



# **Millimeter Wave Short Range Active and Passive Sensors for Intelligent Alarm Systems**

**Program Kodu: 2512**

**Proje No: 114E241**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Ahmet KIZILAY**

Araştırmacı(lar):  
Prof. Dr. Ahmet Serdar TÜRK  
Prof. Dr. Herman SEDEF  
Doç. Dr. Salih DEMİREL

ŞUBAT 2017  
İSTANBUL

## ÖNSÖZ

Günümüzde kızılötesi (IR), akustik/sismik, ultrason, mikrodalga vb. türleri olan uzaktan algılama ve çevre gözetleme alarm sensörleri, yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Her tip sensörün kendine has üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır. Örneğin; optik bantta çalışan kızılötesi ve hiperspektral algılayıcıların görüntü çözünürlüğü normalde çok iyi olmasına karşın, toz, yoğun sis, kar ve yağmur gibi olumsuz hava koşullarında görüş menzili bir hayli azalabilir ve sistem performansı sıcak bir bölgede oldukça zayıflayabilir. Akustik ve mikrodalga algılayıcıların ise hedef tespit menzili daha uzun olabilir iken, görüntü çözünürlük kaliteleri nispeten düşüktür. Dolayısıyla, mevcut sistemlere göre tespit edilen cisimler hakkında daha fazla bilgi edinmeyi sağlayan alternatif akıllı sensörlerin geliştirilmesi gerekliliği bulunmaktadır.

1 Şubat 2015 tarihinde TÜBİTAK İkili İlişkiler fonu desteğiyle başlatılan ve 24 ay süren “Millimeter Wave Short Range Active and Passive Sensors for Intelligent Alarm Systems” isimli projemizin temel hedefi, milimetrik dalga bandında verimli biçimde çalışacak özgün anten, radar donanımı ve işaret/görüntü işleme algoritmaları geliştirilmesi için Ukrayna ortağımız Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, NASU ile işbirliği yaparak hedef cisimlerin uzaktan algılanması ve yüksek çözünürlüklü çevre görüntülemesi amaçlı bir radar alarm sensörünün tasarlanmasıdır. Proje faaliyetleri altı ana iş paketi kapsamında sürdürülmüştür. Her bir iş paketinin ayrıntılı teknik çalışmaları raporda sıralı bölümler halinde verilmektedir.

Proje ekibi adına proje yürütücüsü olarak, vermiş olduğu değerli destekten ötürü TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                 |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ .....                                                                                                                                     | I    |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                                                                | II   |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                                                                             | IV   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                                                              | V    |
| ÖZET .....                                                                                                                                      | XIII |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                  | XIV  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                                                                  | 1    |
| 2. DALGA KILAVUZU DİZİSİ VE YANSITICI ANTEN TASARIMI .....                                                                                      | 2    |
| 2.1 Yüksek Frekans Anten Tasarım Parametreleri.....                                                                                             | 8    |
| 2.2 Besleme Anten Tasarımı .....                                                                                                                | 9    |
| 2.3 Dairesel Polarizasyonlu Konikal Horn Anten Tasarımı .....                                                                                   | 19   |
| 2.4 ADE Anten Yapısı ve Ana Yansıtıcının Tasarımı .....                                                                                         | 22   |
| 2.5 Analitik Regülarizasyon Metodu.....                                                                                                         | 30   |
| 2.6 CST Programında Nihai Anten Tasarımı.....                                                                                                   | 41   |
| 2.7 Dielektrik Lens Yüklü Horn Anten .....                                                                                                      | 47   |
| 3. KA BANT MİLİMETRİK DALGA RADARI ALICI VE VERİCİ BİRİMİ .....                                                                                 | 56   |
| 3.1 I. Dönem Yapılan Çalışmalar .....                                                                                                           | 56   |
| 3.1.1 Milimetrik Dalga Radarı Alıcı Verici Modülü Blok Diyagramı.....                                                                           | 56   |
| 3.1.2 Güç Bölücüsü Tasarımı .....                                                                                                               | 57   |
| 3.1.3 Bant Geçiren Filtre Tasarımı .....                                                                                                        | 59   |
| 3.1.4 Düşük Gürültülü Kuvvetlendiricisi.....                                                                                                    | 61   |
| 3.1.5 Voltaj Kontrollü Osilatör (MMIC çip) .....                                                                                                | 62   |
| 3.1.6 Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (MMIC çip) .....                                                                                          | 63   |
| 3.1.7 Güç Kuvvetlendiricisi (MMIC çip) .....                                                                                                    | 63   |
| 3.1.8 Karıştırıcı (MMIC çip).....                                                                                                               | 64   |
| 3.1.9 Üretilmiş Milimetrik Radar Alıcı Verici Modülü .....                                                                                      | 64   |
| 3.2 II. Dönemde Yapılan Çalışmalar .....                                                                                                        | 67   |
| 3.2.1 24 GHz Milimetrik Dalga Radar Sistemi Tasarımı .....                                                                                      | 67   |
| 3.2.2 Verici Modülü.....                                                                                                                        | 67   |
| 3.2.3 Alıcı Modülü .....                                                                                                                        | 69   |
| 3.2.4 Milimetrik Dalga Radar Sistemi Test Ölçümleri .....                                                                                       | 71   |
| 3.3 III. Dönem Çalışmaları .....                                                                                                                | 73   |
| 3.3.1 Kutulama .....                                                                                                                            | 73   |
| 3.3.2 IF Yükselteç Tasarımı .....                                                                                                               | 75   |
| 3.3.3 Düşük Gürültülü Yükseltgeç.....                                                                                                           | 80   |
| 3.4 Ukrayna Ekibinin Gerçekleştirdiği Ka-band Radar Sistem Tasarımları .....                                                                    | 85   |
| 3.4.1 Yer Platformunda (Ground-based) Gürültü Dalga İşaretli (Noise Waveform)<br>Yapay Açıklık Radarı (GB NW-SAR) Tasarımı ve Performansı ..... | 85   |
| 3.4.2 Radyometrik (Pasif) Görüntüleme .....                                                                                                     | 88   |
| 3.4.3 Projede Elde Edilen Sonuçlar .....                                                                                                        | 95   |
| 4. RADAR KONTROL BİRİMİ VE SİSTEM ENTEGRASYONU .....                                                                                            | 96   |
| 5. ORTAM PROPAGASYON MODELLERİ VE RKA HESAPLAMALARI .....                                                                                       | 101  |
| 5.1 RKA Hesaplamaları .....                                                                                                                     | 101  |

