:10.1007/978-1-4615-6459-1_16.

Luomahaara, J., Sipola, H., Gronberg, L., Mayra, A., Aikio, M., Timofeev, A., Tappura, K., Rautiainen, A., Tamminen, A., Vesterinen, V. (2020). *A Passive, Fully Staring THz Video Camera Based on Kinetic Inductance Bolometer Arrays*. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 11, 101–108. DOI:10.1109/tthz.2020.3029949.

Meng, Y., Qing, A., Lin, C., Zang, J., Zhao, Y., Zhang, C. (2018). *Passive Millimeter Wave Imaging System Based on Helical Scanning.* Sci. Rep., 8, 7852. DOI:10.1038/s41598-018-25637-9.

Olsen, R., Lovberg, J.A., Chou, R.-C., Martin, C.A., Galliano, J.A.Jr. (1997). *Passive millimeter-wave imaging using a sparse phased-array antenna.* Passive Millimeter-Wave Imaging Technology, 3064, 63–70. DOI:10.1117/12.277092.

Pergande, A., Eden, D.D., McKinley, M.C., Sutha, S., Weatherwax, E. (1997). *Concealed weapons detection sensor and sig-nal-processing demonstration.* Passive Millimeter-Wave Imaging Technology, 3064, 46–53. DOI:10.1117/12.277090.

Pernande, A. N. (2013, October 21). *History and challenges of passive millimeter wave imaging.* Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology *VI*. doi:DOI:10.1117/12.2035982

Planck, M. (1900). *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum (On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum. Verh.* Der Dtsch. Phys. Gesselschaft, 2,237

Siegel, P. H. (2002). *Terahertz Technology*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, *50*(3), s. 910-928. doi:10.1109/22.989974

Sinclair, G.N., Appleby, R., Coward, P.R., Price, S. (2000*). Passive millimeter-wave imaging in security scanning.* Passiv. Millim.-Wave Imaging Technol., 4032, 40–45. DOI:10.1117/12.391838.

Tekbaş, M. (2014). Terahertz Görüntüleme ve Tanıma Sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

URL-1: http://www.fp7-terascreen.com/ (Ziyaret Tarihi: 15 Mart 2022).

URL-2: https://malzeme.mam.tubitak.gov.tr/tr/haber/terahertz-teknolojisinin-kazanimi-projesi (Ziyaret Tarihi: 8 Aralık 2022).

Vertiy, A., Ozbek, S., Pavlyuchenko, A., Tekbas, M., Kizilhan, A., Cetinkaya, H., Unal, A., Panin, S. (2011). *Passive radiometric imaging systems in millimeter wavelength range.* In Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, WA, USA; pp. 2111–2114. DOI:10.1109/aps.2011.5996927.

Vine, D.L., Skou, N. (2006), *Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis, (2nd ed.)*. Artech: Norwood, MA, USA

Wang, J., Naftaly, M., Wasige, E. (2022). *An Overview of Terahertz Imaging with Resonant Tunneling Diodes.* Appl. Sci., 12, 3822. DOI:10.3390/app12083822.

Yao, X., Liu, K., Hu, A., Miao, J. (2015). *Improved Design of a Passive Millimeter-Wave Synthetic Aperture Interferometric Imager for indoor applications*. Millimetre Wave Terahertz Sens. Technol., 9651, 965105. DOI:10.1117/12.2194749.

Yujiri, L., Shoucri, M., Moffa, P. (2003). *Passive Millimeter Wave Imaging*. IEEE Microw. Mag., 4, 39–50. DOI:10.1109/MMW.2003.1237476.

Zhang, Y., Zhang, S. (2022). *Novel CMOS-based multi-band terahertz detector for passive imaging.* Semicond. Sci. Technol., 37, 055014. DOI:10.1088/1361-6641/ac606e.

