

**5.9 GHz BANDINDA
HÜCRESEL V2X HABERLEŞMESİ
İÇİN KANAL ÖLÇÜMÜ**

**CHANNEL MEASUREMENT FOR
CELLULAR V2X COMMUNICATIONS
AT 5.9 GHz BAND**

HACER SEDES ARIKAN

PROF. DR CENK TOKER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik Elektronik Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

5.9 GHz Bandında Hücresel V2X Haberleşmesi için Kanal Ölçümü

Hacer Sedes ARIKAN

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cenk TOKER

Eylül 2021, 137 sayfa

Araçlar arası iletişimde alıcı ve vericinin hareketinin yanı sıra ortam da engel olunamaz biçimde dinamiktir. Bu sebeple kanalın zaman, frekans ve Doppler'e göre karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin tespiti için Ankara'nın farklı trafik ve bina yoğunluklarına sahip semtlerinde farklı hız, mesafe ve göreceli konumlarda sürüş testleri yapılmıştır. Birbirinden farklı yüz senaryo için bir adet verici ve bir adet alıcı içeren test düzeneğiyle ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kanala verilen sinyalin incelenmesi ile başlayan çalışmaların sonunda Ankara için 5.89 GHz'de hücresel V2X kanal modelinin oluşturulmasını sağlayacak güç gecikme profili, saçılım fonksiyonu, Doppler spektrum yoğunluğu, rms gecikme yayılımı gibi temel parametreler elde edilmiştir. Bu parametreler için beklenen teorik değerler ile ölçümlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İncelemelerde uygulamadaki ve alt yapıdaki kısıtlamalar göz önünde bulundurularak çıkarımlar ve iyileştirme önerileri yapılmıştır. Uygulama Keysight Technologies Inc.'in hücresel V2X için kullandığı sinyali ile BTK'nın Piyasa Gözetleme Laboratuvarı'na kurduğu 5G Vadisi Test Altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kanal Modelleme, Kanal Ölçümü, Kanal Parametreleri, C-V2X, Kanal Analizi, Doppler, Sürüş Testleri

ABSTRACT

Channel Measurement for Cellular V2X Communications at 5.9 GHz Band

Hacer Sedes ARIKAN

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Cenk TOKER

September 2021, 137 pages

In inter-vehicular communications, the environment, as well as the movement of the receiver and transmitter, is inevitably dynamic. For this reason, the channel should be characterized according to time, frequency, and Doppler. To determine these parameters, drive tests were carried out at different speeds, distances and relative positions in districts of Ankara with different traffic and building densities. Measurements were made with a test setup containing single transmitter and receiver for hundred quantities of different scenarios. At the end of the studies that started with the examination of the signal given to the channel, basic parameters such as power delay profile, scattering function, Doppler spectrum density, rms delay spread, which will enable the creation of the cellular V2X channel model at 5.89 GHz for Ankara were obtained. The theoretical values expected for these parameters and the results obtained with the measurements were compared. Inferences and improvement suggestions were made in the reviews, considering the limitations in practice and infrastructure. The implementation was carried out using the signal used by Keysight Technologies Inc. for cellular V2X and the 5G Valley Test Infrastructure installed by BTK in the Market Surveillance Laboratory.

Keywords: Chanell Sounding, Channel Parameters, Channel Analysis, C-V2X, MSK, Doppler Drive Test

TEŞEKKÜR

BaŐta alıŐma konusunun belirlenmesi ve alıŐmanın hazırlanması sűrecinin her aŐamasında bilgilerini, tecrűbelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Cenk TOKER'e, Fen Bilimleri Enstitűsű Yönetimi'ne, sağladıkları kapsamlı alt yapı için Keysight Technologies Inc'e, Spark Ölçüm Teknolojileri A.Ő'ye, Ulak HaberleŐme A.Ő'ye, Bilgi Teknolojileri ve İletiŐim Kurumu'na ve tüm destekleri için HAVELSAN Teknoloji Radar Genel Müdür Yardımcısı Abdurrahman KURŐUN'a teŐekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. TEORİK VE PRATİK ALTYAPI	10
3.1. Cihazlar, Diğer Ekipmanlar ve Ölçümler	10
3.2. Test Detayları	15
3.3. Test Senaryosu	17
4. SİNYAL İNCELEMELERİ	22
4.1. Sinyali Tanımlama	25
4.2. Sinyalin Matematiksel İfadesi	30
4.3. Referans Sinyale Göre İncelemeler	33
4.4. Kanal Karakterizasyonu	38
5. ÇALIŞMANIN SONUÇLARI	45
6. SONUÇLAR	103
7. REFERANSLAR	105
8. EKLER	110
ÖZGEÇMİŞ	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 89601B yazılımı ile elde edilebilen kanal parametreleri.....	11
Şekil 3.2 Araçlar üzerindeki anten yerleşimi. Araçların içindeki ekipmanlar görülmektedir.	13
Şekil 3.3 Ölçümlere dair görseller	14
Şekil 3.4 Trafikteki testler	14
Şekil 3.5 Ölçüm düzeneği.....	15
Şekil 3.6 Araçlar arası iletişim görseli.....	17
Şekil 3.7 Ankara Çevre Yolu: Otopan senaryoları için rota.....	19
Şekil 3.8 ODTU Teknokent Girişi ile Cema AVM arası: Yoğun trafik senaryoları için rota	19
Şekil 3.9 Beytepe Köyü Yolu: Kırsal alan senaryosu ölçümleri rotası	20
Şekil 3.10 Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı: Duran ve düşük hızlı iki araç senaryolarının gerçekleştirildiği rota.....	20
Şekil 3.11: Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı: 2si Hareketli Karşıkarşı 20 km Senaryosu	21
Şekil 4.1 VSA'deki mat file kayıtlarından elde edilen veriler	22
Şekil 4.2 Periyot bilgisinin çıkarımı	25
Şekil 4.3 Referans sinyalin periyotlarının birbirine eşit olduğu göstermek için periyotların üst üste çizdirildiği grafik	26
Şekil 4.4 Örneklere karşılık gelen zamandaki genlik ve faz değişimleri	27
Şekil 4.5 3277 örnek için faz değişimleri	28
Şekil 4.6 Referans sinyalin bütün periyotları	29
Şekil 4.7 Yıldız kümesi diyagramı	30
Şekil 4.8 Referans sinyal için spektrum görüntüsü	36
Şekil 4.9 İlk ($t=0s$) ve son ($t=2s$) pencerenin spektrumdaki farkı	40
Şekil 4.10 Bir pencere için transfer fonksiyon görüntüsü	41
Şekil 4.11 Sistem fonksiyonları, korelasyon fonksiyonları arasındaki ilişki (Molisch, 2011)	44
Şekil 5.1 01-duran_ilkyakınsabit250metre_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	54
Şekil 5.2 01-duran_ilkyakınsabit250metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	54
Şekil 5.3 01-duran_ilkyakınsabit250metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	55
Şekil 5.4 01-duran_ilkyakınsabit250metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	55
Şekil 5.5 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun PDP grafiği	56
Şekil 5.6 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	56
Şekil 5.7 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	57
Şekil 5.8 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun Doppler spektral yoğunluğu grafiği	57
Şekil 5.9 03-duran_20metre_2sec senaryosunun PDP grafiği	58

Şekil 5.10 03-duran_20metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	58
Şekil 5.11 03-duran_20metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	59
Şekil 5.12 03-duran_20metre_2sec senaryosunun Doppler spectral Density grafiği.....	59
Şekil 5.13 04-duran_30metre_2sec senaryosunun PDP grafiği	60
Şekil 5.14 04-duran_30metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	60
Şekil 5.15 04-duran_20metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	61
Şekil 5.16 04-duran_30metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği..	61
Şekil 5.17 05-duran_15metre_2sec senaryosunun PDP grafiği	62
Şekil 5.18 05-duran_15metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	62
Şekil 5.19 05-duran_15metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	63
Şekil 5.20 05-duran_15metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği...	63
Şekil 5.21 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun PDP grafiği	64
Şekil 5.22 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	64
Şekil 5.23 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	65
Şekil 5.24 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	65
Şekil 5.25 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun PDP grafiği	66
Şekil 5.26 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	66
Şekil 5.27 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	67
Şekil 5.28 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	67
Şekil 5.29 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun PDP grafiği ..	68
Şekil 5.30 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	68
Şekil 5.31 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	69
Şekil 5.32 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	69
Şekil 5.33 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun PDP grafiği	70
Şekil 5.34 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	70

Şekil 5.35 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	71
Şekil 5.36 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	71
Şekil 5.37 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun PDP grafiği	72
Şekil 5.38 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	72
Şekil 5.39 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	73
Şekil 5.40 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	73
Şekil 5.41 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun PDP grafiği	74
Şekil 5.42 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	74
Şekil 5.43 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	75
Şekil 5.44 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	75
Şekil 5.45 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	76
Şekil 5.46 12-20km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	76
Şekil 5.47 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	77
Şekil 5.48 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	77
Şekil 5.49 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	78
Şekil 5.50 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	78
Şekil 5.51 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	79
Şekil 5.52 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	79
Şekil 5.53 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	80
Şekil 5.54 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	80
Şekil 5.55 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	81
Şekil 5.56 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	81
Şekil 5.57 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	82
Şekil 5.58 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	82

Şekil 5.59 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	83
Şekil 5.60 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	83
Şekil 5.61 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun PDP grafiği	84
Şekil 5.62 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	84
Şekil 5.63 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	85
Şekil 5.64 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	85
Şekil 5.65 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	86
Şekil 5.66 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	86
Şekil 5.67 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	87
Şekil 5.68 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	87
Şekil 5.69 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun PDP grafiği.....	88
Şekil 5.70 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği.....	88
Şekil 5.71 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	89
Şekil 5.72 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği	89
Şekil 5.73 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun PDP grafiği	90
Şekil 5.74 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği	90
Şekil 5.75 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfi ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği	91
Şekil 5.76 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği....	91
Şekil 5.77 01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	92
Şekil 5.78 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	93
Şekil 5.79 03-duran_20metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	93
Şekil 5.80 04-duran_30metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	94
Şekil 5.81 05-duran_15metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	94
Şekil 5.82 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	95
Şekil 5.83 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_farkliserit_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	95
Şekil 5.84 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	96
Şekil 5.85 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	96

Şekil 5.86 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_15metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	97
Şekil 5.87 11-20km_hız_yaklaşan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	98
Şekil 5.88 12-10km_hız_yaklaşan_tahizadabitti_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	98
Şekil 5.89 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	99
Şekil 5.90 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	99
Şekil 5.91 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	100
Şekil 5.92 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	100
Şekil 5.93 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	101
Şekil 5.94 18-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu	101
Şekil 5.95 19-ffgps_referans_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu.....	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Kullanılan Test Ürünleri.....	10
Çizelge 3.2 LNA ve PA'lar	12
Çizelge 3.3 Kullanılan antenler	12
Çizelge 3.4 Tam Sinüs Çevirici	13
Çizelge 3.5 Ölçüm özellikleri.....	15
Çizelge 4.1 VSA kayıtlarındaki veri içeriği	23
Çizelge 4.2 Kayıtlara göre sinyal detayları	24
Çizelge 4.3 Genlik Analizleri	27
Çizelge 4.4 Faz analizleri	28
Çizelge 4.5 İletilen sinyaldeki desenin incelenmesi.....	34
Çizelge 5.1 Senaryo Özetleri	46
Çizelge 5.2 Ölçülen ve hesaplanan mesafeler	49
Çizelge 5.3 Doppler Hesapları	50
Çizelge 5.4 Ölçümlere göre sonuçları içeren tablo	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

5G	Fifth Generation
ADAS	Advanced Drive Asistant System
BTK	Bilgi Teknolojileri Kurumu
DSRC	Dedicated Short Range Communication
eNB	eNodeB
ETSI	European Telecommunication Standarts Institute
FCC	Federal Communication Commision
FFT	Fast Fourier Transformation
GGP	Güç Gecikme Profili
gNB	gNodeB
GPS	Global Positioning System
ITU	International Telecommunication Union
LIDAR	Light Detection and Ranging
LNA	Low Noise Amplifier
LOS	Line of Sight
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
NLOS	Non Line of Sight
OBU	On Board Unit
PA	Power Amplifier
PDP	Power Delay Profile
RBW	Resolution Bandwitdh
RF	Radia Frequency
RSU	Road Side Unit
RX	Receiver (Alici)
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
TX	Transmitter (Verici)
V2B	Vehicle to Base Station Communication
V2I	Vehicle to Infrastructure Communication
V2P	Vehicle to Pedestrian Comunciation
V2V	Vehicle to Vehicle Communication
V2X	Vehicle to Everthing Communication
VSA	Vector Signal Analyzer
WSS	Wide Sense Stationary

1. GİRİŞ

Çalışmada Türkiye’de 5.9 GHz bandında akıllı ulaşım sistemlerinin desteklenmesi için yapılması gereken kanal ölçümleri, testler, ölçüm ve analizleri sunulmaktadır. Yeni gelişen akıllı ulaşım sistemleri, dünyanın birçok yerinde yapılan kanal ölçümleri çıktıları ve konu ile ilgili makalelerden faydalanılmıştır.

Kablosuz iletişim teknolojileri, daha güvenli yollar, daha verimli trafik yönlendirmesi ve trafik kazası sebebiyle ölüm ve yaralanmaları en aza indirmek için faydalı bir çalışma alanıdır. Türkiye İstatistik Kurumu’nun 2018 yılı verilerine göre, 2018’de meydana gelen trafik kazası sayısı, 2017 yılına göre yüzde 2,2 artarak 1 milyon 202 bin 716’dan 1 milyon 229 bin 364’e yükselmiştir. Dünya Sağlık Örgütü’nün (2017) verilerine göreyse ölümlü kazaların içinde sürücü kaynaklı ölümler % 90.3, yaya kaynaklı ölümler % 8.3, yolcu kaynaklı ölümler %0.4, araç kaynaklı ölümler % 0.5, yol kaynaklı ölümler % 0.4 ve diğer sebepler % 0.1 oranındadır. Kaza oranını azaltmak için teknolojik gelişmelerden ve yeni nesil iletişim biçimlerinden faydalanılmalıdır. Gelişmiş sürücü sistemleri, sistemlerine sensörleri dahil ederek, makine öğrenmesi, yol planlanması kullanarak sürüşü daha güvenli hale getirilebilir. Araç, sürücü, yaya, yol bilgilerini ve trafik koşullarını trafiği oluşturan diğer elemanlarla (araçlar, yayalar ve diğer altyapısal birimler) ile dinamik olarak paylaşabiliyor olmak, potansiyel risklerin daha iyi tahmin edilmesini sağlayacaktır.

Bu avantajları sağlamak için trafiği oluşturan her ögenin arasındaki iletişim sağlıklı bir şekilde sağlanmalıdır. Bu amaca hizmet etmek için bu iletişim ağının yalnızca bir kısmını oluşturan V2V (araçtan araca), kanal ölçümü çalışmaları ele alınmıştır. Ekipmanlar, test/ölçüm detayları, gerekli senaryolar araştırılmış ve tartışılmıştır. Ölçüm sonuçlarına dair incelemeler ve karşılaştırmalar da çalışma içerisinde yer almaktadır.

Trafikteki kör noktaların kazalara ve çarpışmaların bu tür iletişim sistemlerine dahil edilmesi için ölçümlerde senaryo çeşitliliği artırılmaya çalışılmıştır. Test ve ölçümlerde şehir içi, kırsal, otoyol, iç mekân, araçların hareketli/hareketsiz durumlarını içeren senaryolar gerçekleştirilmiştir.

Federal İletişim Komisyonu (FCC) 5,850 ila 5,925 GHz arasındaki bandı 75 MHz olarak V2X için tahsis etmiştir, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) ise 5,9

GHz'de 70 MHz bant genişliğini tahsis etmiştir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından araç iletişimi için 5.905-5.925 GHz bandı tahsis edilirken, Japonya'da 760 MHz bandı tercih edilmektedir. Mevcut durumda, bu özel hizmet için yaygın olarak 5,9 GHz bandı kullanılmaktadır. Ulaşımında güvenliği ve dolayısıyla iletişimi arttırmak için sensörler kullanılmalıdır. Sensörler, altyapı, yayalar ve araçlar arasında iletişimi sağlamak için yüksek hacimli bir veri aktarımı gerekir. Bunu düşük gecikme süresi ile sağlamak için daha yüksek frekanslarda iletişim kurmak şarttır. 5.9 GHz'deki dalga boyu yaklaşık 5 cm'dir. Bu büyüklükteki dalgaların binalara, çeşitli parçacıklara önceki, düşük frekanslı, iletişim biçimlerine göre daha çok etkileneceği düşünülmektedir.

Radyo dalga yayılımının gerçekleşeceği kanalı değerlendirmek ve belirlemek için kanal sondajlama ölçümleri kullanılır. Radyo kanalını anlamak için kanalı ölçmek, temel karakteristikleri çıkarmak ve simülasyonda kullanılacak güvenilir bir model geliştirmek gerekir. Kanal sondajı, herhangi bir kablosuz iletişim sisteminin çalışmasını taklit eden bir ölçüm tekniğidir. Kanal ölçümlerinde iletilen bir sinyal havada ilerler, kanal koşullarından etkilenir ve ardından alıcıya ulaşır. Sinyaller kanal koşullarında çevresel etkiler sebebiyle kısmen zayıflayabilir, bir binadan geçerken beton, tuğla, cam gibi farklı malzemelerde gücü azalabilir, farklı nesnelere temas halindeyken belli oranlarda bükülebilir ya da yansır. Kanaldaki sinyali değerlendirmek için kanal sondajlama ölçümleri yapılır. Böylelikle kanalın olası koşullar altında parametreleri belirlenir. Uygun bir ölçüm sistemi, alınan sinyale uygulanan sinyal işleme yöntemleri ile kablosuz kanalın özelliklerini çıkarılmasını sağlayabilir. Bunlar kablosuz iletişim sisteminin benzetiminin yapılması ve tasarlanması için kaynak oluşturur. Bu çalışmadaki ölçümler çok yönlü bir iletişim sisteminin frekansa, zamana, konuma göre durumlarını ölçmek için gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Radyo dalgalarının yayılımının gerçekleşeceği kanalı değerlendirmek ve tespit etmek için kanal sondajlama ölçümleri yapılır. Detaylı bir kanal sondajlama ölçümü, güvenilir bir kablosuz sisteminin geliştirilmesi için hayati bir öneme sahiptir. Kanal ölçümleri herhangi bir kablosuz iletişim sisteminin taklit edilmiştir. 5G için öngörülen veri hızlarını, spektrum esnekliğini ve ultra geniş bant teknolojilerini hayata geçirmek için bu testleri yapmak gereklidir. İletişim sisteminin, iletişimin gerçekleştirilmesi planlanan kanalda daha iyi kurgulanabilmesi için kanalı ölçmek ve temel karakteristiklerini belirlemek gerekir. Kanal ölçümlerinden önce bahse konu kanalın özelliklerinin iyi tayin edilmesi gerekir.

Araçların iletişimine dair iki teknoloji bulunmaktadır. Bunlar; Dedicated Short Range Communication (DSRC) ve Vehicle to Everything (V2X)'dir. DSRC 90'lı yılların sonundan beri kullanılan bir teknolojidir ancak kullanılabilirlik bakımından sınıra ulaştığından gelecekte daha çok hücreli teknolojiye bir destek olarak varlığını sürdüreceği ön görülmektedir. DSRC'de kullanılan CSMA-CA protokolü asenkronudur, cihaz bir paket göndermeden önce kanalı dinler ve yalnızca kanal açıksa bir paket gönderir. Bu, kanalın kullanılabilirliğini beklerken boşa harcanan zaman nedeniyle erişim yüküne yol açar. DSRC tipik olarak 150-300 metre arası haberleşme mesafesine sahiptir ki bu da günümüz haberleşme ihtiyaçları için oldukça yetersiz kalmaktadır. Ayrıca DSRC sistemi Road Side Unit (RSU) kurulumu gerektirmektedir ki bu da ilave maliyet ve fazladan ekipman kullanımı demektir. Bir diğer unsur da DSRC teknolojisinin ADAS, LIDAR vb. sürüş destek sistemleri için yeterli tepki süresini tanıyamamasıdır. 3GPP Release 14 ile yakalanmış bazı gelişmeler aşağıdaki gibidir;

- 160km/saat mutlak ve 280km/saat bağıl hızlarda çalışabilmesi,
- Sürücüye tepki süresi için yeterli zamanı tanınması (4 saniyeye varan)
- İki UE arası 100ms gecikme avantajı sunulması.

Bunlar zamanla daha da geliştirilecektir. RSU'lar yerine hâlihazırda bulunan eNB veya NR için gNB kullanılabilir. (Harding ve ark. 2014)'de mevcut RSU ile eNB birlikte varoluşu ve kullanım senaryolarına dair potansiyel şemalar ve bulut teknolojileriyle entegrasyonlarının yaratabileceği avantajlara dair faydalı bilgiler bulunmaktadır. (Bjornborg)'de DSRC (802.11P) kıyasla hücreli V2X teknolojisinin başlıca

avantajlarından ve neden tercih edilmesi gerektiğinden bahsedilmektedir. Amerika, Avrupa ve Çin’de V2X haberleşme için ayrılmış Non-Safety, Safety, Control ve Future uygulamalarına yönelik kanal isimleri ve frekansları da belirtilmiştir. Bant düzenlemelerinde 10 MHz’lik parçalar tercih edilmiştir. (Harding ve ark.; 2014)’de İnsanların sahip oldukları mobil cihazların da araç modemleri ile oluşturulan kanalı kullanarak internete erişebileceğinden de bahsedilmiştir. (Oestges)’de farklı akıllı ulaşım sistemlerindeki (V2V, V2I, V2P, V2G) benzerlikleri ve farklılıkları incelemek amacıyla hazırlanmıştır (Horani ve Szmatala). (Oestges)’de araştırmacı göndermeç ve almaç terminalleri durağan olmadığında ortaya çıkan durumlardan bahsetmektedir. Araçlar farklı bölgelerde hareketli bir şekilde denenmektedir. Bu araştırmadan, tez kapsamında kullanabilecek test senaryolarına dair fikirler elde edilmiştir. Ayrıca bir kanalda haberleşen araç sayısı ve birim araç başına gönderilen bilgi paketi arttıkça kanalın verdiği tepkinin ve bu durumun haberleşme kalitesine (channel congestion) olan etkisine dair fikir edinilmiştir. Çalışmada değişen çevre koşullarına göre sinyallerin gürültüye duyarlı hale geldiği anlatılmıştır. Düşük frekanslardaki haberleşme sinyalleri uzak mesafelere sönmülmmeden ulaşabilmektedir. Ancak veri hızı kısıtlı olmaktadır. Yüksek frekanslı haberleşmede kısa mesafede ancak daha yüksek hızda veri taşınabilmektedir. (Wang, Mao ve Gong, 2017)’de çalışmada 3GPP hücresel V2X standartları incelenmiştir. Ayrıca bu makalede V2X ile IEEE 802.11p karşılaştırması yapılmıştır.

Literatürde, taşıt kanalları yaygın olarak yol kaybı RMS gecikmesi ve Doppler yayılımları, sinyal zarfının dağılımı, güç gecikme profili (PDP) ve Doppler güç spektral yoğunluğu (DSD) aracılığıyla karakterize edildiği yer almaktadır. (Paier ve ark., 2007)’de, (Yang ve ark., 2018) ve (Paschalidis ve ark., 2011)’de belirtilmektedir. Doppler yayılımının kanal karakterizasyonundaki önemi ise (Paier ark., 2007)’de, (Kunisch ve Pamp, 2008)’de ve (Renaudin ve ark., 2008)’de yer almaktadır. Bu parametrelerin yanında kanalın gecikme değerleri açısından değerlendirmesi ise RMS gecikme yayılımı üzerinden yapılır. Bu değer yansıma kaynağı olabilecek objelerin az olduğu ortamlarda (Kırsal) daha düşük, yansıtıcı miktarının fazla olduğu ortamlarda (Şehir) daha yüksektir. (Kunisch ve Pamp, 2008) ve (Tan ark., 2008)’de RMS gecikme yayılımının kırsal bölgelerde RMS gecikme yayılımının nasıl düşük çıktığı anlatılmaktadır. (Renaudin ve ark., 2008), (Tan ve ark., 2008) ve (Sen ve Matolak, 2008) çalışmalarında ile şehir ortamında RMS gecikme yayılımının durumuna dair incelenmeler yapılmıştır.

Bu parametrelerin eldesi için söz konusu kanalda belirli senaryolar için ölçüm yapılması gerekmektedir. (Zeng ve ark., 2020)'da 6 GHz altında 5G için yapılan kanal çalışmalarında gerçekçi verileri elde etmenin kanal ölçümlerinden geçtiği anlatılmaktadır. Kanalı karakterize etmek için birden fazla senaryo için testlerin gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulansa da çalışmada trafikli senaryolar uygulanmamış olup bina yoğunluğu bakımından şehir dışında kalan yerler tercih edilmiştir. Çalışma iki farklı şehirde gerçekleştirilmiştir. Senaryolar yalnızca araçtan alt yapıya (V2I) durumları için kurgulanmıştır. Ölçüm için taşıyıcıyı frekans olarak 3.5 GHz ve 100 MHz bant genişliği tercih edilmiştir. Verici tarafında 40 dBm gücünde güç yükselteçler kullanılarak sönümlenme etkilerine karşı sinyal kuvvetlendirilmiştir. (Li ark., 2019)'da 5,9 GHz'de ve 1,4 GHz'de farklı bir trafik senaryosu olan gemi iletişimi için nehir üzerinde ölçümler alınmıştır. Yalnızca gemi kullanılan senaryoda 5.9 GHz taşıyıcı frekansında ölçüm alınmıştır. Buna ek olarak 1.4 GHz'de köprü senaryosu, bina senaryosu ve kırsal senaryo olmak üzere toplam dört çeşit senaryo gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada da Norwegian University of Science and Technology tarafından sağlanan yüksek çözünürlüklü zaman bölmeli çoğullayıcı kanal sondajlayıcı kullanılmıştır. Çok sayıda engelleyici nesnenin etkisinden dolayı bina senaryosunda güçlü bir gölgelemeye rastlanılmıştır. Gölgeleme sönümlerinin oto korelasyonunun sonuçları, korelasyon mesafelerinin köprü ve bina senaryolarında sırasıyla 1.4 GHz'de 317,3 m (148 λ) ile 222,9 m (104 λ), kırsal senaryosunda 90.1 m (42 λ) ve gemi senaryosunda 5.9 GHz'de 254.3 m (500 λ) olduğunu göstermektedir. Aynı frekans bandında, küçük ölçüm mesafesi nedeniyle kırsal senaryoda korelasyon mesafesi diğerlerinden daha küçüktür. Bununla birlikte, daha yüksek taşıyıcı frekans ile ölçüm alınmasından dolayı gemi senaryosunda büyük bir korelasyon mesafesi elde edilmiştir. (Gudmundson, 1991)'de dış mekân ölçümlerinde korelasyon ile elde edilen mesafe değerlerinin 900 MHz için 132 λ ve 1900 MHz için 633 λ olduğu söylenmektedir. Araç iletişiminde, sürekli hareket içere durumların olmasından ve durağan iletişim koşullarına göre daha dinamik kanal durumları olması nedeniyle ölçümler daha da zor olduğu (Fan ve ark., 2018)'da belirtilmektedir. Bu sebeple VDT adında sanal sürüş testleri ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. (Gao ve ark., 2015)'da çapraz polarize kanal ölçümleri, 2,6 GHz'de kanyon senaryosunda gerçekleştirilmiştir. Kanyon seçilmesinin sebebi farklı açılara sahip polarizasyon ve yansımaların gerçekleşmesi ihtiyacındandır. Polarizasyonun varış açılarını etkilemediği bulunmuştur. (Liang ve ark., 2019)'de 2,54, 3,5, 4,9 ve 5,4 GHz'de yol kaybını elde etmek için iki farklı şehirde kanal ölçümleri yapılmıştır. Farklı çevre koşulları içeren iki şehirde kanalın frekans bağımlılığı incelenmiştir. Kanala iletilen sinyalde herhangi bir modülasyon tercih edilmemiştir. Frekans

bağımlılığına bakmak için frekans bağımlılığı katsayısı karşılaştırmaları yapılmıştır. GPS alıcılar ile alıcı ve verisinin konumları belirlenmiştir. (Mecklenbrauker ve Christoph, 2011)'de mevcut gerçekleştirilen araç kanalı ölçümlerinden ve bu ölçümlerin yapıldığı çeşitli yerlerden bahsedilmiştir. Ayrıca bu ölçümlerde gözlenen gecikme yayılması ve Doppler yayılması gibi özelliklere değinilmiştir. (Abbas, 2014)'de anten yerleşiminin kanala dayalı etkisini araştırılmıştır. Antenin aracın farklı yerlerine monte edilmesi ile ölçümler alınmış ve performans farklılıkları değerlendiriliyor. SIMO, MISO ve MIMO yapıları değinilmiştir. Çoğu yayılım ortamlarında, en iyi almaç performansının iki araçta da hem çatı hem tampona anten koyulması ile elde edildiği anlatılmıştır. Literatür araştırmasında cadde kavşaklarında radyo kanalını karakterize etmek için birçok V2V ölçümü ve ışın izleme simülasyonu tabanlı çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmalarda, şehir ortamındaki caddelerin/kavşaklarının yerleşiminin ve düzeninin, cadde genişliği ve hizalamasının binaların yapısı ve anten yüksekliğinin, 5.9 GHz taşıyıcı frekansında büyük etkisi olduğundan bahsedilmektedir. (Karedal ve ark., 2010)'da 5.6 GHz taşıyıcıda 240 MHz bant genişliğinde çok girişli çok çıkışlı bir kanal ölçümü düzeneği kurulmuştur. Bu çalışmada farklı bina yoğunluklarındaki kavşaklarda sinyalin yayılımına dair incelemeler yapılmıştır. Temel fark, LOS olup olmadığı ve önemli saçılım unsurları binaların ve araçların konum ve yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Araçlar kavşaktan uzaktayken yayılımda kayıp büyük olmaktadır. Bu durumda saçılımı arttıran fiziksel nesnelerin iletişim için yollar sağladığı gözlemlenmiştir. Görüş hattının yokluğunda, kapsama alanının, alınan gücün büyük bir kısmının binalardan ya da diğer trafik unsurlarından saçılan yayılımlardan ortaya çıktığı elde edilmiştir. Her iki araba da kavşakta olduğunda, mevcut yayılma yollarının sayısının arttığı ve bu durumda RMS gecikme yayılmasının en yüksek değerini aldığı fark edilmiştir. (Cheng ark., 2007)'da ise dar/ geniş bantta araç hızı, birbirlerine göre uzaklık ve konum ile kanal performansını kaydetmek için senkronizasyon ve konum belirleme özelliklerine sahip tamamen mobil bir V2V kanal Karakterizasyonu ölçümü yapılmıştır. Bu sistemle gecikme yayılımı ve Doppler spektrumu gibi istatistikler yakalanarak RF kanalı incelenmesi amaçlanmıştır. Kanal ölçümü 5.9 taşıyıcı frekansta 4 kHz bant genişliğinde gerçekleştirilmiştir. Farklı senaryolar için kayıtlar Vector Signal Analyzer yazılımı ile alınmıştır. Hem senkronizasyon hem de veri işleme, işlem sonrası adımlar olarak gerçekleştirilir. İki aracın veri dosyalarını senkronize ettikten sonra, GPS hız ve konum bilgileri VSA ölçümleri ile ilişkilendirilmiştir. GPS güncelleme hızı (güncelleme başına 200 ms) VSA zamanı tarama kayıt hızından (her 1-3 saniyede 1 tarama) farklı olduğundan, her VSA süpürme girişiyle başlar ve en yakın veriye sahip GPS verilerini aranmıştır. GPS

yardımı ile zamanı eş zamanlı hale getirmek ölçümler sonrasında sinyal işlemede ek analizler gerektirmiştir. GPS kesintisi nedeniyle geçersiz GPS bilgilerine sahip ölçüm verilerinin elimine edilmesini sağlamak için de incelemeler yapılmıştır. Yol kaybı ve tutarlılık süresi gibi kanal parametreleri, VSA zaman alanı kayıtlarından hesaplanmıştır. Sinyal gücü ve Doppler yayılma çalışmaları için, zaman alanlı kayıtlar, ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) kullanılarak frekans alanına dönüştürülmüştür. (Acosta ve ark.)’da V2V iletişimi için gecikme profili araştırması amacıyla kullanıma hazır 802.11b kanalı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada her iki aracın da hareket ettiği araçtan araca ölçüm senaryoları için Doppler spektrum yoğunluğu değerleri sunulmuştur. Veriler üç farklı konum için toplanmıştır. Çalışma sonunda hedeflenen bu veriler kullanılarak kanal modeli elde etmektir.

(Demery ve ark., 1991)’da kablosuz iletişim sisteminin karakterize edilmesi ve sistemin tasarımı için önemli bir ön koşul, kanalının yayılma özelliklerinin tam olarak bilinmesidir. Hem dar bant hem de geniş bant teknikleri tartışılarak çeşitli kanal sondajlama yöntemleri gözden geçirilmesi gerektiği (Demery ve ark., 1991)’da paylaşılmaktadır. Şehir gibi karmaşık fiziksel yapılara sahip ortamlarda kablosuz iletişim sistemlerinin nasıl kurgulanacağını ortaya çıkarmak için iletişim sistemine dair modeller elde edilmelidir. Düzensiz şekillere ve birbirinden farklı malzemelere sahip binalar, çok sayıda hareketli veya durağan araçlar, yayalar, ağaçlar, tabelalar, trafik işaretçileri, sokak lambaları vb. gibi çeşitli nesnelere varlığı, kentsel radyo yayın kanalını karmaşık hale getirmektedir. (Ghoraishi ve ark., 2006) kanalının kesin olarak anlaşılması için, kentsel alanlarda farklı saçılmaların daha fazla araştırılması ve değerlendirilmesi gerektiğine değinilmiştir. Saçılmaya sebep olan nesnenin boyutuna, şekline, hizalanmasına ve mesafesine bağlı olarak, yansıma, saçılma veya kırınım gibi herhangi bir saçılma mekanizmasına sahip olabilir. Bunları modellemek için (Ghoraishi ve ark., 2006) ‘da çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu nesnelere ışın izleme algoritmaları ile entegrasyonu değerlendirilmiştir. Kanal modellerini stokastik ve deterministik modeller olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Stokastik model çalışmalarından (Chelli ve Patzol, 2011) ve (Zhu ve ark., 2017) incelenmiştir. Bu çalışmaların ortak noktası geniş anlamda durağan (WSS) varsayımı üzerinden geometri tabanlı model üzerinden analiz yapılmasıdır. (Cheng ve ark., 2009)’de ise V2V için 5.9’da Ricean sönümlenme kanal modelleri önerilmiştir. Bu çalışmada MIMO yapısında incelemeler yapılmıştır. (Li ve ark., 2020)’deki ölçümler WSS varsayımının yalnızca kısa bir mesafe aralığında ve zaman aralığında doğrulandığını göstermektedir. Kanalda uygulanan gerçek senaryolar üzerinden

elde edilen parametreler sonucu çıkan deterministik kanal modeli örneği olarak ışın izleri modeli verilebilir. (Guan ve ark., 2019)'da yazarlar trafik işaretçileri, sokak lambaları gibi göz ardı edilebilecek küçük saçılım kaynaklarına sahip; kırsal ve açık alanlarda V2V için uygulamalarına dair modeller incelenmektedir. (Abbas ve ark., 2015)'de senaryolar simülasyonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında 5.9 GHz'de elde edilen kanal sonuçları ile V2V için yapılan ölçümler karşılaştırılmaktadır. V2V bir kanalın Karakterizasyonu için yapılan kanal ölçümleri ile simülasyon çalışmalarının karşılaştırıldığı diğer çalışmalar; (Wiesbeck ve Knorz, 2007), (Molisch ark., 2009), (Paier ark., 2010), (Nuckelt ve ark., 2011), (Mangel ve ark., 2011), (Sommer ve ark., 2011), (Hosseini Tabatabaei ve ark., 2011) ve (Gaugel ve ark., 2012)'dir. (Nuckelt ve ark., 2013)'de yazarlar SISO bir sistem için kanal analizlerini anlatmaktadır. Bu çalışmada sadece güç gecikme profili (PDP) ve yol kaybı metrikleri açısından bir karşılaştırma yapılmaktadır. (Abbas ve ark.)'de belirleyici bir V2V kanal modeli ve V2V kanal ölçümü verileri karşılaştırılmaktadır. 4 kesişen yol senaryosu için çeşitli kanal metrikleri, kanal kazancı, gecikme, Doppler yayılması, öz değer hesapları hem ölçüm hem modelden elde edilen ışın izleme simülasyonlarından türetilen anten korelasyonu elde edilmiştir. Kanal parametreleri LOS ve NLOS için karşılaştırılmıştır. NLOS durumunda ölçüm ile model arasındaki parametre incelemelerinde farklılıklar elde edilmiştir. (Abbas ve ark.) makalesinde yoldaki kaybın TX ve RX arasındaki uzaklıkla olan ilişkisi incelenmiştir. (Abbas ve ark., 2015)'da ölçüme dayalı araştırma yapmanın zorlukları ve masrafları sebebiyle belirli karmaşıklık düzeylerinde ile istenen herhangi bir senaryonun araştırılmasına izin veren deterministik model tabanlı ışın izleme simülasyonları ile de araştırmalar yapılabileceği tartışılmaktadır. Ancak, simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, uygulanan matematiksel modellerin yanı sıra ortamı tanımlamak için kullanılan verilerin doğruluğuna da büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle simülasyonların doğrulanması gerekmektedir. (Sommer ve ark.,2011)'ın çalışmasında IEEE 802.11p/DSRC Standartının sinyal yayılımı üzerine çeşitli ölçümler yapılmıştır. Farklı binaların oluşturduğunu engellerin iletişim üzerindeki etkileri ölçülmüştür. Daha sonra bulgulara dayanarak hesaplama açısından kolay bir ampirik model geliştirilmiştir. Simülasyon modelini gerçek dünya ölçümleriyle doğrulamak için karşılaştırmalar yapılmıştır. (Maurer ve ark.)'da hareketli araçlar arasındaki iletim kanalına dair yeni bir model sunulmuştur. Karayolu trafiği, yol şeridine bitişik çevre ve araçlar arasındaki dalga yayılımı modellenmiştir. Dalga yayılımını modellemek için, kanalın geniş bant ve dar bant analizlerine izin veren 5.2 GHz'de bir yaklaşım kullanılmıştır. (Abbas ve ark., 2013)'daki çalışmalarda (Paier ve ark., 2010)'daki DRIVEWAY adlı bir ölçüm

kampanyasında kaydedilen bağımsız ve gerçekçi kanal ölçüm verilerini kullanarak NLOS yol kaybı modeli doğrulanmıştır. (Cheng ve ark., 2009)'da tanıtılan bir referans kanal modelinden yola çıkılarak deterministik ve stokastik simülasyon modelleri önerilmiştir. Alıcı veya vericiye göre 100 m'den daha kısa mesafelerde bulunan nesnelerin potansiyel saçılma kaynağı oluşturduğunu (Ghoraishi ve ark., 2006) çalışmasında paylaşılmıştır. (Morioka ve ark.)'da

Bu tez çalışmasında deterministik kanal modeline giden yolda, ölçümlerden elde edilen kanal parametreleri elde edilecektir. Elde edilmesi planlanan parametreler; güç gecikme profili, rms gecikme yayılımı, ortalama gecikme, Doppler spektrum yoğunluğu, ortalama Doppler kayması, RMS Doppler yayılımıdır. Bu kanal parametrelerinin elde edilmesi için 5.89 GHz taşıyıcı frekansında 20 MHz bant genişliğinde Ankara'da farklı bina, trafik yoğunluklarında, hızlarda, araçların birbirlerine göre konumları ve yönleri göz önünde bulundurularak V2V ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler için sürüş testleri tasarlanmış ve kanal sondajlama ölçüm yöntemi uygulanmıştır.