|        |                                                                                                |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.1  | Muhtemel Hedefler ve RKA Simülasyon Sonuçları .....                                            | 103 |
| 5.2    | Radar Bütçe Hesapları .....                                                                    | 105 |
| 5.2.1  | Zayıflamaların Hesabı .....                                                                    | 106 |
| 5.2.2  | Muhtemel Hedeflerin Maksimum Tespit Edilebilir Mesafe Aralığı .....                            | 108 |
| 5.3    | Propagasyon Modelleri .....                                                                    | 110 |
| 5.3.1  | Literatür Taraması .....                                                                       | 111 |
| 5.3.2  | Fizik Optik Çözümleri .....                                                                    | 112 |
| 5.3.3  | Ayrıştırma Metoduyla Propagasyon Modelleme .....                                               | 122 |
| 5.3.4  | Yağmur Damlaları ve Hedef Cisme Ait Saçılma Geometrisi İçin Elde Edilen Sayısal Bulgular ..... | 143 |
| 6.     | ADAPTİF İŞARET VE GÖRÜNTÜ İŞLEME ALGORİTMALARI GELİŞTİRİLMESİ.....                             | 165 |
| 6.1    | Literatür Taraması .....                                                                       | 165 |
| 6.2    | Sistem Modeli ve Verilerin Elde Edilmesi .....                                                 | 166 |
| 6.3    | Sinyal İşleme Teknikleri .....                                                                 | 166 |
| 6.3.1  | Arka Plan Kaldırma .....                                                                       | 166 |
| 6.3.2  | Zamanla Değişen Sinyal Kazancı .....                                                           | 167 |
| 6.3.3  | Frekans Filtreleme .....                                                                       | 168 |
| 6.3.4  | Wiener Filtreleme .....                                                                        | 169 |
| 6.4    | Görüntüleme Algoritmaları .....                                                                | 170 |
| 6.4.5  | Huzme Adaptif Yapay Açıklık Radarı (YAR) Algoritması .....                                     | 170 |
| 6.5    | MUSIC (Multiple Signal Classification) Algoritması ve Ön Çalışma Sonuçları .....               | 174 |
| 6.6    | Yerüstü Sentetik Açıklık Radar (SAR) Test Ölçümleri .....                                      | 178 |
| 6.6.6  | Kullanılan Materyal .....                                                                      | 178 |
| 6.6.7  | Network Analizör .....                                                                         | 178 |
| 6.6.8  | Radar Anteni .....                                                                             | 179 |
| 6.6.9  | Bilgisayar ve Ekran .....                                                                      | 179 |
| 6.6.10 | Hareketli Platform .....                                                                       | 179 |
| 6.6.11 | Diğer Materyaller .....                                                                        | 180 |
| 6.6.12 | MMW (Milimetrik Dalga) Kapalı Alan Ölçümleri .....                                             | 181 |
| 6.6.13 | MMW Açık Alan Ölçümleri .....                                                                  | 183 |
| 6.6.14 | MMW Saha Ölçümleri .....                                                                       | 185 |
| 7.     | SİSTEM PERFORMANS ÖLÇÜMÜ VE RAPORLANMASI .....                                                 | 196 |
| 7.1    | Sistem Performans Testleri .....                                                               | 199 |
| 7.1.1  | Çanak Anten Kullanılarak Yapılan Ölçümler .....                                                | 199 |
| 7.1.2  | Horn Anten Kullanılarak Yapılan Ölçümler .....                                                 | 203 |
| 8.     | SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                        | 206 |
| 9.     | REFERANSLAR .....                                                                              | 207 |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                         | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 5.1. Yaygın farklı hedefler için mikrodalga frekanslarında RKA değerleri (Balanis, 1989; Rezende vd., 2002) ..... | 87    |
| Tablo 5.2. 24 GHz için farklı yağış miktarlarında oluşan yağmur zayıflamaları .....                                     | 90    |
| Tablo 5.3. 24 GHz için farklı su yoğunluklarında oluşan sis zayıflamaları .....                                         | 91    |
| Tablo 5.4. Sulu ve normal karlı ortam için a ve b parametreleri .....                                                   | 91    |
| Tablo 5.5. 24 GHz için farklı yağış miktarlarında oluşan kar zayıflamaları .....                                        | 92    |
| Tablo 5.6. Alıcı verici sistem parametreleri .....                                                                      | 92    |
| Tablo 5.7. Muhtemel hedeflerin RKA değerleri .....                                                                      | 92    |
| Tablo 5.8. 24 GHz'de sisli ortam maksimum tespit edilebilir aralık.....                                                 | 93    |
| Tablo 5.9. 24 GHz'de yağmurlu ortam maksimum tespit edilebilir aralık (MDR).....                                        | 93    |
| Tablo 5.10. 24 GHz'de sulu karlı ortam maksimum tespit edilebilir aralık (MDR) .....                                    | 94    |
| Tablo 5.11. 24 GHz'de karlı ortam maksimum tespit edilebilir aralık (MDR).....                                          | 94    |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Açık sonlandırmalı dalga kılavuzundan saçılması için 2B ARM hesabının analitik sonuçlarla karşılaştırması.....                                         | 3  |
| Şekil 2.2. Simetrik ve asimetrik horn antenlerin 2B ARM ile yakın alan ışıma desenlerinin hesabı.....                                                             | 3  |
| Şekil 2.3. (a) Tipik bir MM-dalga radar yansıtıcı anten geometrisi (b) 2B ARM ile 3B MoM benzetiminden elde edilen anten ışıma örüntülerinin karşılaştırması..... | 4  |
| Şekil 2.4. 2-B bir parabolik yansıtıcı ve odağındaki noktasal kaynak modeli.....                                                                                  | 4  |
| Şekil 2.5. 3-boyutlu 0.6mx1m silindirik reflektör anten geometrisi ve hesaplanan dikey ışıma örüntüsü.....                                                        | 7  |
| Şekil 2.6. 3x3'lük dalga kılavuzu dizisi.....                                                                                                                     | 8  |
| Şekil 2.7. 3x3 lük dalga kılavuzu dizisinin 24 GHz ışıma örüntüsü.....                                                                                            | 8  |
| Şekil 2.8. Dalga kılavuzu içerisinde besleme pininin yerini belirten şekil (Lg: Dalga kılavuzu içerisindeki dalga boyu).....                                      | 9  |
| Şekil 2.9. WR-42 Dalga Kılavuzu Standartlarına göre tasarlanmış piramit horn anten şekli ve boyutları.....                                                        | 10 |
| Şekil 2.10. Tasarlanan piramit horn antenin 24 GHz de 3B'lu ışıma örüntüsü.....                                                                                   | 10 |
| Şekil 2.11. Piramit horn antenin 24 GHz deki ışıma örüntüsü.....                                                                                                  | 11 |
| Şekil 2.12. WR-42 Dalga kılavuzlu piramit horn anten tasarımının şekli ve boyutları.....                                                                          | 11 |
| Şekil 2.13. Tasarlanan piramit horn antenin 24 GHz de 3B'lu ışıma örüntüsü.....                                                                                   | 12 |
| Şekil 2.14. Piramit horn antenin 24 GHz deki ışıma örüntüsü.....                                                                                                  | 12 |
| Şekil 2.15. Açıklık kısmı değiştirilerek tasarlanan anten ve 24 GHz'deki 3B ışıma örüntüsü.....                                                                   | 13 |
| Şekil 2.16. WR-42 Dalga kılavuzlu Konikal Horn Anten şekli ve boyutları.....                                                                                      | 13 |
| Şekil 2.17. WR-42 Dalga kılavuzlu Konikal Horn Anten 24 GHz 3B ışıma örüntüsü.....                                                                                | 14 |
| Şekil 2.18. WR-42 Dalga kılavuzlu Konikal Horn Anten 24 GHz ışıma örüntüsü.....                                                                                   | 14 |
| Şekil 2.19. WR-42 dikdörtgen kesitli piramit horn beslemeli çanak analizi sonucu.....                                                                             | 15 |
| Şekil 2.20. WR42 konikal horn beslemeli çanak analizi sonucu.....                                                                                                 | 15 |
| Şekil 2.21. 24 GHz de polar koordinatlarda piramit horn anten (solda) konikal horn anten (sağda).....                                                             | 15 |
| Şekil 2.22. DHRA'nın benzetim şekli.....                                                                                                                          | 16 |
| Şekil 2.23. DRHA'nın 0-40 GHz S11 grafiği.....                                                                                                                    | 16 |
| Şekil 2.24. DRHA'nın 20 – 40 GHz kazanç değişim grafiği.....                                                                                                      | 17 |
| Şekil 2.25. DRHA'nın 24 GHz'de ışıma örüntüsü.....                                                                                                                | 17 |
| Şekil 2.26. Dielektrikli DRHA'nın benzetim şekli.....                                                                                                             | 17 |
| Şekil 2.27. Dielektrikli ve dielektriksiz DRHA'nın S11 karşılaştırma grafiği.....                                                                                 | 18 |
| Şekil 2.28. Dielektrikli ve dielektriksiz DRHA'nın kazanç karşılaştırma grafiği.....                                                                              | 18 |
| Şekil 2.29. Dielektrikli DRHA'nın 24 GHz'de ışıma örüntüsü.....                                                                                                   | 18 |
| Şekil 2.30. Horn antenin ilk çalışmalar sonucunda elde edilen hali.....                                                                                           | 19 |
| Şekil 2.31. Horn antende kullanılan SMA konektörün çizimi.....                                                                                                    | 19 |
| Şekil 2.32. SMA konektörü ile tasarlanan horn antenin 23-25 GHz S11 grafiği.....                                                                                  | 20 |
| Şekil 2.33. Besleme anteni içine yerleştirilen dielektrik malzemenin şekli ve besleme pinine olan mesafesi.....                                                   | 20 |
| Şekil 2.34. Dielektrik malzeme içinde iken antenin S11 grafiği ve eksenel oranı.....                                                                              | 21 |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.35. ADE anten yapısı temel parametreleri.....                                                                                                             | 22 |
| Şekil 2.36. ADE antenin parça boyları ve odak noktalarının gösterimi.....                                                                                         | 22 |
| Şekil 2.37. Boyutu küçültmek için dikey ve yatay kesitlerinden kısaltılmış ADE anten yapısı.....                                                                  | 23 |
| Şekil 2.38. Boyu küçültülmüş antenin dikey ışınma örüntüsü.....                                                                                                   | 23 |
| Şekil 2.39. Boyu küçültülmüş antenin yatay ışınma örüntüsü.....                                                                                                   | 24 |
| Şekil 2.40. Çeşitli boy ve odak mesafelerinde Cassegrain Anten tasarım ve sonuçları.....                                                                          | 25 |
| Şekil 2.41. Papyon ADE tasarımının çanaklı yapı ile ve ön profilden gösterimi.....                                                                                | 26 |
| Şekil 2.42. Papyon ADE anten tasarımının yatay ışınma örüntüsü.....                                                                                               | 26 |
| Şekil 2.43. Papyon ADE anten tasarımının dikey ışınma örüntüsü.....                                                                                               | 26 |
| Şekil 2.44. ADE anten ile papyon ADE anten versiyonlarının gösterimi.....                                                                                         | 27 |
| Şekil 2.45. ADE versiyonlarının ana yansıtıcı olmadan ilk sonuçlarının yatay ve dikey ışınma örüntüsü.....                                                        | 27 |
| Şekil 2.46. ADE versiyonlarının ana yansıtıcı ile dikey ışınma örüntüsü.....                                                                                      | 28 |
| Şekil 2.47. ADE versiyonlarının ana yansıtıcı ile yatay ışınma örüntüsü.....                                                                                      | 28 |
| Şekil 2.48. 3m lineer ölçüm sisteminin bir parçası olarak tasarlanan antenin fiziksel görünümü.....                                                               | 29 |
| Şekil 2.49. 3m lineer ölçüm sisteminin bir parçası olarak tasarlanan antenin 3B'lu ışınma örüntüsü.....                                                           | 29 |
| Şekil 2.50. Nümerik çözüm tekniği kullanılmak üzere modellenmiş parabolik yansıtıcı antenin ARM ile modellenmesi.....                                             | 30 |
| Şekil 2.51. Birinci ve ikinci türden cebrik sistem gösterimi.....                                                                                                 | 31 |
| Şekil 2.52. Birinci ve ikinci türden cebrik sistemlerin çözüm yöntemleri açısından karşılaştırılması.....                                                         | 33 |
| Şekil 2.53. Silindirden saçılmanın analitik sonuç ile ARM sonucunun karşılaştırılması (solda) , ARM ile parabolik yansıtıcı anten tasarımı gösterimi (sağda)..... | 34 |
| Şekil 2.54. Çeşitli frekanslar için elde edilmiş olan ARM ışınma örüntüleri.....                                                                                  | 35 |
| Şekil 2.55. 2m çapında 10m uzunluğunda silindirden saçılma karşılaştırması performans sonuçları.....                                                              | 35 |
| Şekil 2.56. 2m çapında 10m uzunluğunda silindirden saçılma karşılaştırması ışınma örüntüleri.....                                                                 | 36 |
| Şekil 2.57. 60cm boyunda 30cm derinliğinde dalga kılavuzu parçası analizi performans sonuçları.....                                                               | 36 |
| Şekil 2.58. 60cm boyunda 30cm derinliğinde dalga kılavuzu parçası analizi ışınma örüntüleri.....                                                                  | 37 |
| Şekil 2.59. ARM ile laboratuvar ortamında üretilmiş antenin ölçüm sonucunun karşılaştırılması.....                                                                | 37 |
| Şekil 2.60. 24 GHz frekansında tasarlanan PY antenin ARM ile hesaplanan ışınma örüntüsü.....                                                                      | 38 |
| Şekil 2.61. 24 GHz frekansında tasarlanan PY antenin ARM ile hesaplanan PY üzerindeki akım dağılımı grafiği.....                                                  | 38 |
| Şekil 2.62. Proje kapsamında CST de tasarlanan anten yapısı.....                                                                                                  | 39 |
| Şekil 2.63. Proje kapsamında ARM de tasarlanan anten yapısı.....                                                                                                  | 40 |
| Şekil 2.64. Besleme anteni olarak tasarlanan yapı.....                                                                                                            | 40 |
| Şekil 2.65. 24 GHz ARM (mavi) ve CST (kırmızı) sonuçları.....                                                                                                     | 41 |
| Şekil 2.66. 30,0 GHz ARM (mavi) ve CST (kırmızı) sonuçları.....                                                                                                   | 41 |
| Şekil 2.67. Horn antende kullanılacak 24 GHz SMA konektörün çizimi.....                                                                                           | 41 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.68. Üretimi yapılacak antenin benzetim programında çizimi.....                                                                                  | 42 |
| Şekil 2.69. 30 cm ADE anten yapısının benzetim programı ile çizimi.....                                                                                 | 42 |
| Şekil 2.70. Simülasyon programı sonuçlarına göre ADE antenin ışıma örüntüsü.....                                                                        | 42 |
| Şekil 2.71. Üretim için kalınlık ve alt yansıtıcı anten ayarlama bağlantı noktalarının olduğu anten çizimi.....                                         | 43 |
| Şekil 2.72. Anten üretiminde kullanılan ciba malzeme kalıpları ve üretilmiş anten.....                                                                  | 44 |
| Şekil 2.73. Ciba malzemeden ahşap CNC tezgâhında kalıp çıkarılması.....                                                                                 | 44 |
| Şekil 2.74. CNC tezgâhında üretilen horn antenler ve ADE antenin alt yansıtıcıları.....                                                                 | 45 |
| Şekil 2.75. CNC tezgâhında üretilen horn antenler ve ADE antenin alt yansıtıcıları.....                                                                 | 45 |
| Şekil 2.76. Ciba malzemeden kalıbı çıkarılan ana yansıtıcı antenin alüminyum folyo ile şeritler halinde kaplanması (solda), kaplanmış hali (sağda)..... | 45 |
| Şekil 2.77. Besleme anteni ve alt yansıtıcı anteni yerleştirilmiş ADE anten yapısı.....                                                                 | 46 |
| Şekil 2.78. Ölçüm sisteminde üretilen antenlerin performans testleri yapılırken.....                                                                    | 46 |
| Şekil 2.79. ADE antenin ışıma örüntüsü ölçüm sonuçları.....                                                                                             | 47 |
| Şekil 2.80. Horn anten tasarımı.....                                                                                                                    | 48 |
| Şekil 2.81. Horn anten kazanç performansı (dBi).....                                                                                                    | 48 |
| Şekil 2.82. Antenin geri dönüş kaybı.....                                                                                                               | 49 |
| Şekil 2.83. Kısa kanat uzunluklu horn anten yapısı, ışıma örüntü şekli ve kazanç grafiği.....                                                           | 49 |
| Şekil 2.84. Kısa kanat uzunluklu horn anten ışıma örüntüsü grafiği.....                                                                                 | 50 |
| Şekil 2.85. Kısa kanat uzunluklu horn anten geri dönüş kaybı (S11).....                                                                                 | 50 |
| Şekil 2.86. Orta kanat uzunluklu horn anten yapısı, ışıma örüntü şekli ve kazanç grafiği.....                                                           | 51 |
| Şekil 2.87. Orta kanat uzunluklu horn anten ışıma örüntüsü grafiği.....                                                                                 | 51 |
| Şekil 2.88. Orta kanat uzunluklu horn anten geri dönüş kaybı (S11).....                                                                                 | 51 |
| Şekil 2.89. Uzun kanat uzunluklu horn anten yapısı, ışıma örüntü şekli ve kazanç grafiği.....                                                           | 52 |
| Şekil 2.90. Uzun kanat uzunluklu horn anten ışıma örüntüsü grafiği.....                                                                                 | 52 |
| Şekil 2.91. Uzun kanat uzunluklu horn anten geri dönüş kaybı (S11).....                                                                                 | 53 |
| Şekil 2.92. Üretilen antenin besleme dalga kılavuzu kısımları.....                                                                                      | 53 |
| Şekil 2.93. Besleme dalga kılavuzuna SMA konektörün pin uzunluğu ayarlanarak monte edilmiş hali.....                                                    | 53 |
| Şekil 2.94. Kısa (solda) ve orta kanat uzunluğuna sahip horn anten açıklıkları.....                                                                     | 54 |
| Şekil 2.95. Uzun kanat uzunluğuna sahip horn anten açıklık kısmı.....                                                                                   | 54 |