Zhang, J., Zhu, W., Zhao, Y., Zhao, R., Dong, L. (2013*). Passive THz Imaging System Based on the Crank-Rocker Mechanism.* Acta Opt. Sin., 33, 1211006. DOI:10.3788/aos201333.1211006.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Cetinkaya, H. Kızılhan, A. **Tekbaş, M.** Demirci, Ş. Yiğit, E. Özdemir, C. Vertiy, A. (2011). *The Millimeter-Wave ISAR Imaging of Concealed Objects*. XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050618

Demirci, Ş. Cetinkaya, H. **Tekbaş, M.** Yiğit, E. Özdemir, C. Vertiy, A. (2011). *Back-projection Algorithm for ISAR Imaging of Near-Field Concealed Objects.* XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050450

Erden, E. **Tekbaş**, **M.** Boz Oğulcan, B. Topaloğlu, S. (2022). *Compact L Band Power Amplifier for GPS Jammers.* 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Doi: 10.1109/SIU55565.2022.9864942.

İşıker, H. Ünal, İ. **Tekbaş, M.** Özdemir, C. (2018). *An Auto-Classification Procedure for Concealed Weapon Detection in Millimeter-Wave Radiometric Imaging Systems*. Mıcrowave And Optıcal Technology Letters, 60(3), 583-594., Doi: 10.1002/mop.31005

Panin, S. B. Ünal, İ. Sayıntı, A. Öztürk, T. **Tekbaş, M.** (2016). *Permittivity Measurements for Dielectric Lens and Dielectric Rod Antenna Designs*. 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Doi: 10.1109/MSMW.2016.7538061

Panin, S. B. **Tekbaş, M.** Türetken, B. (2013). *Detection of Hidden Metallic Targets by Radiometric System and Low Aberration lens design*. International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Doi: 10.1109/MSMW.2013.6622202

Tekbaş, M. Çakır, G. (2023). *A Compact W-Band Low-Noise Radiometry Sensor for a Single-Pixel Passive Millimeter-Wave Imager.* MDPI AG, 12, 1-16., Doi:10.3390/electronics12102330

Tekbaş, M. Toktaş, A. Çakır, G. (2020). *Design of a Dual Polarized MMDave Horn Antenna Using Decoupled Microstrip Line Feeder*. International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249801

Tekbaş, M. Toktaş, A. Üstün, D. (2019). *A Formulaic Model Calculating the Permittivity of Testing Materials Placed on a Circular Patch Antenna.* 2 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Doi: 10.1109/DIPED.2019.8882582

Tekbaş, M. Erdoğan, M. S. Ünal, İ. (2017). *A W Band Waveguide Detector Module Using Zero Bias Schowttky Diode.* IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Doi: 10.1109/ELNANO.2017.7939734

Toktaş, A. Üstün, D. **Tekbaş, M.** (2019). *Multi-Objective Design of MultiLayer Radar Absorber Using Surrogate-Based Optimization*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 67(8), 3318-3329., Doi: 10.1109/TMTT.2019.2922600

Toktaş, A. Üstün, D. **Tekbaş, M.** (2020). *Global Optimisation Scheme Based on Triple-Objective ABC Algorithm for Designing Fully Optimised Multi-Layer Radar Absorbing Material*. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 14(8), 800-811., Doi: 10.1049/iet-map.2019.0868

Toktaş, A. Üstün, D. **Tekbaş, M.** (2019). *Design of Quad-port Circular MIMO Antenna With Isolation Improved by Shorting Walls*. XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Doi: 10.1109/DIPED.2019.8882634

Toktaş, A. Üstün, D. Yiğit, E. Sabancı, K. **Tekbaş, M.** (2018*). Optimally Synthesizing Multilayer Radar Absorbing Material (RAM) Using Artificial Bee Colony Algorithm.* XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Doi: 10.1109/DIPED.2018.8543261