3. TEORİK VE PRATİK ALTYAPI

3.1. Cihazlar, Diğer Ekipmanlar ve Ölçümler

BTK tarafından koordine edilen 5G Vadisi Açık Test Sahası'nda kullanılan ekipmanlar Çizelge 3.1'de listelenmiştir. Bu ekipmanlar kullanılarak V2X, 5.89 GHz taşıyıcı frekansında kanal parametreleri için ölçümler gerçekleştirilmiştir.

M8190A + E8267D 44 GHz taşıyıcı frekansına kadar 1 GHz modülasyon bant genişliğini destekleyecek şekilde V2X sinyal kaynağı olarak kullanılmıştır. V2X haberleşmesi yüksek bir bant genişliği gerektirmediğinden sadece E8267D de verici olarak kullanılabilir. (Kmetovicz, 2018)' göre N9040B ise 44 GHz taşıyıcı frekansına kadar 1 GHz analiz bant genişliğini destekleyecek yeteneğe sahiptir. V2X alıcısı olarak kullanılmıştır. İki sistem ayrı ayrı araçlara yerleştirilmiştir. Araçlar dururken veya hareket ederken taşıyıcı üzerinden üretilen sondajlama işareti alıcı ile yakalanıp kanal parametrelerini hesaplamak üzere kaydedilmiştir. Vericide ve alıcıda 10 dB kazançlı monopole antenler kullanılmıştır. Temel çalışma frekansı 5.9 GHz olarak planlanmış olsa da çalışmalar 5.89 GHz için gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 Kullanılan Test Ürünleri

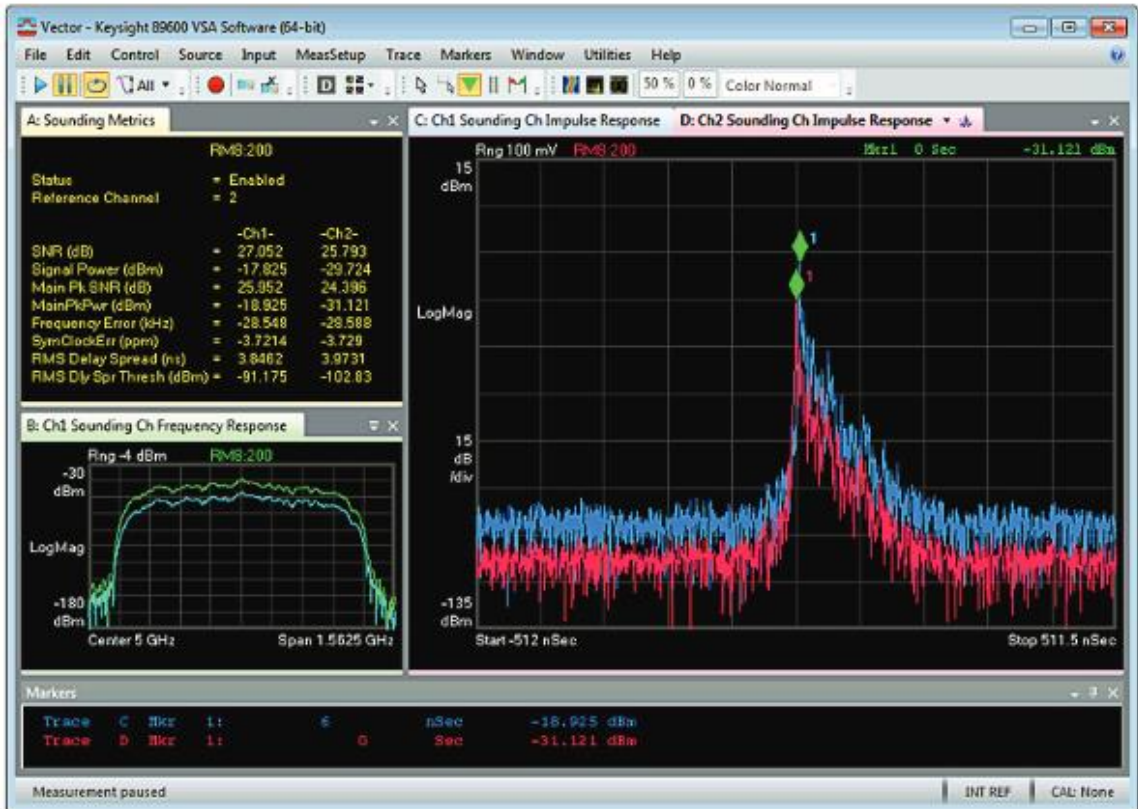
Marka	Model	Ürün Tipi	Açıklama
Keysight	M8190A	AWG	12 GSa/s Arbitrary Waveform Generator
Keysight	E8267D	VSG	PSG Vector Signal Generator, 100 kHz to 44 GHz
Keysight	N9040B	SA	UXA Signal Analyzer, 2 Hz to 44 GHz

Sondaj işareti üretmek için M9099T Waveform Creator yazılımı kullanılmıştır. Yazılım özelliklerine (*M9099T waveform creator software*, 2021)'den ulaşılabilmektedir. Analiz için de N9040B'yi kontrol eden 89601B VSA yazılımı kullanılmıştır. VSA yazılımı yardımıyla aşağıdaki kanal parametreleri ölçülebilmektedir.

- Kanal dürtü cevabı
- Kanal güç gecikme profili
- Kanal frekans cevabı
- Sinyal gürültü oranı (SNR) – Tüm sinyalin tüm gürültüye oranı

- Sinyal gücü – Alınan sondaj sinyalinin gücünün tahmini
- Temel tepe SNR – EN büyük tepe gücünün gürültü gücüne oranı
- Temel Tepe Güç - Ana yoldaki güç ($t = 0$ s'de ortalılır)
- Frekans Hatası – Verici ve alıcı arasındaki frekans hatası tahmini (ana yoldan hesaplanır)
- Sembol saat hatası – Verici ve alıcıdaki örnek saatler arasındaki hata tahmini (ana yoldan hesaplanır)
- RMS gecikme yayılımı – Göreceli güçleri göz önüne alındığında yansımaların yayılmasının ölçüsü
- RMS gecikme yayılımı eşiği – Hangi örneklerin yol içerdiğini belirleyin (RMS gecikme yayılımı hesaplamasında kullanılır)

Bu ölçüm sonuçlarının VSA ekranındaki görsel Şekil 3.1'i incelenebilir. (Keysight, 2021)'a göre VSA temelde FFT algoritmaları ile çalışan hızlı veri ve sinyal analiz yazılımıdır.



Şekil 3.1 89601B yazılımı ile elde edilebilen kanal parametreleri

Çalışmada 10 dB monopol antenler kullanılmıştır. 5.9 GHz’de alıcı ve verici antenin kazancının 10 dB olması durumunda 1 km mesafede havadaki kaybın yaklaşık 87 dB olacağı Keysight mühendisleri tarafından önceki test tecrübelerine dayandırılarak paylaşılmıştır ve bu değere diğer olası bozucular (bina, tüneller, diğer kapalı cisimler...vs) dahil edilmiştir. E8267D 5.89 GHz’de +9 dBm gücünde işaret üretebileceği için N5183B 6 GHz sinyal üreteci verici olarak kullanması tercih edilmiştir. 1 km mesafede 83 dB kayıp ile düşük RBW değerlerinde N9040B kullanılarak kanal ölçümleri yapılabileceği öngörülmüştür.

Daha yüksek çıkış gücü için verici tarafından güç kuvvetlendirici, alıcı tarafında da düşük gürültülü kuvvetlendirici kullanmanın faydalı olacağı düşünülmüştür. Tahsis edilen alt yapıda bulunan bu gibi ekipmanlar Çizelge 3.2’de belirtilmiştir. Bu RF kuvvetlendiriciler kaybı arttıracakları endişesi ile düzeneğe dahil edilmemişlerdir.

Çizelge 3.2 LNA ve PA’lar

Marka	Model	Ürün Tipi	Açıklama
Mini-Circuits	ZX60-V63+	LNA or PA	0.05-6 GHz Amplifier,Max. +13 dBm in
Mini-Circuits	ZX60-8008E-S+	LNA or PA	20-8000 MHz Amplifier, Max. +15 dBm in

Test düzeneğinde kullanılan antenler Çizelge 3.3’de sunulmuştur.

Çizelge 3.3 Kullanılan antenler

Marka	Model	Ürün Tipi	Açıklama	Adet
Mobile Mark	ECOM9-5500-3C-BLK-120	Antenna + 3m RF195 Low Loss Cable	ECOM9-5500 Omni-Directional Magnetic Mount Antenna,9dBi with 3Metre RF195(2 dB loss for 2m) Low Loss Cable and SMA (M) Straight Connector	2

Test cihazları arabalar içerisinde kullanılacağı için cihazların güç değerlerine uygun 12V-220V çevirici gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan ürün aşağıda verilmiştir. Sinyal üreteç ve analizör kataloglarına göre maksimum durumda güç değeri 1500W olmaktadır. (Keysight, 2020)’de Alıcı olarak UXA 800W'a ve verici olarak, MXG’nin çalışması için 650W'a ihtiyaç duymaktadır. En yüksek ve ortalama çalışma güçleri göz önünde

bulundurularak aşağıdaki çevirici seçilmiştir. Seçilen evirici iki ayrı araca da monte edileceğinden iki adet çevirici kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Tam Sinüs evirici

Marka	Model	rn Tipi	Açıklama	Adet
TOMMATECH	P1500-1500W	Invertor	Tam Sinüs İnverter P1500Watt 12V-48V-220V SOLAR İNVERTÖR	2

Dört adet 150 aH jel pıl kullanılmıştır. Bu düzenek ile testler esnasında en fazla 1.5 saat ölüm alınabilmiştir. Jel piller Ulak Haberleşme desteğiyle şarj edilmiştir.

Araç içi ve dışı yerleşimleri şekil 3.2'deki görselde görebilirsiniz.



şekil 3.2 Araçlar zerindeki anten yerleşimi. Araçların içindeki ekipmanlar görülmektedir.

Manyetik montajlı antenler kullanılmıştır. lmlere dair görseller şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3 Ölçümlere dair görseller

Trafik senaryolarına dair görsel Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4 Trafikteki testler

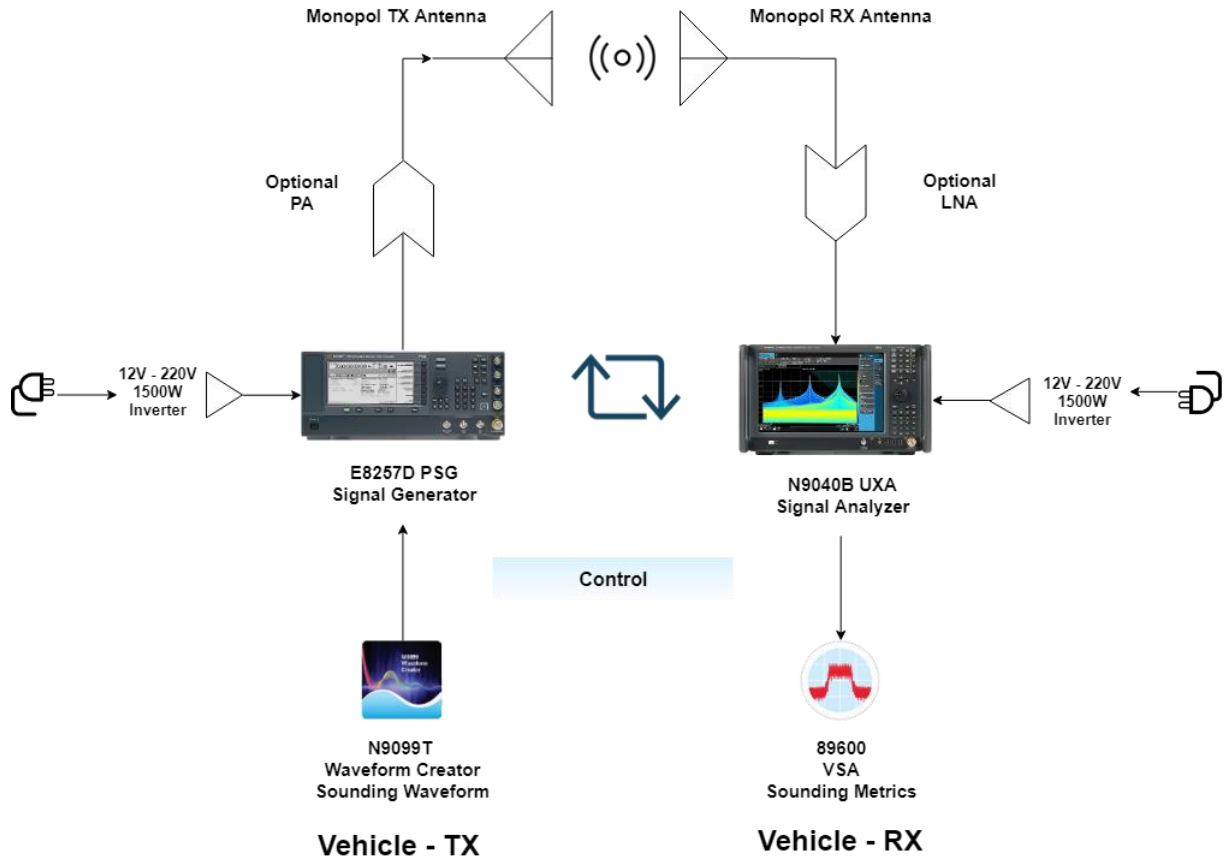
Ölçüm detayları Çizelge 3.1Çizelge 3.5'teki gibidir.

Çizelge 3.5 Ölçüm özellikleri

Frequency	5.89 GHz	
Bandwidth	20 MHz	
Power	20 dBm	
RX	N9040B 50 GHz	Keysight
TX	N5282B	Keysight
RX Antenna	ECOM9-5500-3C-BLK-120 9dBi	Mobile Mark
TX Antenna	ECOM9-5500-3C-BLK-120 9dBi	Mobile Mark
RF195 Low Loss Cable x2	2 dB loss for 2m	Mobile Mark
Inverter x2	Tam Sinüs Inverter P1500Watt 12V-48V-220V	Tommatech
Jel Battery x4	12V 150 AH heavy duty VRLA AGM GEL	JELPOWER Battery
Car TX x1	Hatchback or Sedan	Nissan Micra or Ford Mondeo
Car RX x1	Sedan	Ford Focus
Rural Location	Car park of Hacettepe University Law Faculty	
Low Traffic Sub Urban Location	3.1 km of Beytepe Köyü Yolu	
Traffic Urban	Kızılay	
Indoor	Bauhaus Kapalı Otopark (full car park)	
Highway	Ankara	
Tunnel	İnönü Bulvarı Milli Kütüphane Alt Geçidi	

3.2. Test Detayları

Yukarıda belirtilen test cihazları ve diğer ekipmanlar Şekil 3.5'deki akış diyagramında belirtildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Ölçüm düzeneği

(5GAA publishes test results in support to C-V2X FCC petition for waiver 2019)'de de belirtildiği üzere Amerika'da (FCC) ve Avrupa'da (ETSI) tarafından gerçekleştirilen testler incelendiğinde, PC5(V2X) için genelde 30 MHz +20 MHz +20 MHz olacak şekilde 70 MHz bant kullanımının tercih edildiği görülmüştür. 30 MHz güvenli bant, 20 MHz güvenli olmayan bant ve 20 MHz diğer çalışmalar için ayrılmış bantlardır. Bu projede 20 MHz analiz bant genişliğinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

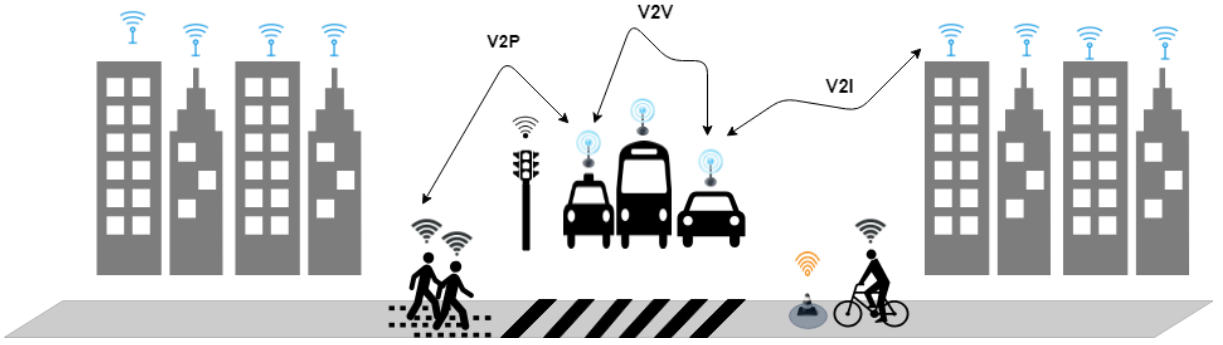
Verici çıkışındaki ortalama güç değerinin testlerde 26 dBm olmasına karar verilmiştir. Gereksinime göre çıkış gücü 24-36 dBm aralığında artırılıp azaltılmıştır.

Testlerde araç hızlarının literatürdeki diğer test senaryolarında da genellikle 60 – 70 km/s olduğu gözlemlenmiştir. Yalnızca otoyol senaryolarında hız 120 km/s gibi mertebelere çıkmaktadır. Otoyoldaki senaryolarda iki araç arasındaki mesafe ortalama 50 m 'dir.

3.3. Test Senaryosu

Mevcut alt yapı ile V2X çalışmaları öncelik V2V (Vehicle to Vehicle) çalışmalarına verilmiştir. Testler yapılmadan önce aşağıda listelenen bilgiler belirlenmiştir.

1. Yayılım tipi (V2V)
2. Testin gerçekleştirileceği çevre (Kırsal, şehir, çevre yolu, köy vb.)
3. Terminallerin ve etkileşimli nesnelerin hızları
4. Araç Trafik Yoğunluğu
5. Hareketli terminallerin yönleri (Aynı şerit, farklı şerit, yaklaşan, uzaklaşan vb.)



Şekil 3.6 Araçlar arası iletişim görseli

Tez’de söz konusu ölçüler sadece V2V için gerçekleştirilmiştir. Bu yayılım tipinde uygulanan senaryolar aşağıdaki gibidir.

- Kapalı ortam, iki araç da hareketsiz
- Kapalı ortam, yalnızca bir araç hareketli
- Kapalı ortam, iki araç da hareketli
- Açık ortam, iki araç da hareketsiz
- Açık ortam, yalnızca bir araç hareketli
- Açık ortam, iki araç da hareketli

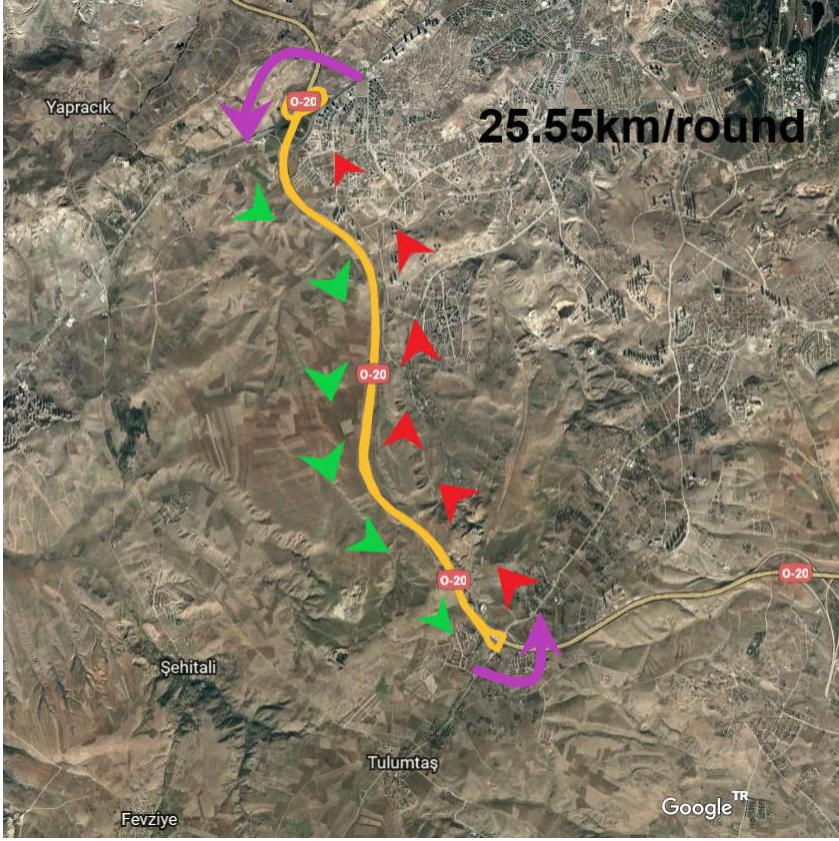
Literatüre sunulan V2X ölçümlerinin çoğu sabit alıcılar ve vericiler ile ilgilidir. Araçların iletişimine uygun kanal çalışması yapmak için mobil alıcılar ve vericiler kullanılmıştır. Bu, çoklu yol ve saçılma etkilerini artıran ve zamana bağımlı değişen kanala yol açan bir

durumdur. Kaçınılmaz olarak, Doppler kayması, terminallerin hızlı hareket etmeleri nedeniyle sinyal üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilmektedir. Bir kanal modeli ölçümünde aşağıda listelenen hareketli araç ortamına özel kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

- Terminal tipi
- Çevresel farklılıklar
- Yer değiştirme, hız, ivmelenme
- Araçların birbirlerine ve objelere göre yönleri
- Trafik yoğunluğu
- Yaya yoğunluğu

Aşağıdaki bölümde belirtilen ölçümler Ankara'da kentsel, banliyö, kırsal, otoyol ve kapalı alanlarda yapılmıştır. 18 Mayıs 2019 tarihinde erişilen Google Haritalar sayesinde araç deneylerinde kullanılan yollar Şekil 3.7- Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

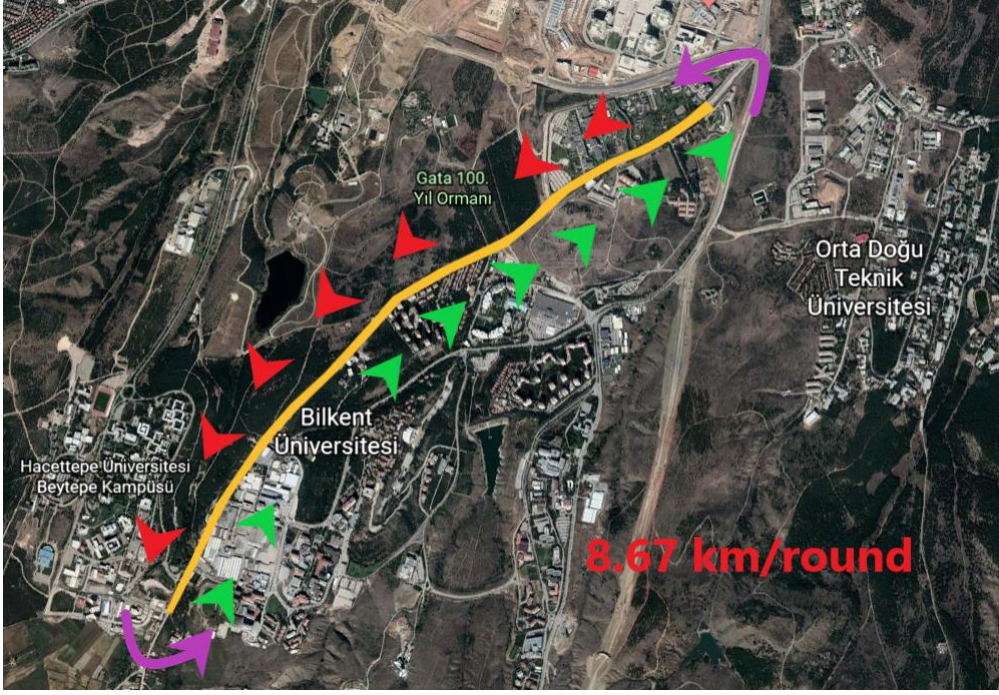
Açık ve yağmurlu havalarda test yapma imkanı yakalanmıştır. Otoyol senaryosunda maksimum görece hız 240 km/s ve 120 km/s olacak şekilde uygulanmıştır. Araçlar arasında maksimum 100 metre mesafe bulunmaktadır. Biri TX diğeri RX olmak üzere iki ayrı araç olduğu için, verici ve alıcıyı senkron çalıştırmak için senkronizasyon portları bağlanamamıştır. Bu durum Doppler etkisini doğrudan hesaplanmasını engellemiştir. Ölçümler sırasında alınan sinyalde beklenmeyen bozulmalar yakalanmıştır. Bunların cihaz ve malzeme etkileri olduğu değerlendirilmiştir.



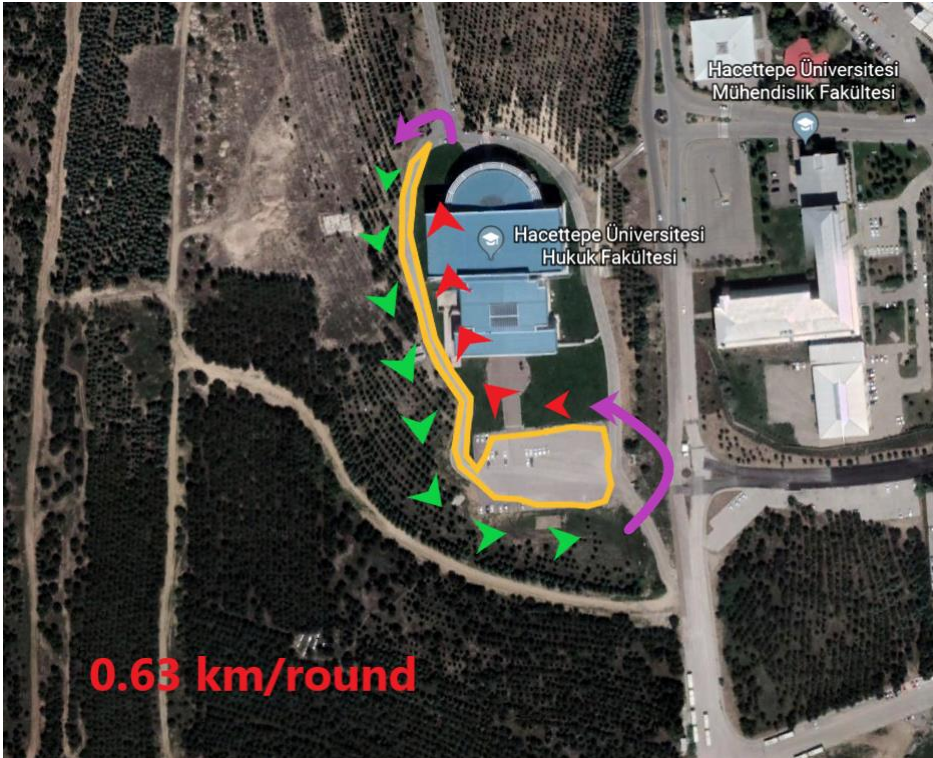
Şekil 3.7 Ankara Çevre Yolu: Otoban senaryoları için rota



Şekil 3.8 ODTU Teknokent Girişi ile Cema AVM arası: Yoğun trafik senaryoları için rota



Şekil 3.9 Beytepe Köyü Yolu: Kırsal alan senaryosu ölçümleri rotası



Şekil 3.10 Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı: Duran ve düşük hızlı iki araç senaryolarının gerçekleştirildiği rota



Şekil 3.11: Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı: 2si Hareketli Karşıkarşı 20 km Senaryosu

100 farklı senaryo gerçekleştirilmiştir. Bunlar kırsal, banliyö, kentsel, kapalı ve otoyolda yapılmıştır. Hem LOS hem de NLOS koşulları ölçümlere dahil edilmiştir.

4. SİNYAL İNCELEMELERİ

Ölçümler sonucunda elde edilen sinyaller Keysight PathWave VSA (Vector Signal Analyzer) yazılımı ile incelenmiş ve kaydedilmiştir. Verilerin kayıt formatı MATLAB ile kullanıma uygun olan “m” dosyasıdır. Veriler MATLAB ortamında Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

Name ^	Value
FreqValidMax	5.9250e+09
FreqValidMin	5.8750e+09
InputCenter	5.9000e+09
InputRange	0.1259
InputReflmped	50
InputZoom	1
IQ	0
TimeString	'Thu Mar 28 10:34:48.918 2019'
XDelta	1.5625e-08
XDomain	2
XStart	0
XUnit	'Sec'
Y	193650079x1 complex single
YUnit	'V'

Şekil 4.1 VSA’deki mat file kayıtlarından elde edilen veriler

Şekil 4.1’de gösterilen verinin detayları Çizelge 4.1’de verilmektedir. Bu tablodaki verileri kullanarak elde edilen diğer veriler ise Çizelge 4.2’de sunulmaktadır. Örnekleme oranı $1/XDelta$ olarak hesaplanmaktadır. Örnekleme oranı VSA yazılımı tarafından band’ın yaklaşık 1,2 katı olacak şekilde belirlenmektedir. İletilen sinyalin sembol oranı sinyal üreticinin sayısal analog çeviricisindeki orana karşılık gelmektedir.

Çizelge 4.1 VSA kayıtlarındaki veri içeriği

Dalga Formu Veri İçeriği		
FreqValidMax	5.9250e+09	Dalga formunun görüntülenen en düşük frekans değeri
FreqValidMin	5.8750e+09	Dalga formunun görüntülenen en yüksek frekans değeri
InputCenter	5.9000e+09	Dalga formunun merkez frekansı
InputRange	0.1259	Tepe Voltajı değeri cinsinden donanımın ayarlanan aralığını gösterir. -8 dBm'e karşılık gelmektedir.
InputZoom	1	InputZoom'un 1 olması, zaman verilerinin karmaşık olduğunu ve sinyale yaklaşma özelliğinin kullanıldığını gösterir
IQ	0	IQ değerinin sıfır olması sinyal formatının I+jQ şeklinde olmadığını gösterir.
TimeString	'Thu Mar 28 10:34:48.918 2019'	Kayıt tarihi
XDelta	1.5625e-08	Veri Çeşidi = double Zaman verisi için, XDelta iki örnek arasındaki zaman farkını temsil eder. Örnekleme oranı 1/XDelta olarak hesaplanır.
XDomain	2	XDomain, verinin hangi düzlemde olduğunu gösterir. 2 gözlemin zamanda yapıldığını gösteriyor.
XStart	0	X düzleminin başlangıç değeri
XUnit	'Sec'	X düzleminin birimi
Y	193650079x1 complex single	Zaman düzleminde kayıt edilen sinyalin örnekleri
YUnit	'V'	String cinsinden sağlanan bu içerik Y düzleminin birimini ifade eder.

Çizelge 4.2 Kayıtlara göre sinyal detayları

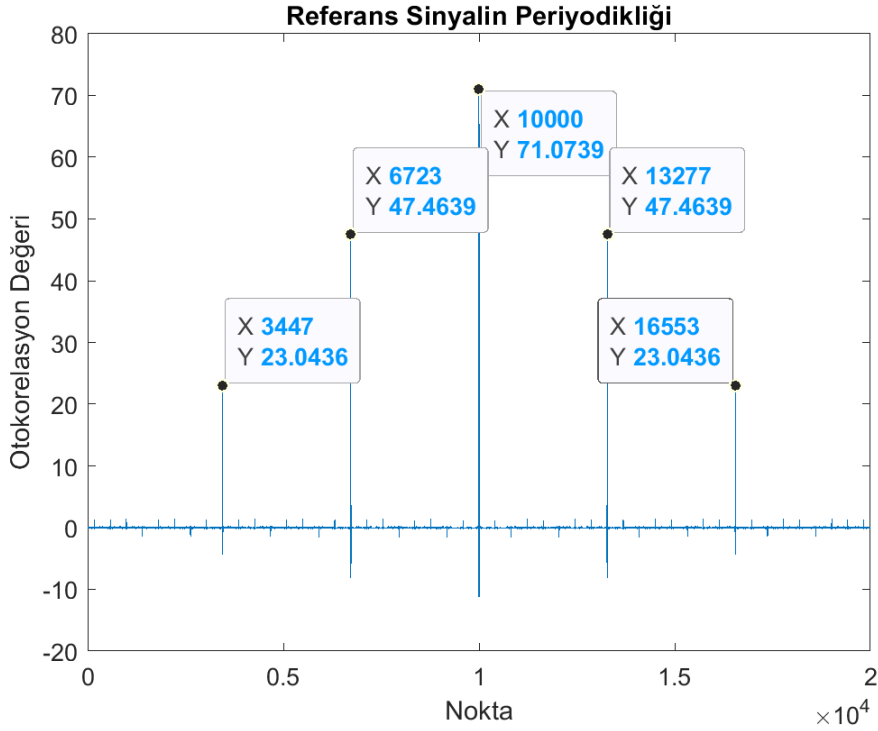
Veri	Değişken	Değer
Taşıyıcı Frekans	fc	5.89 GHz
İletilen Sinyalin Bant Genişliği	BWtx	20 MHz
Alicının Bant Genişliği		50 MHz
C-V2X Standardının Bant Genişliği	BWv2x	10 MHz
İki Örnek Arası Süre	XDelta	15.625 ns
Örnekleme Oranı	1/XDelta	64MSa/s
İletilen Sinyalin Sembol Süresi	$L = 1/ BWtx$	50 ns
C-V2X Standardında Bir Sembolün Süresi	$Lv2x = 1/ BWv2x$	100 ns
İletilen Sinyal için Örneklerin Çözünürlüğü	$L * 3e8$	15 m
C-V2X Standardı için Örneklerin Çözünürlüğü	$Lv2x * 3e8$	30 m
İletilen sinyalin Modülasyon İndeksi		1/2 +- 1/8
Sembol Başına Örnek Sayısı	$(1/XDelta)/(BWtx)$	3.2
Bir Periyottaki Örnek Sayısı		3277
Bir Periyottaki Sembol Sayısı		1024.0625
Bir Periyot Süresi	Per_samp * L	163 us

Kanal modeli oluşturmak için bir referans sinyale ihtiyaç bulunmaktadır. Ölçümlerde kullanılan dalga biçimi Keysight'ın cihazlarında kullandığı özel bir sinyaldir. Keysight sinyalin kullanılmasına izin verirken, sinyal hakkında hiç bir bilgiyi paylaşmayacağını belirtmiştir. Sinyal hakkında elde olan tek bilgi yapılan ölçüm sonuçlarıdır. Bu sebeple ilk önce sinyalin incelenip, tanımlaması gerekmiştir.

Ölçümlerden ilki verici ve alıcı arasında 30 cm uzunluğunda SMA(f)- SMA(f) Pasternack kablo bağlıken yapılmıştır. Bu ölçüm ile kablo kaybının ihmal edilerek referans olarak kullanılacak sinyali saf bir şekilde elde etmek amaçlanmıştır. Ölçüm sonucu referans sinyal için elde edilen verilerin işlenmesi ile aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır

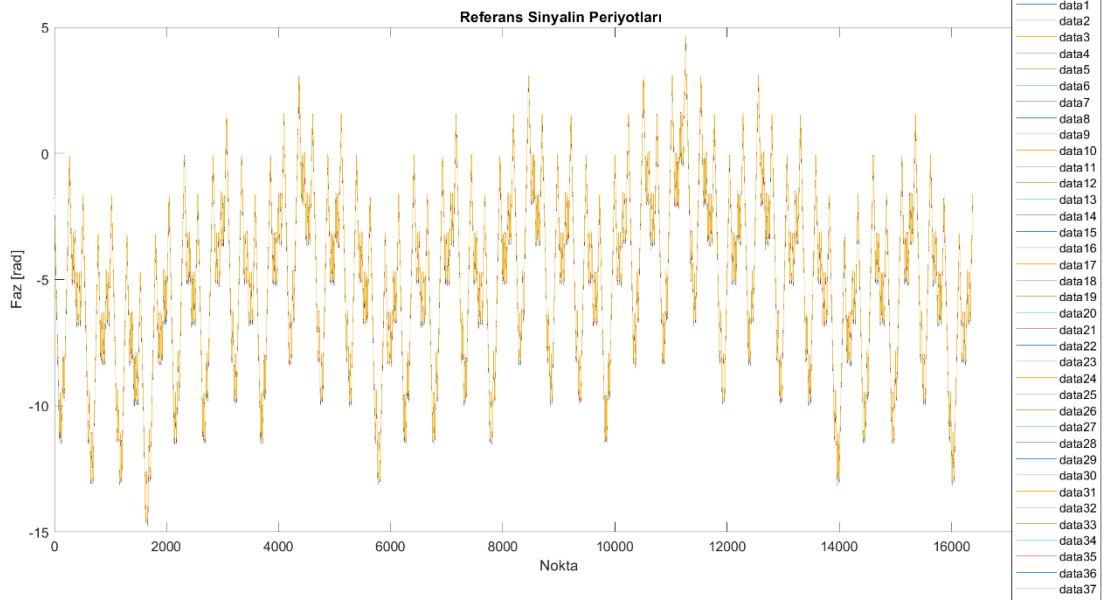
4.1. Sinyali Tanımlama

Periyodikliği analiz etmek için sinyalin oto korelasyonu hesaplanmıştır. Oto korelasyon, bir sinyalin kendisinin ile kendisinin gecikmeli bir kopyası ile karşılaştırılmasıdır. Referans sinyal için alınan ölçüm kaydının 193 milyon örnek olması, veri işleme esnasında bazı kısıtlamalara sebep olmaktadır. Bu nedenle verinin tamamını kendisiyle korelasyonunu hesaplamak yerine, veri parçalara ayrılarak incelenmiştir. İlk 10000 örnek için Şekil 4.2'deki sonuç elde edilmektedir. Buna göre benzerlik derecesi yüksek durumlarda zirve noktaları tespit edilmiştir. Bu tepelere bakıldığında 3277 örnekte bir sinyalin kendini tekrar etmektedir.