| Şekil 2.96. Açıklık kısımlarının boylarını karşılaştırmak için karşılaştırmalı gösterimi.....                                                           | 54 |
| Şekil 2.97. Uzun kanat uzunluğuna sahip horn anten çitfinin birleştirilmiş halinin S11 sonucu grafiği.....                                              | 55 |
| Şekil 2.98. Üretimi ve ölçümleri bitirilen uzun kanat açıklıklı horn antenin ölçüm sisteminde denenmesi.....                                            | 55 |
| Şekil 3.1. Milimetrik dalga radar alıcı ve verici modülü için blok diyagramı.....                                                                       | 57 |
| Şekil 3.2. Klasik Wilkinson GB yapısı.....                                                                                                              | 58 |
| Şekil 3.3. Tasarlanan Wilkinson GB (a) benzetim (b)(c) üretim.....                                                                                      | 58 |
| Şekil 3.4. Wilkinson GB benzetim performansı (a) geçiş ve geri dönüş kayıpları (b) portlar arası yalıtım.....                                           | 59 |
| Şekil 3.5. Wilkinson GB ölçüm sonuçları geçiş ve geri dönüş kayıpları.....                                                                              | 59 |
| Şekil 3.6. BPF (a) Üretim (b) Benzetim.....                                                                                                             | 60 |
| Şekil 3.7. Tasarlanan BPF karakteristiği (a) benzetim sonuçları (b) ölçüm sonuçları.....                                                                | 61 |
| Şekil 3.8. Tasarlanan DGK.....                                                                                                                          | 62 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.9. DGK performans sonuçları giriş VSWR (V1), çıkış VSWR (V2), kazanç (S21)....               | 62 |
| Şekil 3.10. MMIC VKO karakteristiği.....                                                             | 62 |
| Şekil 3.11. MMIC DGK karakteristiği.....                                                             | 63 |
| Şekil 3.12. MMIC GK karakteristiği.....                                                              | 64 |
| Şekil 3.13. Karıştırıcı yapısı ve çalışma karakteristiği.....                                        | 64 |
| Şekil 3.14. Milimetrik dalga radarı alıcı verici modülü.....                                         | 65 |
| Şekil 3.15. Verici modül ölçüm sonucu.....                                                           | 65 |
| Şekil 3.16. Alıcı modül ölçüm sonucu.....                                                            | 66 |
| Şekil 3.17. 24 GHz milimetrik dalga alıcı ve verici yapısı blok diyagramı.....                       | 67 |
| Şekil 3.18. VKO ve PA'nın çıkış sinyali (24 dB kablo ve zayıflatıcı kaybı mevcuttur).....            | 67 |
| Şekil 3.19. (a) Wilkinson mikroşerit GB (b) benzetim sonuçları.....                                  | 68 |
| Şekil 3.20. (a) Mikroşerit GB (b) geçiş kaybı (c) geri dönüş kaybı.....                              | 69 |
| Şekil 3.21. SPDT anahtar çıkış sinyali (500 MHz).....                                                | 69 |
| Şekil 3.22. (a) Karıştırıcı ölçüm düzeneği (b) IF sinyal çıktısı.....                                | 70 |
| Şekil 3.23. 24 GHz milimetrik dalga radar sistemi.....                                               | 71 |
| Şekil 3.24. Test ortamı, antenlerin ve hedeflerin konumları.....                                     | 71 |
| Şekil 3.25. Belli mesafelerdeki metal hedefler için IF sinyal çıktıları.....                         | 72 |
| Şekil 3.26. Belli mesafelerdeki insan hedefler için IF sinyal çıktıları.....                         | 72 |
| Şekil 3.27. Kutulanmış milimetrik radar modülü.....                                                  | 73 |
| Şekil 3.28. Verici gücünün artırılması için kullanılan modülün blok diyagramı.....                   | 74 |
| Şekil 3.29. HMC1131 performans parametreleri (a) kazanç (b) giriş yansıması (c) çıkış yansıması..... | 75 |
| Şekil 3.30. BJT yükselteç devresi.....                                                               | 75 |
| Şekil 3.31. BJT transistör devresi kazanç grafiği.....                                               | 76 |
| Şekil 3.32. LC alçak geçiren filtre şematik gösterimi.....                                           | 77 |
| Şekil 3.33. LC alçak geçiren filtre geçiş ve geri dönüş parametre grafiği.....                       | 77 |
| Şekil 3.34. Tasarlanan Yükselteç Devresinin Serimi.....                                              | 78 |
| Şekil 3.35. Tasarlanan IF Yükseltecin Genlik Cevabı.....                                             | 78 |
| Şekil 3.36. Üretilen IF Yükselteç Devresi.....                                                       | 79 |
| Şekil 3.37. Üretilen IF Yükseltecin Kazanç ve Geri Dönüş Parametre Grafiği.....                      | 79 |
| Şekil 3.38. DC izolasyonlu kuplaj elemanı.....                                                       | 80 |
| Şekil 3.39. DGK blok diyagramı.....                                                                  | 81 |
| Şekil 3.40. Tasarlanan devrenin simülasyon şematiği.....                                             | 81 |
| Şekil 3.41. Tasarlanan devrenin layoutu.....                                                         | 82 |
| Şekil 3.42. Tasarlanan devrenin S parametreleri (lineer simülatör).....                              | 82 |
| Şekil 3.43. Tasarlanan devrenin EM Simülasyon kullanılarak elde edilen S parametreleri.....          | 83 |
| Şekil 3.44. Tasarlanan devrenin gürültü katsayısı.....                                               | 83 |
| Şekil 3.45. Tasarlanan devrenin çizimi.....                                                          | 84 |
| Şekil 3.46. Üretilmiş düşük gürültülü kuvvetlendirici (resim).....                                   | 84 |
| Şekil 3.47. Bistatik/multi-statik GB NW-SAR blok diyagramı.....                                      | 86 |
| Şekil 3.48. Ka-bant bistatik/multi-statik GB NW-SAR sistemi.....                                     | 87 |
| Şekil 3.49. Ka-bant bistatik GB NW SAR sisteminin radyometrik mod çalışma resmi.....                 | 91 |
| Şekil 3.50. Menzil-yatay eksen bistatik pasif radar radyometrik görüntüsü.....                       | 92 |
| Şekil 3.51. Gürültü kaynağı hedeflerinin menzil-yatay eksen radyometrik görüntüsü.....               | 93 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.52. İki sentetik huzmeli anten kullanan GB NW SAR sistemin menzıl-yatay eksen radyometrik görüntüsü.....                                                                                                 | 94  |
| Şekil 4.1. Kontrol birimi blok diyagramı.....                                                                                                                                                                    | 96  |
| Şekil 4.2. Tetiklemeli monostable darbe üretici devre şeması.....                                                                                                                                                | 97  |
| Şekil 4.3. Tetiklemeli monostable darbe üretici çıkış sinyali.....                                                                                                                                               | 98  |
| Şekil 4.4. Pico5244B dijital osiloskop.....                                                                                                                                                                      | 98  |
| Şekil 4.5. STM32F4-Discovery geliştirme kartı.....                                                                                                                                                               | 99  |
| Şekil 4.6. MATLAB programında hazırlanan grafik kullanıcı arayüzü (GUI) ekran çıktısı....                                                                                                                        | 100 |
| Şekil 5.1. Tasarlanan a) insan, b) köpek, c) askeri araç modelleri.....                                                                                                                                          | 104 |
| Şekil 5.2. 24 GHz’de için insan modelinin MLFMM ve PO ile RKA çözümleri.....                                                                                                                                     | 104 |
| Şekil 5.3. 24 GHz için köpek modelinin RKA çözümler.....                                                                                                                                                         | 105 |
| Şekil 5.4. 24 GHz’de askeri araç (Akrep) modelinin RKA çözümleri.....                                                                                                                                            | 105 |
| Şekil 5.5. Farklı frekanslar için yağmur kaynaklı zayıflamanın yağış miktarına göre değişimi.....                                                                                                                | 112 |
| Şekil 5.6. Silindirik cisim için problem geometrisi.....                                                                                                                                                         | 116 |
| Şekil 5.7. Gözlem noktasındaki saçılan elektrik alan hesabı.....                                                                                                                                                 | 116 |
| Şekil 5.8. Dikdörtgen plaka için problem geometrisi.....                                                                                                                                                         | 117 |
| Şekil 5.9. Dikdörtgen plaka için RKA’ların karşılaştırılması.....                                                                                                                                                | 117 |
| Şekil 5.10. Dikdörtgen plaka için problem geometrisi.....                                                                                                                                                        | 120 |
| Şekil 5.11. Bir milyon faset için RKA sonucu ve paket simülasyon programı sonucu karşılaştırılması.....                                                                                                          | 122 |
| Şekil 5.12. Problem geometrisi.....                                                                                                                                                                              | 124 |
| Şekil 5.13. Şekil 5.12’deki probleme dış eşdeğerliğin uygulanması.....                                                                                                                                           | 126 |
| Şekil 5.14. Şekil 5.’deki probleme iç eşdeğerliğin uygulanması.....                                                                                                                                              | 127 |
| Şekil 5.15. PEC cisim üzerindeki akım dağılımının farklı metotlarla çözümünün karşılaştırılması.....                                                                                                             | 131 |
| Şekil 5.16. Silindirik ızgaranın üzerindeki eşdeğer pertürbasyon akımlarının periyod sayısına bağlı değişimi.....                                                                                                | 131 |
| Şekil 5.17. Problem geometrisi.....                                                                                                                                                                              | 132 |
| Şekil 5.18. Şekil 5.17’deki probleme dış eşdeğerliğin uygulanması.....                                                                                                                                           | 133 |
| Şekil 5.19. Şekil 5.18’deki probleme iç eşdeğerliğin uygulanması.....                                                                                                                                            | 134 |
| Şekil 5.20. Doğrulama amaçlı ele alınan problem geometrisi.....                                                                                                                                                  | 136 |
| Şekil 5.21. Norman’ın makalesinde sonsuz uzun iletken periyodik sinüzoidal yüzey için yüzey üstündeki akım dağılımı.....                                                                                         | 136 |
| Şekil 5.22. Sonsuz uzun iletken periyodik sinüzoidal yüzey için yüzey üstündeki akım dağılımları.....                                                                                                            | 137 |
| Şekil 5.23. Sonsuz uzun dielektrik periyodik sinüzoidal yüzey için yüzey üstündeki eşdeğer akım dağılımları.....                                                                                                 | 137 |
| Şekil 5.24. Kawthar’ın makalesindeki sonsuz uzun dielektrik periyodik sinüzoidal yüzey için yüzey üstündeki eşdeğer akım dağılımları.....                                                                        | 138 |
| Şekil 5.25. Sonsuz uzun dielektrik periyodik sinüzoidal yüzey için yüzey üstündeki eşdeğer elektriksel akımın reel ve sanal kısmının dağılımı.....                                                               | 138 |
| Şekil 5.26. Tek katmanlı bir periyodik dielektrik silindirlerden oluşan ızgara. için aydınlanma açısının 1750 olması durumunda bir periyod içindeki dielektrik silindir üzerindeki eşdeğer akım dağılımları..... | 139 |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.27. Tek katmanlı bir periyodik dielektrik silindirlere oluşan ızgara için aydınlanma açısının 90.010 olması durumunda bir periyot içindeki dielektrik silindir üzerindeki eşdeğer akım dağılımları..... | 139 |
| Şekil 5.28. Problem geometrisi.....                                                                                                                                                                             | 142 |
| Şekil 5.29. Fizik metodu ile yakın alanda hesaplanan normalize edilmiş saçılan elektriksel alanın saçılma açısına göre değişimi.....                                                                            | 142 |
| Şekil 5.30. Fizik metodu ile yakın alanda hesaplanan radar kesit uzunluğunun saçılma açısına göre değişimi.....                                                                                                 | 143 |
| Şekil 5.31. Ele alınan saçılma geometrisi.....                                                                                                                                                                  | 144 |
| Şekil 5.32. MoM çözümü ve Hybrid çözüm arasındaki hata grafiği.....                                                                                                                                             | 144 |
| Şekil 5.33. MoM çözümü ve Hybrid çözümlerle elde edilen saçılan alanların genliği.....                                                                                                                          | 145 |
| Şekil 5.34. MoM çözümü ve Hibrit çözümlerle elde edilen saçılan alanların fazı.....                                                                                                                             | 145 |
| Şekil 5.35. MoM çözümü ve Hibrit çözüm arasındaki hata grafiği.....                                                                                                                                             | 146 |
| Şekil 5.36. PEC silindir üzerindeki pertürbasyon yüzeyi.....                                                                                                                                                    | 146 |
| Şekil 5.37. Ele alınan saçılma geometrisi.....                                                                                                                                                                  | 147 |
| Şekil 5.38. Saçıcı üzerindeki normalize akım dağılımı.....                                                                                                                                                      | 148 |
| Şekil 5.39. PEC hedef üzerindeki pertürbasyon yüzeyi.....                                                                                                                                                       | 148 |
| Şekil 5.40. Saçılma uzunluğu.....                                                                                                                                                                               | 148 |
| Şekil 5.41. Periyodik yapının serbest uzay seçildiği durumda saçılma uzunluğu.....                                                                                                                              | 149 |
| Şekil 5.42. PEC hedef üzerindeki farklı pertürbasyon yüzeyleri için bistatic saçılma uzunlukları.....                                                                                                           | 149 |
| Şekil 5.43. Ele alınan farklı saçılma geometrileri a) tek katmanlı saçıcı yapı (Case 1) b) iki katmanlı saçıcı yapı (Case 2).....                                                                               | 150 |
| Şekil 5.44. Ele alınan farklı saçılma geometrileri için saçılma uzunlukları.....                                                                                                                                | 151 |
| Şekil 5.45. Farklı saçılma senaryolarına ait durumlar.....                                                                                                                                                      | 152 |
| Şekil 5.46. Durum I'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=90$ ).....                                                                                                                 | 152 |
| Şekil 5.47. Durum I'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=180$ ).....                                                                                                                | 152 |
| Şekil 5.48. Durum I'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=360$ ).....                                                                                                                | 153 |
| Şekil 5.49. Durum II'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=90$ ).....                                                                                                                | 153 |
| Şekil 5.50. Durum II'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=180$ ).....                                                                                                               | 154 |
| Şekil 5.51. Durum II'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=360$ ).....                                                                                                               | 154 |
| Şekil 5.52. Durum III'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=90$ ).....                                                                                                               | 155 |
| Şekil 5.53. Durum III'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=180$ ).....                                                                                                              | 155 |
| Şekil 5.54. Durum III'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=360$ ).....                                                                                                              | 156 |
| Şekil 5.55. Durum IV'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=90$ ).....                                                                                                                | 156 |
| Şekil 5.56. Durum IV'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=180$ ).....                                                                                                               | 157 |
| Şekil 5.57. Durum IV'e ait saçılma geometrisi için saçılma uzunluğu grafiği ( $\alpha=360$ ).....                                                                                                               | 157 |
| Şekil 5.58. Durum I'e ait saçılma geometrisi için akım grafikleri ( $\alpha=90$ , $\alpha=180$ , $\alpha=360$ ).....                                                                                            | 158 |
| Şekil 5.59. Durum II'e ait saçılma geometrisi için akım grafikleri ( $\alpha=90$ , $\alpha=180$ , $\alpha=360$ ).....                                                                                           | 159 |
| Şekil 5.60: Durum III'e ait saçılma geometrisi için akım grafikleri ( $\alpha=90$ , $\alpha=180$ , $\alpha=360$ ).....                                                                                          | 160 |
| Şekil 5.61. Durum VI'e ait saçılma geometrisi için akım grafikleri ( $\alpha=90$ , $\alpha=180$ , $\alpha=360$ ).....                                                                                           | 160 |
| Şekil 6.1. (a) Ham radar datası (b) arka plan kaldırılmış radar datası (c) karşılık gelen ortalama vektör.....                                                                                                  | 167 |
| Şekil 6.2. Zamanla değişen sinyal kazancı (a) ham A-tarama (b) zaman-kazanç fonksiyonu (c) zamanla değişen kazanç uygulaması sonucu.....                                                                        | 168 |