Ünal, İ.**Tekbaş, M.** Gülüm, T. Ö. Topaloğlu, S. (2017). *Terahertz Teknolojileri ile Yüksek Hızlı Kablosuz Veri Bağı.* 25. IEEE Sınyal Isleme Ve Iletısım Uygulamaları Kurultayı

Ünal, İ. **Tekbaş, M.** Kaya, A. Öztürk, T. Ç. (2016*). Millimeter Wave Syntheziser for Josephson Voltage Standard System.* 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)

Vertiy, A. Cetinkaya, H. Panin, S. B. Pavlyuchenko, A. **Tekbaş, M**. Ünal, A. Kızılhan, A. Kaya, A. Özdemir, Caner. Demirci, Ş. Yiğit, E. (2011). *Image Reconstruction in SAR, ISAR and Tomography Applications at Millimeter-Wave Band*. 2011 Mıcrowaves, Radar And Remote Sensıng Symposıum, Doi: 10.1109/MRRS.2011.6053631

Vertiy, A. Özbek, S. Pavlyuchenko, A. **Tekbaş, M.** Kızılhan, A. Cetinkaya, H. Ünal, A. Panin, S. B. (2011). *Short- and Long-Range Passive Imaging in Millimeterwave-band.* 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050452

Vertiy, A. Üstün, Deniz. Pavlyuchenko, A. **Tekbaş, M.** Kızılhan, A. Cetinkaya, H. Ünal, A. Panin, S. B. (2011). *Passive Radiometric Imaging Systems in Millimeter Wavelength Range*. 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Doi: 10.1109/APS.2011.5996927

Vertiy, A. Cetinkaya, H. **Tekbaş, M.** (2010). *Subsurface Tomography Imaging at Subterahertz and Terahertz Frequency*. 2010 Internatıonal Kharkov Symposıum On Physıcs And Engıneerıng Of Mıcrowaves, Mıllımeter And Submıllımeter Waves, Doi: 10.1109/MSMW.2010.5546095 No:4513855)

Vertiy, A. Cetinkaya, H. **Tekbaş, M.** (2010*). Subsurface Sensing at Sub-terahertz and Terahertz Frequencies.* Proceedings of the XIII Internarional Conference on Ground Penetrating Radar, Doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550080

Vertiy, A. Cetinkaya, H. **Tekbaş, M.** (2010). *Terahertz and Sub-Terahertz Subsurface Tomography.* 18-th Internatıonal Conference On Mıcrowaves, Radar And Wıreless Communıcatıons, 6(5), 485-489., Doi: 10.2529/PIERS091208093425

Yiğit, E. Demirci, Ş. Özdemir, C. **Tekbaş, M.** (2013*). Short-range Groundbased Synthetic Aperture Radar Imaging: Performance Comparison between Frequency Wave Number Migration and Back-Projection Algorithms*. Journal of Applied Remote Sensing, 7(1),73483, Doi: 10.1117/1.JRS.7.073483.

Yiğit, E. Kayabaşı, A. Toktaş, A. Sabancı, K. **Tekbaş, M.** Duysak, H. (2017). *Millimetre Wave ISAR Imaging Technique Based On Sparse Aperture Data Collection*. 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering(ISEE).

Yiğit, E. **Tekbaş, M.** Ünal, İ. Erdoğan, S. (2017). *An Analysis for the use of Compressed Sensing Method in Microwave Imaging.* 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Doi: 10.1109/SIU.2017.7960478

Yıldön, S.D. Kaygısız, C.T. **Tekbaş, M**. Erden, E. Topaloğlu, S. (2022). *High Attenuation Lumped Element Band-Stop Filter Design Using Resonator Tuning Method.* 2022 IEEE 2ND Ukraınıan Mıcrowave Week.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa TEKBAŞ; ilk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde başladığı Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği eğitimini 2005 yılında tamamladı. 2009 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans öğrenimini 2014 yılında tamamladı. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı`nda Doktora öğrenimine başladı.