Şekil 4.2 Periyot bilgisinin çıkarımı

Yapılan işlemi doğrulamak için referans sinyalde her bir periyodun üst üste oturup oturmadığını kontrol etmek için MATLAB'da inceleme yapılmış ve Şekil 4.2'deki sonuç elde edilmiştir. Periyotların her birinin üst üste oturduğu doğrulanmıştır.



Şekil 4.3 Referans sinyalin periyotlarının birbirine eşit olduğu göstermek için periyotların üst üste çizdirildiği grafik

Bu sonuç sinyalin periyodik olduğunu göstermektedir. Sembol oranı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Sembol oranı} = \frac{\text{Örnekleme Oranı}}{\text{İletim Bantgenişliği}} = \frac{64e6}{20e6} = 3,2$$

3277'de bir tekrar eden ve sembol oranı 3.2 olan bir sinyalin, bir periyodunda yer alan sembol sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

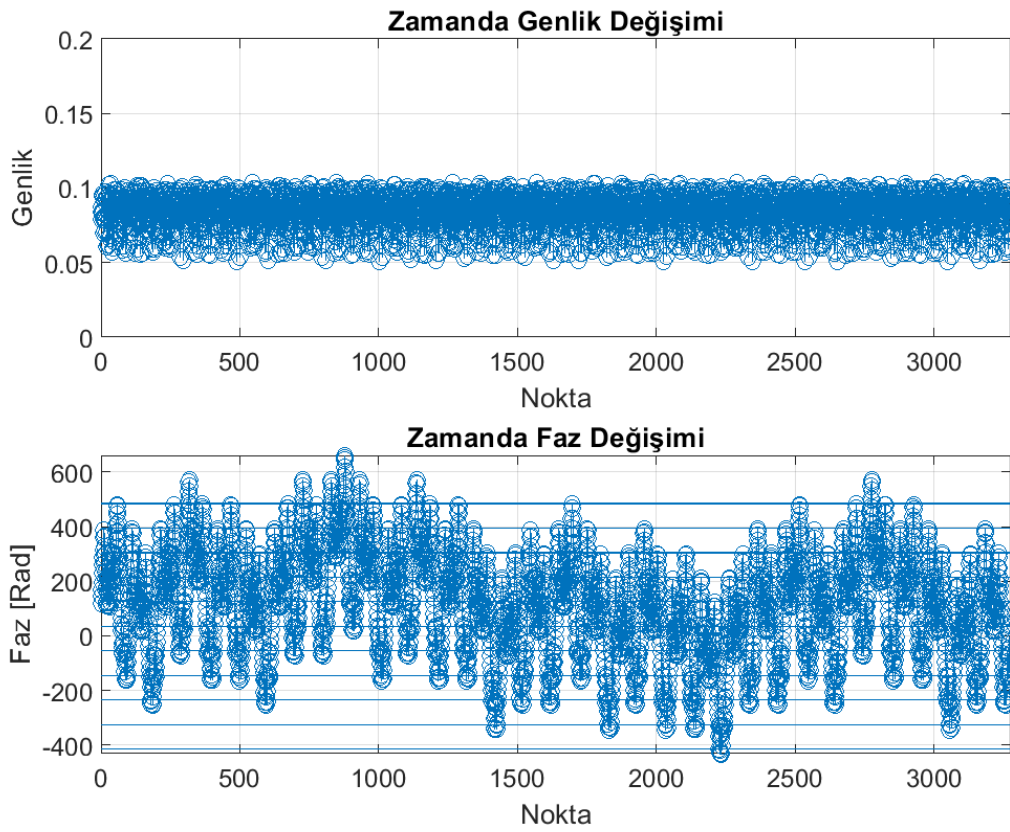
$$\text{Sembol sayısı} = \frac{3277}{3,2} = 1024,0625 \text{ sembol}$$

Sinyalin genlik ve faz gibi diğer temel özellikleri incelenirken, sinyal boyutlarının büyük olması sebebi ile sinyal periyotları parçalanarak incelenmiştir. Önce genlik incelemeleri yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır. Genlikteki sapmaların küçük olması sebebiyle, genlik değişimi yok kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3 Genlik Analizleri

Genlik Analizleri	Değer (V)
Ortalama Genlik	0.0835
En Yüksek Genlik	0.1043
En Düşük Genlik	0.0502
Genlik Varyansı	1.27e-4
Genliğin Standart Sapması	0.0113

Genlikteki sapmaların görseli Şekil 4.4'dedir.



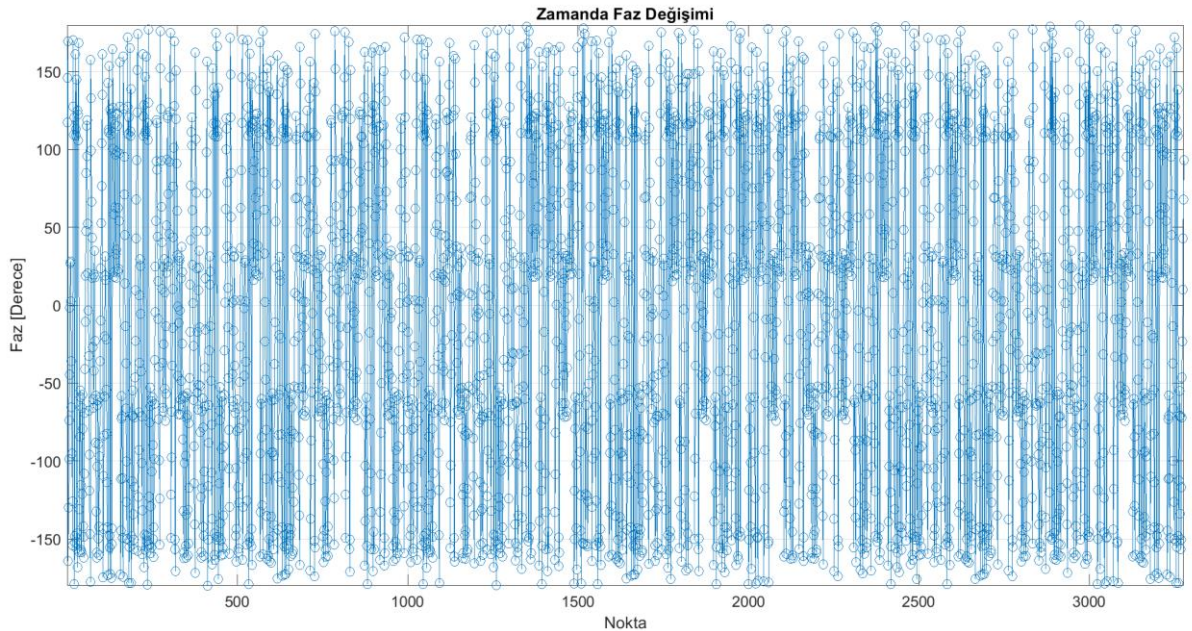
Şekil 4.4 Örneklere karşılık gelen zamandaki genlik ve faz değişimleri

Benzer analizler faz bilgisi için yapıldığında Çizelge 4.4'teki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre bilginin, fazda taşındığı sonucuna varılmıştır. Unwrapped faz görseli de Şekil 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Faz analizleri

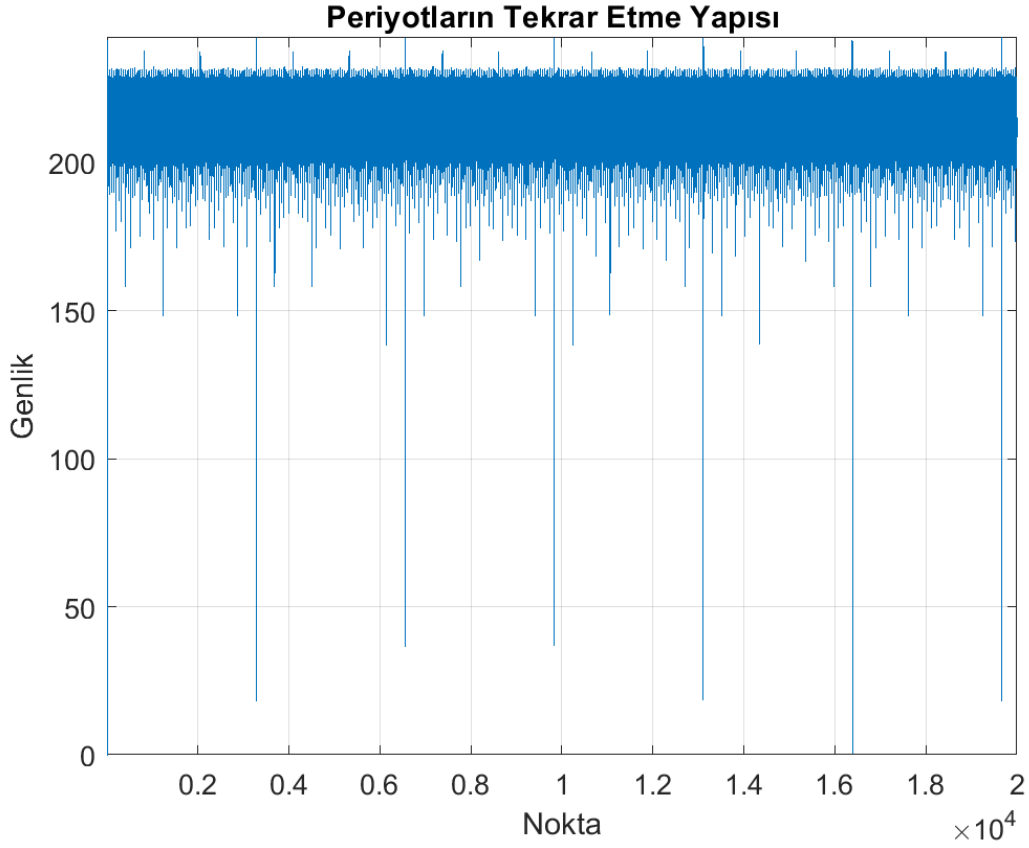
Faz Analizleri	Değer
Ortalama Faz	-8.0303
En Yüksek Faz	180
En Düşük Faz	-179.9895
Faz Varyansı	1.102e4
Fazın Standart Sapması	104.9828

Sembol başına düşen örnek miktarı aşağıdaki gibi hesaplandığında 3,2 örnek gelmektedir. 3,2 örnek adımlarla sayılamayacağı için her bir örnek arasına 4 fazladan örnek ekleyerek iki örnek arasına 5 aralık eklenmiştir. Eklenen yeni örnekler lineer interpolasyon ile birleştirildiğinde ise analiz edilebilir bir sinyal elde edilmiştir. Bu durumda $5 + 5 + 5 + 1 = 16$ örnek aslında 3,2'ye denk gelecek şekilde ayarlanmıştır. Bu durumda sembol başına düşen bitleri atarken 16'da bir atanması gerekmektedir. Resim 6 ve Resim 5'te faz seviyeleri de açıkça gösterilmektedir. Enterpolasyon sonucu elde edilen 16 örnekten oluşan sembolleri ifade etmek için her 16 örneğe bir bit atanmıştır.



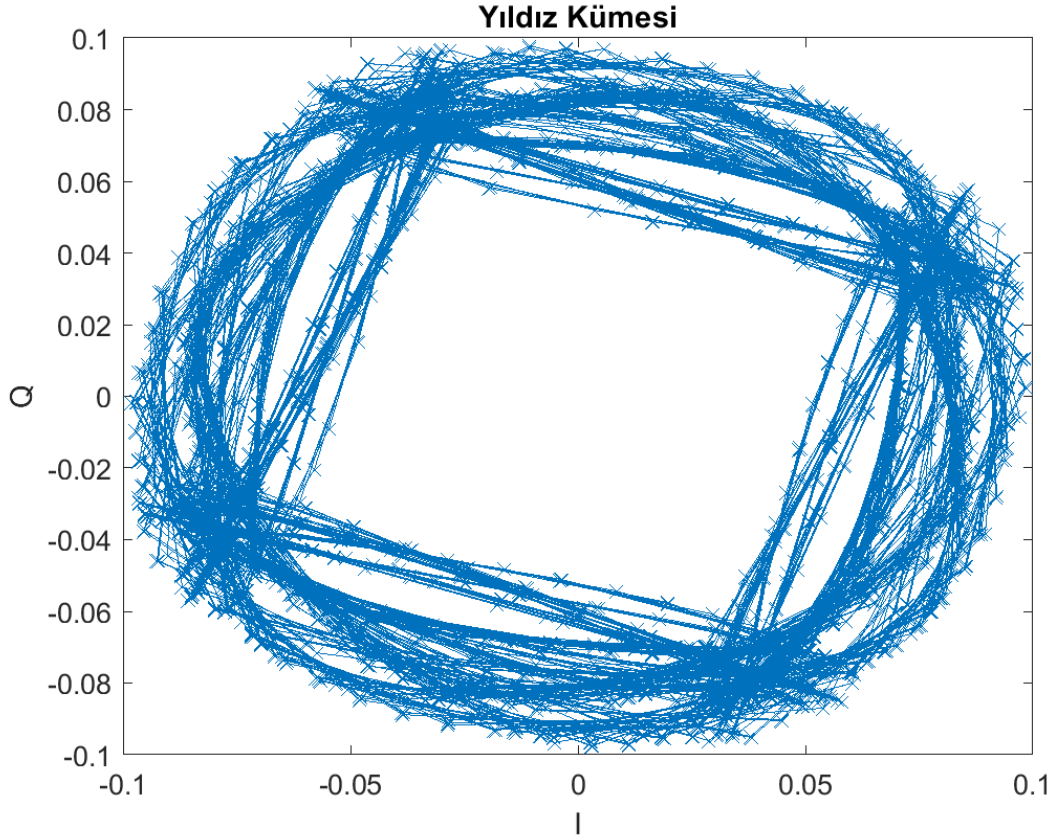
Şekil 4.5 3277 örnek için faz değişimleri

Sinyal yakından incelendiğinde periyodun tam sıfırda başlamadığı ve 16384'te tekrar başa döndüğü görülmektedir. Bu iki periyot arasında da 4 adet daha küçük periyotlar bulunmaktadır. Bu periyotların seviyeleri diğer periyotlarda da aynı kalmaktadır. Küçük periyotlar ise 3277 ve katlarında tekrar etmektedir.



Şekil 4.6 Referans sinyalin bütün periyotları

Genlik değişimleri sabit kabul edilebilecek seviyededir. Sembol başına düşen örnek sayısı 3.2 olup sayma biçimindeki düzenleme ihtiyacı sebebi ile enterpolasyon yapıldığı için sembol başına düşen örnek sayısı 16'ya çıkmıştır. Bu sayede ölçümlerin, sembol başına yeterli örnek ile alındığı çıkarımı yapılmıştır. Yapılan analizlerin ilki zamandaki genlik ve faz değişimlerini incelemek içindir. Aynı sinyal üzerinde I/Q incelemeler için yıldız kümesi Şekil 4.7'deki gibi oluşmaktadır.



Şekil 4.7 Yıldız kümesi diyagramı

Bu grafiğe bakıldığında göz açıklığının gayet iyi olduğu ve yalnızca birbirine en yakın yıldız kümesi noktaları arasında geçişler olduğu gözlemlenmiştir. Yıldız kümesi noktalarında örnek sayısı gözetmeksizin yaklaşık 20-25 derecelik bir kayma mevcuttur. Bu kaymanın kablo uzunluğundan kaynaklı olması mümkündür. Kablodaki ekleme kaybı 0.9-1.5 dB/m olup kablo ucundaki konektör kayıpları bu değere dahil edilmiştir. Bu paragrafta bahsedilen analizlerin görselleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Yapılan analizlerle bilginin yalnızca fazda taşındığına karar verilmiştir. Modülasyon indeksinin yaklaşık $\frac{1}{2}$ olması modülasyon tipinin MSK olduğunu göstermektedir.

4.2. Sinyalin Matematiksel İfadesi

Sinyalin MSK modülasyona sahip olduğu tespit edilen sinyalin matematiksel ifadesi için aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. MSK binary CPFSK ve dolayısıyla CPM’in özel bir türüdür. MSK’de sinyal $h = 1/2$ modülasyon indeksi ile tanımlanır. T darbe genişliğine

sahip ve $g(t)$ ile ifade edilen dikdörtgensel darbelerden oluşur. Sinyalin fazı şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}\phi(t; \bar{I}) &= h \pi \sum_{k=-\infty}^{n-1} I_k + \pi I_n q(t - nT) \\ &= \theta_n + \frac{1}{2} \pi \left(\frac{t - nT}{T} \right)\end{aligned}$$

Burada $nT \leq t \leq (n+1)T$. $\theta_n = \frac{1}{2} \pi \sum_{k=1}^{n-1} I_k$ sembollerin hafızasını $(n-1)T$ 'ye kadar temsil etmektedir. h ile $\frac{1}{2}$ modülasyon indeksi ifade edilmektedir. \bar{I} vektörü içinde tek bir sembol I_k ile gösterilir. $nT \leq t \leq (n+1)T$ aralığındaki modüleli taşıyıcı sinyal aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}s(t) &= \sqrt{\frac{2\varepsilon}{T}} \cos(2\pi f_c t + \phi(t; \bar{I})) \\ &= A \cos\left(2\pi f_c t + \theta_n + \frac{1}{2} \pi \left(\frac{t - nT}{T} \right)\right) \\ &= A \cos\left(2\pi f_c t + \theta_n + \frac{\pi I_n t}{2T} - \frac{\pi I_n nT}{2T}\right) \\ &= A \cos\left(2\pi t \left(f_c + \frac{I_n}{4T} \right) - \frac{\pi n I_n}{2} + \theta_n\right)\end{aligned}$$

MSK'de genlikte bilgi taşınmaz. MSK'de bilgi $\phi(t; \bar{I})$ içerisinde taşınır. Nitekim genlikteki değişim yapılan ölçümlerin sonuçlarına göre ortalama 0.084 değişmektedir. Frekanslar aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}f_1 &= f_c - \frac{1}{4T} \\ f_2 &= f_c + \frac{1}{4T}\end{aligned}$$

Aşağıdaki hesaplamalarla devam edilmiştir.

$$\begin{aligned}s(t) &= A \cos\left(2\pi \left(5.9e9 + \frac{I_n}{4(51.2e-6)}\right) t - \frac{3277}{2} \pi I_n + \theta_n\right) \\ s(t) &= 0.0835 \cos\left(\left(\frac{(2416,64e3)\pi + \pi I_n}{204,8e-6}\right) t - 1638,5\pi I_n + \theta_n\right)\end{aligned}$$

Burada θ_n şöyle tanımlanmıştır.

$$\theta_n = \frac{1}{2}\pi \sum_{k=1}^n I_k = \frac{1}{2}\pi \sum_{k=1}^{3277} I_k$$

I_k sembol vektöründeki bir sembolü temsil etmektedir. Frekansları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$f_1 = 5,9e9 - \frac{1}{4(51,2e - 6)} = \frac{1208,32 - 1}{204,8e - 6} = 5.985.117,1875$$
$$f_2 = 5,9e9 + \frac{1}{4(51,2e - 6)} = \frac{1208,32 + 1}{204,8e - 6} = 5.904.882,8125$$

Sinyalin ifadesini aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$S_i(t) = A \cos(2\pi f_i t + \theta_n + \frac{1}{2}n\pi(-1)^{i-1}), i = 1,2$$
$$S_i(t) = 0,0825 \cos(2\pi f_i t + \theta_n + \frac{1}{2}3277\pi(-1)^{i-1})$$
$$S_i(t) = 0,0825 \cos(2\pi f_i t + \theta_n + 1638,5\pi(-1)^{i-1})$$
$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{1}{2T} = \frac{1}{2(52,2e - 6)} = 9765,625$$

4.3. Referans Sinyale Göre İncelemeler

Ölçümlerde verici ve alıcı herhangi bir ortak referansa göre çalıştırılmamıştır. Ölçümler üreteç ve analizör için ayrı ayrı EXT Ref In girişinden GPS anten bağlantısı ile yapıp, iki test cihazını senkron çalıştırmanın mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Senaryoların ve referans sinyalin başlangıç ve bitişleri aynı olmadığı için sinyalleri incelemeye başlamadan önce incelenecek sinyallerin eşleştirilmesi gerekmektedir. İnterpolasyon yapılmış referans ve senaryo sinyalleri periyotlarına ayrılmıştır. Bir matrisin her satırı bir periyot olacak şekilde ayarlanmıştır. İnterpolasyonlu durumda bir periyot 16384 örnekten oluşmaktadır. Her sembol 16 örnekten oluştuğu için periyotlar bitlerle ifade edildiğinde 1024 bitten oluşan periyotlar elde edilmiştir.

Daha önce de belirtildiği üzere sinyal kaydı m dosya formatında 2 saniye kaydedilmiştir. Sinyal kayıtları 193 milyon örnek içermektedir. Sinyalin tamamı ancak bölerek incelenebilmiştir. Bütün senaryoları 30000 x 1024 boyutunda periyot sayısı x periyodun kendisi olarak bir matris içerisinde toplanmıştır. Bu periyotlar ardışık olarak matrise yerleştirilmiştir. Her bir periyodu sinyalin tamamı içinde arasında Çizelge 4.5'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 İletilen sinyaldeki desenin incelenmesi

Periyot	Özellik	Eşit Periyot Sayısı	Sonraki Periyotlarda Tekrar Sayısı
1	Benzersiz	0	
2-16	Eşit	15	15*4
17	Benzersiz	0	
18-32	Eşit	15	15*4
33	Benzersiz	0	
34-48	Eşit	15	15*4
49	Benzersiz	0	
50-55	Eşit	6	6*4
56-64	Eşit	9	9*4
65	Benzersiz	0	
66-80	Eşit	15	15*4
81	Benzersiz	0	
82-96	Eşit	15	15*4
97	Benzersiz	0	
98-103	Eşit	6	6*4
104-112	Eşit	9	9*4
113	Benzersiz	0	
114-119	Eşit	6	6*4
120-128	Eşit	9	9*4
129	Benzersiz	0	
130-136	Eşit	7	7*4
137-144	Eşit	8	8*4
145	Benzersiz	0	
146-152	Eşit	7	7*4
153-160	Eşit	8	8*4
161	Benzersiz	0	
162-168	Eşit	7	7*4
169-176	Eşit	8	8*4
177	Benzersiz	0	
178-192	Eşit	15	15*4
193	Benzersiz	0	
194-199	Eşit	6	6*4
200-209	Eşit	9	9*4
210-215	Eşit	6	6*4
216-224	Eşit	9	9*4
225	Benzersiz	0	
226-232	Eşit	7	7*4
233-240	Eşit	8	8*4
241	Benzersiz	0	
226-232	Eşit	7	7*4
233-240	Eşit	8	8*4
241	Benzersiz	0	
242-248	Eşit	7	7*4
239-256	Eşit	8	8*4

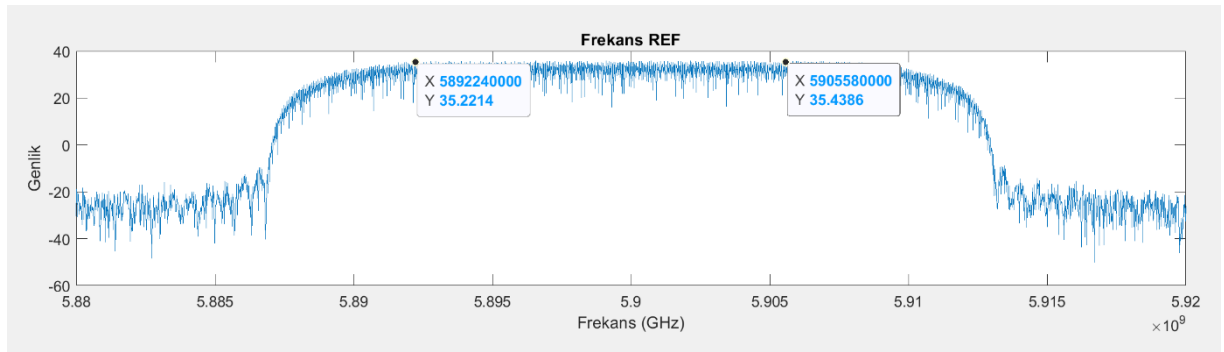
Çizelge 4.5. (Devamı)

Periyot	Özellik	Eşit Periyot Sayısı	Sonraki Periyotlarda Tekrar Sayısı
257	Benzersiz	0	
258-272	Eşit	15	15*4
273	Benzersiz	0	
274-288	Eşit	15	15*4
289	Benzersiz	0	
290-296	Eşit	7	7*4
297-304	Eşit	8	8*4
305	Benzersiz	0	
306-320	Eşit	15	15*4
321	Benzersiz	0	
322-336	Eşit	15	15*4
337	Benzersiz	0	
338-352	Eşit	15	15*4
353	Benzersiz	0	
354-368	Eşit	15	15*4
369	Benzersiz	0	
370-384	Eşit	15	15*4
385	Benzersiz	0	
386-391	Eşit	6	6*4
392-400	Eşit	9	9*4
401	Benzersiz	0	
402-407	Eşit	6	6*4
408-416	Eşit	9	9*4

Bu tabloya göre birinci periyotun benzersiz olduğu gözlenmiştir. 30000 periyotluk kısmı incelendiğinde sinyalin hiçbir periyodunda 1. bu periyot tekrar etmemektedir. Birinci periyot ile ikinci periyot arasında 507 bit değişmektedir. 2. periyotla 16. periyot arasındaki 15 adet periyot eşittir ve bu 15lik grubun aynısı 4 kere 30000 içinde tekrar etmektedir. Bu periyotlar arkasından gelen 17. periyot ise 1. periyot gibi 30000 adet periyot içinde hiç tekrar etmemektedir. Bunlar tabloda benzersiz olarak isimlendirilmiştir. 18. ve 32. periyot arasında kalan 15 adet periyot eşit olup bu 30000 adet periyot içinde 4 kez bu şekilde tekrar etmektedir. Diğer bir periyot grubu çeşidi ise ilk olarak 50. ve 64. periyotlar arası rastlanan 6'lı ve 9'lu grup olmak üzere toplamı yine 15'e eşit olan periyotlardır. Bu gibi gruplarda 50. ve 55. gruplar arasındaki 6 adet periyot eşit olup bu tüm periyotlar içinde 4 kere tekrar etmektedir. 56. ve 64. periyotlar arasındaki 9 adet periyot eşit olup tüm periyotlar içinde 4 kere tekrar etmektedir. Benzer bir periyot grubu 130. ve 144. periyotları arasında ortaya çıkmaktadır. 30. ve 152. periyotları arasındaki 7 adet periyot eşit olup hepsi birbirine eşittir.

Bu 7 adet periyot tüm periyotlar içinde 4 kez tekrar etmektedir. 153. ve 160. periyotlar arasında kalan 8 adet periyot birbirine eşittir. Bu 8 adet periyot tüm periyotlar içinde 4 kere tekrar etmektedir. Tüm tablo benzer şekilde yorumlanmıştır.

Referans sinyalin frekans düzlemindeki görüntüsü aşağıdaki gibidir. Genlik 35 dBm olup 3 dB kesim noktaları 5.89 GHz ve 5.91 GHz'e denk gelmektedir. Bu da sinyalin üretildiği bant genişliği olan 20 MHz'e elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Referans sinyal için spektrum görüntüsü

Her senaryoyu referans sinyale göre değerlendirmek için sinyallerin referans sinyal ile senkron olması gerekmektedir. Senkronizasyon yöntemi senaryoların referans sinyal ile korelasyonunun farkı kadar döngüsel kayma uygulamaktır. Senaryolar ile referans örnek bazında incelenerek karşılaştırma yapılacak periyotlar belirlenmiş, iki sinyal senkron hale getirilmiştir.

Referansın 2. periyodu ile 14625. periyotları arası senaryo 2'nin 1767. periyodu ile 16377. periyodu arasında yer almaktadır. Referansın 14627. periyodundan sonraki periyotlar Senaryo 2'nin 7. periyodundan itibaren devam etmektedir. Referans sinyalin 14627. periyodu ile 1638. periyodu arasındaki periyotlar ise senaryo 2'nin 7. ve 1751. periyotları arasında yer almaktadır. Bunda sonraki sıralamalar referans sinyalin 2. periyodu ile 14625. periyodu arasında gözlenen durumla aynı devam etmektedir. Buna göre; referans sinyalin 16387. periyodu ile 30000. periyodu arası Senaryo 2'nin 1767. periyodu ile 15373. periyodu arasında gözlenmektedir. Referans sinyalin 18. periyodu senaryo ikinin 1783. satırında bulunmaktadır. Tekrar biçimi referans sinyalin kendi periyotları arasında gözlenen tekrar biçimi ile benzerdir. Bu durumdan çıkan sonuçla Senaryo 2'yi 6. periyottan başlatmak uygun

olacaktır. 6 x 1024'den 6144. örnekten alındığında da referans sinyal ile Senaryo 2 senkron hale gelmiştir.

Bu incelemeler sinyalin içindeki desenin ve bilginin ortaya çıkarılabilmesi hedeflenerek yapılmıştır.

4.4. Kanal Karakterizasyonu

Kanal karakterizasyonu yapılırken sistemin özellikleri ile kanalın durumları karşılaştırılmıştır. Sistemi değerlendirmek için aşağıdaki parametreler elde edilmiştir.

1. RMS Gecikme Yayılımı
2. Ortalama Gecikme
3. Bantgenişliği Uyumluluğu
4. Zaman Uyumluluğu
5. Ortalama Doppler Kayması
6. RMS Doppler Yayılımı

Bu parametrelerin çıkarılması için sırasıyla sistem fonksiyonları, korelasyon fonksiyonları, özel durumlar için korelasyon fonksiyonları olarak adlandırılmaktadır.

Kanal Karakterizasyonu için bütün kayıtlar aynı uzunluktaki kayıtlar haline getirilmiştir. Böylelikle kayıtlar 2 saniye (*total_record_sec*) süren, 128 milyon noktadan oluşan hale getirilmiştir. Olayları 2 saniyeye sığdırmaya çalışmak bu çalışmanın zorlu yanlarından biridir. 128 milyon nokta içeren veriyi tek seferde incelemek için yeterli alt yapı bulunamadığından, veri 51 μ s 'lik (*time_window_sec*) pencerelere, 2432 noktaya (*time_window_point*), ayrılarak incelenmiştir. Kayıt içerisindeki toplam pencere sayısı ise 52631 (*nb_of_window_in_record*) adettir.

İki kaydın da eşit sayıda noktalar üzerinden incelenmesi için matrisler eş boyutlara getirilmiştir. *Time_window_point* değeriyle zaman pencereleri içerisindeki nokta sayısı hesaplanmıştır. Bu hesap için kayıt içerisindeki nokta sayısı ile zaman penceresinin uzunluğu ile çarpılıp toplam kayıt süresine bölünür. Bu hesaplamada ortaya çıkabilecek ondalıklı işlem sonuçlarının önüne geçebilmek için "round" kullanılmıştır. Bir kayıttaki pencere sayısı hesaplamak için kayıttaki toplam nokta sayısı, bir penceredeki nokta sayısına oranlanmıştır. Bu işlem *nb_of_window_in_record* değişkeninde gösterilmiştir. Bu işlemde "floor" tercih edilmesinin sebebi, bir kaydı aynı sayıda noktaya bölme ihtiyacındandır.

Boyutları kayıt içerisindeki toplam pencere sayısı (M), penceredeki nokta sayısı (N) olan aşağıda ifade edilen matris oluşturulmuştur. Bu işlemlerden sonra lineer zamanla değişen referans sinyal ve senaryo sinyali elde edilmiştir.

$$LTV_refSig_matrix = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \text{ zaman penceresi } 1 \dots & \vdots \\ & \ddots & \\ \vdots & \dots \text{ zaman penceresi } M \dots & \vdots \end{bmatrix}_{M \times N}$$

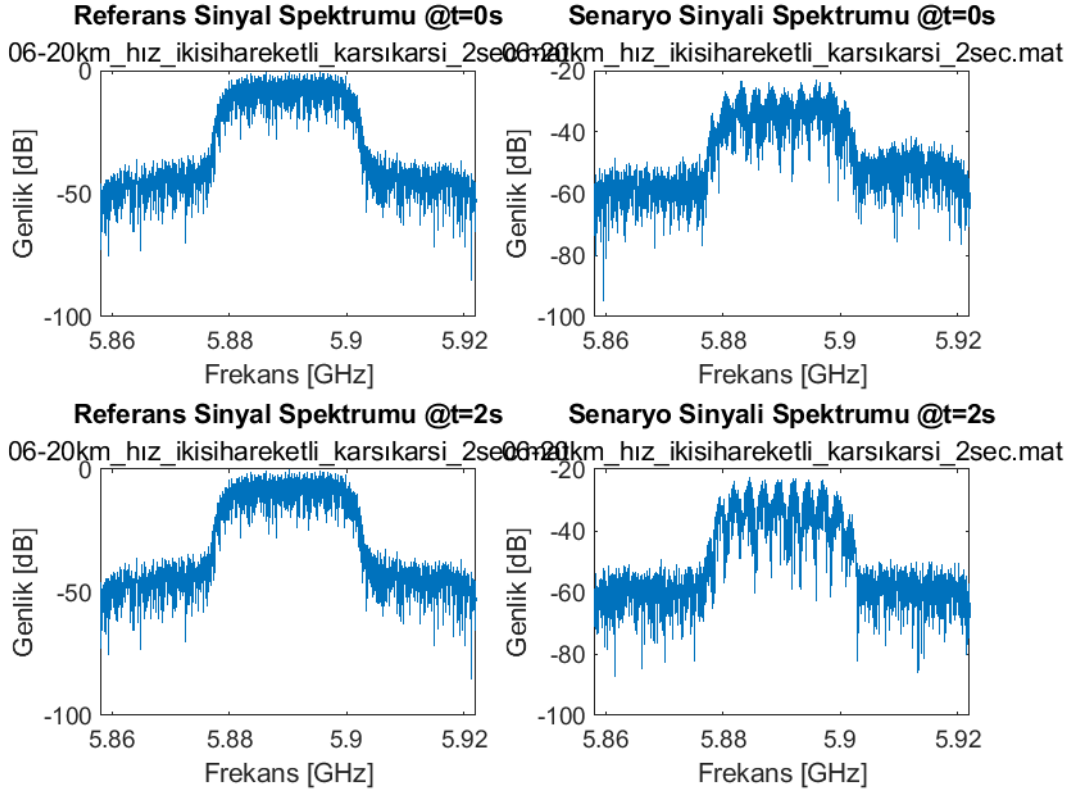
$$LTV_senSig_matrix = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \text{ zaman penceresi } 1 \dots & \vdots \\ & \ddots & \\ \vdots & \dots \text{ zaman penceresi } M \dots & \vdots \end{bmatrix}_{M \times N}$$

Sıradaki adımda her satırın FFT's alınarak her bir sinyal frekans düzlemine geçirilmiştir. FFT her bir satır için yani her bir pencere için alınmıştır. Elde edilen bu matrisler sinyallerin kendi transfer fonksiyonlarıdır.

$$trans_func_refSig = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \text{ FFT'si alınmış zaman penceresi } 1 \dots & \vdots \\ & \ddots & \\ \vdots & \dots \text{ FFT'si alınmış zaman penceresi } M \dots & \vdots \end{bmatrix}_{M \times N}$$

$$trans_func_senSig = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \text{ FFT'si alınmış zaman penceresi } 1 \dots & \vdots \\ & \ddots & \\ \vdots & \dots \text{ FFT'si alınmış zaman penceresi } M \dots & \vdots \end{bmatrix}_{M \times N}$$

Kanalın ve gürültünün zamanla değişmesi nedeniyle sinyallerin her pencerede farklı olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple farklı zamanlar için spektrum farklılık göstermektedir. Bu sebeple farklı t anları için sinyal incelenmiştir. Örnek görsel Şekil 4.9'da verilmiştir. İlk (t=0s) ve son pencere (t=2s) burada görüntülenmiştir.