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.3. Wiener filtrenin etkisi (a) ham radar datası (b) filtre sonucu.....                                                | 170 |
| Şekil 6.4. YAR işleminde kullanılan kurgusal anten dizisinin gösterimi.....                                                   | 170 |
| Şekil 6.5. Antenin hesaplanan noktaya olan uzaklığı.....                                                                      | 171 |
| Şekil 6.6. YAR huzmesi içerisindeki her bir antenin hesaplanan noktaya olan uzaklığı arasındaki fark.....                     | 172 |
| Şekil 6.7. Hesaplanan noktanın anten tarafından görüldüğü açı hesabı.....                                                     | 173 |
| Şekil 6.8. YAR ayak izi görüntüsü.....                                                                                        | 174 |
| Şekil 6.9. Simülasyon datasına ait IFFT ve MUSIC algoritmaları sonuçları.....                                                 | 178 |
| Şekil 6.10. GHz Anritsu MS4644A model VNA.....                                                                                | 179 |
| Şekil 6.11. Hareketli platform.....                                                                                           | 180 |
| Şekil 6.12. 2-B SAR veri toplama sistem geometrisi.....                                                                       | 180 |
| Şekil 6.13. Test ölçümü için tasarlanan MMW radar sistemi (a) hedefler ile (b) antenler ve network analizör ile.....          | 181 |
| Şekil 6.14. MMW radar uygulamasına ait hedef senaryosu.....                                                                   | 182 |
| Şekil 6.15. MMW radar B-tarama görüntüleri (a) ham veri (b) YAR algoritması sonucu (c) YAR ve MUSIC algoritmaları sonucu..... | 182 |
| Şekil 6.16. El-kol metal hedef (solda) ve tahta hedef (sağda) fotoğrafı.....                                                  | 183 |
| Şekil 6.17. Milimetrik dalga ölçüm düzeneği.....                                                                              | 184 |
| Şekil 6.18. Senaryo 2 için hedef gösterimi.....                                                                               | 184 |
| Şekil 6.19. 24-26 GHz filtreli B-tarama görüntüsü.....                                                                        | 184 |
| Şekil 6.20. Açık alan ölçüm alanının uydu görüntüsü.....                                                                      | 185 |
| Şekil 6.21. Senaryo 2 için ölçüm krokisi.....                                                                                 | 186 |
| Şekil 6.22. Senaryo geometrisi.....                                                                                           | 187 |
| Şekil 6.23. 24-26 GHz filtreli B-tarama görüntüsü.....                                                                        | 187 |
| Şekil 6.24. Senaryo 4 için hedef gösterimi.....                                                                               | 188 |
| Şekil 6.25. 24-26 GHz filtreli B-tarama görüntüsü.....                                                                        | 189 |
| Şekil 6.26. 24-26 GHz filtreli B-tarama görüntüsü.....                                                                        | 190 |
| Şekil 6.27. Senaryo 6 için hedef gösterimi.....                                                                               | 191 |
| Şekil 6.28. Senaryo 6 geometrisi.....                                                                                         | 191 |
| Şekil 6.29. 24-26 GHz filtreli ham B-tarama görüntüsü.....                                                                    | 191 |
| Şekil 6.30. Senaryo 7 geometrisi.....                                                                                         | 192 |
| Şekil 6.31. Senaryo 7 için hedef gösterimi.....                                                                               | 192 |
| Şekil 6.32. 24-26 GHz filtreli B-tarama görüntüsü.....                                                                        | 193 |
| Şekil 6.33. Senaryo 8 için anten ve hedef gösterimi.....                                                                      | 193 |
| Şekil 6.34. (a) ham B-tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu işlenmiş B-tarama görüntüsü.....                            | 194 |
| Şekil 6.35. Anten ve hedef gösterimi.....                                                                                     | 195 |
| Şekil 6.36. (a) ham B-tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu işlenmiş B-tarama görüntüsü.....                            | 195 |
| Şekil 7.1. Senkronizasyon blok diyagramı.....                                                                                 | 196 |
| Şekil 7.2. Mikrodenetleyici yazılımı akış diyagramı.....                                                                      | 198 |
| Şekil 7.3. Tarayıcı sistemi ve ADE antenler.....                                                                              | 199 |
| Şekil 7.4. Tasarlanan radar sisteminin (a) verici işareti (b) alıcı işareti.....                                              | 199 |
| Şekil 7.5. Senaryo 1'e ait ölçüm senaryosu.....                                                                               | 200 |

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 7.6. Senaryo 1'e ait (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                                                                 | 200 |
| Şekil 7.7. Senaryo 2'ye ait test senaryosu.....                                                                                                                                           | 201 |
| Şekil 7.8. Senaryo 2'ye ait (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                                                                | 201 |
| Şekil 7.9. Senaryo 2'ye ait yazılımsal ortalama alma yöntemi uygulanmış (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                    | 202 |
| Şekil 7.10. Örnekleme aralığı 2 ns olan datanın (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                                            | 202 |
| Şekil 7.11. Örnekleme aralığı 2 ns olan dataya yazılımsal ortalama alma yöntemi uygulanmış (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB]..... | 203 |
| Şekil 7.12. Senaryo 1'e ait horn antenler ile alınan ölçüm senaryosu.....                                                                                                                 | 203 |
| Şekil 7.13. Senaryo 1'e ait horn antenler ile alınan (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                                       | 204 |
| Şekil 7.14. Senaryo 1'e ait 2. ölçüm için (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                                                  | 204 |
| Şekil 7.15. Senaryo 2'ye ait horn antenler ile alınan (a) ham B tarama görüntüsü (b) SAR algoritması sonucu elde edilen B-tarama görüntüsü [dB].....                                      | 205 |

## ÖZET

Bu projenin temel hedefi, hedef cisimlerin kötü hava koşullarında yüksek çözünürlük ile uzaktan algılanması amacıyla milimetrik bantta çalışan bir çevre görüntüleme radar alarm sensörünün geliştirilmesi ve bu doğrultuda milli teknolojik bilgi birikiminin elde edilmesidir.