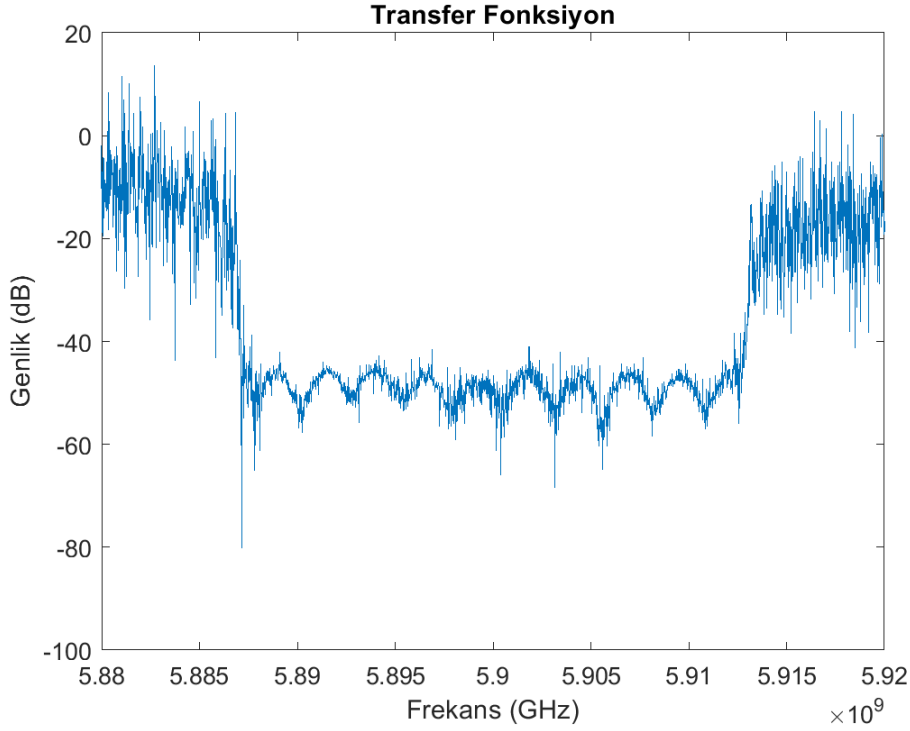


Şekil 4.9 İlk (t=0s) ve son (t=2s) pencerenin spektrumdaki farkı

Referans ve senaryo için ayrı ayrı elde edilen spektrumlar birbirine bölünerek zamanla değişen kanal transfer fonksiyonu, başka bir deyişle zamanla değişen kanal frekans cevabı elde edilmiştir. Matris büyüklüğü $M \times N$ olarak devam ettirilmiştir. Bütün pencereleri üst üste gözlemlemek için kullanılan bilgisayar yeterli gelmiştir. Bir pencere için görüntü Şekil 4.10'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Kanal Transfer Fonksiyonu} &= \frac{\text{Senaryo Sinyali'nin Transfer Fonksiyonu}}{\text{Referans Sinyal'in Transfer Fonksiyonu}} \\ &= H(t, f) \end{aligned}$$

$$H(t, f) = \begin{bmatrix} \vdots & \dots \text{frekans penceresi 1} \dots & \vdots \\ & \ddots & \\ \vdots & \dots \text{frekans penceresi M} \dots & \vdots \end{bmatrix}$$



Şekil 4.10 Bir pencere için transfer fonksiyon görüntüsü

Eğer zamana göre değişen kanal transfer fonksiyonunun ters FFT'si alındığında (ifft) zamana göre değişen kanal dürtü cevabını elde edilmiştir. İfadeler aşağıda verilmiştir. Matris $M \times N$ boyutundadır.

$$\text{Kanal Dürtü Cevabı} = h(t, \tau) = \begin{bmatrix} \vdots & \dots H(t = 1, f)'in \tau'ya göre ifft'si \dots & \vdots \\ & \ddots & \\ \vdots & \dots H(t = M, f)'in \tau'ya göre ifft'si \dots & \vdots \end{bmatrix}$$

Zamana bağlı kanal dürtü cevabının zamana göre FFT'sini alındığında Doppler'e göre değişen dürtü cevabını elde edilmiştir. Bu, söz konusu matriste satırlara göre FFT almak anlamına gelmektedir. Zaman pencereleri arasındaki değişimin frekansını hesaplanmıştır. Böylelikle sistem fonksiyonları çıkarılmıştır.

$$\text{Doppler Dürtü Cevabı} = iFFT_{\tau}(h(t, \tau))$$

$$FFT(h(t, \tau)) = S(v, \tau) = \begin{bmatrix} S(v = 1, \tau = 1) & \dots & S(v = 1, \tau = N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S(v = M, \tau = 1) & \dots & S(v = M, \tau = N) \end{bmatrix}$$

Doppler'e göre değişen dürtü cevabının genliğinin karesi alınarak saçılım fonksiyonu elde edilmiştir. Saçılım fonksiyonu her genlik ve τ penceresinden incelendiğinde güç gecikme profili; genlik ve Doppler penceresinden incelendiğinde Doppler spektrum yoğunluğu elde edilir.

$$|S(v, \tau)|^2 = P_S(v, \tau) = \begin{bmatrix} |S(v = 1, \tau = 1)|^2 & \dots & |S(v = 1, \tau = N)|^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ |S(v = M, \tau = 1)|^2 & \dots & |S(v = 1, \tau = N)|^2 \end{bmatrix}$$

Eğer saçılım fonksiyonunun sütunları arasındaki değişim incelendiğinde, güç gecikme profili (GGP) oluşturulur. Bunun için matematiksel olarak $P_S(v, \tau)$ 'in v 'ye yani Doppler kaymasına göre integrali alınmalıdır. Böylelikle saçılma fonksiyonunun genlik ve τ penceresinden görünen tepkilerin altında kalan alan toplanmıştır. Güç gecikme profili, doppler kaymasından bağımsızdır. Alıcıya ne kadar gücün iletildiği bilgisini içermektedir.

$$\text{Güç Gecikme Profili} = P_h(\tau) = \int P_S(v, \tau) dv$$

Güç gecikme profilinden ortalama gecikme ve RMS gecikme yayılımı kanal parametreleri elde edilebilmektedir. Ortalama gecikme aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Öncelikle zamana göre gücün integrali alınmıştır. Bu hesaplama sıfıncı derece momenttir.

$$P_m = \int_{-\infty}^{\infty} P_h(\tau) d\tau$$

Sonra bunu kendisi ile normalize edilerek ortalama gecikme hesaplanmıştır. Birinci derece moment için hesaplama aşağıda verilmiştir.

$$T_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_h(\tau) \tau d\tau}{P_m}$$

Buna göre ikinci derece momenti hesaplanarak RMS gecikme yayılımı elde edilmiştir.

$$S_\tau = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_h(\tau) \tau^2 d\tau}{P_m} - T_m^2}$$

Saçılma fonksiyonunun satırları arasındaki değişim incelendiğinde, Doppler spektrum yoğunluğu hesaplanmıştır. Bunun için matematiksel olarak $P_S(v, \tau)$ 'in τ 'ya göre integrali alınmıştır. Saçılma fonksiyonunun genlik ve *doppler* penceresinden görünen tepkilerin altında kalan alan toplanmıştır.

$$\text{Doppler Spektrum Yoğunluğu} = P_B(v) = \int P_S(v, \tau) dt$$

Kanalın belirsizliği ile ilgili parametreleri elde etmek için güç gecikme profili frekans düzleminde incelenmiştir. Güç gecikme profilinin τ 'ya göre FFT'sini aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Frekans Korelasyon Fonksiyonu} = \text{FFT}(P_h(\tau))_{\tau} = R_H(\Delta f)$$

Frekans korelasyon fonksiyonunun 3 dB noktasında uyumlu bantgenişliği elde edilmiştir. Uyumlu bant genişliği kanal parametrelerinin değişmediğinin var sayıldığı en küçük bant genişliğidir. Benzer şekilde zaman düzleminde kanal parametrelerinin sabit kaldığı en küçük zaman aralığı ise uyumlu zaman olarak tanımlanmıştır. Uyumlu zaman, Doppler spektrum yoğunluğu Δt 'ye göre FFT'sinin alınması ile hesaplanmıştır. Zaman korelasyon fonksiyonunun 3 dB noktası ise uyumlu zamanı verir. İlgili hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$\text{Zaman Korelasyon Fonksiyonu} = \text{FFT}(P_B(v))_{\Delta t}$$

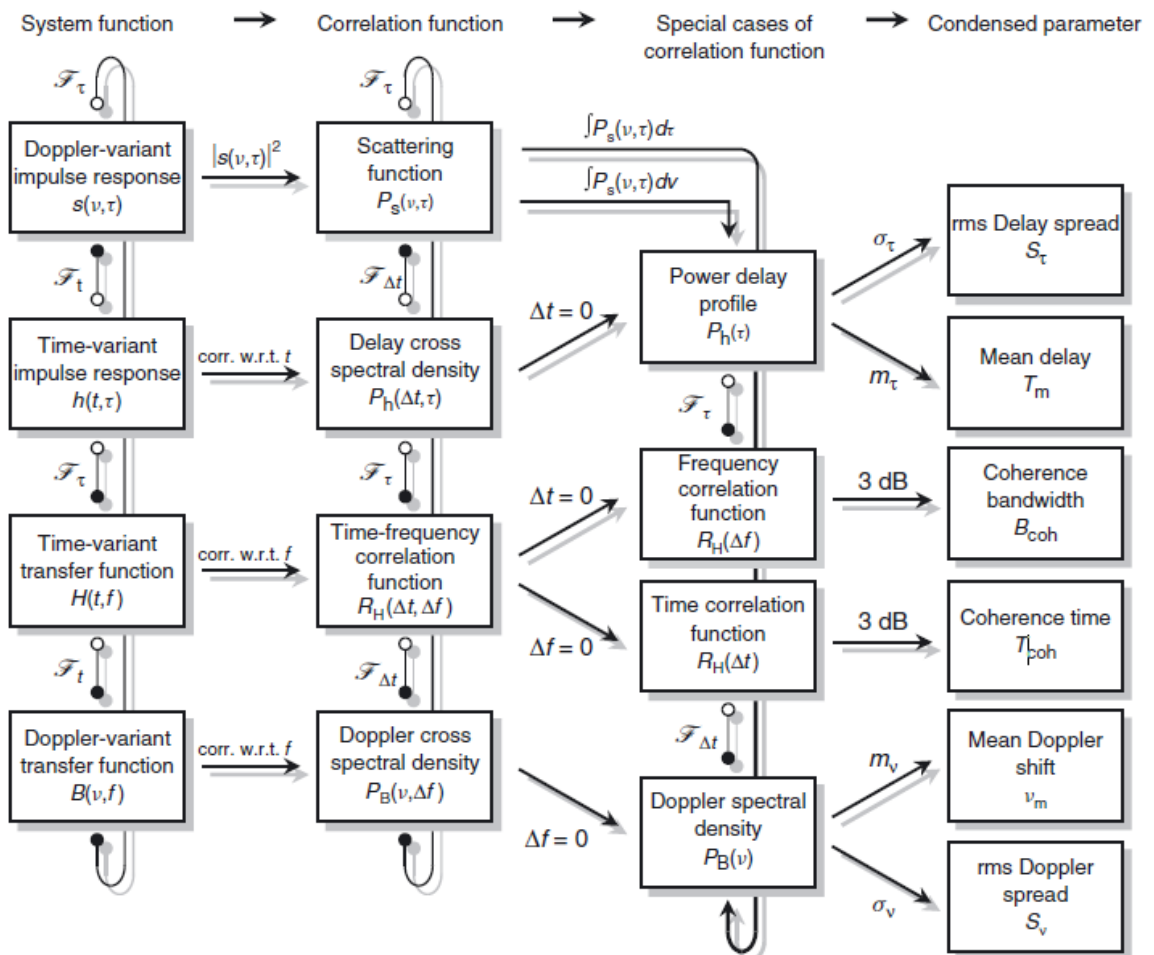
İşlem adımları Molisch Wireless Communication (Molisch, 2011) kitabındaki kanal parametrelerin eldesini açıklayan akış diyagramında gösterilmiştir. Akış şeması aşağıda paylaşılmıştır. Bu diyagrama göre izlenen işlem akışı sırasıyla aşağıda listelenmiştir.

- i. Sistem Fonksiyonları
 - a. Zamana bağlı transfer fonksiyonu
 - b. Zamana bağlı dürtü cevabı
 - c. Doppler'e bağlı dürtü cevabı
- ii. Korelasyon Fonksiyonları
 - a. Saçılma fonksiyonu

iii. Korelasyon Fonksiyonlarının Özel Durumları

- a. Güç Gecikme Profili
 - i. Ortalama gecikme profili
 - ii. RMS gecikme yayılımı
- b. Frekans korelasyon fonksiyonu
 - i. Uyumluluk bantgenişliği
- c. Doppler Spektrum Yoğunluğu
 - i. Ortalama Doppler kayması
 - ii. RMS Doppler yayılımı
- d. Zaman uyumluluk fonksiyonu
 - i. Zaman uyumluluğu

Hesaplamalar ve işlem adımları için (Molisch, 2011) referans alınmıştır.



şekil 4.11 Sistem fonksiyonları, korelasyon fonksiyonları arasındaki ilişki (Molisch, 2011)

5. ÇALIŞMANIN SONUÇLARI

Araç iletişimi için yapılan testleri zorlaştıran, hızla değişen sinyal yayılım koşullarıdır. İşlenen senaryolar durağan olsa bile kanal ideal koşullar altındaki gibi tamamen durağan hale getirilememiştir. Senaryolara göre hem verici (TX) hem de alıcı (RX) hareketli olabilmektedir ve saçılma ortamı hızla değişmektedir. Bu nedenle, araç iletişim kanalı, durağan olmayan bir sönmüleme, gecikme süreci ile karakterize edilmiştir.

Birbirinden farklı 100 senaryo kaydı alınmıştır. Senaryoları ayırt edebilmek ve inceleyebilmek için kayıtlar, duran ve hareketli olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma şöyledir;

- Duran Senaryolar
 - 02-duran_nonlineofsight_2sec
 - 03-duran_20metre_2sec
 - 04-duran_30metre_2sec
 - 05-duran_15metre_2sec
 - 19-ffgps_referans_2sec.mat
- Hareketli Senaryolar
 - 06-20km_hız_ikisihareketli_karsıkarsi_2sec
 - 07-20km_hız_ikisihareketli_karsıkarsi_farkliserit_2sec
 - 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec
 - 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec
 - 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_15metre_2sec
 - 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec.mat
 - 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec.mat
 - 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec.mat
 - 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec.mat
 - 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec.mat
 - 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec.mat
 - 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec.mat
 - 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec.mat

Senaryolar için kayıtlar alınırken araçların birbirlerine göre durumları Çizelge 5.1'deki tabloda özetlenmiştir.

Çizelge 5.3’de parametrelere ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır. Çizelgede Senaryo Adı, Korelasyon_farkı, GGP_tepe_noktası, rms_gecikme_yayılım_ns, ortalama_gecikme_ns, doppler_tepe_noktası, rms_doppler_yayılım_nokta, ortalama_doppler_kayması_nokta, Gecikme_ns korelasyon_mesafe_m, GGP_mesafe_m değerlerine yer verilmiştir. Bu değerler (Paier ark., 2007), (Renaudin ark., 2008), (Bernado ark., 2014)’de de kanal karakterizasyonunda hesaplanması gereken parametreler olarak belirtilmiştir.

Çizelge 5.1 Senaryo Özetleri

Senaryo Adı	Durum
'01-duran_ilkyakınsabit250metre_2sec.mat'	RX ve TX antenleri arası 2.5 metre. İki araç kapı kapıya denk gelecek şekilde paralel ve yanyana.
'02-duran_nonlineofsight_2sec.mat'	RX ve TX arasında bir araba var. RX’in ortadaki arabaya uzaklığı 24 m ve TX’in arabaya uzaklığı 23 m. Sırasıyla RX, ortadaki araba ve TX arka arkaya sıralıdır.
'03-duran_20metre_2sec.mat'	RX ve TX arası 20 m. RX ve TX araçları birbirlerine paralel bir şekilde park durumundadır.
'04-duran_30metre_2sec.mat'	RX ve TX arası 30 m. RX ve TX araçları birbirlerine paralel bir şekilde park durumundadır.
'05-duran_15metre_2sec.mat'	RX ve TX arası 15 m. RX ve TX araçları birbirlerine paralel bir şekilde park durumundadır.
'06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec.mat'	RX ve TX aynı şeritte birbirlerine doğru 20 km/s hızla hareket ediyor. Senaryo Hacettepe Hukuk Fakültesi otoparkında gerçekleştirilmiştir.
'07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_farkli_serit_2sec.mat'	RX ve TX farklı şeritte birbirlerine doğru 20 km/s hızla hareket ediyor. Senaryo Hacettepe Hukuk Fakültesi otoparkında gerçekleştirilmiştir.
'08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec.mat'	RX ve TX arka arkaya hareket ediyor. Araçlar arası 30 m. Konum, Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı
'09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec.mat'	RX ve TX arka arkaya hareket ediyor. Araçlar arası 30 m. Konum, Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı. İkinci deneme.

'10- 20km_hız_ikisihareketli_katar_15metre_2sec.mat'	RX ve TX arka arkaya hareket ediyor. Araçlar arası 15 m. Konum, Hacettepe Hukuk Fakültesi Otoparkı
'11- 20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklaşık50metre_2sec.mat'	Hacettepe Hukuk Fakültesinin Otoparkı'nda araçlar 20 km/s hız ile hareket ederken kaydedilmiştir.
'12- 10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec.mat'	Hacettepe Hukuk Fakültesinin Otoparkı'nda araçlar birbirlerine doğru 10 km/s hız ile hareket ederken kayıt yapılmıştır. Araçların önleri birbirlerine denk geldiğinde kayıt bitmiştir.
'13- trafik_katar_10metre_hız50_2sec.mat'	Cepa'nın ve Kentpark'ın önünde iki araç arasında 10 m varken, RX ve TX araçlarının hızları 50 km/s'ken alınmış kayıttır. Araçlar aynı yönde arka arkaya hareket etmiştir.
'14- trafik_katar_10metre_hız70_2sec.mat'	Cepa'nın ve Kentpark'ın önünde iki araç arasında 10 m varken, RX ve TX araçlarının hızları 70 km/s'ken alınmış kayıttır. Araçlar aynı yönde arka arkaya hareket etmiştir.
'15- trafik_katar_20metre_hız50_2sec.mat'	Cepa'nın ve Kentpark'ın önünde iki araç arasında 20 m varken, RX ve TX araçlarının hızları 50 km/s'ken alınmış kayıttır. Araçlar aynı yönde arka arkaya hareket etmiştir.
'16- trafik_katar_20metre_hız70_2sec.mat'	Cepa'nın ve Kentpark'ın önünde iki araç arasında 20 m varken, RX ve TX araçlarının hızları 70 km/s'ken alınmış kayıttır. Araçlar aynı yönde arka arkaya hareket etmiştir.
'17- trafik_katar_50metre_hız50_2sec.mat'	Cepa'nın ve Kentpark'ın önünde iki araç arasında 50 m varken, RX ve TX araçlarının hızları 50 km/s'ken alınmış kayıttır. Araçlar aynı yönde arka arkaya hareket etmiştir.
'18- trafik_katar_50metre_hız70_2sec.mat'	Cepa'nın ve Kentpark'ın önünde iki araç arasında 50 m varken, RX ve TX araçlarının hızları 70 km/s'ken alınmış kayıttır. Araçlar aynı yönde arka arkaya hareket etmiştir.
'19-ffgps_referans_2sec.mat'	Referans olarak kullanılan sinyal. RX ve TX arası kısa kablo ile bağlıdır.

Senaryolarda incelemeler yapılmadan önce sinyaller senkronize edilmiştir. Senkronizasyon yöntemi senaryoların referans sinyal ile korelasyonunun farkı kadar döngüsel kayma uygulanmıştır.

Çizelgedeki korelasyon_farki değeri senaryo sinyallerinin referans sinyallere göre eşzamanlı hale getirilmesi için kaç nokta kaydırıldığını gösterilmiştir. Gecikme_ns değeri ile güç gecikme profilindeki en kuvvetli tepe noktasının kaç ns’de çıktığı sunulmuştur.

Tablodaki “GGP (Güç gecikme profili)_mesafe_m” parametresi alıcı ve verici arasındaki mesafeyi metre cinsinden göstermektedir. “GGP_mesafe_m” parametresinden elde edilen değerler, ölçüm sırasında alıcı ve verici arasındaki mesafeden farklı olabilmektedir. Bu durum ölçüm hatalarını ve belirsizliklerini ortaya koyulmuştur. Senaryo isimlerindeki mesafeler yaklaşık ölçümlerle verilmiştir. Hesaplamalarla elde edilen sonuçlarda yaklaşık mesafe ölçümlerinde hata yapıldığı ortaya çıkarılmıştır. Buna göre senaryolardan mesafeleri ölçümlerde belirtilenlerden bazıları ve hesaplanan değerler Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Kayıtların 2 saniye olması mesafe tayinini zorlaştırmaktadır.

Çizelge 5.2 Ölçülen ve hesaplanan mesafeler

Senaryo Adı	Yaklaşık Ölçülen Mesafe [m]	GGP_mesafe_m [m]
20-ffgps_referans_2sec.mat'	0	0
'07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_farkliserit_2sec.mat'		38,64512
'11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec.mat'		48,80996
'06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec.mat'		42,67358
'12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec.mat'		53,11948
10-20km_hız_ikisihareketli_katar_15metre_2sec.mat'	15	19,2523
'05-duran_15metre_2sec.mat'	15	17,42544
'01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec.mat'	2,5	12,97539
'04-duran_30metre_2sec.mat'	30	30,16662
'03-duran_20metre_2sec.mat'	20	13,02223
'02-duran_nonlineofsight_2sec.mat'	50	55,18055
09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec.mat'	30	37,5698
08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec.mat'	30	46,79573
'17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec.mat'	50	75,32285
'15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec.mat'	20	32,50874
'18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec.mat'	50	108,7216
'16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec.mat'	20	48,57575
'14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec.mat'	10	44,1257
'13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec.mat'	10	40,56567

RMS gecikme yayılımında bütün senaryolar için aynı değer elde edilmiştir. Saçılım miktarı arttıkça RMS gecikme yayılımında artış beklenmektedir. (Bernado ark., 2014)'e göre trafik senaryolarında daha çok saçılım kaynağı olmasına rağmen, otoyol senaryolarına göre daha düşük RMS gecikme yayılımı elde edilmiştir. (Bernado ark., 2014)' e göre bunun nedeni araçların üstüne kurulan antenin bu seviyenin altındaki yayılımları yakalamada iyi olmayışı olarak açıklanmıştır. (Abbas ark., 2014)'de araçlara en az iki anten yerleştirilmesinin parametrelerin hesaplanmasında bir iyileştirme sağlayacağından bahsedilmiştir. Bu gibi değişimleri yakalamak için olayların 2 saniyeden uzun süreli kayıtlarda incelenmesi de gerekmektedir.

Ortalama gecikme bütün senaryolar için aynı çıkmaktadır. Bu da kanalın her senaryoya ortalama bir gecikme katkısı olduğunu göstermektedir.

Hareketlerin kanala göre Doppler değerine bakıldığından, kanal parametreleri bağıl hıza göre hesaplanmamıştır. Kanal kendi başına hareketli olarak düşünülmüştür. Aynı yönde aynı

hızda hareket eden senaryolarda alıcı-vericinin birbirlerine göre bağıl hız 0 km/s'tir. Örneğin 20 km/s hıza sahip senaryolarda dünyaya göre bağıl hız 20 km/s'dir. Referans sinyal kendisi ile kıyaslandığında (20. Senaryo) Doppler sonucunun sıfır olması bu çıkarımı kanıtlar niteliktedir. Teorik hesaplara göre,

$$f_{Doppler} = \frac{V}{c/f}$$

eşitliğiyle, Çizelge 5.3'deki teorik Doppler değerleri elde edilmiştir. Senaryolarda 10 km/s, 20 km/s, 50 km/s ve 70 km/s olmak üzere dört farklı hızda ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerle elde edilen Doppler değerleri Çizelge 5.3'de Ölçüm Sonuçlarından Elde Edilen Ortalama Doppler [Hz] sütununda verilmiştir. Ölçümlerden elde edilen Doppler değerlerine göre hızlar hesaplandığında, testler esnasında not edilen yaklaşık hızlardan sapmalar olduğu fark edilmiştir.

Çizelge 5.3 Doppler Hesapları

Hız [km/s]	Teorik Doppler [Hz]	Ölçüm Sonuçlarından Elde Edilen Ortalama Doppler [Hz]	Ölçüm Sonuçlarına Göre Ortalama Hız [km/s]
10	54.47	71	13.0356
20	108.93	79.5	14.5962
50	272.33	356.3	65.41668
70	381.26	362	66.4632

Çizelge 5.4 Ölçümlere göre sonuçları içeren tablo

Senaryo Adı	Korelasyon farkı	GGP_tep_e_noktası	rms_gecikme_yayılim_ns	ortalama_gecikme	doppler_tep_noktası	rms_doppler_yayılim_noktası	ortalama_doppler_kayması_noktası	Gecikme_	GGP_mesafe_m
'01- duran_ilk yakinsabit 250metre _2sec.mat'	277	277	2,18E-07	1,87E-07	91	97,46529 398	128,8525 758	4,33E-08	12,97539 222
'02- duran_no nlineofsig ht_2sec. mat'	1179	1178	2,21E-07	1,91E-07	92	142,5586 907	210,6162 45	1,84E-07	55,18054 887
'03- duran_20 metre_2s ec.mat'	278	278	2,20E-07	1,90E-07	92	126,8371 186	167,2161 547	4,34E-08	13,02223 479
'04- duran_30 metre_2s ec.mat'	645	644	2,20E-07	1,91E-07	91	137,1048 175	188,8997 356	1,01E-07	30,16661 585
'05- duran_15 metre_2s ec.mat'	372	372	2,20E-07	1,90E-07	86	132,9471 872	172,6336 335	5,81E-08	17,42543 649
'06- 20km_hiz _ikishare ketli_kars ıkarşı_2se c.mat'	1743	911	2,21E-07	1,91E-07	70	149,8093 219	228,3825 065	2,72E-07	42,67358 236
'07- 20km_hiz _ikishare ketli_kars ıkarşı_far kliserit_2s ec.mat'	1631	825	2,21E-07	1,91E-07	65	149,5491 088	229,5672 276	2,55E-07	38,64512 124
08- 20km_hiz _ikishare ketli_kata r_30metr e_2sec.m at'	1000	999	2,21E-07	1,91E-07	98	111,7426 213	149,8218 823	1,56E-07	46,79572 863
09- 20km_hiz _ikishare ketli_kata r_30metr e_ikincide neme_2s ec.mat'	1612	1611	2,21E-07	1,91E-07	93	119,0890 353	151,9697 733	2,52E-07	75,46338 22
10- 20km_hiz _ikishare ketli_kata r_15kmet re_2sec. mat'	411	411	2,20E-07	1,90E-07	85	133,7618 118	169,1967 407	6,42E-08	19,25229 676

Senaryo Adı	'11-20km_hiz_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec.m	'12-10km_hiz_yaklasan_tahizada_bitti_2sec.mat'	'13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec.mat'	'14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec.mat'	'15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec.mat'	'16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec.mat'	'17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec.mat'	'18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec.mat'	19-ffgps_referans_2sec.mat'	Korelasyon farkı	GGP_tep_e_noktası	rms_gecikme_yayilims	ortalama_gecikme	doppler_tep_noktası	rms_doppler_yayilims_noktası	ortalama_doppler_kaymasi_noktası	Gecikme_	GGP_mesafe_m
0	1402	1311	1597	10765	5873	1031	1674	9965	0									
2346	1042	1134	866	942	694	1037	1608	2321	2346									
3,82E-07	2,21E-07	2,21E-07	2,21E-07	2,21E-07	2,20E-07	2,21E-07	2,21E-07	2,22E-07	3,82E-07									
3,82E-07	1,91E-07	1,91E-07	1,91E-07	1,91E-07	1,91E-07	1,91E-07	1,91E-07	1,92E-07	3,82E-07									
1	66	71	384	367	349	366	336	353	1									
0	153,3051661	150,4489825	143,9657342	143,2186475	143,4046815	143,7726282	143,2097322	143,7587459	0									
1	188,6571322	170,4026551	255,4998845	255,5718824	251,440405	251,3134501	252,0504595	251,1440908	1									
0	2,19E-07	2,05E-07	2,50E-07	1,68E-06	9,18E-07	1,61E-07	2,62E-07	1,56E-06	0									
0	48,80995919	53,11947574	40,56566666	44,12570207	32,50874441	48,57574633	75,32285448	108,7216077	0									

RMS Doppler yayılımının en düşük değeri referans sinyalin kendisiyle karşılaştırıldığı durumda çıkmıştır. Bu karşılaştırmada RMS gecikme yayılımı sıfırdır. Referans sinyalden sonra en durağan ölçüm 01 numaralı senaryo olan araçlar arası 2.5 m olduğu durumdur. Burada RMS gecikme yayılımı 97.47 Hz çıkmıştır. Kentsel ortamlarda gerçekleştirilen senaryoların RMS gecikme yayılımı, kırsal alanda alınan ölçümlere göre daha yüksektir.

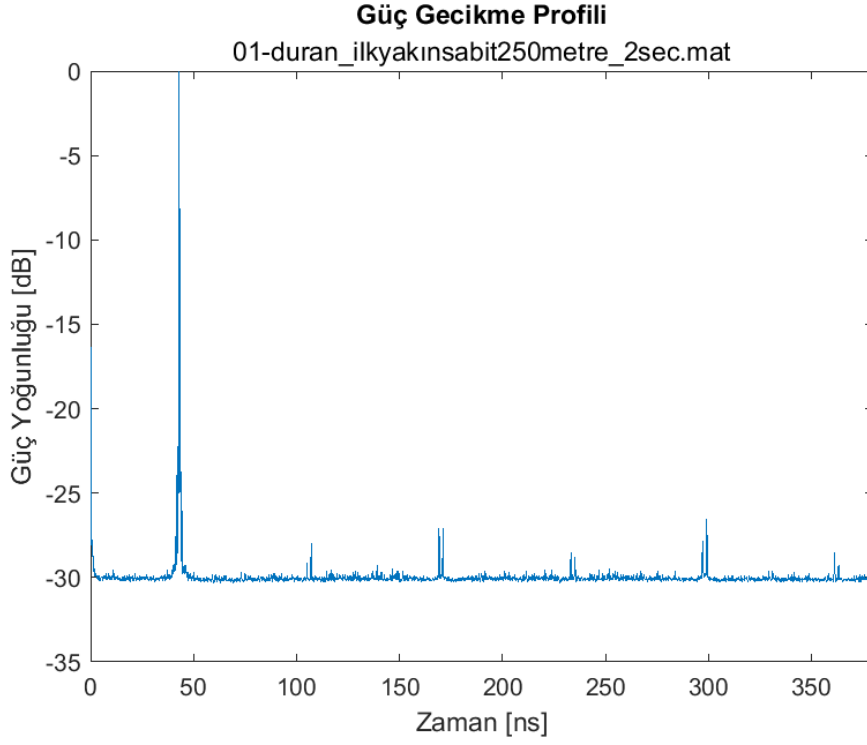
Duran senaryolarda bile Doppler değerlerinin elde edilmiş olması (ortalama 90 Hz), kanalın hiçbir zaman tam durağan hale gelemiyor olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

PDP grafiklerinden;

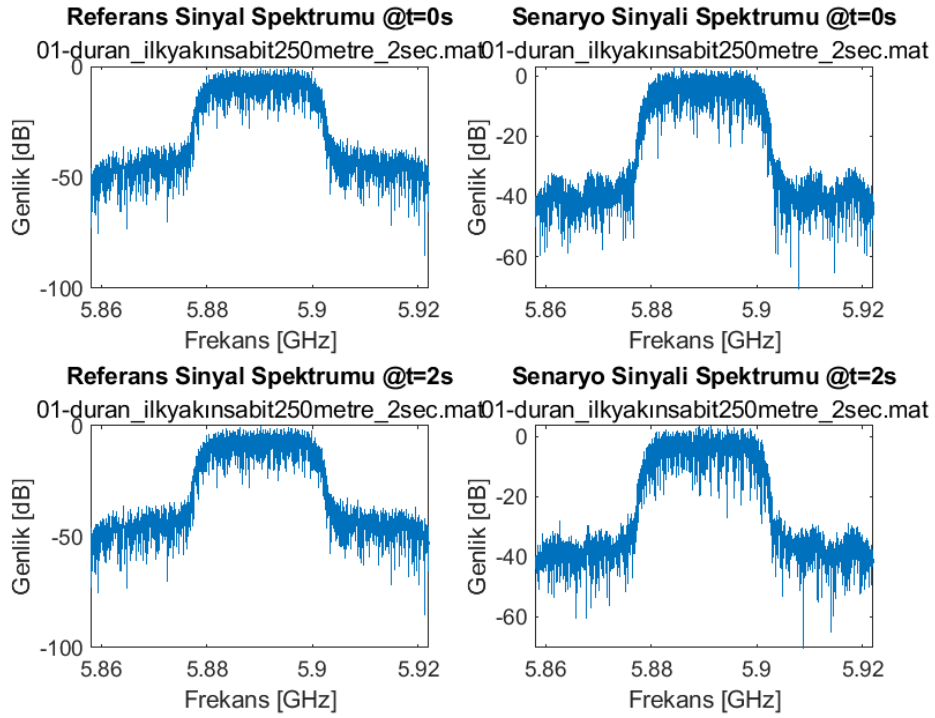
- Şekil 5.21 06-20km_hız_ikisihareketli_karsıkarsi_2sec senaryosunun PDP grafiğinde, Şekil 5.25 07-20km_hız_ikisihareketli_karsıkarsi_farkliserit_2sec senaryosunun PDP grafiğinde,
- Şekil 5.33 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun PDP grafiğinde,
- Şekil 5.33 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun PDP grafiğinde,
- Şekil 5.45 12-10km_hız_yaklasan_tahizdabitti_2sec senaryosunun PDP grafiğinde,
- Şekil 5.49 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiğinde
- Şekil 5.65 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiğinde

iki tepe noktası gözlemlenmiştir. Bu senaryoların hepsinin hareketli ve nispeten yoğun trafik durumlarında geręekleřtirilmiřtir. Güç gecikme profilinde iki tepe olması güçlü başka yansıtıcıların da kanalda yer aldığını gösterilmiştir.

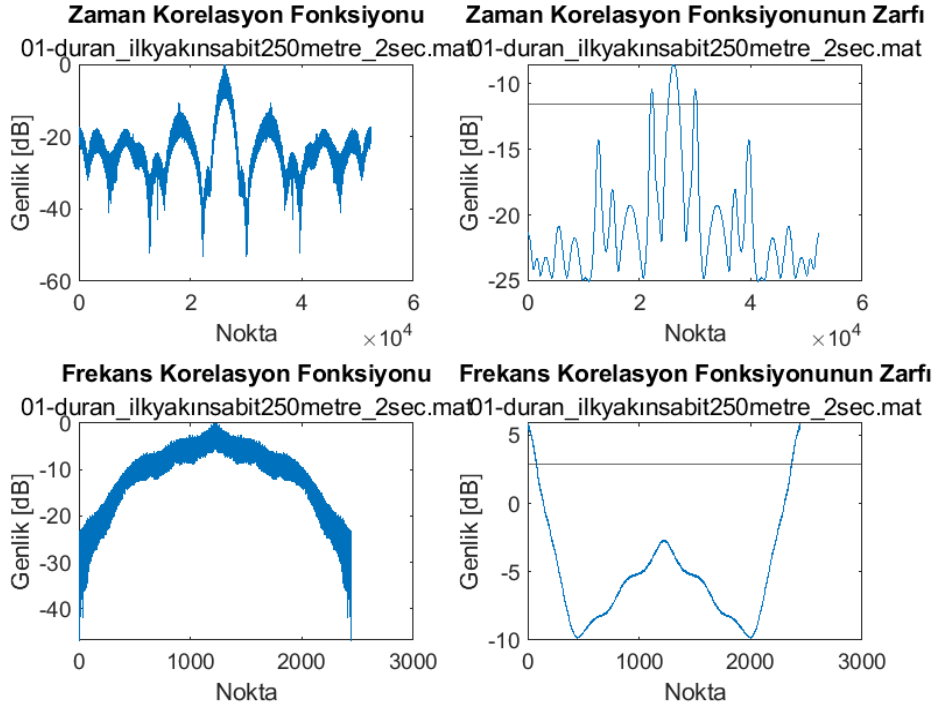
Şekil 5.1 - Şekil 5.76 arasında sırasıyla güç gecikme profili, zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı, frekans korelasyon fonksiyonunun zarfı, kayıt başındaki ($t=0s$) ve sonundaki ($t=2s$) spektrum, Doppler spektrum yoğunluğu grafikleri her senaryo için verilmiştir.