Bilindiği üzere, radar ile çevre görüntülemeye performansın esas unsuru olan menzil ve çözünürlüğü belirleyen temel parametreler etkin ışıma gücü, çalışma frekansı ve bant genişliğidir. Milimetrik dalga radar teknolojisi toz, sis, yağmur ve kar gibi görüş mesafesinin az olduğu koşullarda bile nesnelerin yüksek çözünürlükle algılanmasına olanak tanır. Kayıplı ortamlarda uzun menzilde hedef tespiti için alt frekans bandı, kayıpsız ya da az kayıplı ortamlarda daha hassas görüntüme için ise üst frekans bandı kullanılır. Bu çerçevede, projemizde YTÜ ekibi tarafından 25 GHz, Ukrayna IRE ekibi tarafından ise 36 GHz frekans bantlarında çalışan radar tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Böyle bir milimetrik dalga radarının gereksinimlerini belirlemek için öncelikle kayıplı hava ortamlarında elektromanyetik dalga yayılımının ve hedef saçılmasının sayısal analizi geliştirilen yeni bir hibrit yaklaşım MoM (Moments of Methods) ve PO metotlarını birleştirilerek elde edilmiştir. Sonrasında, MM-dalga uygulama alanlarına göre öngörülen frekanslarda çalışmaya ve fiziksel kullanıma uygun dielektrik yüklü horn ve ADE yapısında parabolik yansıtıcı türü özgün tarayıcı anten yapılarının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenlerin analitik regülarizasyon (ARM) yöntemlerine dayalı özgün sayısal algoritmalarla hızlı ve güvenilir benzetim çalışmaları yapılmış, seçilen tasarımlar üretilmiş ve RF devre analizörü ile performans ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, radar donanımı için RF devre birimlerinin (LNA, IF kartı, RF bölücü, karıştırıcı vs) modüler tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak üretilen antenler, RF birimler, tasarlanan kontrol ve veri kayıt ünitesinin tümleştirmesi ile oluşturulan sistemin performans testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar proje ortağımız NASU, IRE ekibiyle teknik ziyaretler vasıtasıyla paylaşılmıştır.

### Anahtar Kelimeler:

MİLMETRİK DALGA, YAPAY AÇIKLIK RADARI, ÇEVRE GÖZETLEME, PARABOLİK YANSITICI ANTEN.



## **ABSTRACT**

The main objective of this project is to develop an environmental imaging radar alarm sensor working in the millimetric band for remote sensing of targets in bad weather conditions and to obtain the national technological knowledge.

As a matter of fact, the fundamental parameters determining the resolution and range, which are the main elements of radar and environmental imaging performance, are effective radiation power, working frequency and bandwidth. The millimetric wave radar technology provides for remote sensing of objects with high resolution even under conditions where visibility is low such as dust, fog, rain and snow. The lower frequency band is used for long-range target detection in lossy environments, and the upper frequency band is used for more sensitive imaging in lossless or low-loss environments. In this framework, radar designs were implemented by the team of YTU at 25 GHz and by the Ukrainian IRE team at 36 GHz frequency bands.

To determine the requirements of such millimetric wave radar, a new hybrid approach combining MoM (Moments of Methods), and Physical Optics (PO) methods, was developed for the numerical analysis of electromagnetic wave propagation and target scattering in lossy environments. Then, dielectrically loaded horn and ADE type parabolic reflector antennas were designed at the frequencies of MM-wave application areas. The numerical simulations of the antennas were carried out using original numerical algorithms based on analytical regularization (ARM) method. The selected designs were produced and performance measurements were made with RF network analyzer. In addition, modular design and production of RF circuit units (LNA, IF card, RF divider, mixer, etc.) for radar equipment have been realized. Finally, the performance tests of the system were performed by integrating the produced antennas, RF units, the designed control and data recording modules. Results were shared with our project partner, Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, NASU team through technical visits.

### **Keywords:**

MILLIMETER WAVE, SYNTHETIC APERTURE RADAR, SURVAILANCE, PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA.

## 1. GİRİŞ

Mikrodalga radar alarm sensörlerinin yaygın tipleri, volumetrik (menzil ve açı) ve Doppler (hareket) algılayıcılardır. Doppler modu, hareketli cisimler için korunan bir hacmin hızlı bir şekilde görüntülenmesinde kullanılır. Menzil modunda ise, hedefin düzlemsel konumunu (mesafe ve açı) tespit etmek yayılan işaret module edilir (örneğin frekans ya da faz modülasyonu) ve işlenir. Dolayısıyla, kullanılan radar sensörü yüksek performanslı hedef tespiti, teşhisi ve takibi için iyi bir menzile ve açısal çözünürlüğe sahip olmalıdır. Aksi takdirde, birçok durumda bu algılayıcıların yanlış alarm verebileceği bilinmektedir. Bununla birlikte, hedef tespit bölgesinin ayrıntılı görüntüsünü belirlemek de zorlaşır (Lester, 1999).

Arabalar için milimetrik dalga engel tespit (park) sensörleri (Hasch vd., 2012) konusunda birçok pratik çalışma bulunmasına rağmen, uzaktan algılama alarm sensörü olarak milimetrik dalga frekanslarının kullanımı endüstriyel mesafe ölçerler (Ei-Infocomm Pte Ltd) gibi uygulamalarla sınırlıdır. Ancak, milimetrik dalga teknolojisindeki gelişmeler, potansiyel olarak küçük boyutlarda ve pahalı olmayan milimetrik dalga çok amaçlı sensörlerin üretimine imkan sağlamaktadır (Mencia-Oliva vd., 2011). Milimetrik dalga bandında çalışan uzaktan algılama sistemleri sayesinde mevcut mikrodalga radar sensör yapılarına göre çok daha iyi çözünürlüğe ve daha küçük boyutlara sahip çevre gözetleme sistemleri tasarlanabilir. Bu projenin esas amacı, böyle bir radar algılayıcı sistemini tasarlamak, geliştirmek ve laboratuvar prototipini üretmektir.

Bu sensörler ayrıca, radar tipi tasarımın yanı sıra, tekli alıcı/verici çifti olarak veya farklı tipteki sensörlerin kombinasyonu şeklinde kullanılabilir (Dulski vd., 2009). Vinç, kamyon, endüstriyel robotlar gibi büyük hareketli makinelerin önündeki insanların tespiti uygulamaları örnek olarak verilebilir. Ya da, bariyer tipi milimetrik dalga algılayıcılar tasarlanarak, uygun bir mesafeye konumlandırılmış verici ve alıcı arasında oluşan huzmenin kesildiği anda cisim tespiti yapılabilir (örneğin; sınır güvenliği amaçlı elektronik çit).

Bu sensörlerin yetenek ve sınırlamalarını anlamak için, milimetre dalga bandındaki çeşitli cisimlerin dağılma özellikleri araştırılmış ve milimetre dalga yayılım özellikleri dikkate alınmıştır. Akıllı alarm sistemlerinde uygulama için kısa menzilli (birkaç on metre) yüksek çözünürlüklü milimetre (MM) dalga sensörü oluşturma olanağı araştırılmıştır. Ayrıca çeşitli cisimlerin saçılma özelliklerine ve milimetre dalga yayılım özelliklerine bağlı performans ve kısıtlamaları araştırılmıştır.

Pasif radyometrik (Kudryashov vd., 2013; Lukin vd., 2014) ve aktif gürültü (Lukin, 2002; Garmatyuk ve Narayanan, 1999) Yapay Açıklık Radarı (YAR) (Tarchi vd., 2010; Lukin vd., 2012) olmak üzere iki farklı tekniğe dayanan yeni alarm sensörleri tasarlanmıştır. Uzak

nesnelerin termal radyasyonlarını kullanarak radyometrik olarak görüntülenmesi çeşitli şekillerde gerçekleştirilmektedir. Mevcut radyometrik yöntemler sadece termal radyasyonun açısal koordinatlarının ölçülmesini sağlar. Radyometrik görüntülemeye önerdiğimiz yaklaşımın temel fikri, açıklık sentezi ile birlikte belirli yörünge boyunca hareket eden bir ya da iki antenli interferometrik radyometrenin uygulanmasına dayanmaktadır (Garmatyuk ve Narayanan, 1999; Tarchi vd., 2010). Bu sayede, YAR tekniğinin radyometrik prensipler ile birlikte uygulanarak termal radyasyon kaynağının menziline dair bilgi elde etme şansını verecektir.

Ukrayna IRE ekibince geliştirilen “Gürültü YAR”, gürültü radar teknolojisi (Lukin, 2002; Garmatyuk ve Narayanan, 1999) üzerine kuruludur. Böylece, düşük algılanma olasılığı (LPI), düşük yayın gücü, diğer cihazlarla çok iyi elektromanyetik uyumluluk (EMC) sağlanmaktadır. Gürültü YAR sistemi karıştırıcılar için daha bağıışıktır ve yayınlanan dalga biçimleri doğada rastgele olduğu için buna karşı aktif istihbarat önlemleri sağlamak daha zordur. Bu radar sensörünün üstün özellikleri, gizli çalışması, kesin menzil ve Doppler tahmini, hedef takibi, görüntülenmesi ve sınıflandırmasıdır.

Proje ekibimizce yapılan teknik çalışmalar proje planına göre aşağıda verilen altı ana iş paketi altında gerçekleştirilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

## **2. DALGA KLAVUZU DİZİSİ VE YANSITICI ANTEN TASARIMI**

İP.1 kapsamında yapılan çalışmalara dair ayrıntılı teknik rapor ekteki [Bölüm 2](#)'de sunulmaktadır.

## **3. KA BANT MİLİMETRİK DALGA RADARI ALICI VE VERİCİ BİRİMİ**

İP.3 kapsamında yapılan çalışmalara dair ayrıntılı teknik rapor ekteki [Bölüm 3](#)'te sunulmaktadır.

## **4. RADAR KONTROL BİRİMİ VE SİSTEM ENTEGRASYONU**

İP.4 kapsamında yapılan çalışmalara dair ayrıntılı teknik rapor ekteki [Bölüm 4](#)'te sunulmaktadır.

## **5. ORTAM PROPAGASYON MODELLERİ VE RKA HESAPLAMALARI**

İP.5 kapsamında yapılan çalışmalara dair ayrıntılı teknik rapor ekteki [Bölüm 5](#)'te sunulmaktadır.

## **6. ADAPTİF İŞARET VE GÖRÜNTÜ İŞLEME ALGORİTMALARI GELİŞTİRİLMESİ**

İP.6 kapsamında yapılan çalışmalara dair ayrıntılı teknik rapor ekteki [Bölüm 6](#)'da sunulmaktadır.

## **7. SİSTEM PERFORMANS ÖLÇÜMÜ VE RAPORLANMASI**

İP.7 kapsamında yapılan çalışmalara dair ayrıntılı teknik rapor ekteki [Bölüm 7](#)'de sunulmaktadır.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu proje kapsamında hedef cisimlerin uzaktan algılanması ve yüksek çözünürlüklü çevre görüntülemesi için 25 GHz frekansında çalışan bir radar alarm sensörü tasarlanmıştır. Proje boyunca hali hazırda, SCI kapsamında 2 adet makale ve 6 adet uluslararası bildiri yayınlanmıştır. Ayrıca, bir SCI makalesi ve bir uluslararası bildiri hakem değerlendirmesindedir. Bir SCI makale ise, sunulma aşamasındadır.

Birinci iş paketinde yüksek performanslı bir algılayıcı sistem için, dielektrik yüklü horn ve ADE yapısında parabolik yansıtıcı türü özgün milimetrik dalga tarayıcı anten tasarlanmıştır. Tasarlanan antenler üretilip performans sonuçları değerlendirilmiştir. Bu anten yapıları 25 GHz radar sistemi ile uyumlu biçimde çalışabilmektedir.

İkinci iş paketinde radar donanımı için RF devre birimlerinin (LNA, IF kartı, RF bölücü, karıştırıcı vs) modüler tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü iş paketinde hizmet alımı desteği ile gerçekleştirilmiş olan kontrol birimi darbe üretici, sayısallaştırıcı ve motor kontrolü olmak üzere üç ayrı parçadan oluşmaktadır. 74HC123 entegresi ile darbe üretici, Pico5244B model dijital osiloskop modülü ile sayısallaştırma ve veri aktarımı, STM32F4-Discovery geliştirme kartı ile tarayıcı step motor kontrolü sağlanmıştır.

Dördüncü iş paketinde radar kesit alanı hesaplamaları, ortam propagasyon modelleri ve radar bütçe denklemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda, muhtemel hedeflerin özellikle kötü hava koşullarında tespit olasılığı ve görüntülenebilmesine yönelik geri yansımalar benzetim programları vasıtasıyla hesaplanmıştır. Propagasyon ortamının zayıflatma etkisinin hesabı için literatür taraması yapılmış ve ayrıca yağmurlu ortamlarda hedeflerden saçılan alanların hesaplanmasına yönelik yeni bir MoM-PO hibrit yaklaşımı geliştirilmiştir.

Beşinci iş paketinde MMW radar sistemi ile çevre gözetlemesinde yüksek çözünürlükte görüntüleme yapabilen elektromanyetik tabanlı işaret ve görüntü işleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu bağlamda, öncelikle frekans atlamalı MM-dalga devre analizörü ile toplanan ham verilerden yüksek çözünürlüklü hedef görüntüsü oluşturmak amacıyla dinamik arka plan çıkarma, uyarlamalı filtreleme, değişen menzil ve huzme tabanlı YAR ve MUSIC algoritmaları geliştirilmiştir. Daha sonra bu yöntemler tasarlanan MM-dalga radar sistemi için zaman domeninde güncellenerek kullanılmıştır.

Altıncı ve son iş paketinde birinci iş paketinde üretilen antenler, ikinci iş paketinde üretilen RF birimler, üçüncü iş paketinde tasarlanan kontrol ve veri kayıt ünitesinin tümleştirmesi ile oluşturulan sistemin performans testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ham veriler beşinci iş

paketinde geliştirilen işaret işleme algoritmaları kullanılarak YAR görüntüleri elde edilmiş ve ölçüm sonuçları raporlanmıştır.

Bu proje neticesinde, laboratuvar prototipi seviyesinde bir 25 GHz. radar sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemin gerçek zamanda ve daha uzun menzilde çalışacak bir ürün prototipi haline getirilmesi bir sonraki amacımızdır. Bu çerçevede daha yüksek güçlü RF kuvvetlendirici ve FPGA tabanlı kontrol ve işaret işleme birimi geliştirilmesi hedeflenmektedir.

## 9. REFERANSLAR

Almazov, V.B. 1974. "Methods for passive radar", VIRTU, 85.

Arai, L., Shanker, M. S. 2003. "Signal Processing of Ground Penetrating Radar Using Spectral Estimation Techniques to Estimate the Position of Buried Targets", EURASIP Journal on Applied Signal Processing., 12, 1198-1209.

Arvas, E., Rao, S. M., Sarkar, T. K. 1986. "E-field solution of TM-scattering from multiple perfectly conducting and lossy dielectric cylinders of arbitrary cross-section", IEE Proceedings, 133 (2), 115–121.

Arvas, E., Ross, M., Qian, Y. 1988. "TM scattering from a conducting cylinder of arbitrary crosssection covered by multiple layers of lossy dielectrics", IEE Proceedings H, 135 (4), 226–230.

Arvas, E., Ross, M., Qian, Y. 1989. "TE scattering from a conducting cylinder of arbitrary crosssection covered by multiple layers of lossy dielectrics", IEE Proceedings H, 136 (6), 425–430.

Badron, K. 2011. "Rain induced attenuation studies for V-band satellite communication tropical region", J Atmos Sol-Terr Phys (UK), 73, 601.

Balanis, C. A. 1989. Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons.

Bardi, I., Remski, R., Perry, D., Cendes, Z. 2002. "Plane wave scattering from frequency-selective surfaces by the finite-element method", IEEE Trans. Magn., 38 (2), 641–644.

Bohren, C. F., Huffman, D. R. 1983. Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley (USA).

Bozzi, M., Perregrini, L. 2003. "Analysis of multilayered printed frequency selective surfaces by the MoM/BI-RME method", IEEE Trans. Antennas Propag., 51 (10), 2830–2836.

Burki, J., Ali, T., Arshad, S. 2013. "Vector network analyzer (VNA) based synthetic aperture radar (SAR) imaging", 16th International Multi Topic Conference (INMIC), 207 - 212.

Cho, Y. H., Kwon, D. H. 2013. "Efficient mode-matching analysis of 2-D scattering by periodic array of circular cylinders", IEEE Trans. Antennas Propag., 61 (3), 1327–1333.

Curlander, J. C., McDounough, R. N. 1991. Synthetic aperture radar, systems and signal processing. NewYork: John Wiley & Sons.

- Devaney, A.J. Super-resolution Processing of Multi-static Data Using Time Reversal and MUSIC. Boston, MA 02115: Department of Electrical Engineering Northeastern University.
- Dulski R., Kastek, M., Bieszczad G., Trzaskawka P. Ciurapinski W. 2009. "Data fusion used in multispectral system for critical protection", WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 42, 165-173.
- Dong, J. Shi, R., Chen, K., Li, Q., Lei, W. 2011. "An external calibration method for compensating for the mutual coupling effect in large aperture synthesis radiometers", International Journal of Antennas and Propagation, 8.
- Edelsohn et al. 1991. Interferometric radiometer. US patent No.4.990.925, 14.
- Edelsohn, C.R. Wiley, C.A. 1991. Interferometric radiometer.
- Ei-Infocomm Pte Ltd. "94 GHz Millimeter Wave Industrial Distance Sensor"ç <http://www.ei-infocomm.com.sg>
- ElMahgoub, K., Yang, F., Elsherbeni, A. Z. 2012. Scattering Analysis of Periodic Structures Using Finite-Difference Time Domain Method. Morgan and Claypool.
- Freni, A., Mias, C., Ferrari, R. L. 1998. "Hybrid finite-element analysis of electromagnetic plane wave scattering from axially periodic cylindrical structures", IEEE Trans. Antennas Propag., 46 (12), 1859–1866.
- Garmatyuk, D.S., Narayanan, R. M. 1999. "Ultrawide-band noise synthetic radar: Theory and experiment," IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp. 3, 1764–1767.
- Grabner, M., Kvicera, V. 2013. Simulation of Multiple Scattering Effect in Atmosphere Hydrometeors by Monte Carlo Method. 7th European Conference on Antennas and Propagation.
- Hasch, J., Topak, E., Schnabel, R. Zwick, T., Weigel, R., Waldschmidt, C. 2012. "Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 60 (3).
- Hu, F. G. 2010. "Integral equation analysis of electromagnetic wave propagation in periodic structure and error analysis of various basis functions in projection of plane waves", PhD thesis, Iowa State University.
- Ilin, N. V., Kondratev, I. G., Sapogova, N. V., Smirnov, A. I. 2006. "Light scattering on 2D nanostructured resonant gratings", PIERS Online, 2 (3), 288–291.
- Ishimaru, A. 1978. "Wave propagation and scattering in random media", Academic Press (USA), 1 (2).
- Ito, S., Oguchi, T., Iguchi, T., Kumagai, H., Robert, M. 1995. "Depolarization of radar signals due to Multiple Scattering in Rain", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33 (4).
- Ito, S., Oguchi, T. 1989. Approximate Solutions of the vector radiative transfer equation for linearly polarized light in discrete random media. Optical Society of America.
- Ito, S., Oguchi, T. 1994. "Circular depolarization ratio of radar returns from rain: validity of the second order solution of RT equation", IEE Proc.- Microw. Antennas Propog, 141.