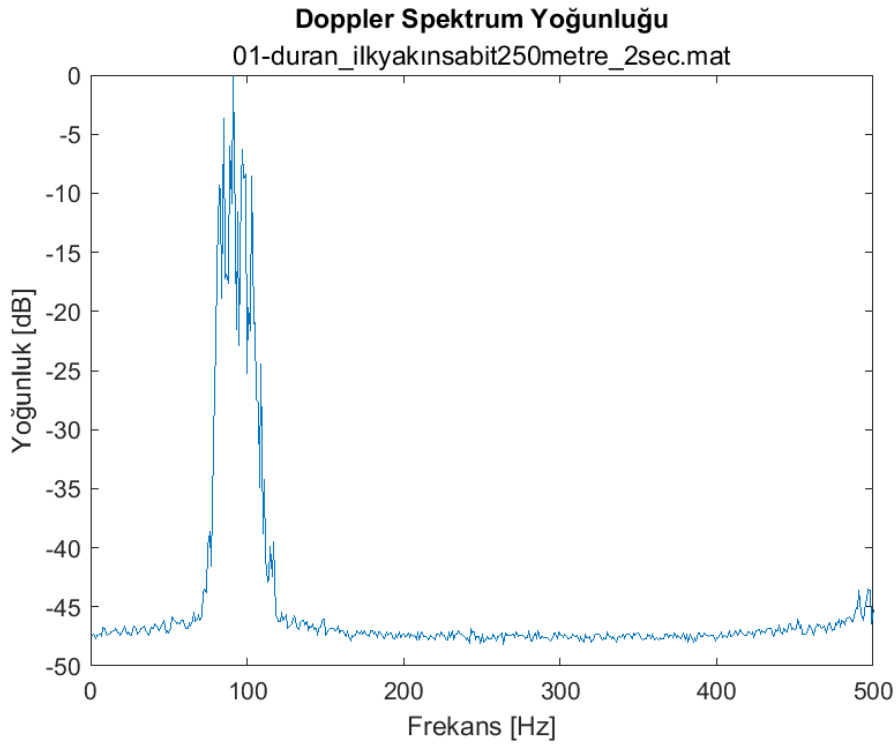
Şekil 5.1 01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec senaryosunun PDP grafiği



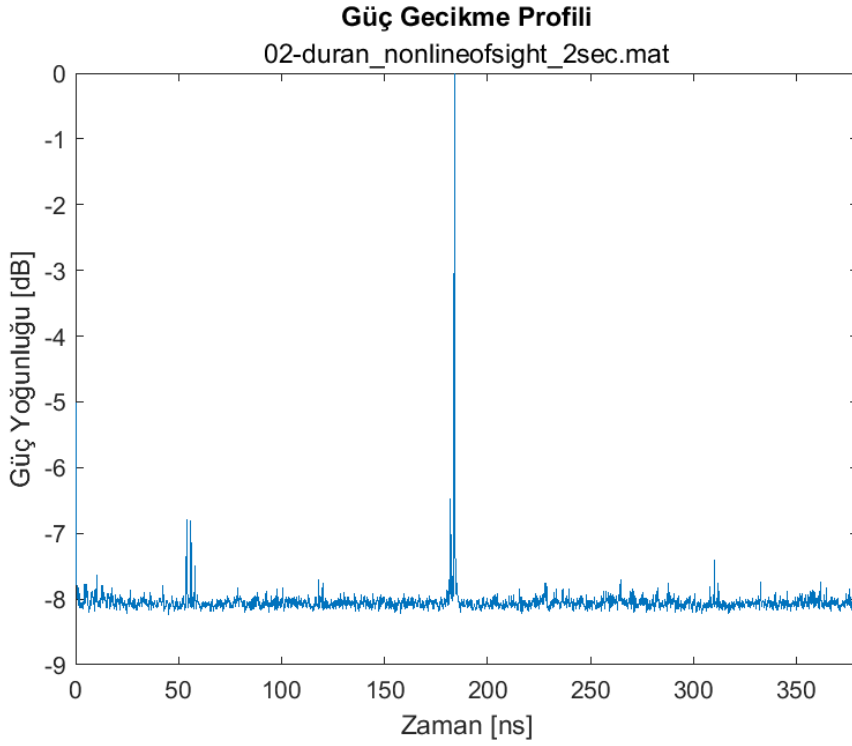
Şekil 5.2 01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



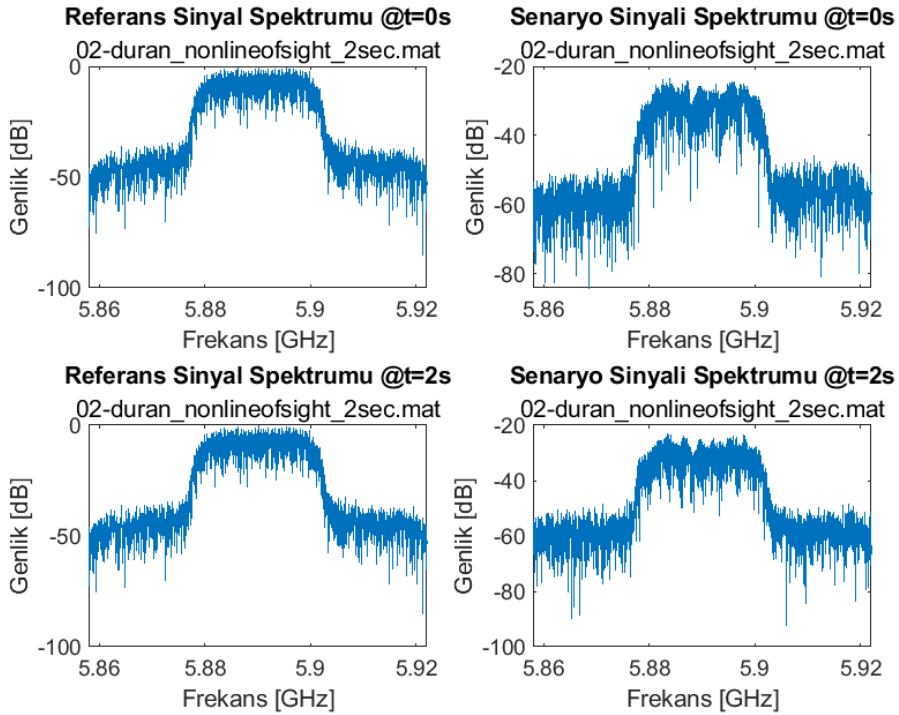
Şekil 5.3 01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



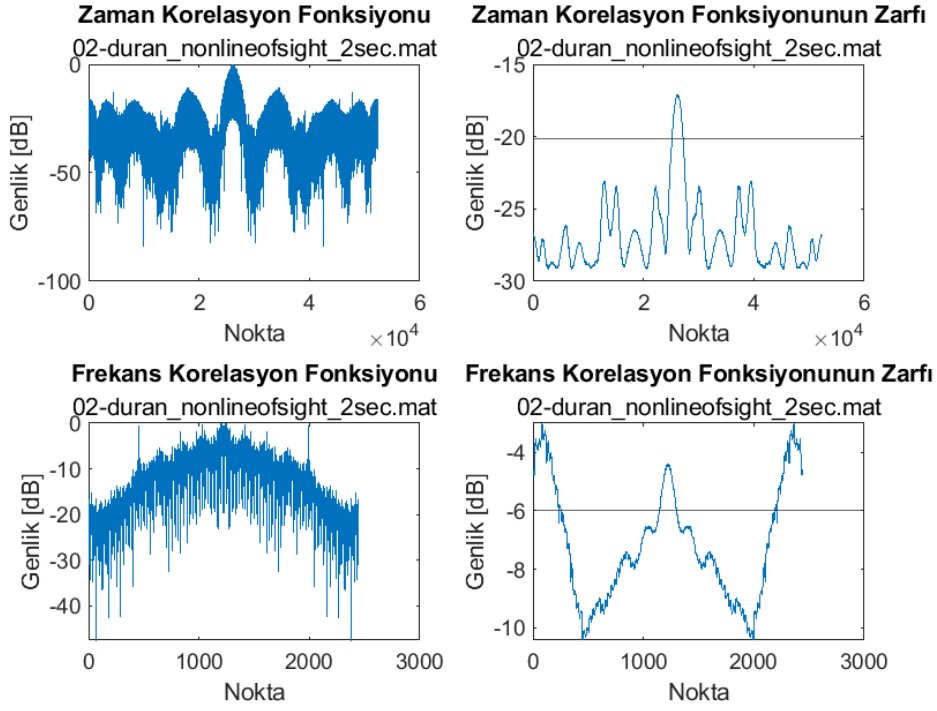
Şekil 5.4 01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



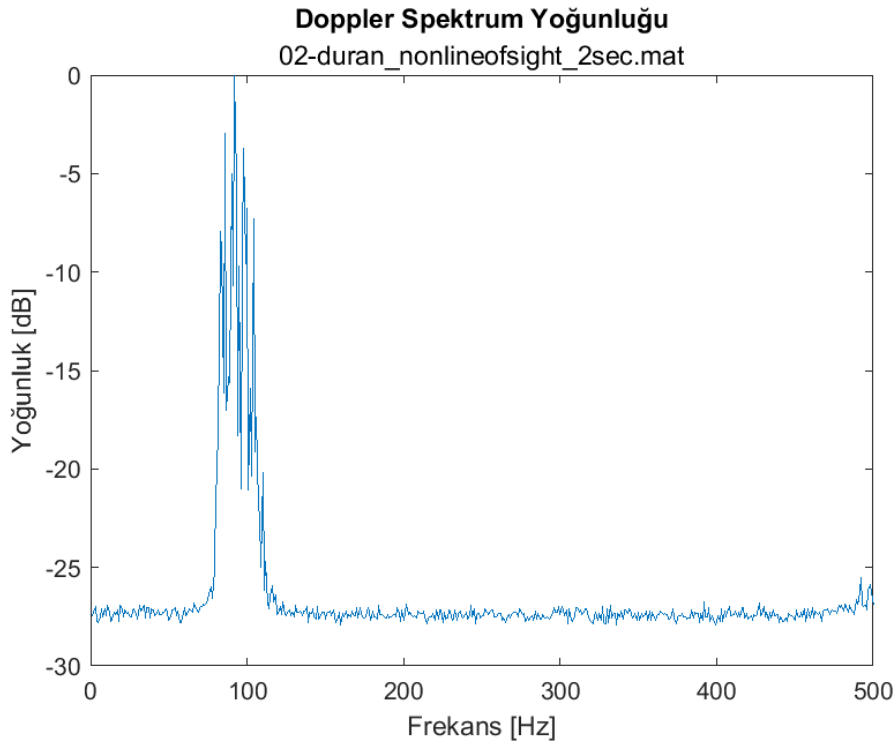
Şekil 5.5 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun PDP grafiği



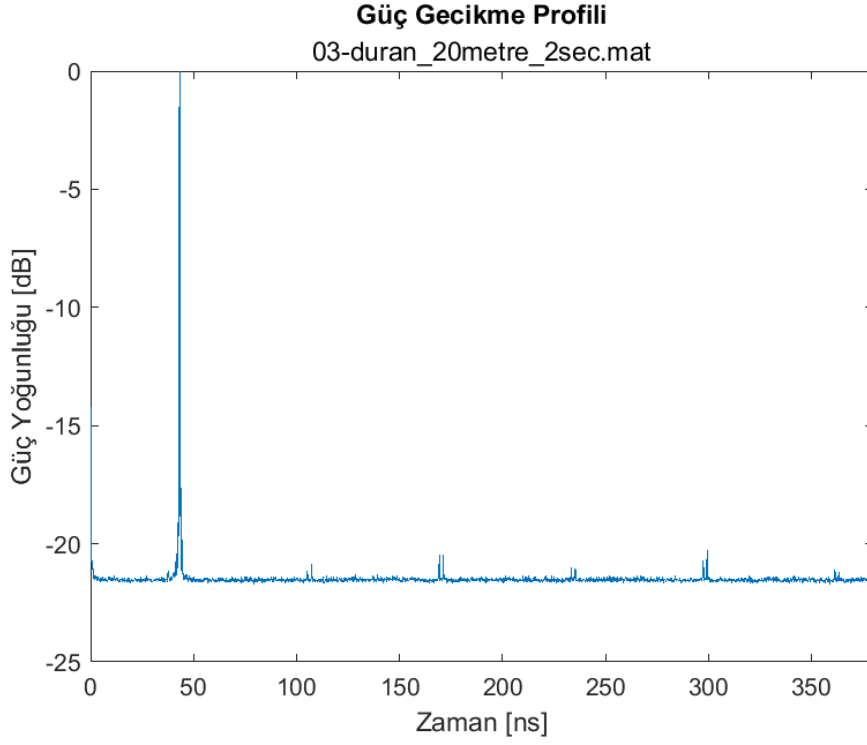
Şekil 5.6 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



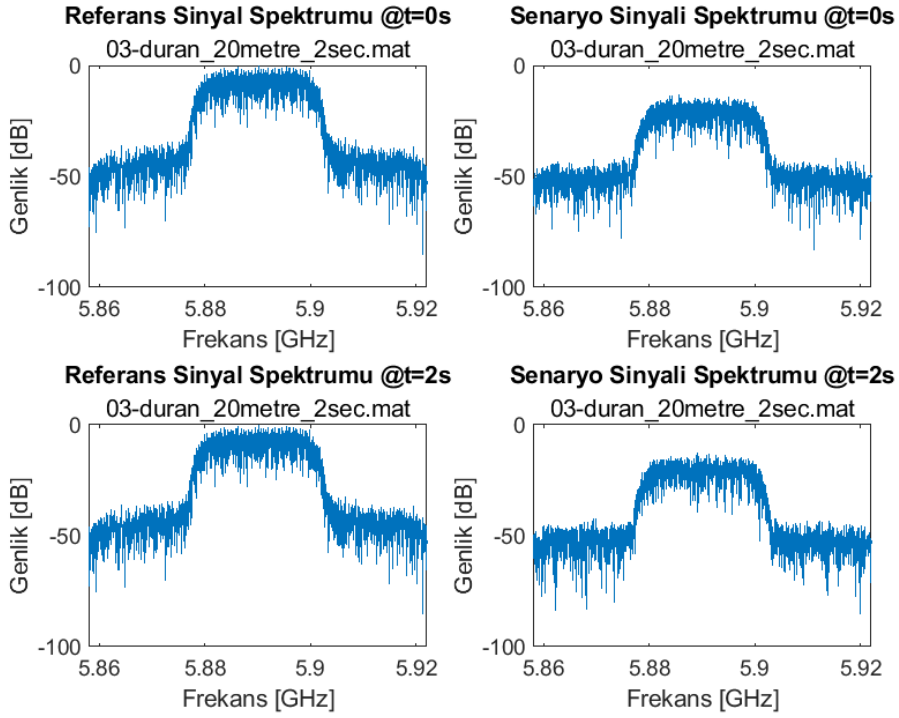
Şekil 5.7 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



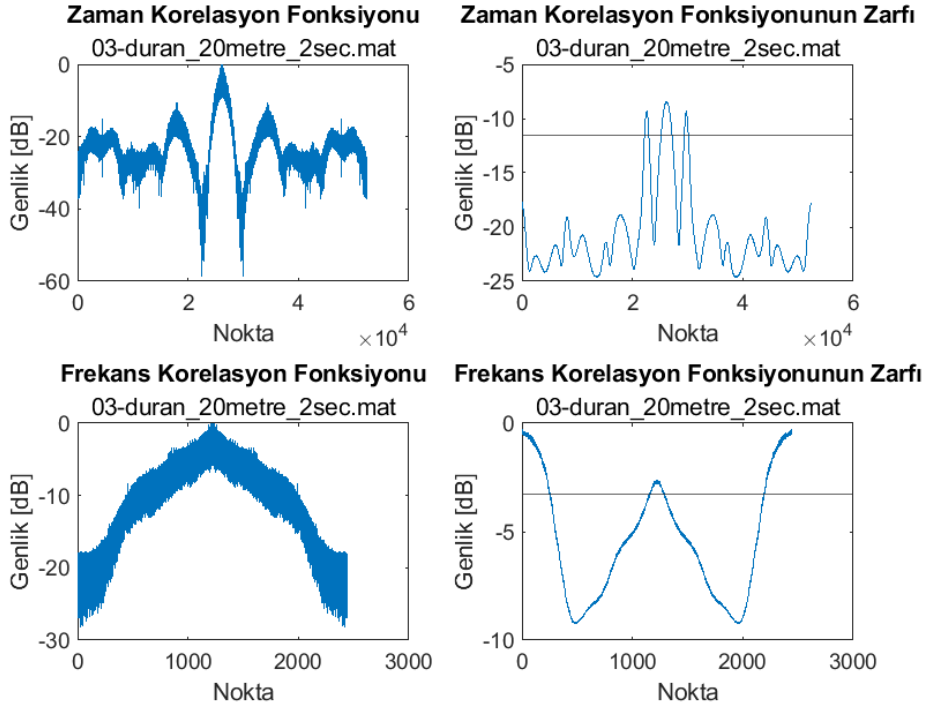
Şekil 5.8 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosunun Doppler spektral yoğunluğu grafiği



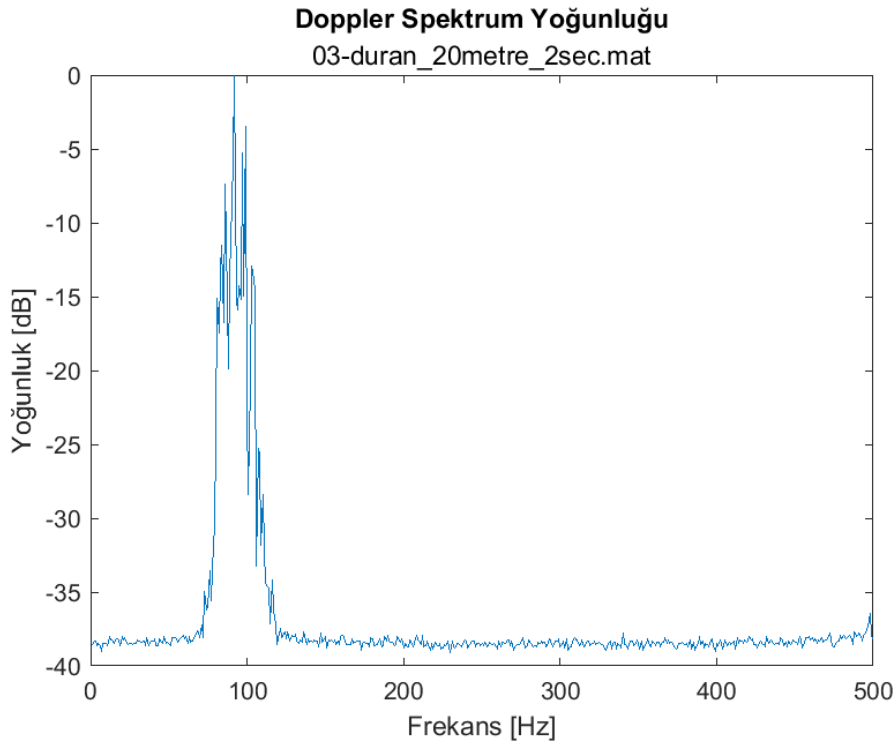
Şekil 5.9 03-duran_20metre_2sec senaryosunun PDP grafiği



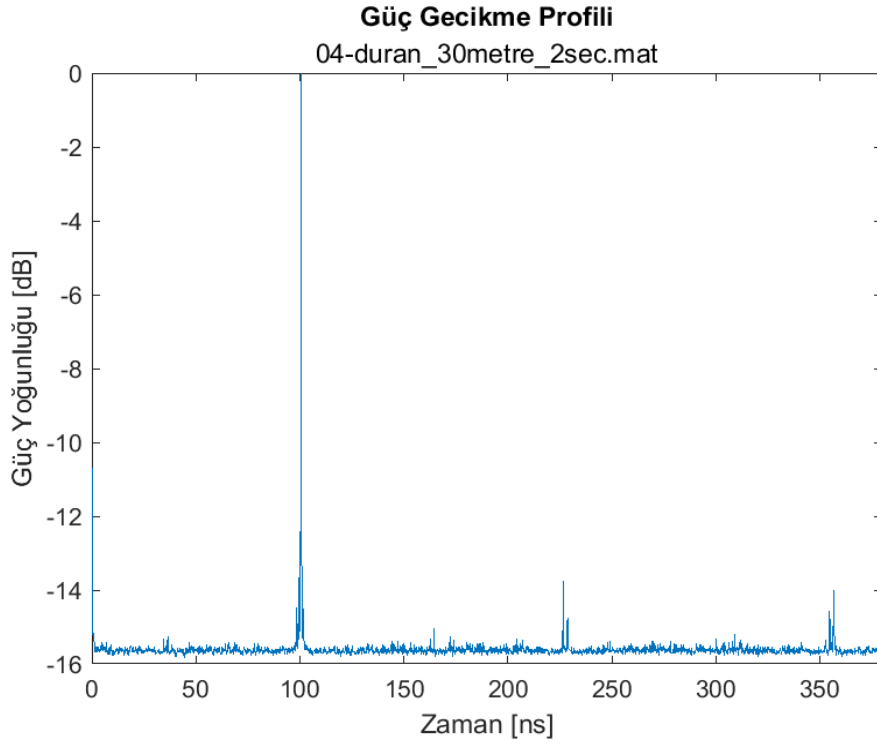
Şekil 5.10 03-duran_20metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



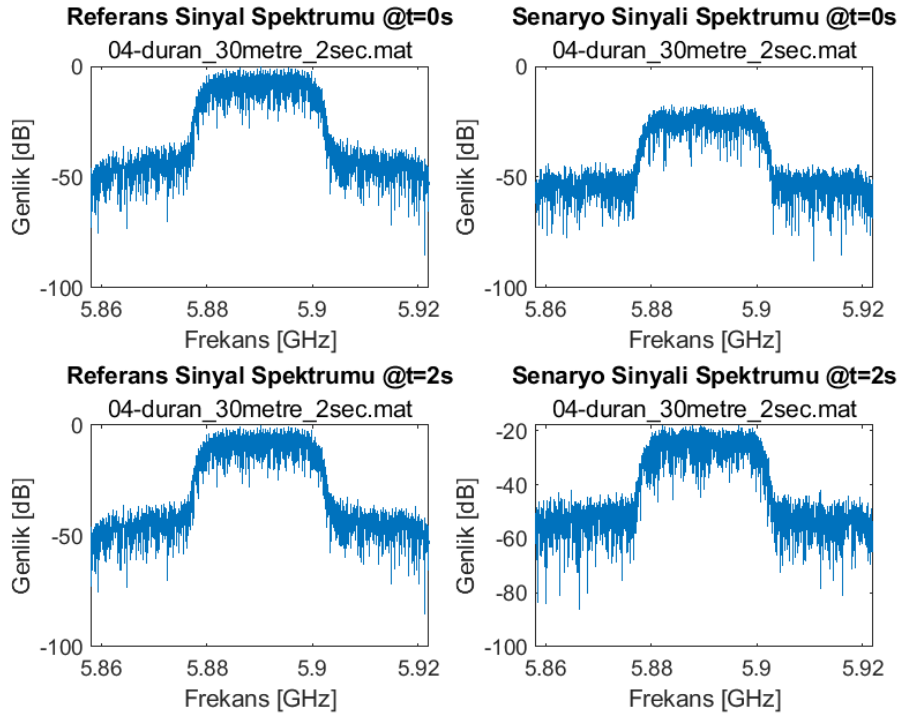
Şekil 5.11 03-duran_20metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



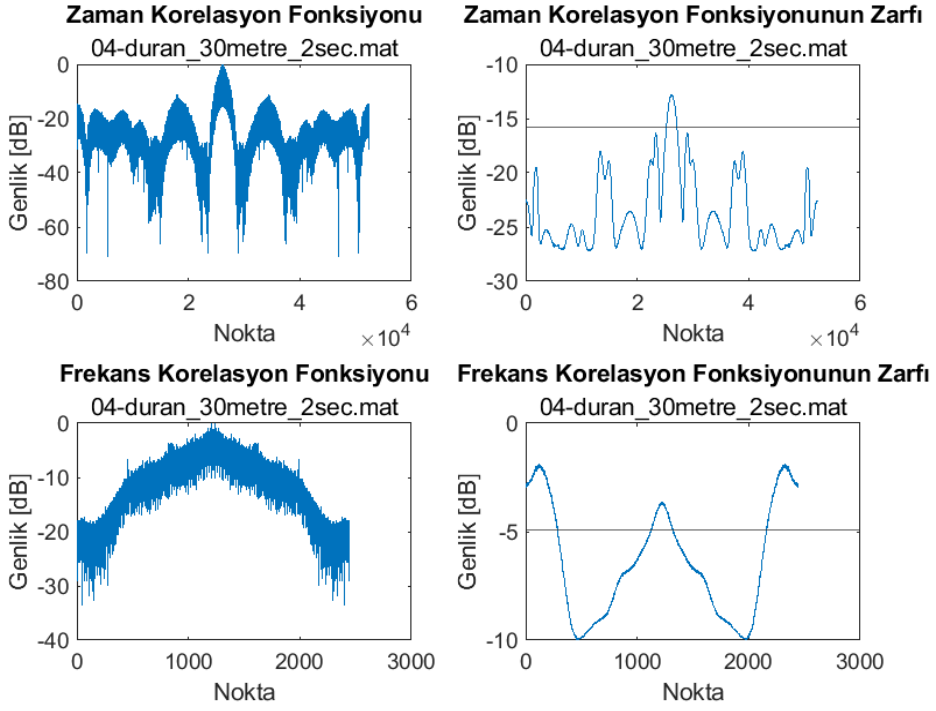
Şekil 5.12 03-duran_20metre_2sec senaryosunun Doppler spectral Density grafiği



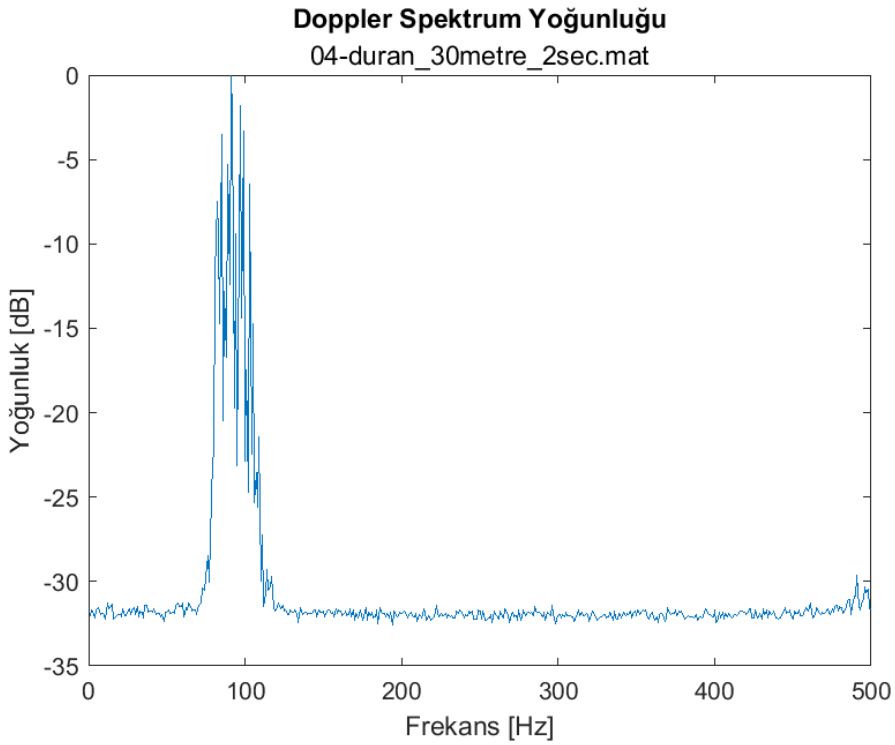
Şekil 5.13 04-duran_30metre_2sec senaryosunun PDP grafiği



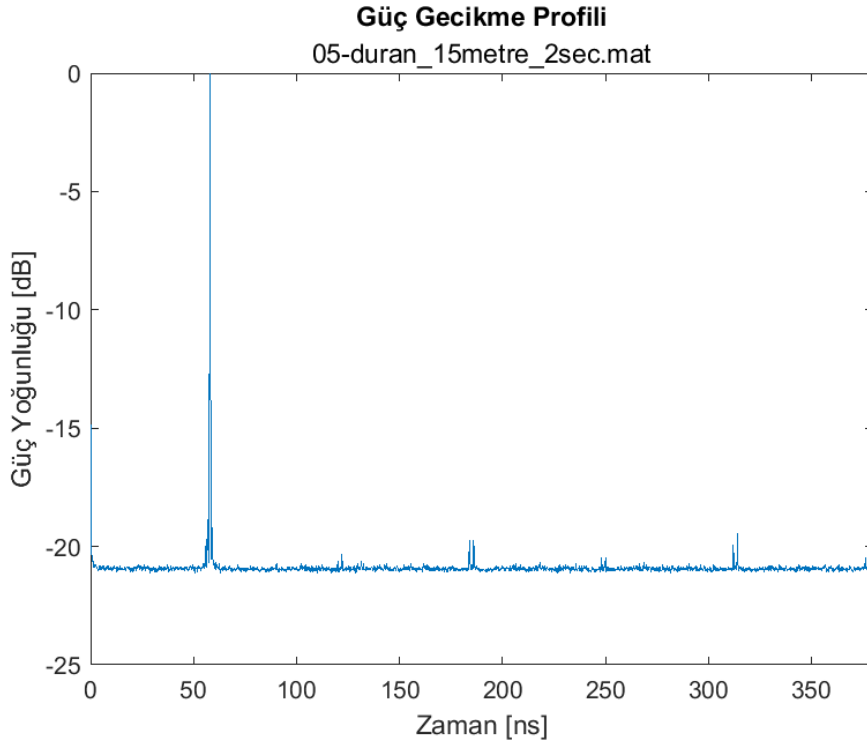
Şekil 5.14 04-duran_30metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



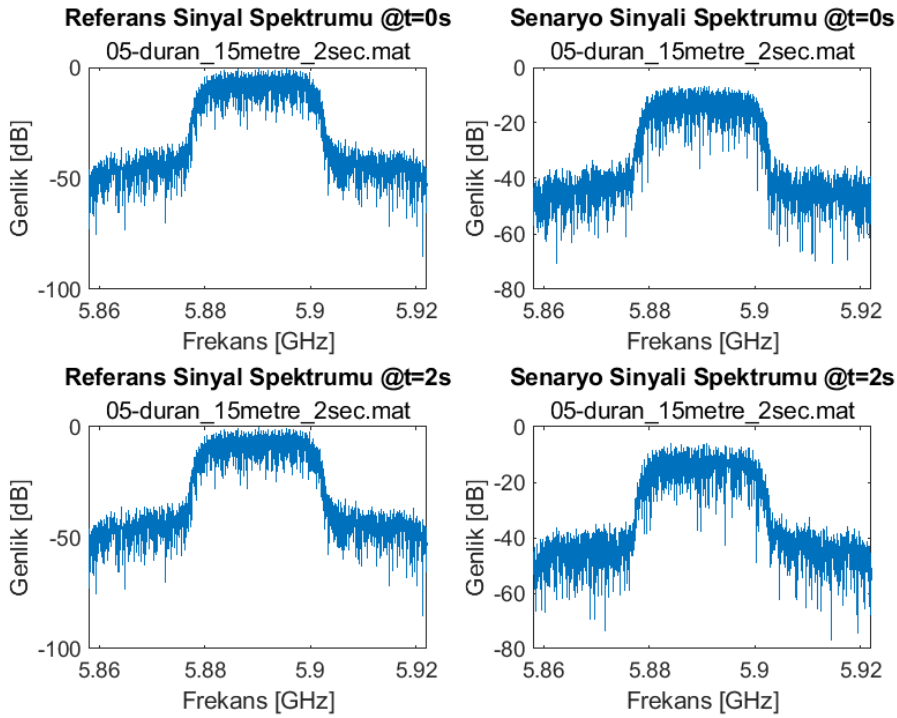
Şekil 5.15 04-duran_20metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



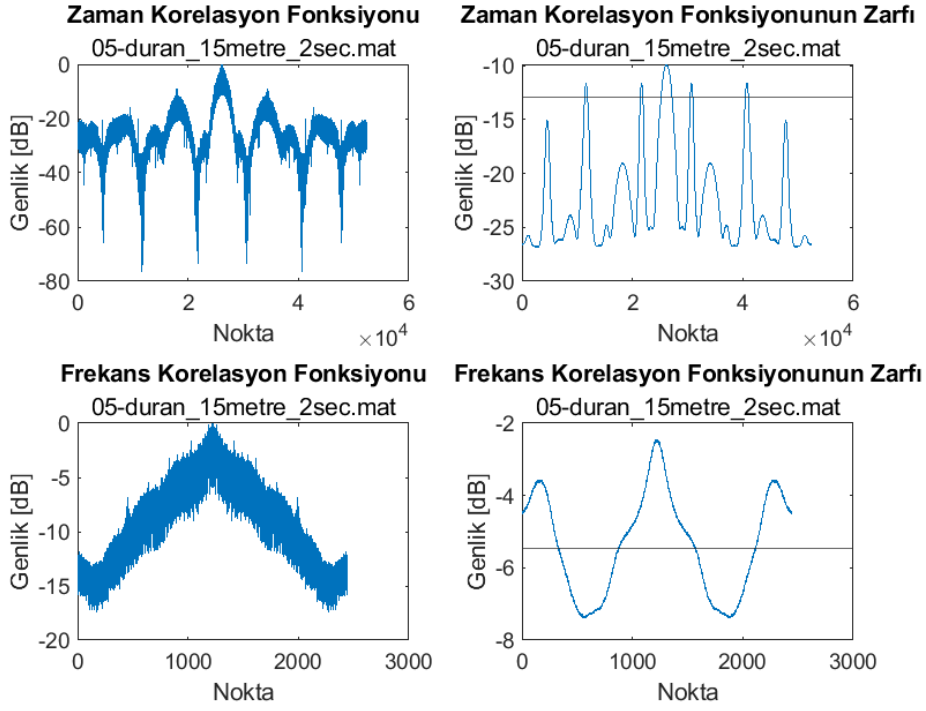
Şekil 5.16 04-duran_30metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



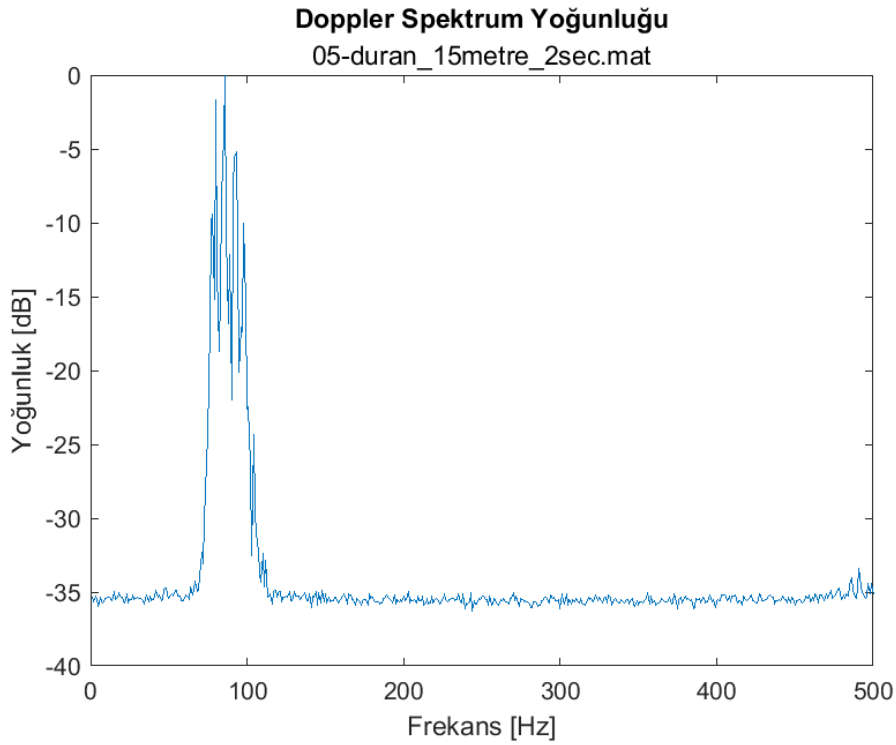
Şekil 5.17 05-duran_15metre_2sec senaryosunun PDP grafiği



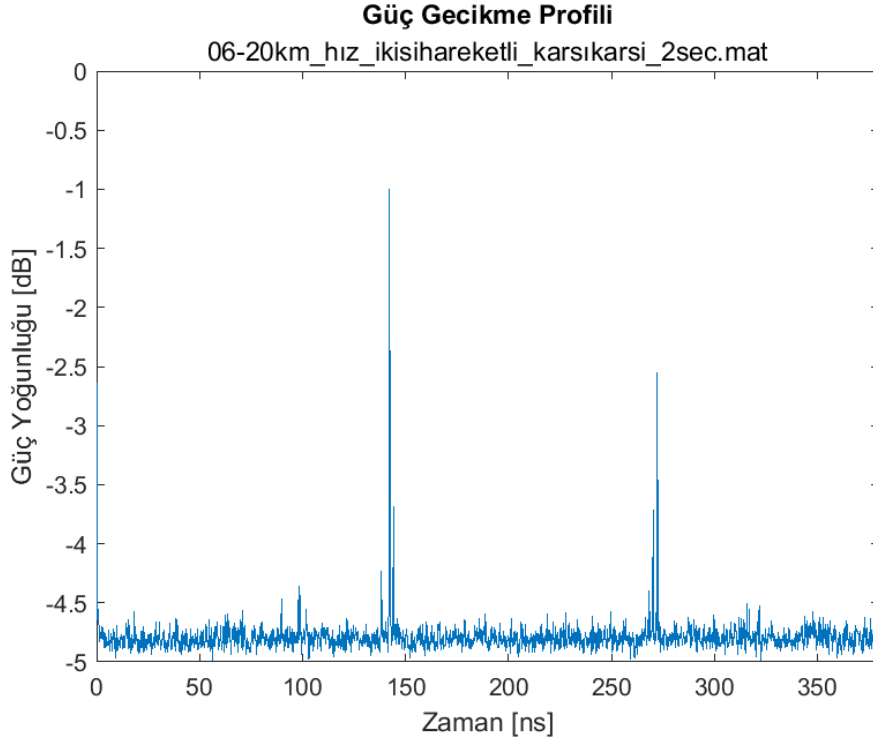
Şekil 5.18 05-duran_15metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



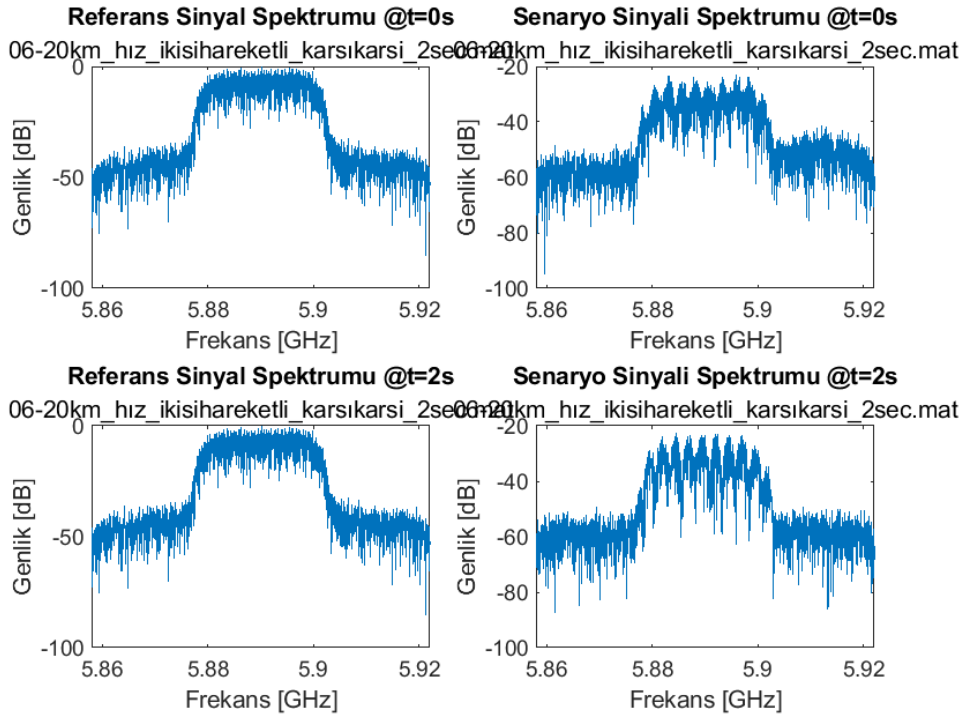
Şekil 5.19 05-duran_15metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



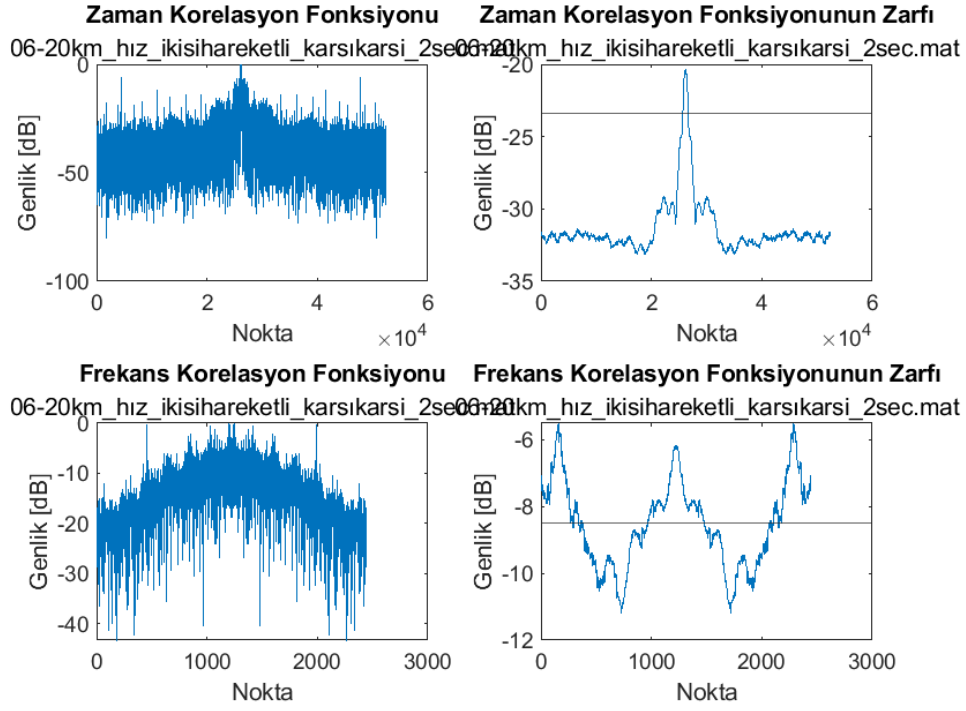
Şekil 5.20 05-duran_15metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



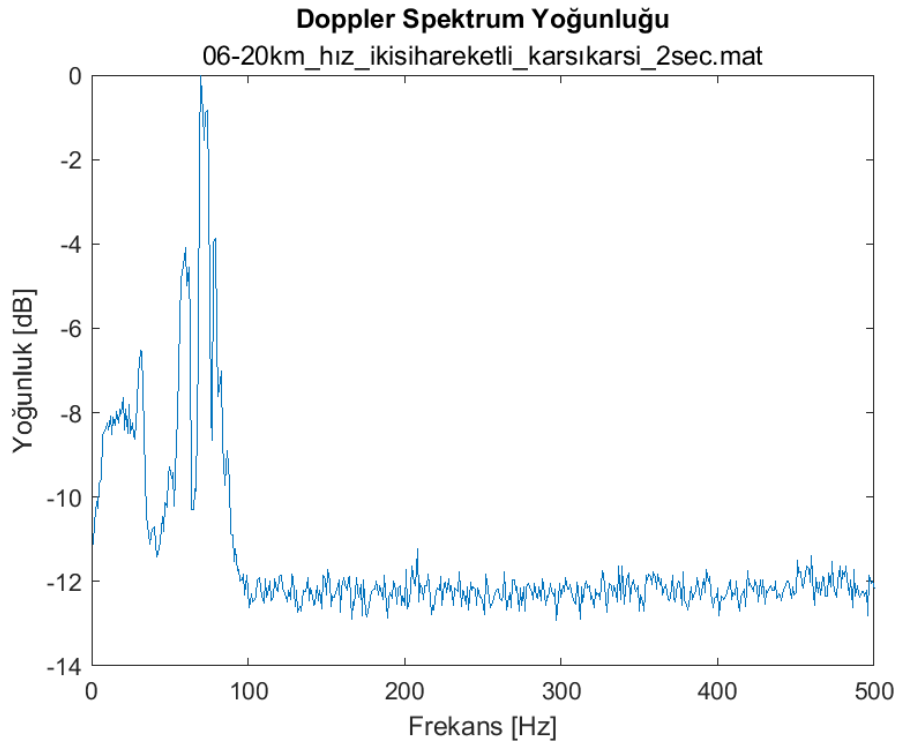
Şekil 5.21 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun PDP grafiği



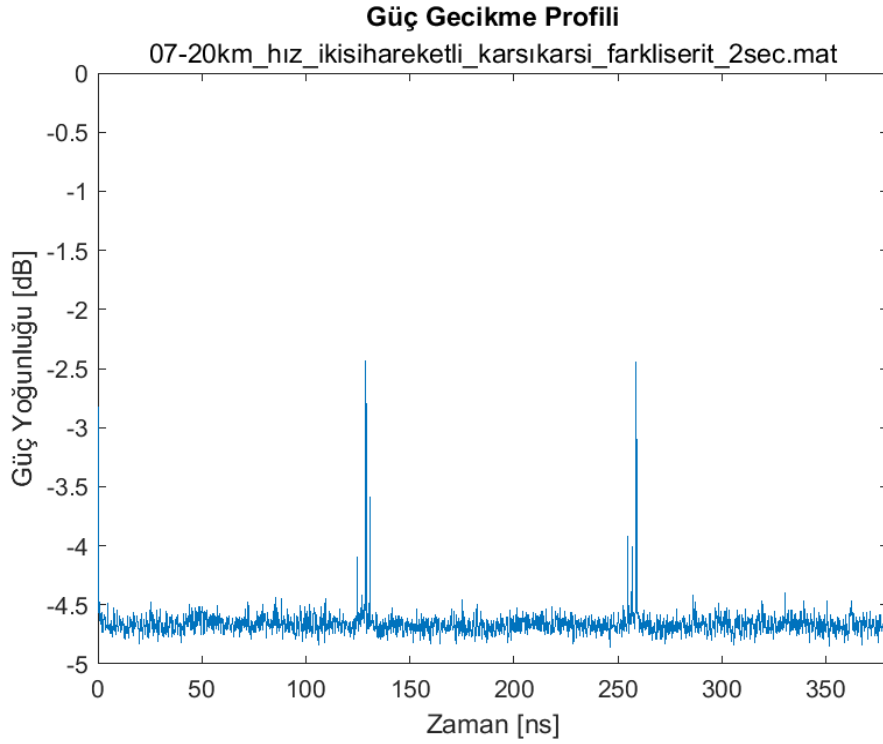
Şekil 5.22 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



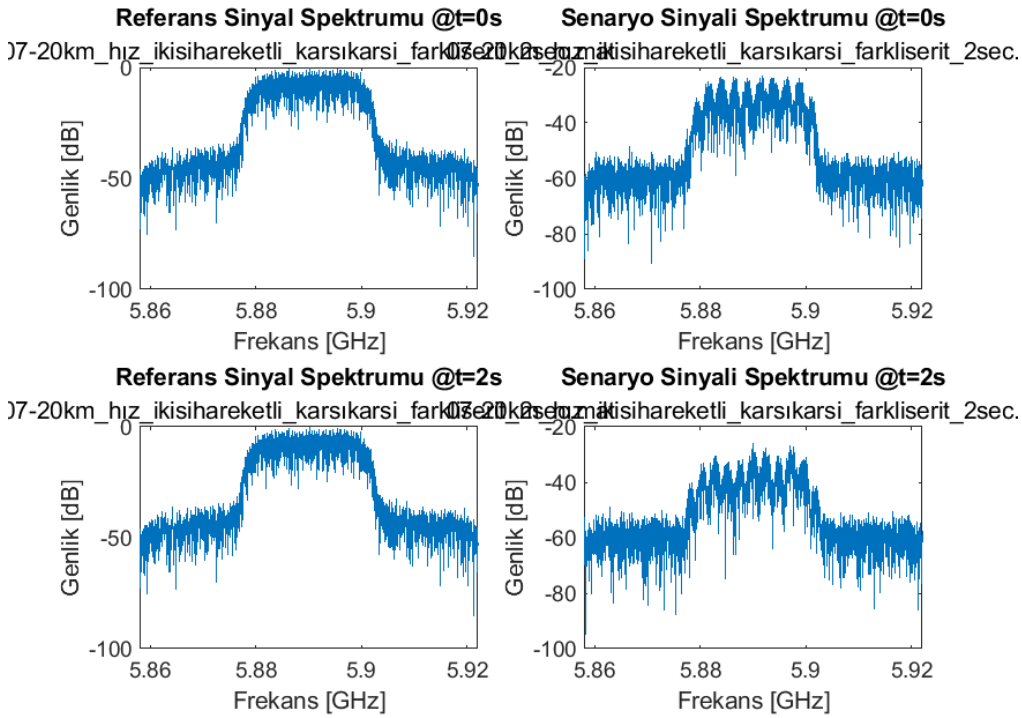
Şekil 5.23 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



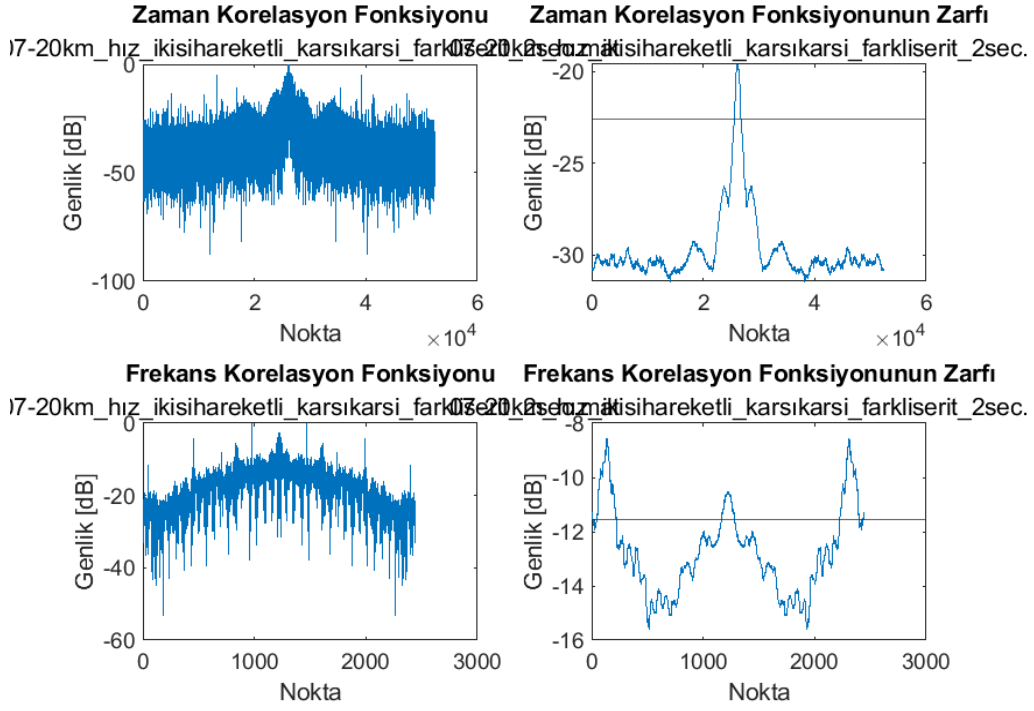
Şekil 5.24 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



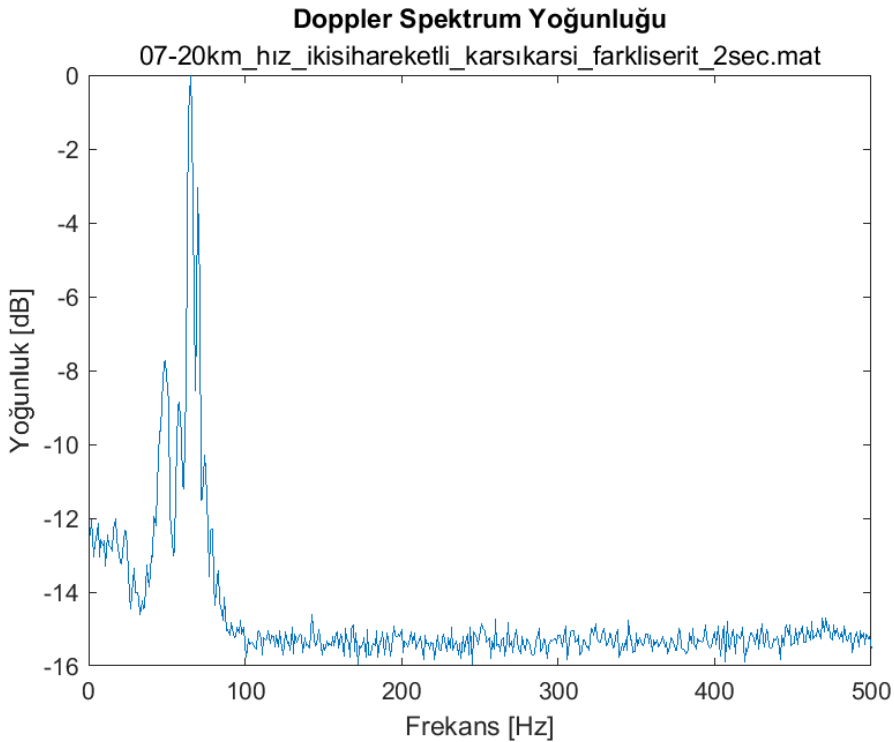
Şekil 5.25 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_farkliserit_2sec senaryosunun PDP grafiği



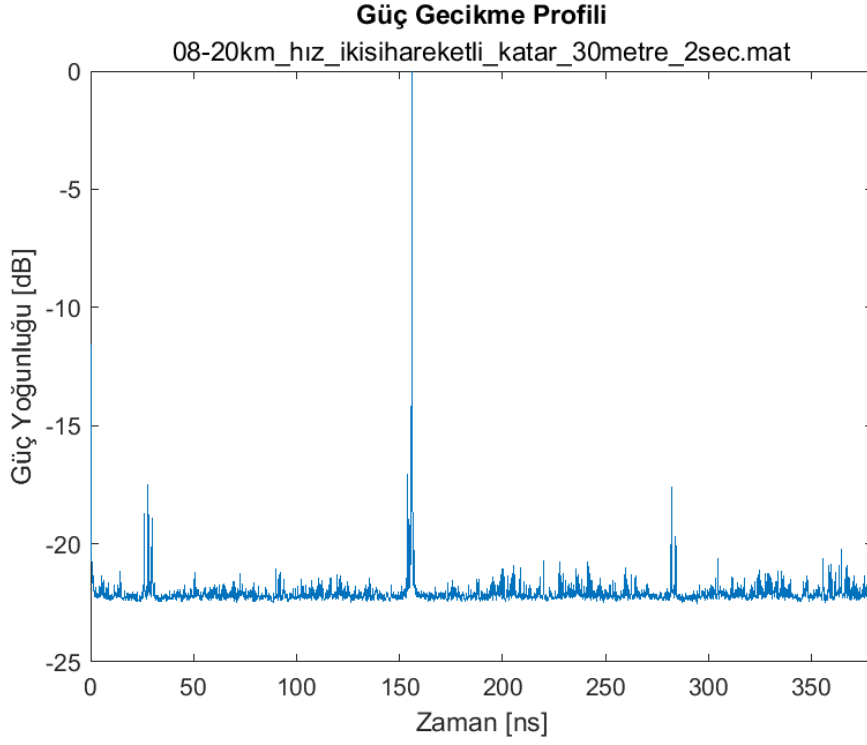
Şekil 5.26 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



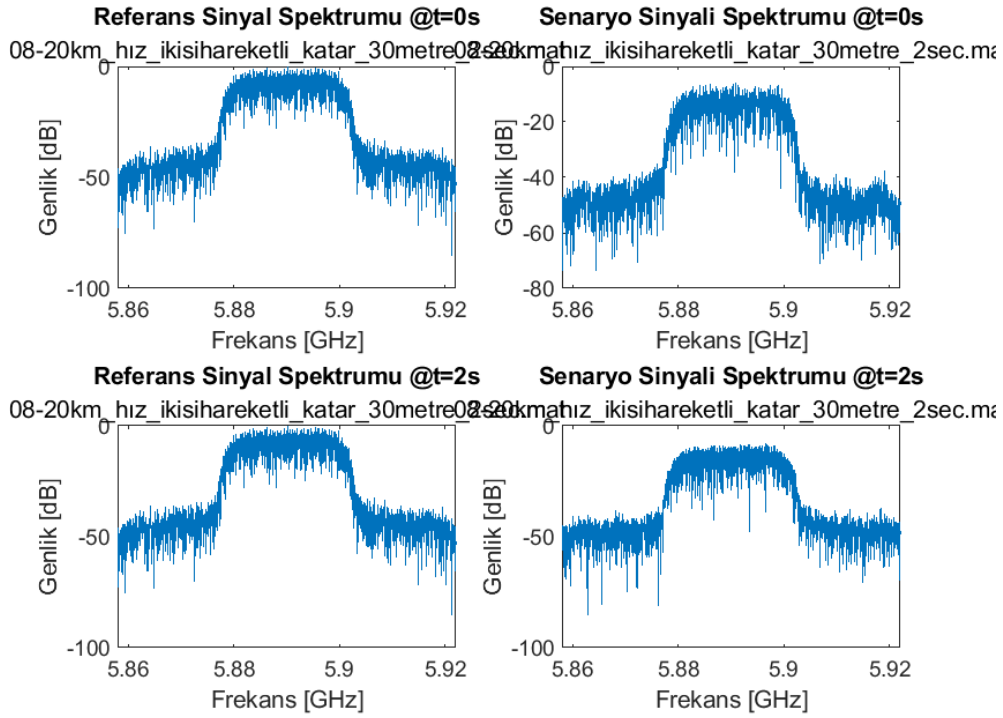
Şekil 5.27 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



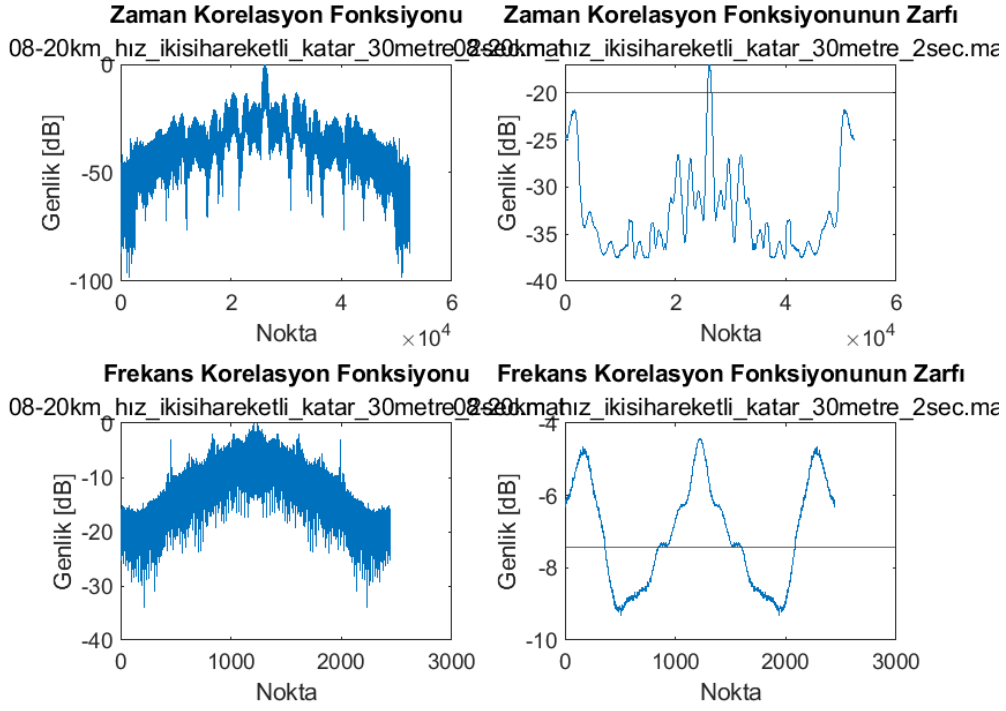
Şekil 5.28 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_fakrliserit_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



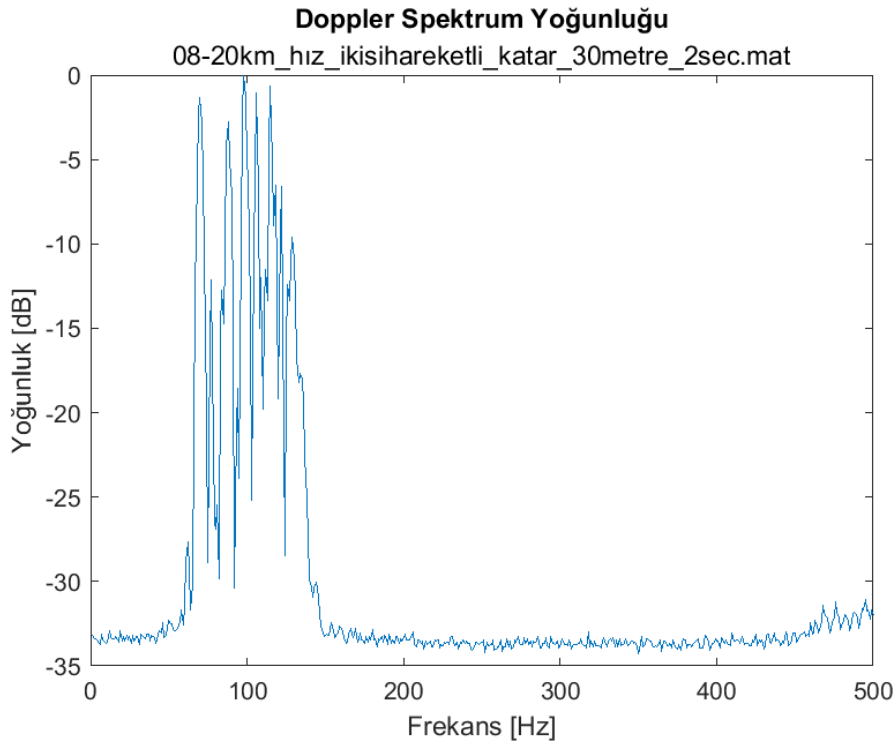
Şekil 5.29 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun PDP grafiği



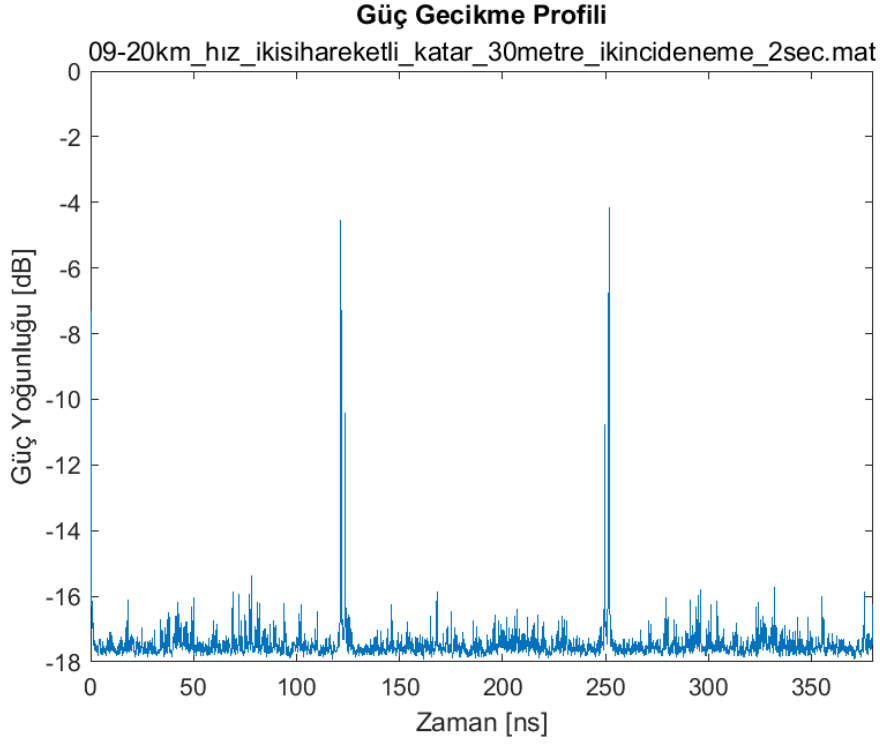
Şekil 5.30 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



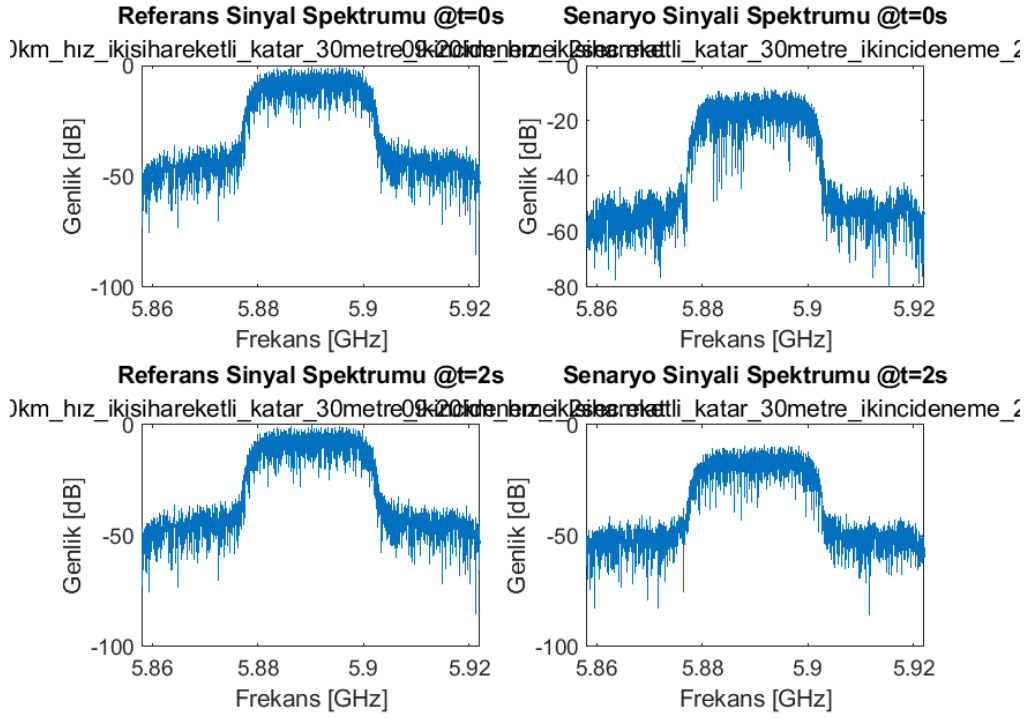
Şekil 5.31 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



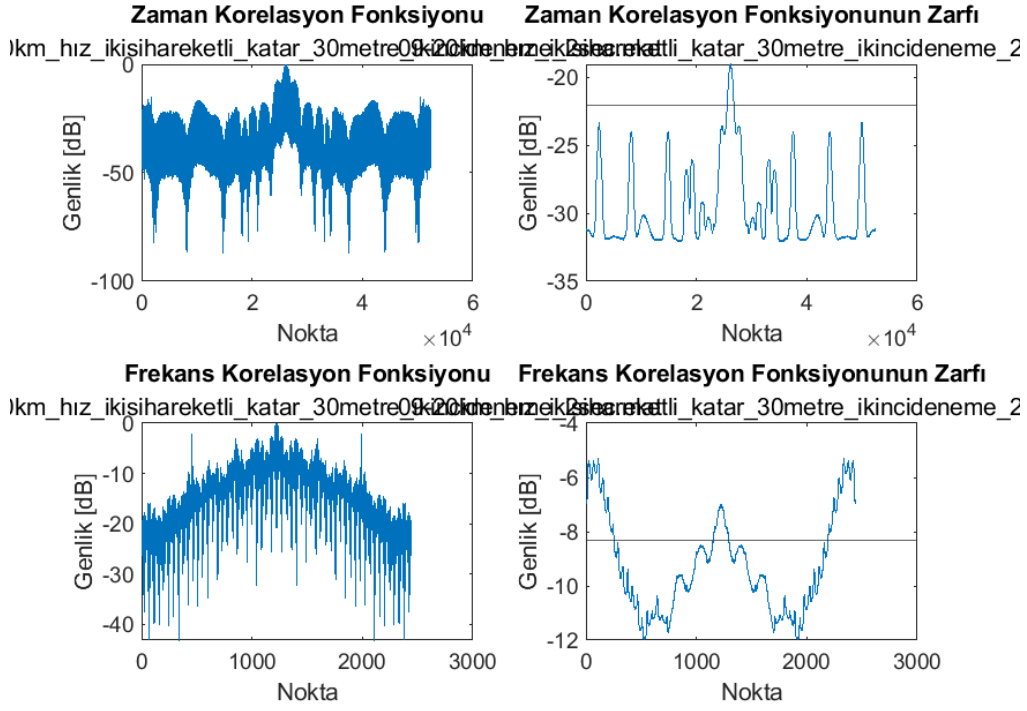
Şekil 5.32 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



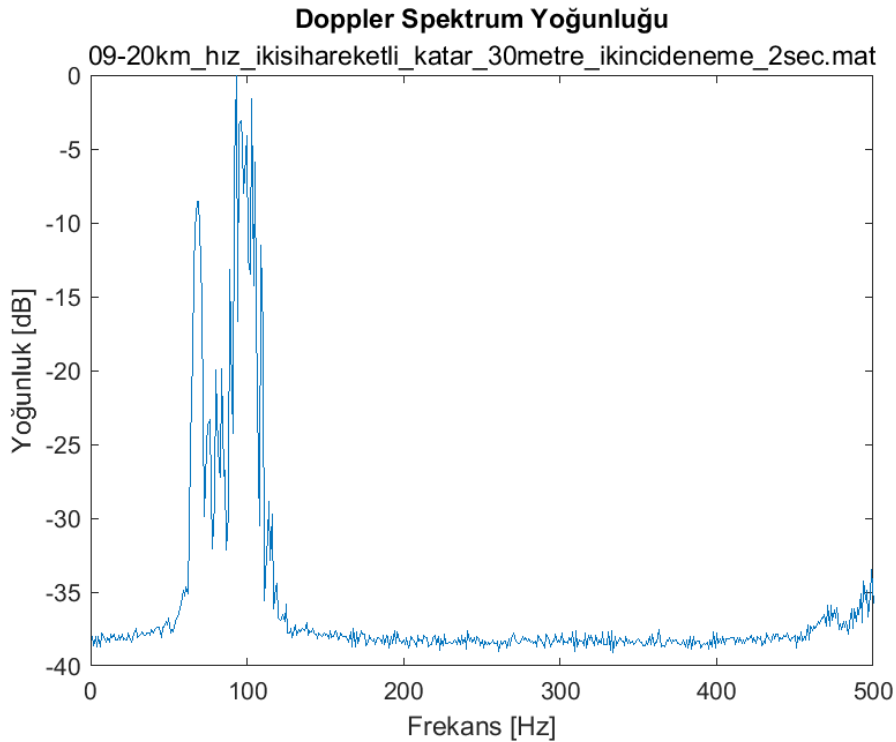
Şekil 5.33 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun PDP grafiği



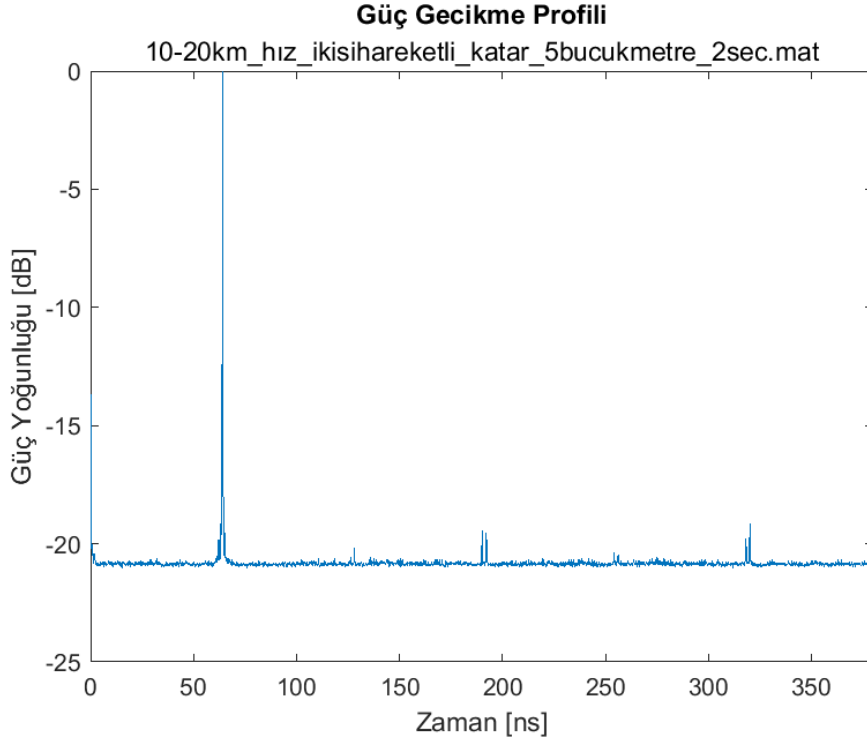
Şekil 5.34 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



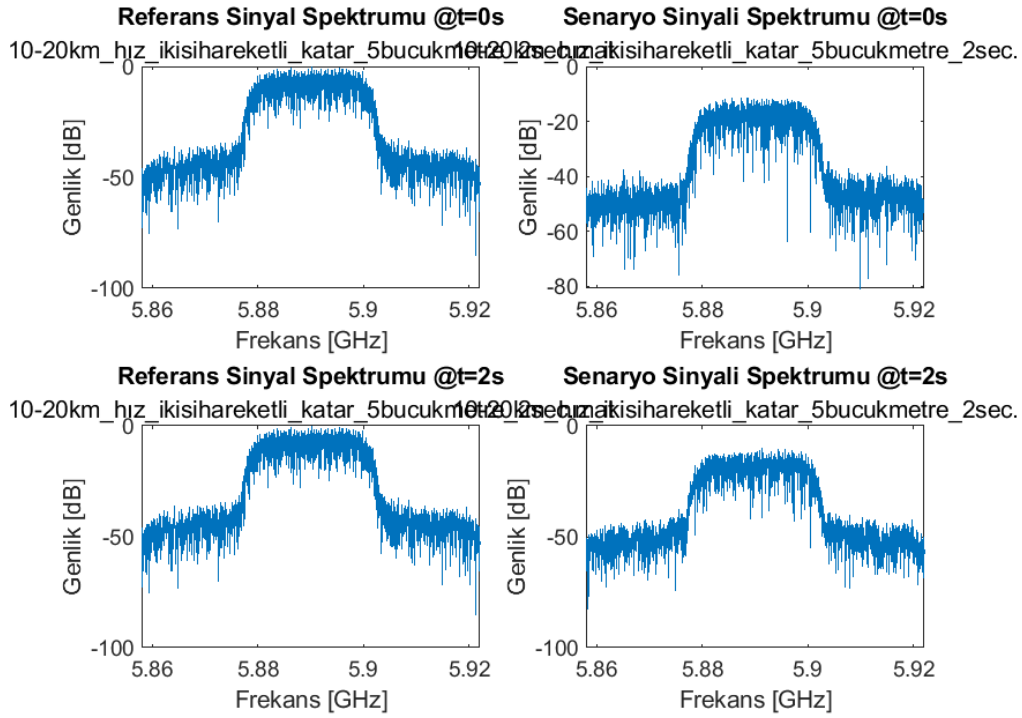
Şekil 5.35 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



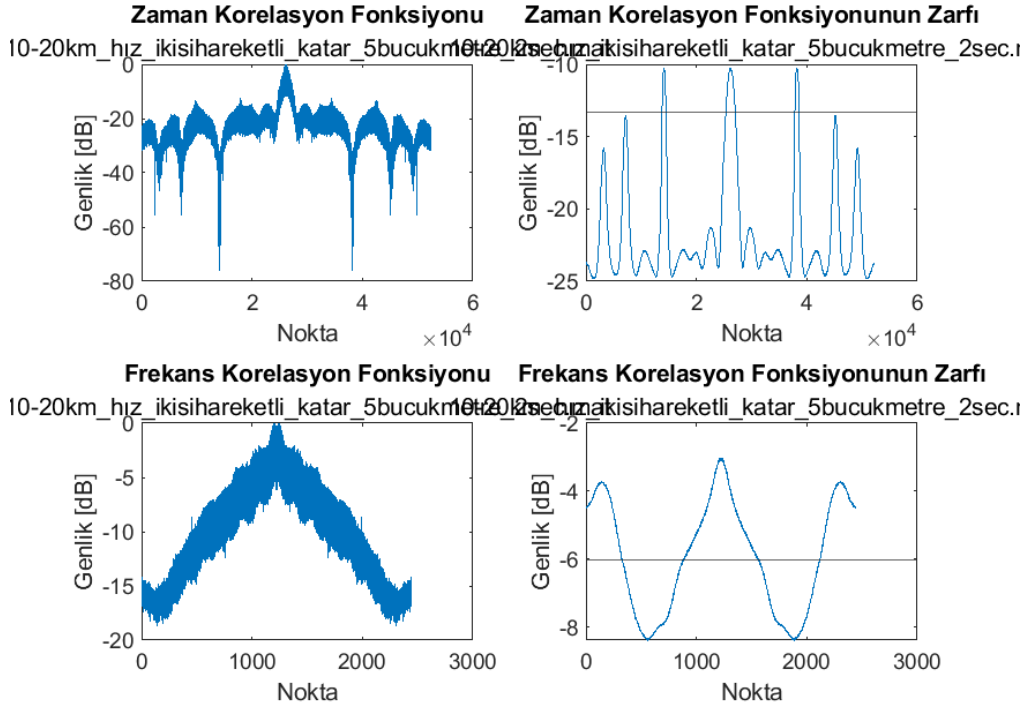
Şekil 5.36 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



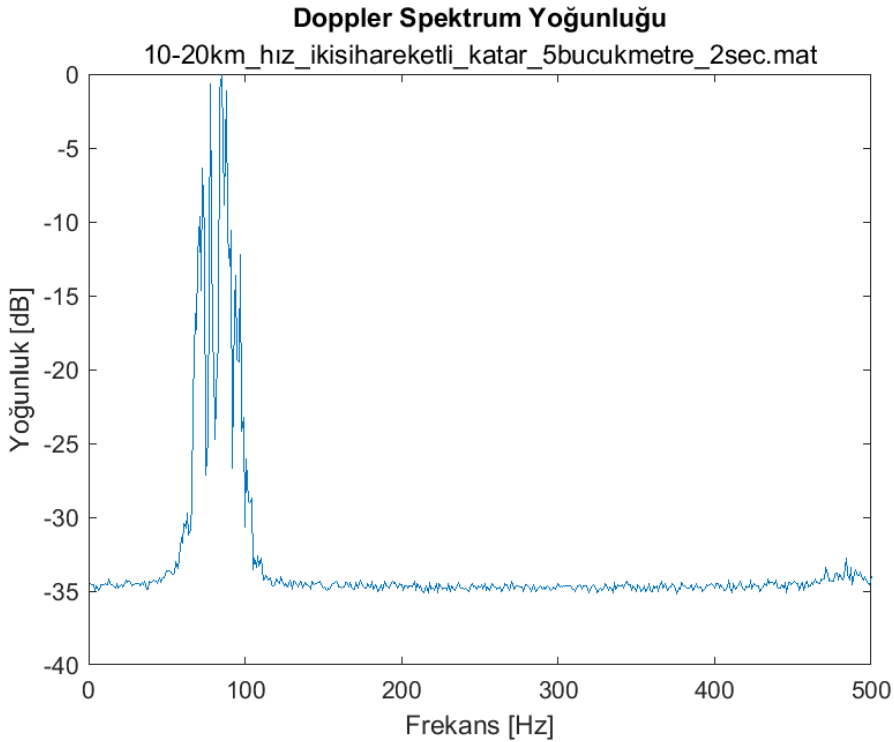
Şekil 5.37 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun PDP grafiği