- Jandieri, V., Yasumoto, K. 2011. "Electromagnetic scattering by layered cylindrical arrays of circular rods", IEEE Trans. Antennas Propag., 59 (6), 2437–2441.
- Kong, F. N., By, T. L. 1993. "Theory and Performance of a GPR System Which Uses Step Frequency Signals", J. Appl. Geophys, 33, 453-445.
- Kudryashov, V.V., Lukin, K.A., Palamarchuk, V.P. 2013. "Coherent Radiometric Imaging with Ka-Band Ground-Based Synthetic Aperture Noise Radar," Telecommunications and Radio Engineering, 72 (8), 699-710.
- Kuga, Y., Ulaby, F. T., Haddock, T. F., DeRoo, R. D. 1991. "Milimeter wave radar scattering from snow", Radio Science, 26.
- Laws, J. O., Parsons, D. A. 1943. "The relation of raindrop-size to intensity", Trans Am Geophys Union, 24, 452-460.
- Lee, J., Havrilla, M., Hyde, M., Rothwell, E. J. 2008. "Scattering from a cylindrical resistive sheet using a modified physical optics current", IET microwaves, antennas & propagation, 2 (5), 482–491.
- Lester, A.J. 1999. "Analyses of performance of volumetric intrusion detection Technologies", IEEE 33rd Annual Proceedings International Carnahan Conference on Security Technology, 101–111.
- Lukin, K.A. 2001. "Noise radar", Telecommun. Radio Eng., 55(12), 8–16.
- Lukin, K.A. 2002. "The Principles of Noise Radar Technology", Proc. of NRTW-2002, 13-22.
- Lukin, K.A. 2002. "The principles of noise radar technology". Proc. NRTW, 13–22.
- Lukin, K.A. 2003. "A novel approach to scanning antenna design", Proc. 4th Int. Conf. Antenna Theory and Techniques, 11, 290–293.
- Lukin, K.A. 2005. "Sliding antennas for noise waveform SAR", Appl. Radio Electron., 4(1), 103–106.
- Lukin, K.A. 2005. "Sliding Antennas for Noise Waveform SAR," Applied Radio Electronics, 4(1), 103-106.
- Lukin K.A. et. al. 2008. "Ka-Band Bistatic Ground-Based Noise Waveform SAR for Short-Range Applications," IET Radar, Sonar & Navigation, 2(4), 233-243.
- Lukin, K.A. 2010. "Scanning Synthetic Radiation Pattern Antennas," Radioelectronics and communications systems, 53(4), 219- 224.
- Lukin K.A., Kulpa K., Palamarchuk, V.P. 2012. "Experimental estimation of the accuracy of the object shifts measurement using differential SAR interferometry method", Applied Radioelectronics, 11(3), 366-372.
- Lukin, K.A., Kudriashov, V.V., Vyplavin, P.L. 2014 "Coherent Imaging In Range-Azimuth Plane Using Bistatic Radiometer Based On Antennas With Beam Synthesizing," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.

- Mahafza, B. R. 2013. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. CRC Press.
- Makal, S., Kizilay, A. 2011. "A decomposition method for the electromagnetic scattering from a conductive object buried in a lossy medium", ACES Journal, 26 (4), 340–347.
- Makal, S., Kizilay, A. 2011. "Computation of the scattered fields from a dielectric object buried in a medium with a periodic surface by a decomposition method", IET Microwaves, Antennas & Propagation, 5 (14), 1703–1709.
- Manara, G., Monorchio, A., Mittra, R. 1999. "Frequency selective surface design based on genetic algorithm", Electronics Letters, 35 (17), 1400–1401.
- Marshall, J. S., Palmer, W. McK. 1948. "The distribution raindrop size with size", J. Meteorol, 5, 165-166.
- Matzler, C. 2012. "Effects of Rain on Propagation, absorption, and scattering of microwave radiation based on the dielectric model of Liebe", IAP Research Report, 10.
- Matzler, C. 2012. "Matlab functions for mie scattering and absorption", IAP Research Report, 2-8.
- Mencia-Oliva, B., Grajal, J., Yeste-Ojeda, O.A. 2011. "COTS technologies for radar sensors at millimeter-wave bands", IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Integration Technologies, 105-108.
- Mittra, R., Chan, C. H., Cwik T. 1988. "Techniques for analyzing frequency selective surfaces- a review", Proc. IEEE, 76 (12), 1593–1615.
- Mogyla, A.A., Lukin, K.A., Shiyan, Y.A. 2002. "Relay-type noise correlation receiver for the measurement of range and vector range rate", Telecommun. Radio Eng., 57(2–3), 175–183.
- Natarov, D. M., Benson, T. M., Altintas, A., Sauleau, R., Nosich, A. I. 2010. "Resonances in the electromagnetic scattering by very large finite-periodic grids of circular dielectric wires", Proc. Int. Kharkov Sym. on Physics and Engineering of Microwaves, MM and Sub-MM Waves (MSMW), Kharkiv, 1–3.
- Norman, A., Nyquist, D., Rothwell, E., Chen, K. M., Ross, J., Ilavarasan, P. 1996. "Transient scattering of a short pulse from a conducting sinusoidal surface", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 10 (4), 461-487.
- Oguchi, T. 1983. "Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors", Proc IEEE (USA), 71 (9), 1029.
- Okamura, S., Oguchi, T. 2010. "Electromagnetic wave propagation in rain and polarization effects", Proc Jpn Acad (JAPAN), 86.
- Olsen, R. L., Rogers, D. V., Hodge, D. B. 1978. "The aRb relation in the calculation of rain attenuation", IEEE Transactions on Antennas and Prop, 26 (2).
- Petersson, L. E. R., Jin, J. M. 2006. "Analysis of periodic structures via a time-domain finite-element formulation with a Floquet ABC", IEEE Trans. Antennas Propag., 54 (3), 933–944.

- Petre, P., Swaminathan, M., Veszely, G., Sarkar, T. K. 1993. "Integral equation solution for analyzing scattering from one-dimensional periodic coated strips", IEEE Trans. Antennas and Propag., 41 (8), 1069–1080.
- Pouliguen, P., Desclos, L. 1996. "A physical optics approach to near field RCS computations", Annales des télécommunications., 51 (5-6), 219–226.
- Pous, R., Pozar, D. M. 1991. "A frequency-selective surface using aperture-coupled microstrip patches", IEEE Trans. Antennas Propag., 39, 1763–1769.
- Rezende, M. C., Martin, M. I., Faez, R. 2002. "Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets", Revista de Física Aplicada e Instrumentação, 15 (1).
- Radhavan, S. 2003. Radar Meteorology. Springer Science+Business Media.
- Sadiku, M. N. O. 2001. Numerical Techniques in Electromagnetics. CRC Press.
- Sheng, N., Liao, C., Lin, W., Zhang, Q., Bai, R. 2014. "Modeling of Millimeter-Wave Propagation in Rain Based on Parabolic Equation Method", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 13.
- Shilo et. al. 2003. Microwave radiometric system. ZIR for the customs service technology and design in the electric equipment, 3, 11-13.
- Shilo, S.A., Komyak, V.A. 1998. "Millimeter band scanning multi-beam radiometer", in Proc. MSMW, 529-531.
- Skolnik, M. I. 2000. Introduction to Radar Systems. MacGraw Hill.
- Tarchi, D., Lukin, K., Fortuny-Guasch, J., Mogila, A., Vyplavin P., Sieber, A. 2010. "SAR imaging with noise radar", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 46 (3), 1214-1225.
- Thompson, A.R., Moran, J.M., Swenson, G.W. 2001. Interferometry and synthesis in radio astronomy. (2nd edition). New York: John Wiley and Sons.
- Toyama, H., Yasumoto, K. 2005. "Electromagnetic scattering from periodic arrays of composite circular cylinder with internal cylindrical scatterers", Progress in Electromagnetics Research, 52, 321–333.
- Twersky, V. 1962. "On scattering of waves by the infinite grating of circular cylinders", IRE Trans. Antennas Propag., 10 (6), 737–765.
- Unal, M., Caliskan, A., Turk, A. S., Bakbak, P.O. 2013. "Subsurface and through-wall SAR imaging techniques for ground penetrating radar", Technology and Design in Electronic Equipment, 37(6), 32-36.
- Unal, M., Caliskan, A., Turk, A. S., Orhan, M., Ozdemir, M. 2014. Development of Signal Processing Techniques for Through-Wall Imaging Radar Systems. Poland: Microwave and Radar Week.

Yang, R. K., Li, L., Ma, H. H. 2013. "Effects of backscattering enhancement considering multiple scattering in rain on MMW radar performance", Indian Journal of Radia & Space Physics, 42.

Yanlin, X., Hu, Y., Weikang, Y. 2015. "Scattering analysis of periodic composite metallic and dielectric structures with synthetic basis functions", Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 30 (10), 1059–1067.

Yasumoto, K., Toyama, H., Kushta, T. 2004. "Accurate analysis of two-dimensional electromagnetic scattering from multilayered periodic arrays of circular cylinders using lattice sums technique", IEEE Trans. Antennas Propag., 52 (10), 2603–2611.

Yurduseven, O., Türk, A.S. 2010. Muhtelif Cisimlerin Radar Kesit Alanı Analizleri ve RKA Optimizasyonu. ELECO Ulusal Kongresi.

Zaki, K. A., Neureuther, A. R. 1971. "Scattering from a Perfectly Conducting Surface with a Sinusoidal Height Profile: TE Polarization", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, AP-19 (2).