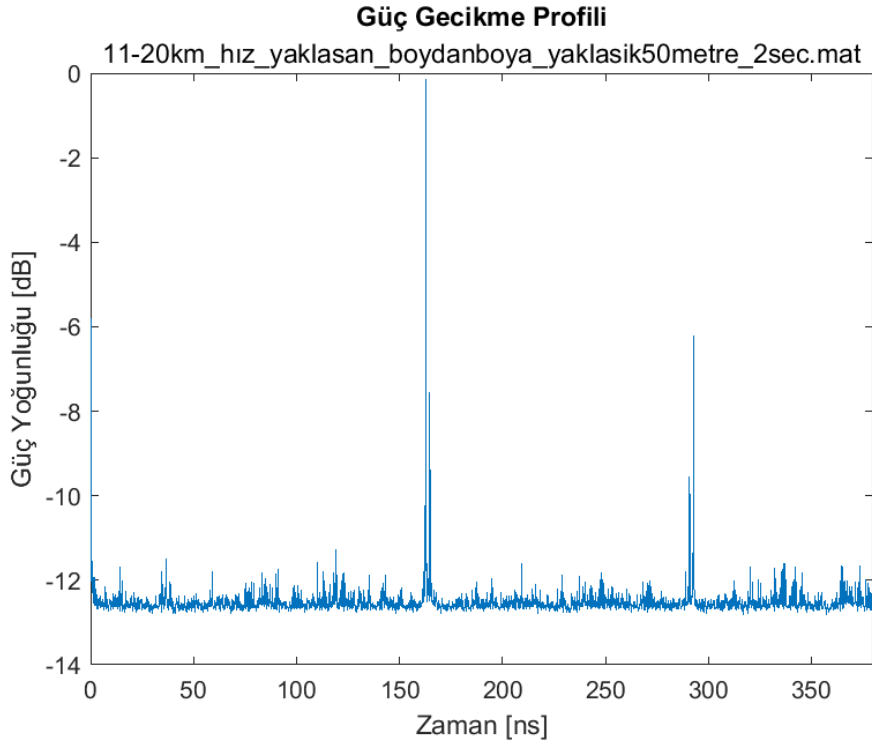
Şekil 5.38 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



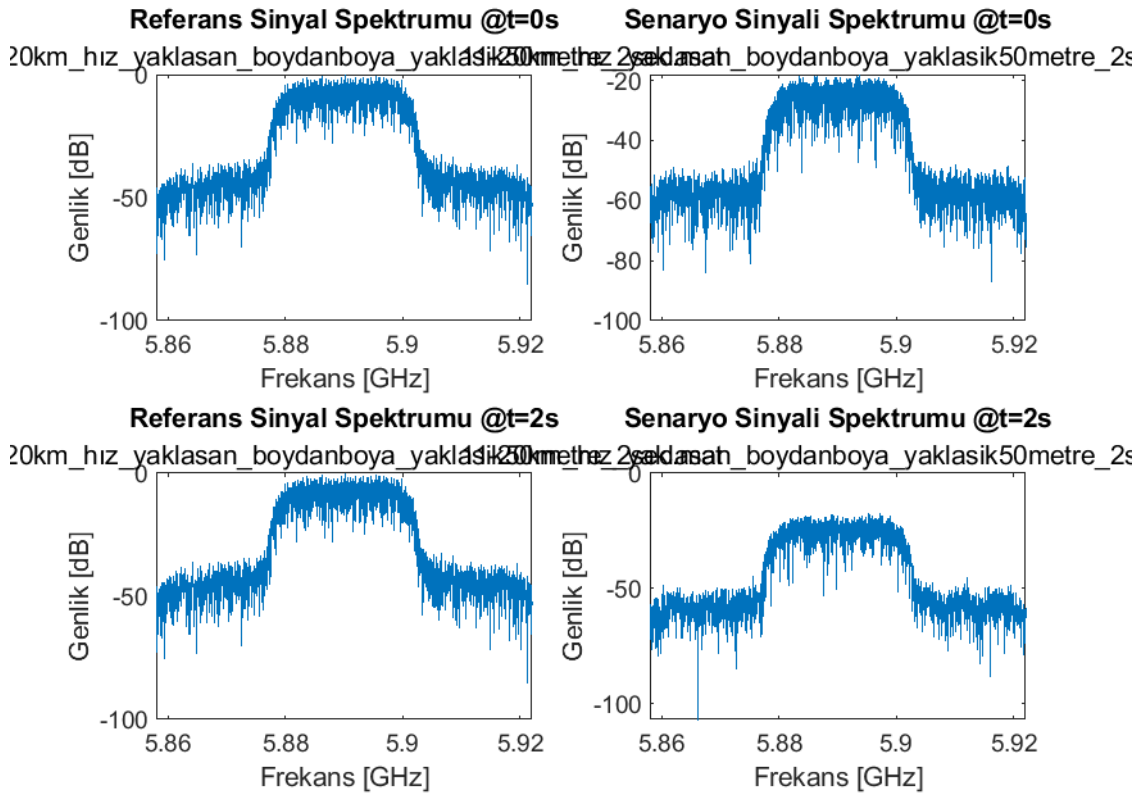
Şekil 5.39 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



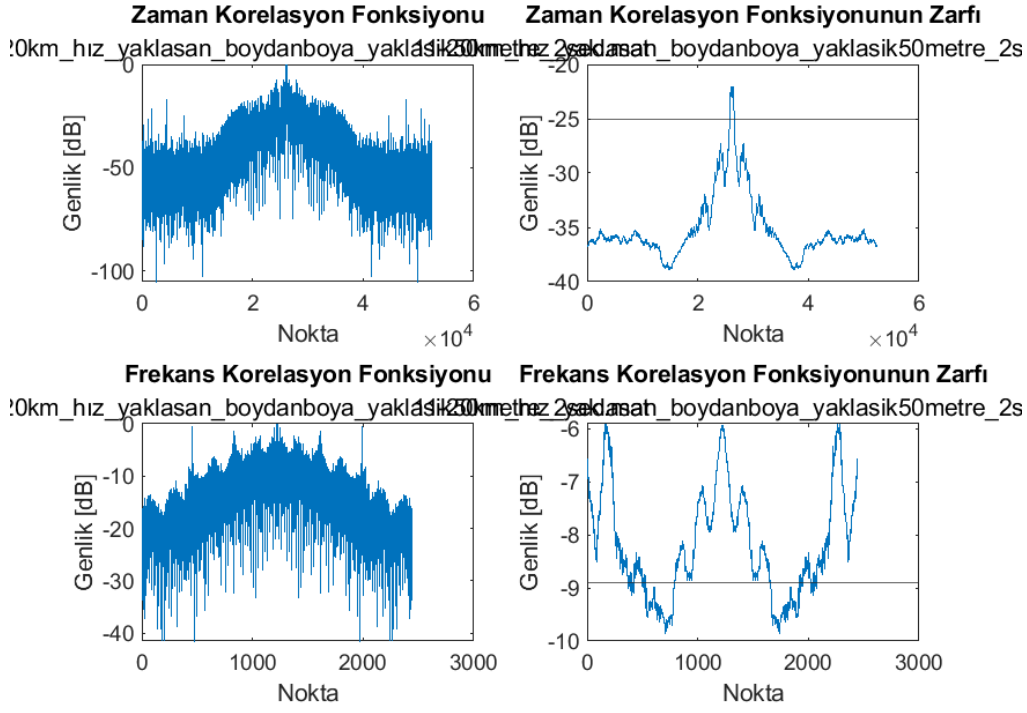
Şekil 5.40 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



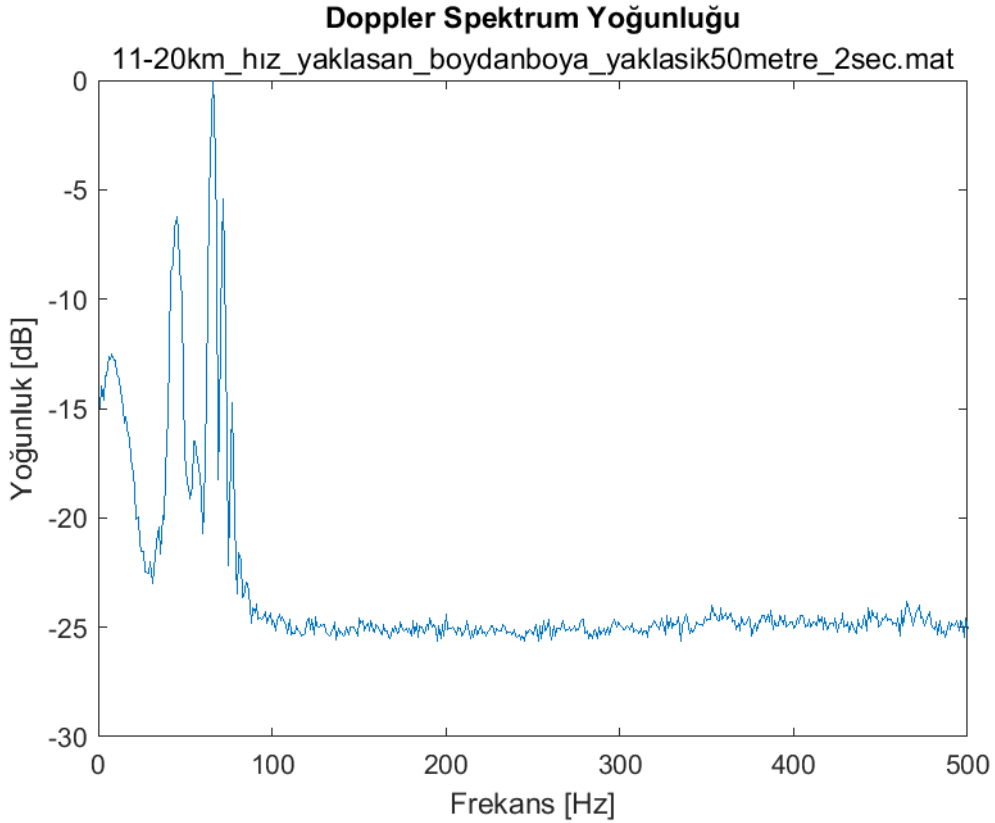
Şekil 5.41 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun PDP grafiği



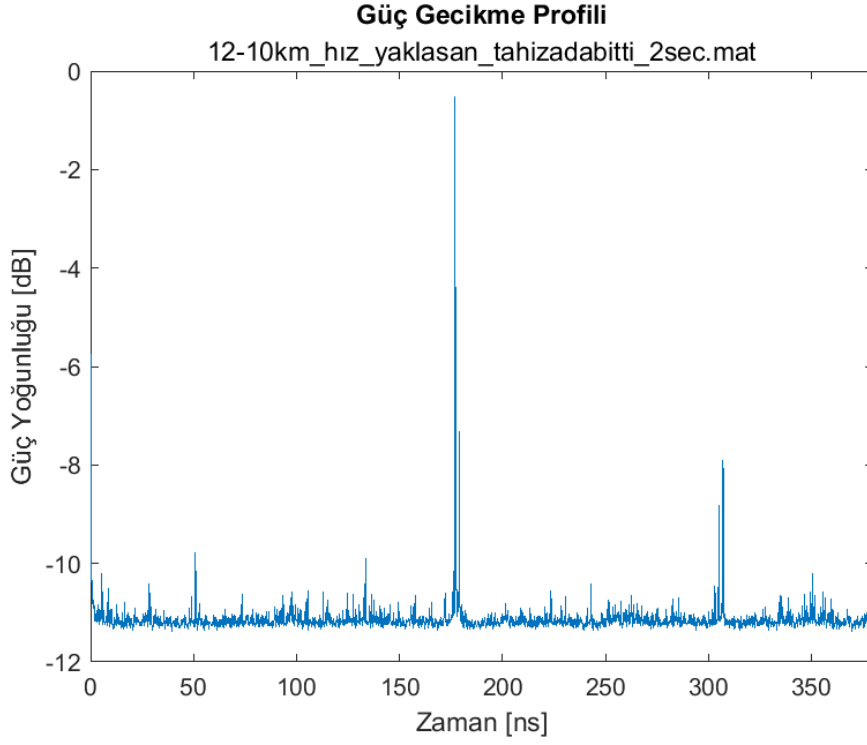
Şekil 5.42 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



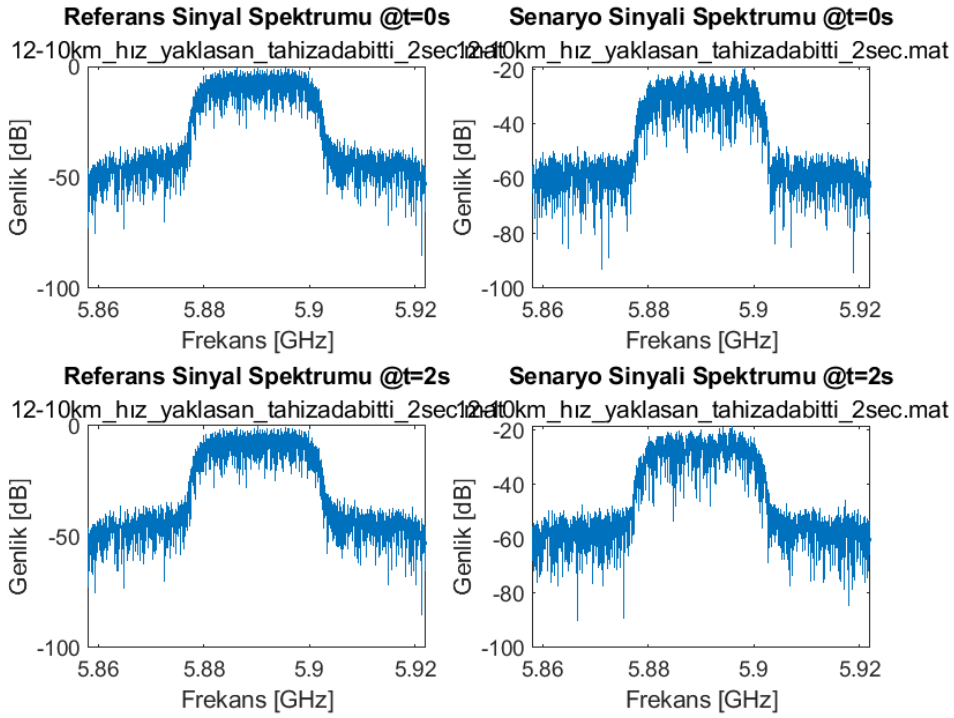
Şekil 5.43 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



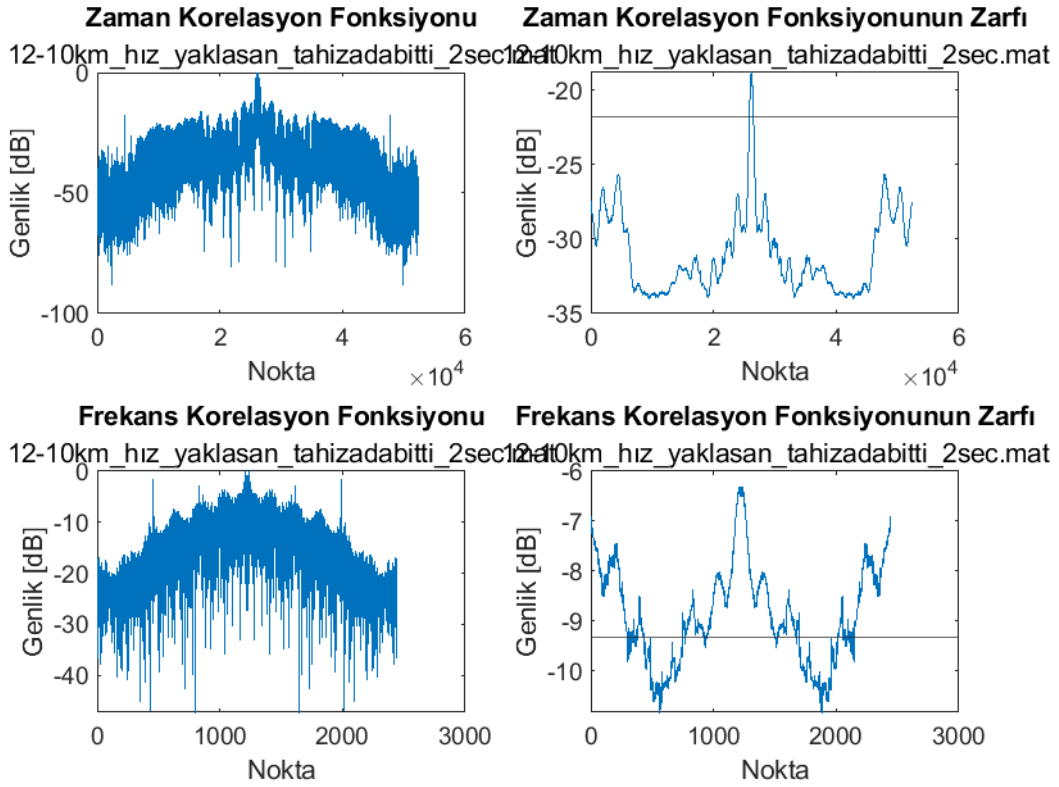
Şekil 5.44 11-20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



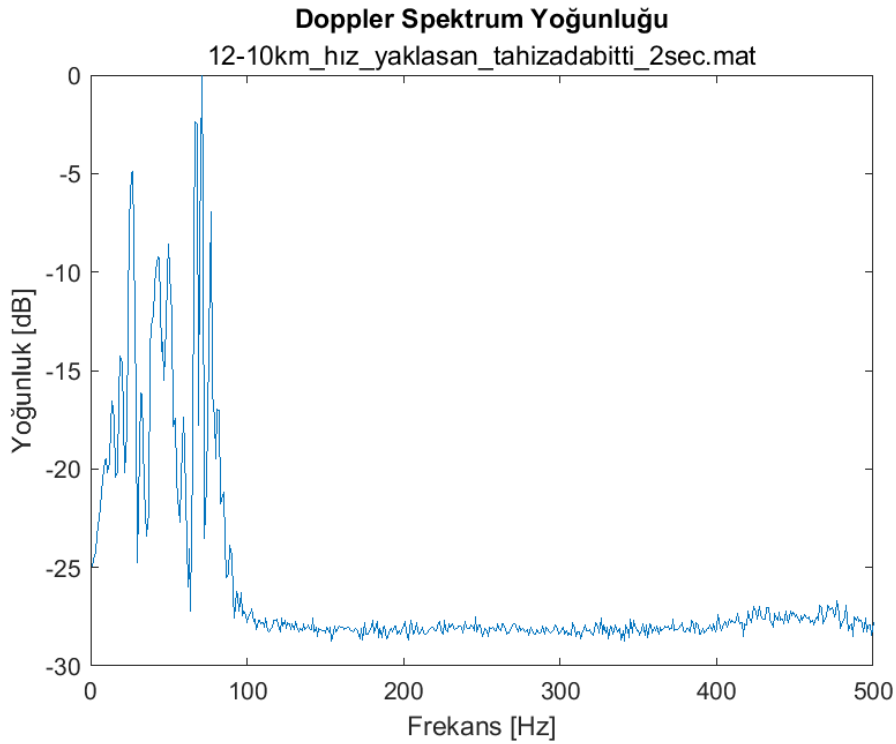
Şekil 5.45 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun PDP grafiği



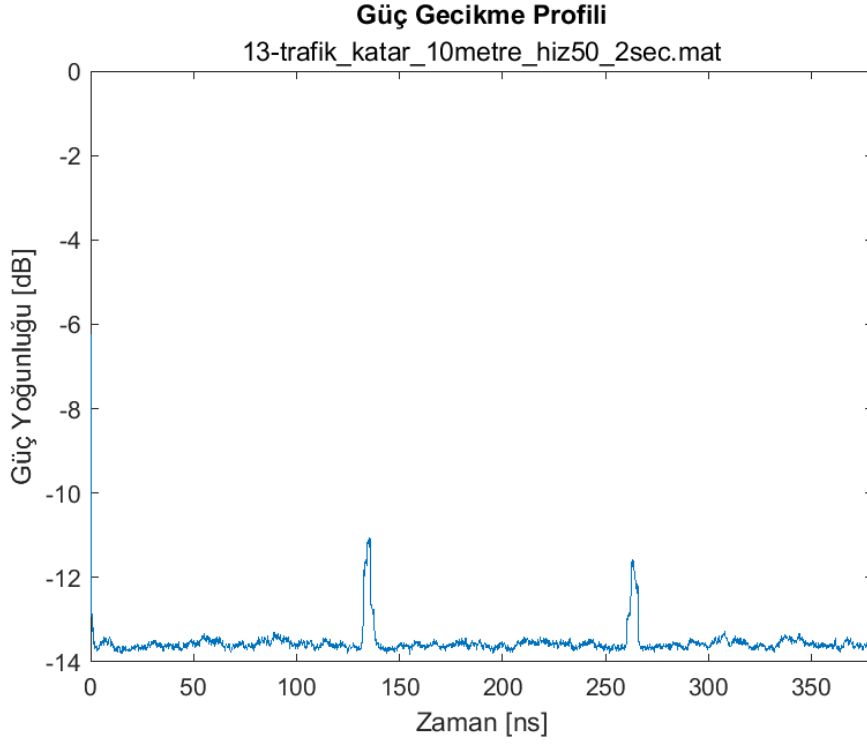
Şekil 5.46 12-20km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



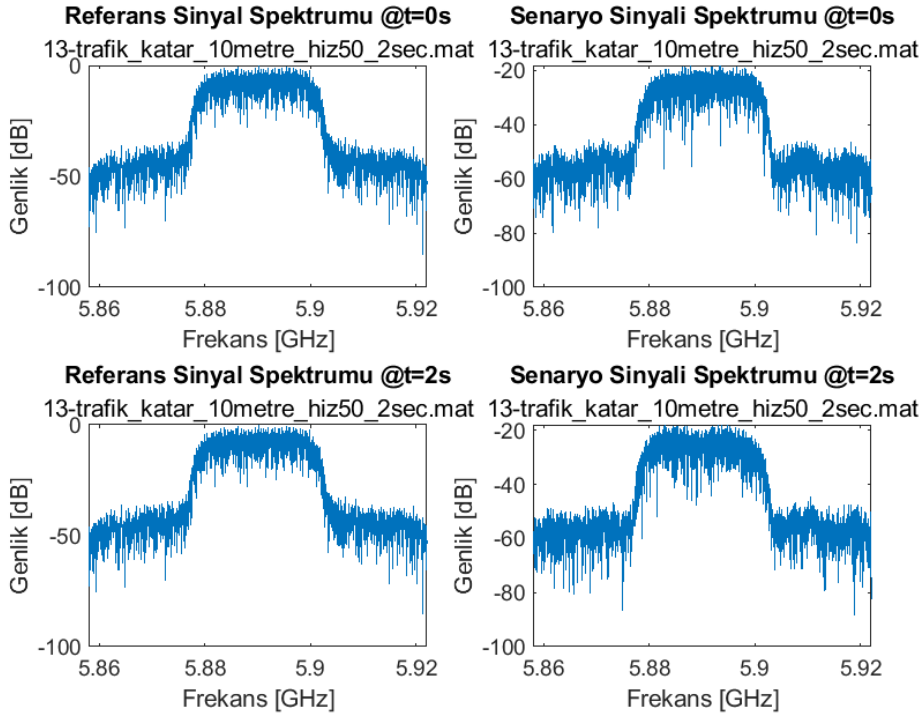
Şekil 5.47 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



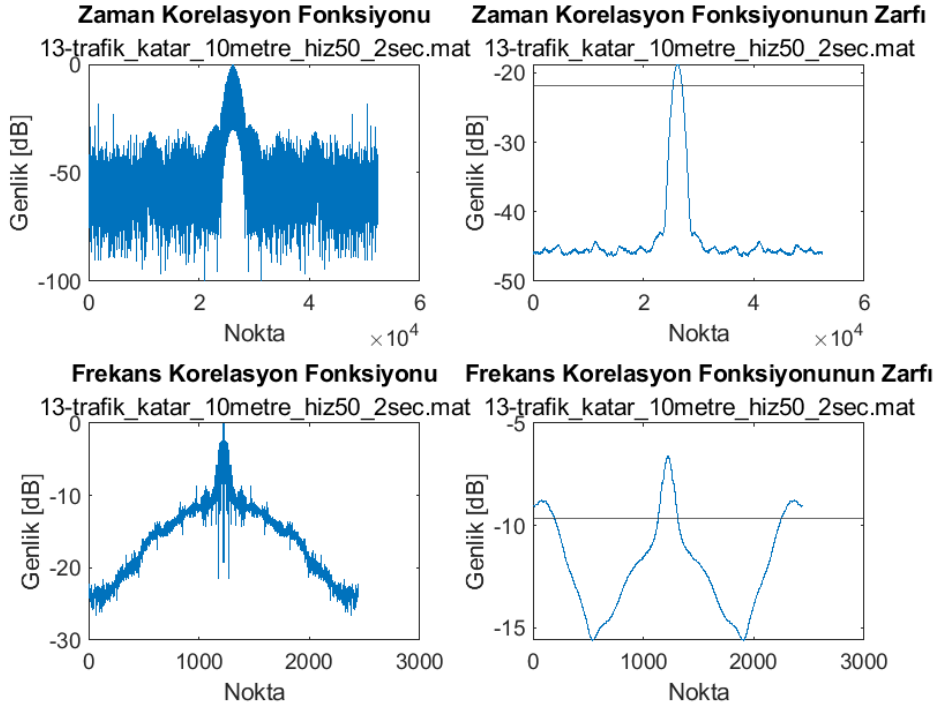
Şekil 5.48 12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



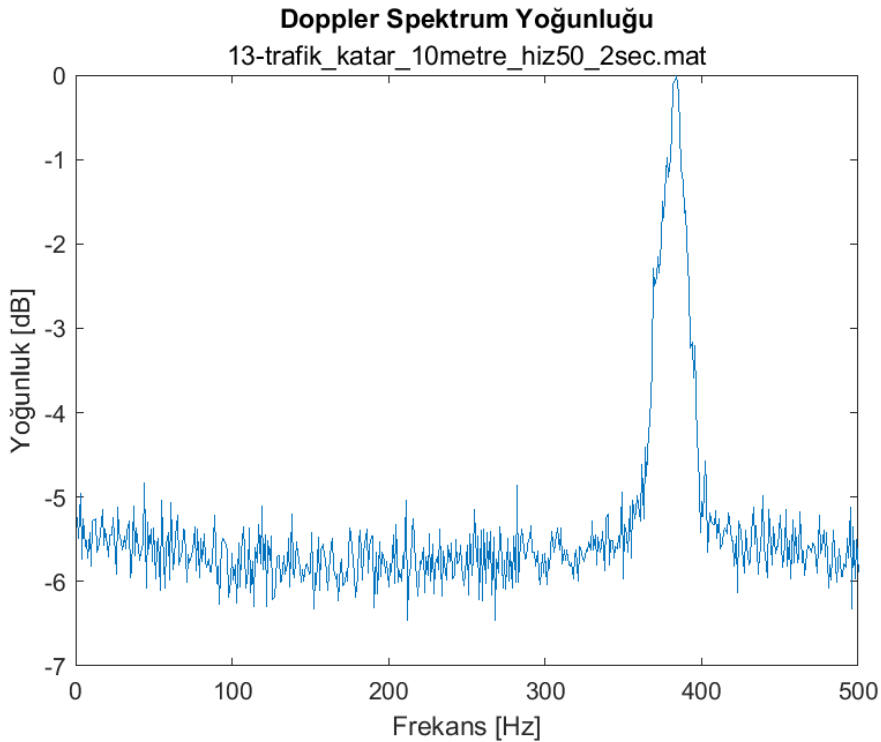
Şekil 5.49 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiği



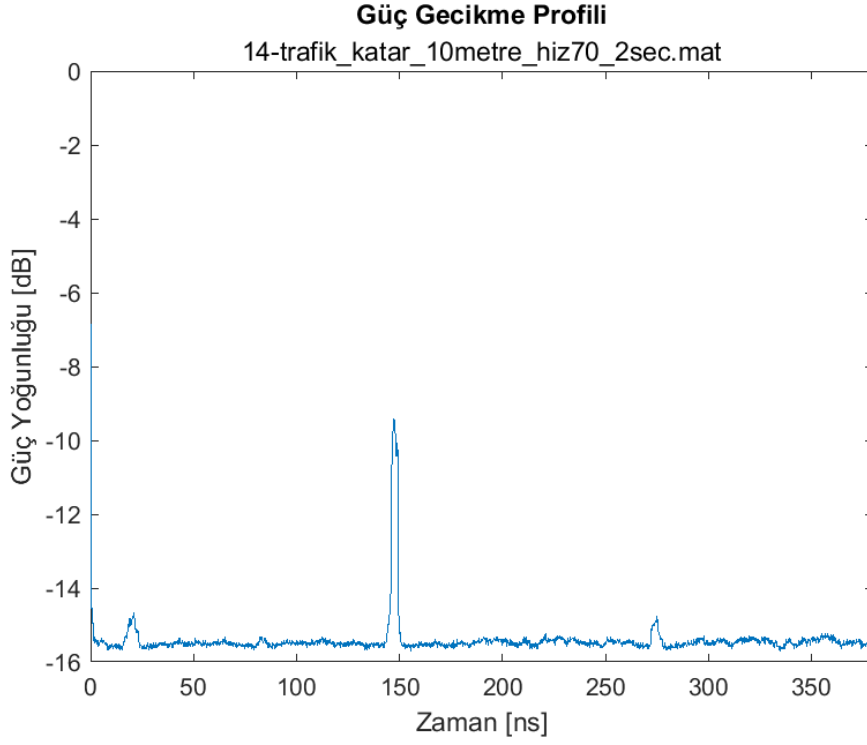
Şekil 5.50 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



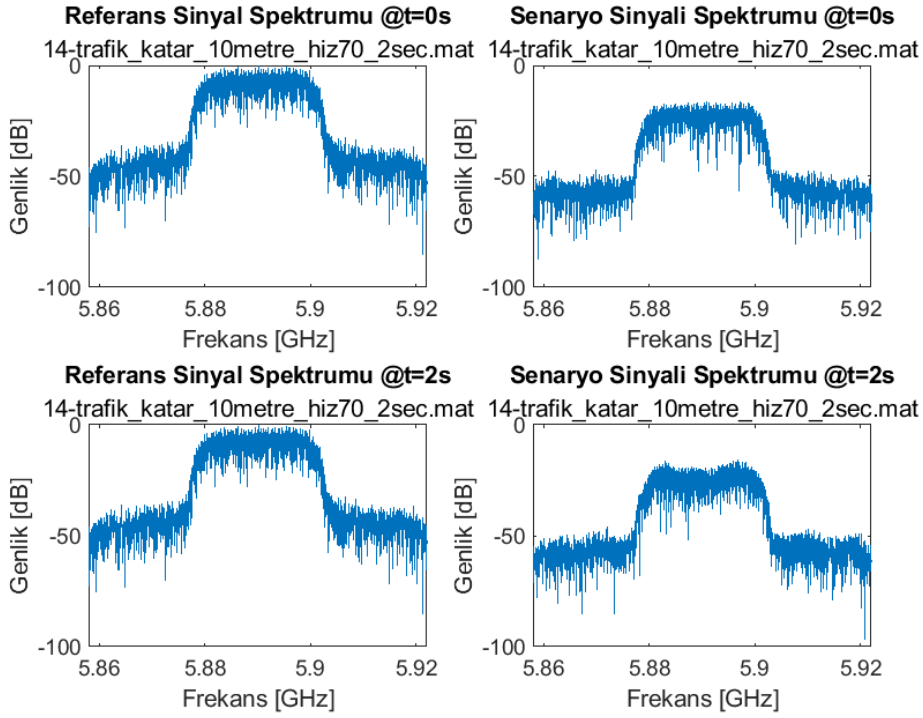
Şekil 5.51 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



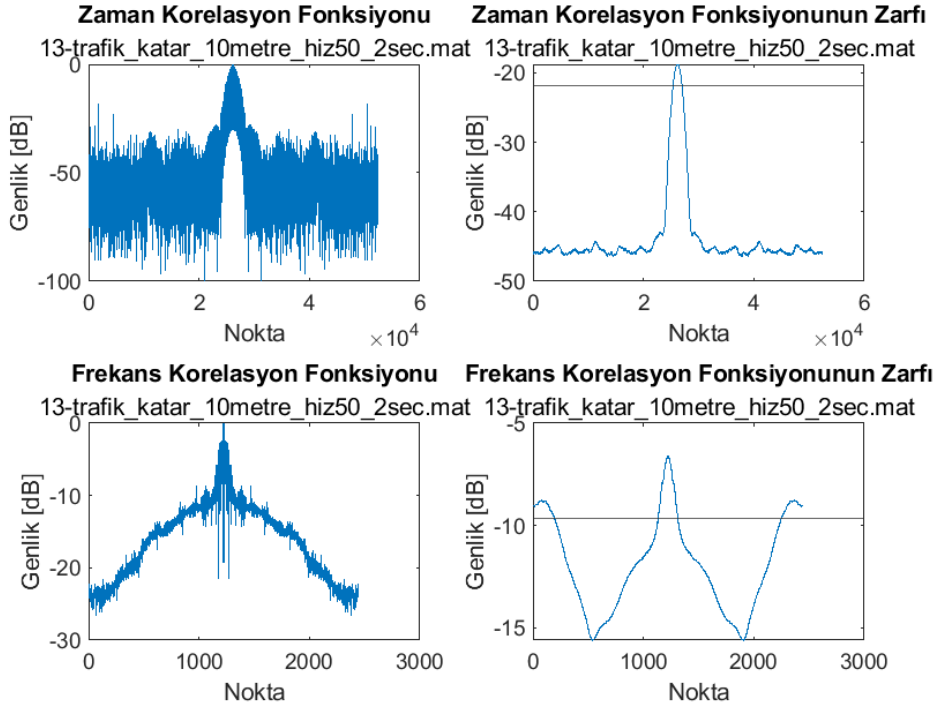
Şekil 5.52 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



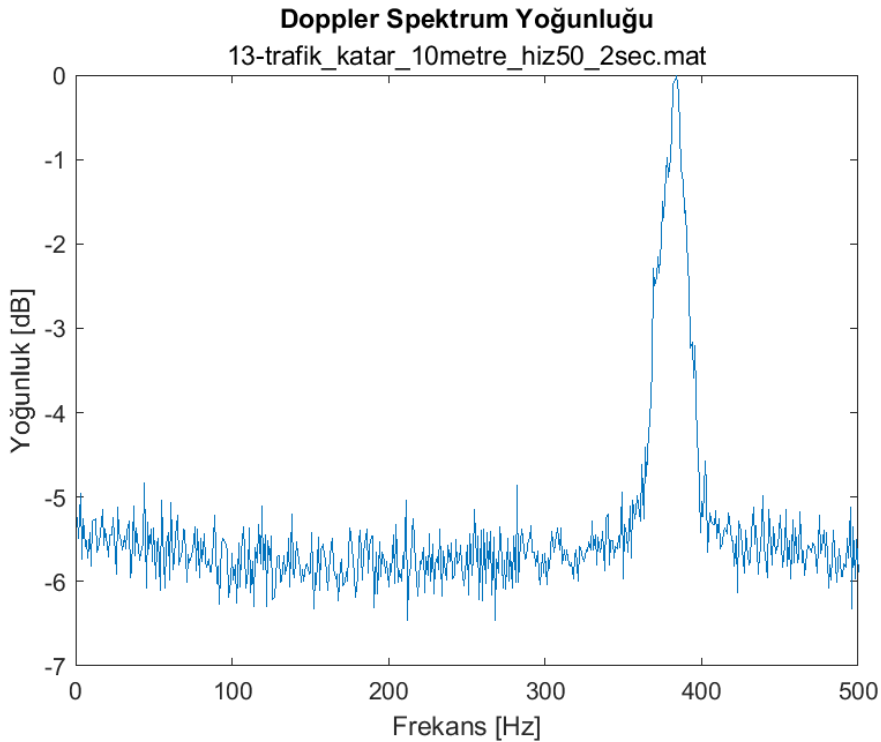
Şekil 5.53 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun PDP grafiği



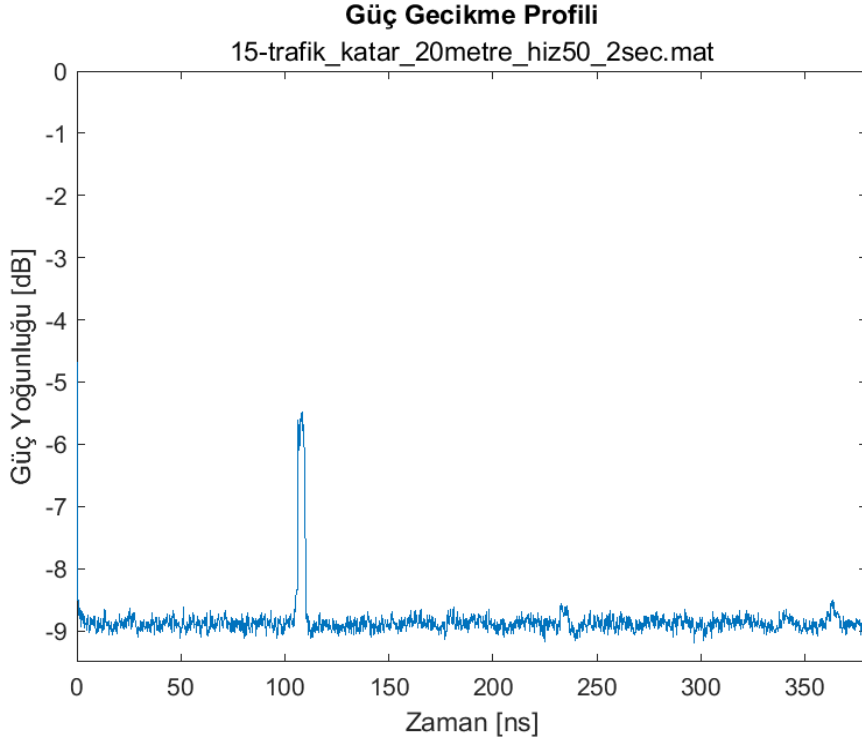
Şekil 5.54 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



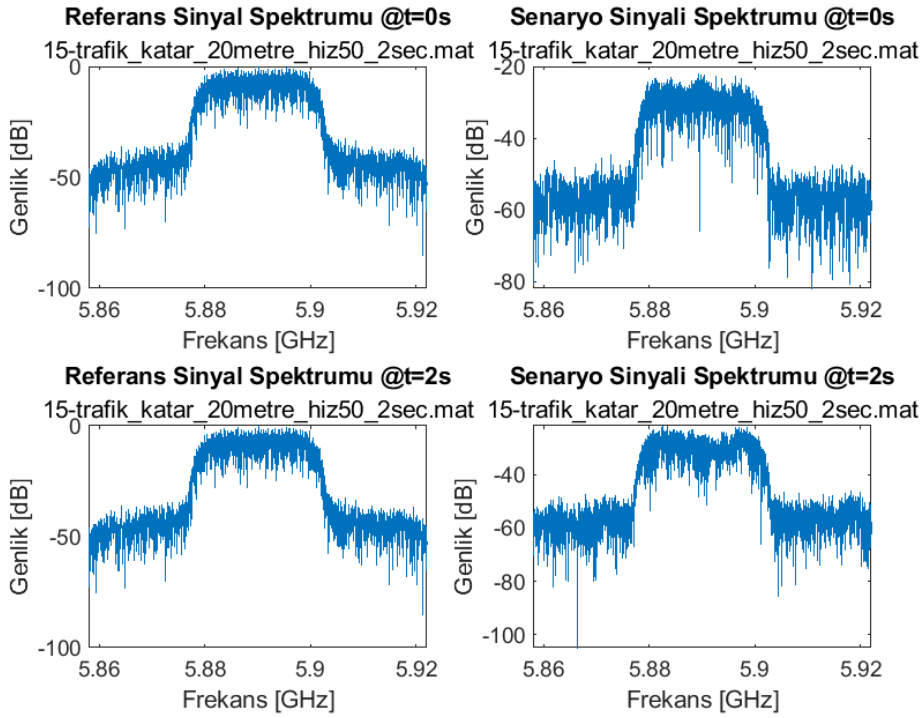
Şekil 5.55 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



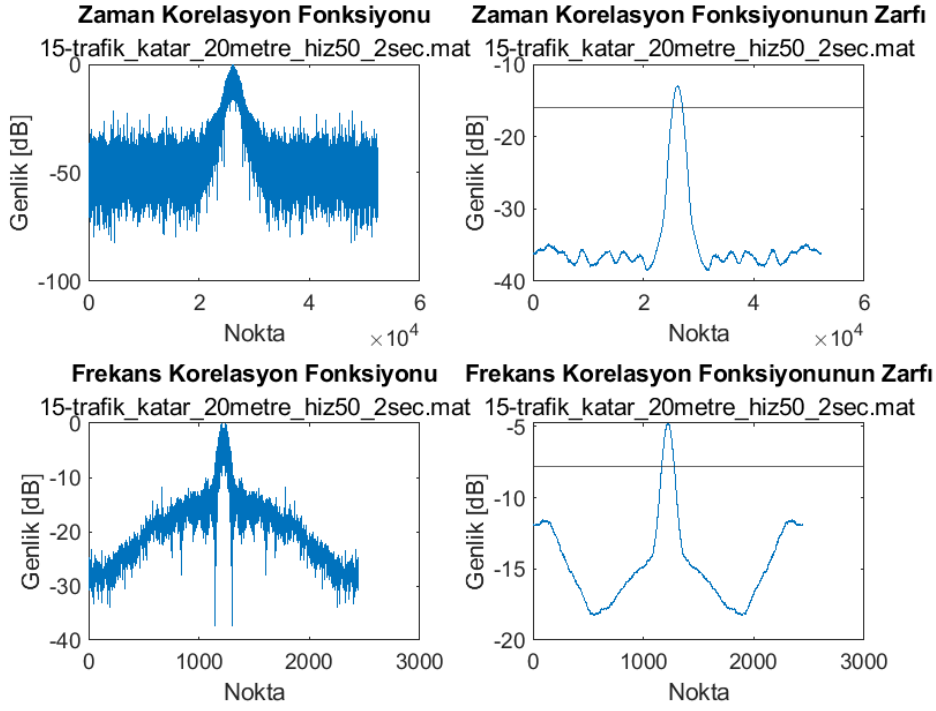
Şekil 5.56 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



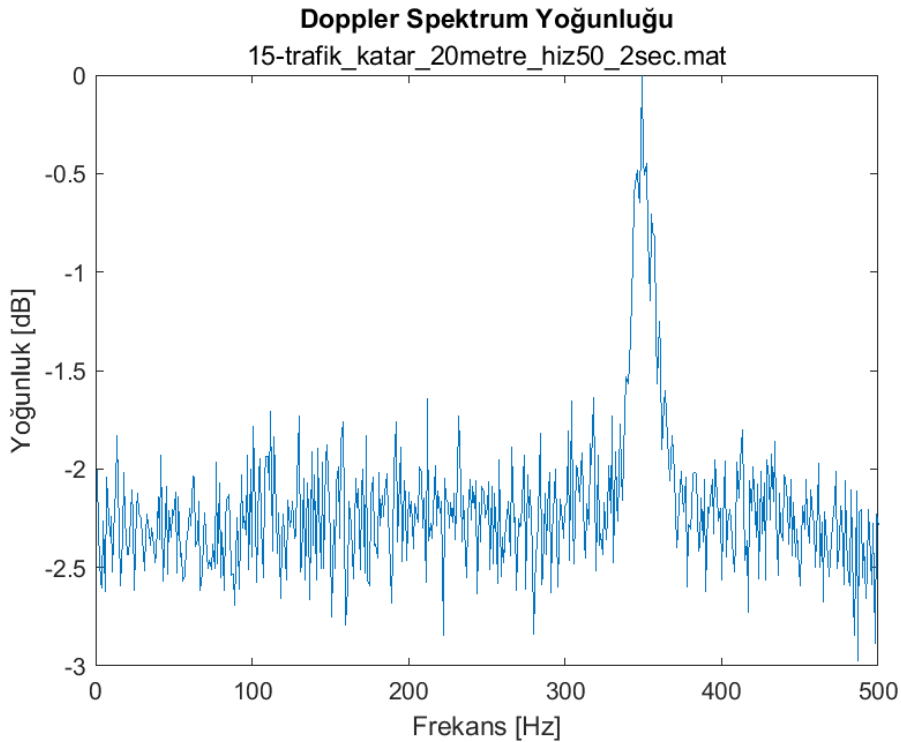
Şekil 5.57 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiği



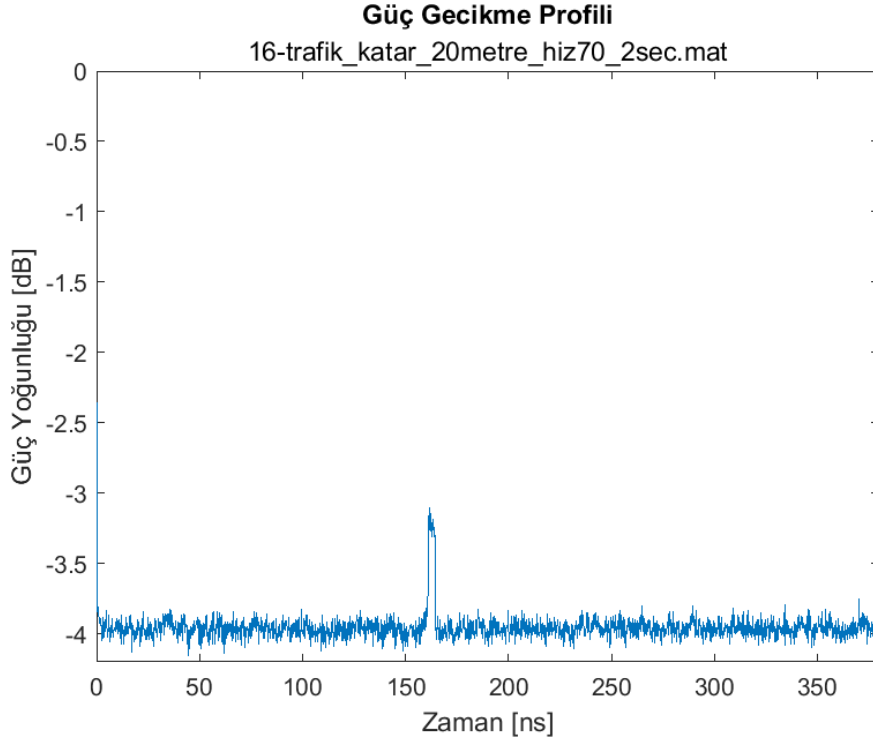
Şekil 5.58 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



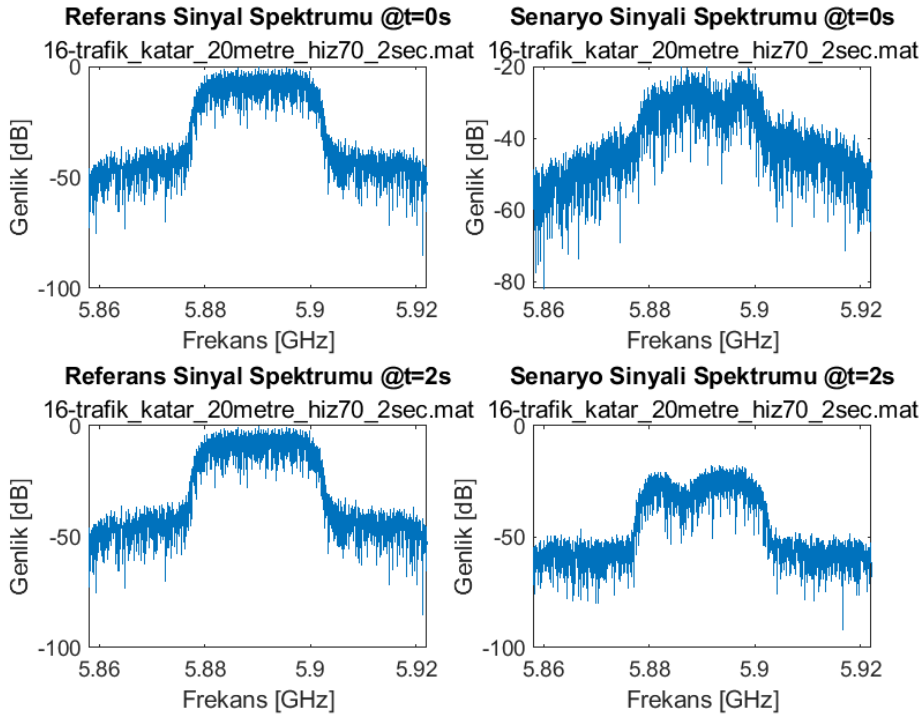
Şekil 5.59 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



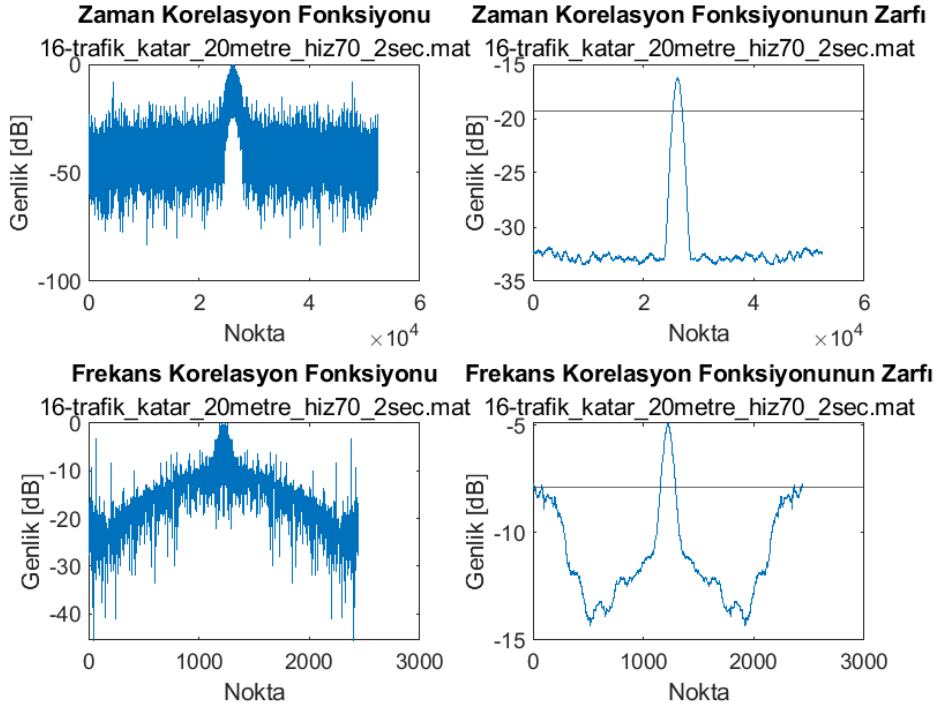
Şekil 5.60 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



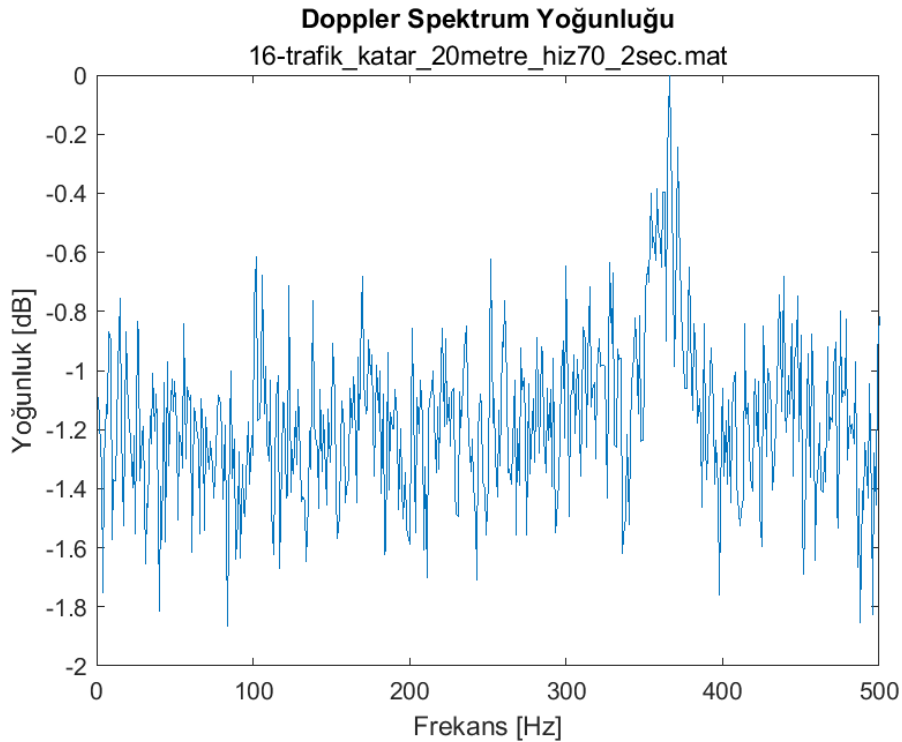
Şekil 5.61 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun PDP grafiği



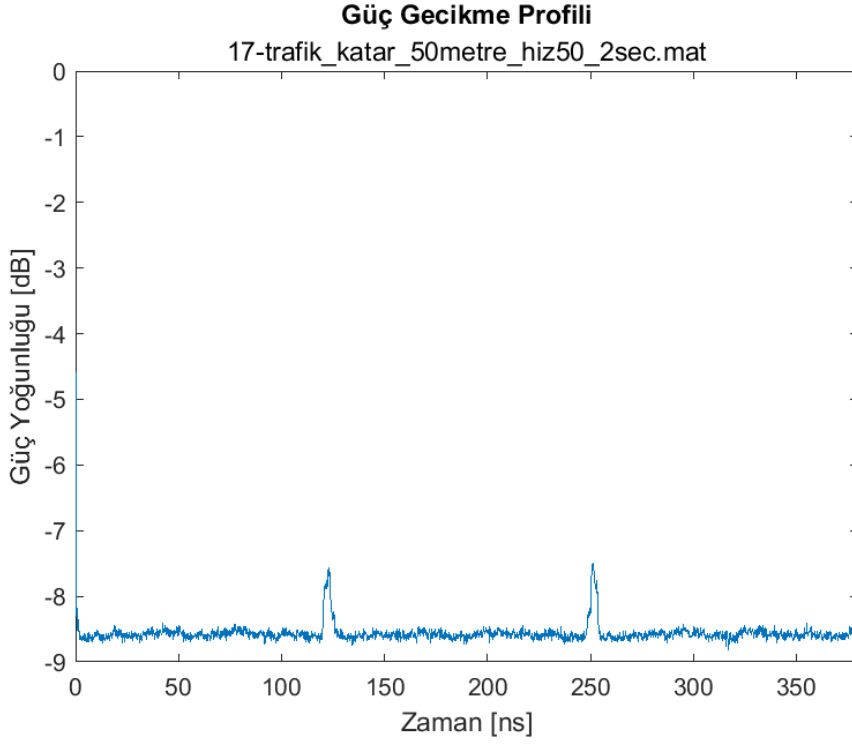
Şekil 5.62 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



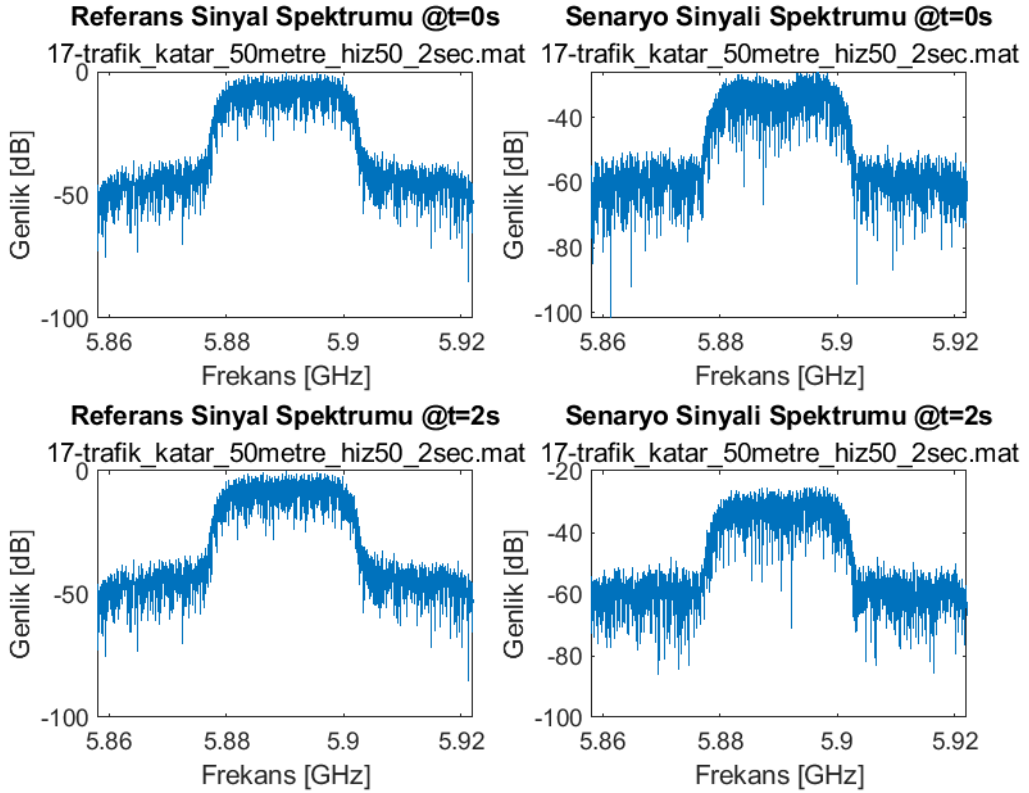
Şekil 5.63 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



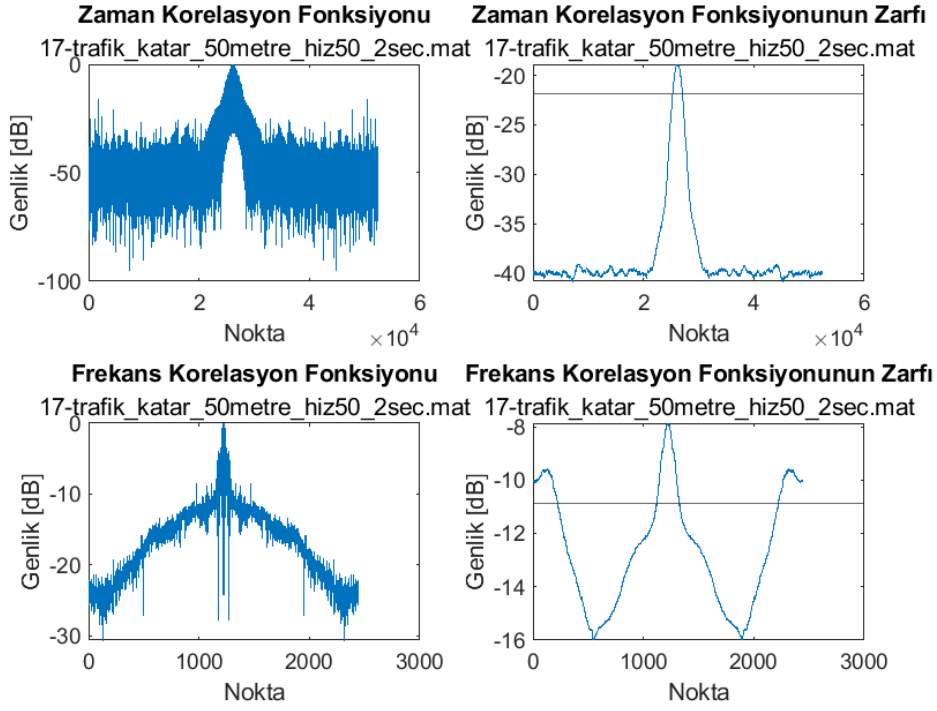
Şekil 5.64 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



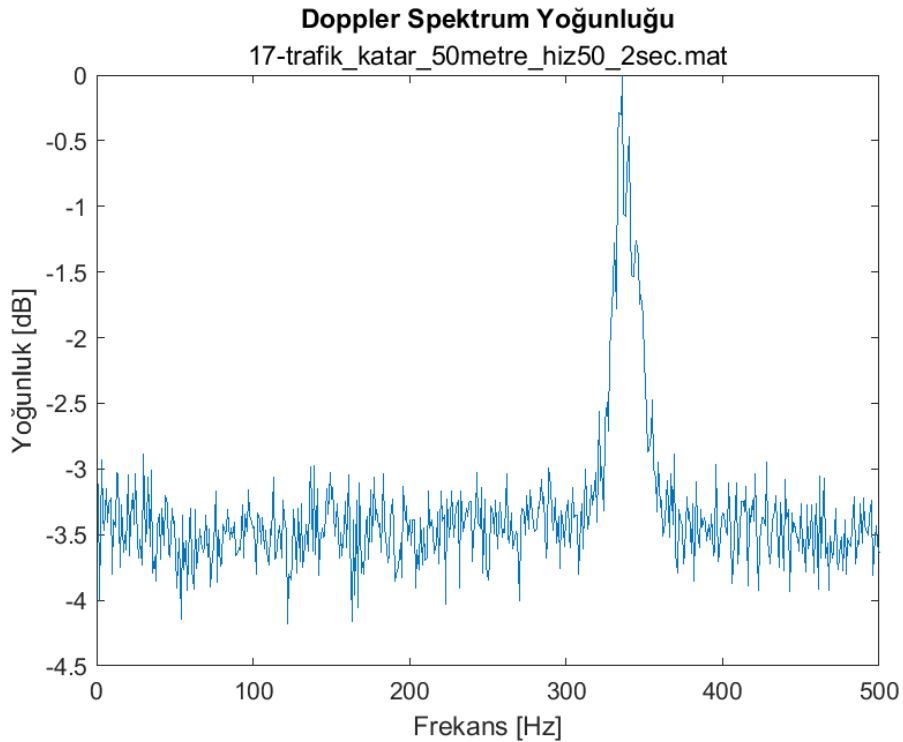
Şekil 5.65 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun PDP grafiği



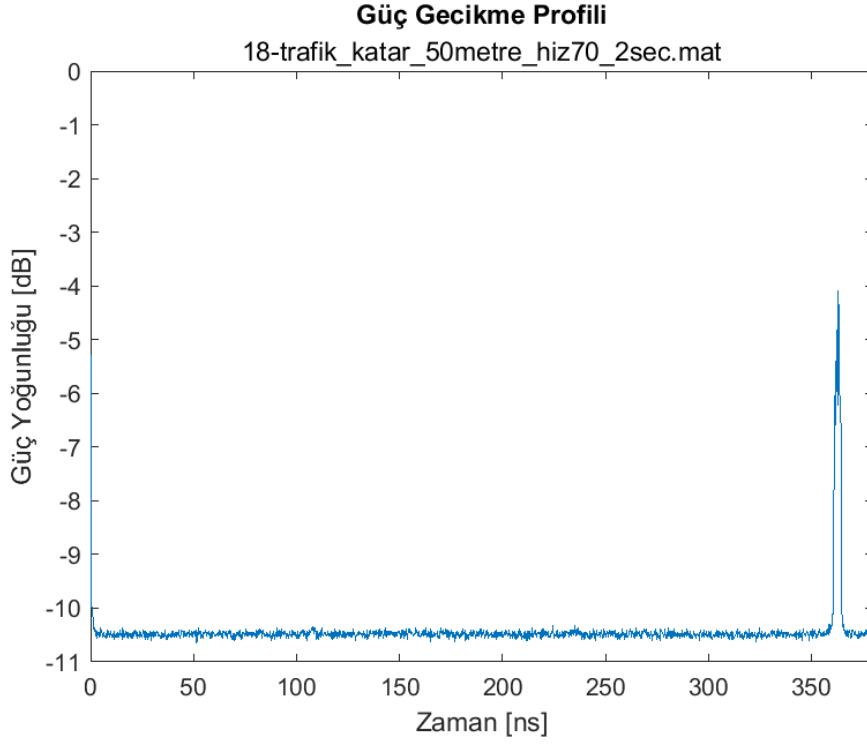
Şekil 5.66 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



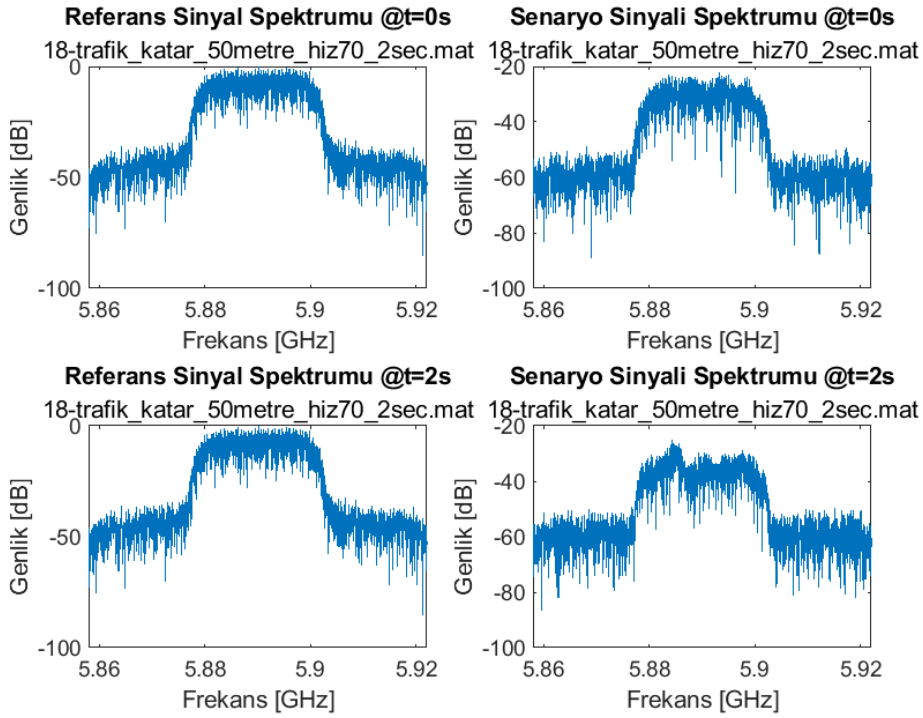
Şekil 5.67 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



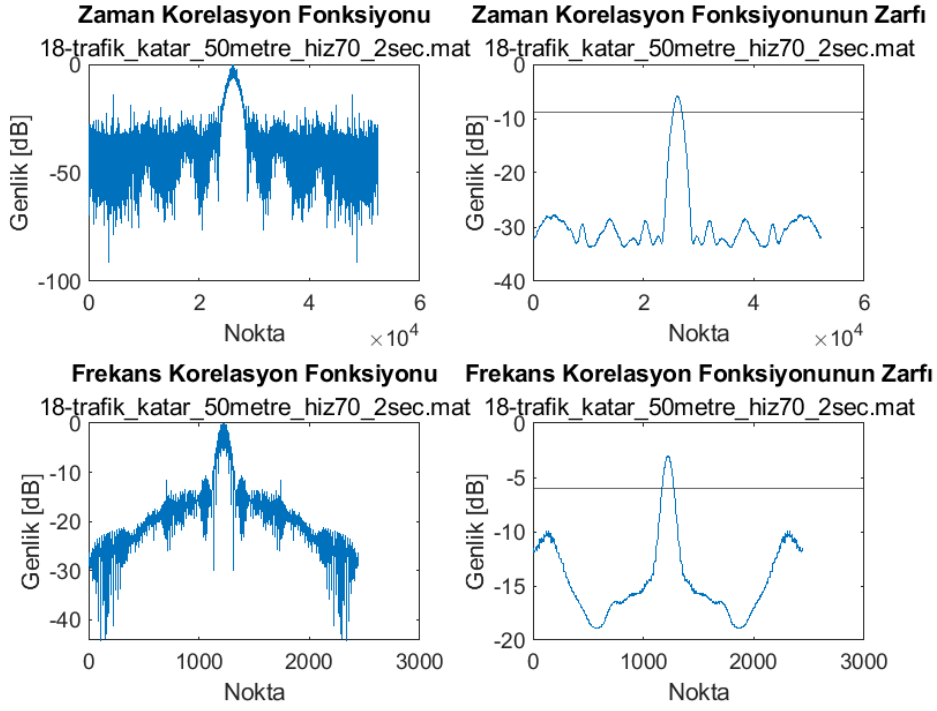
Şekil 5.68 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



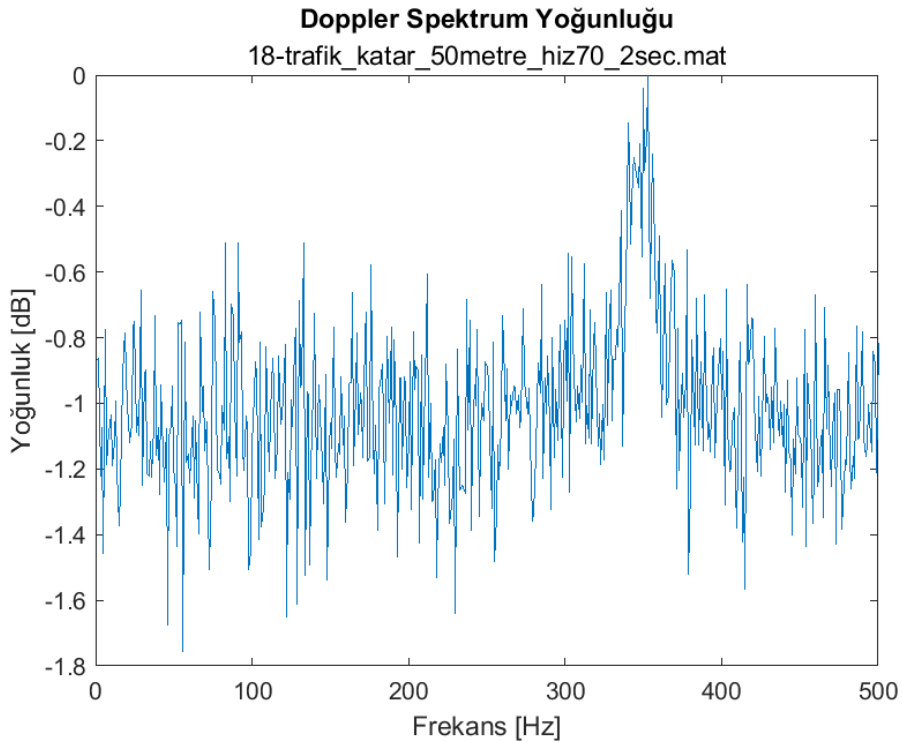
Şekil 5.69 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun PDP grafiği



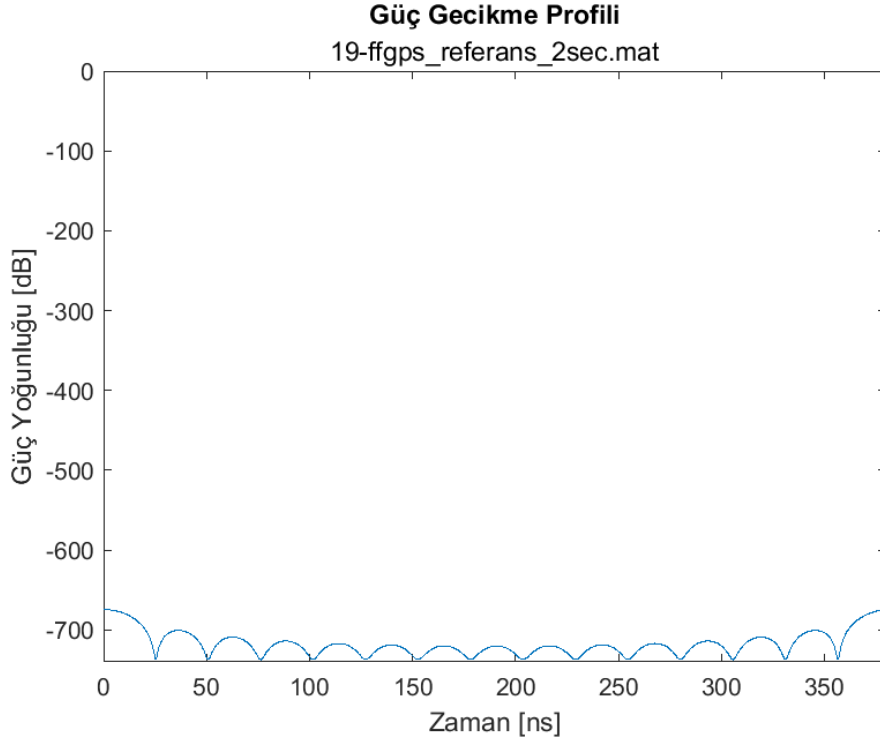
Şekil 5.70 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği



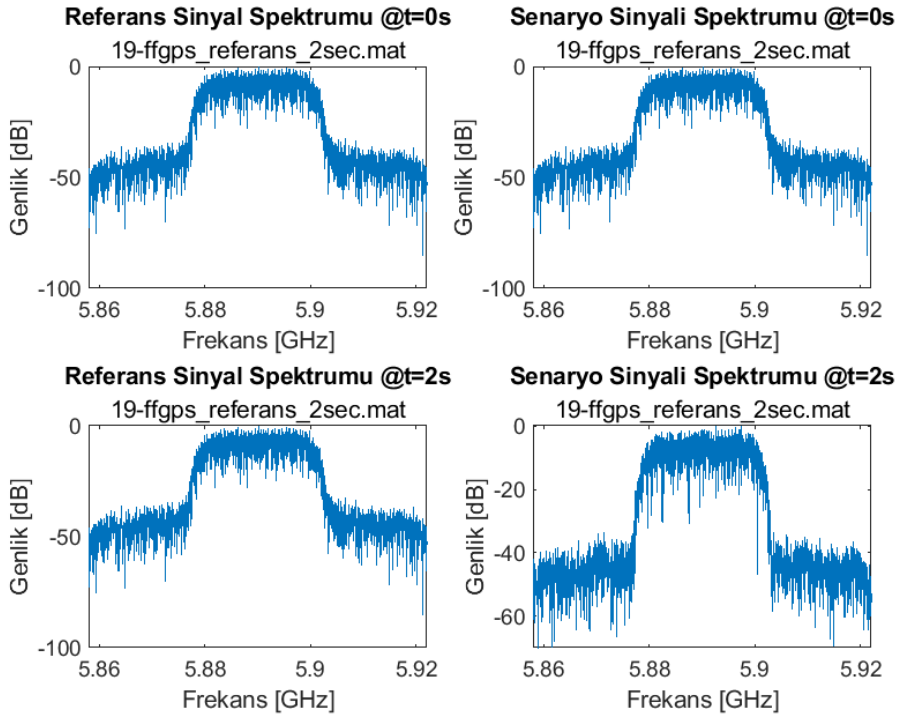
Şekil 5.71 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği



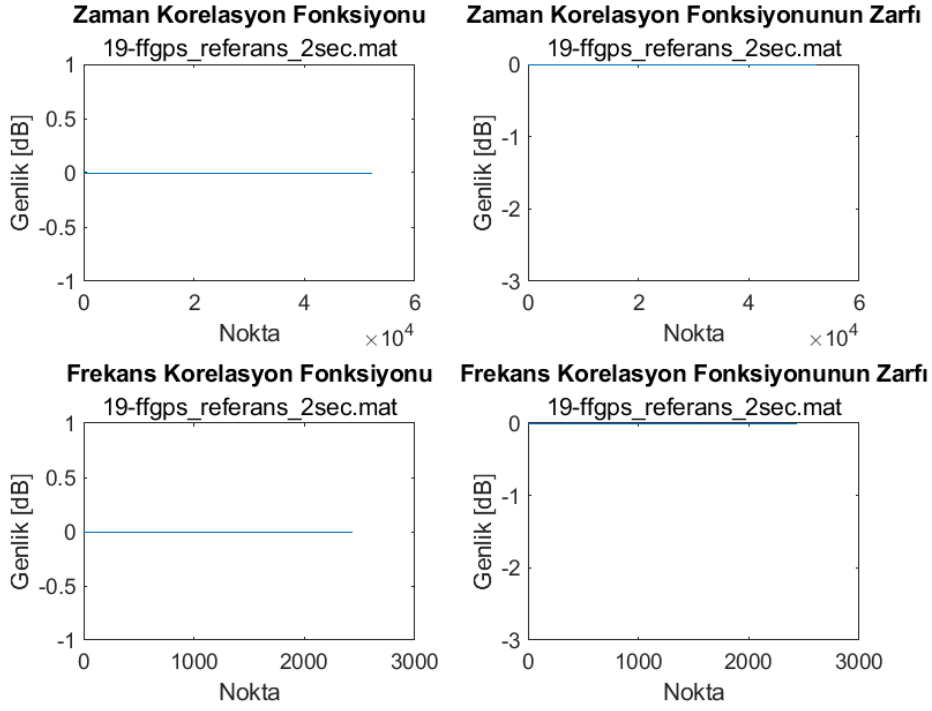
Şekil 5.72 18-trafik_katar_50metre_hiz70_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği



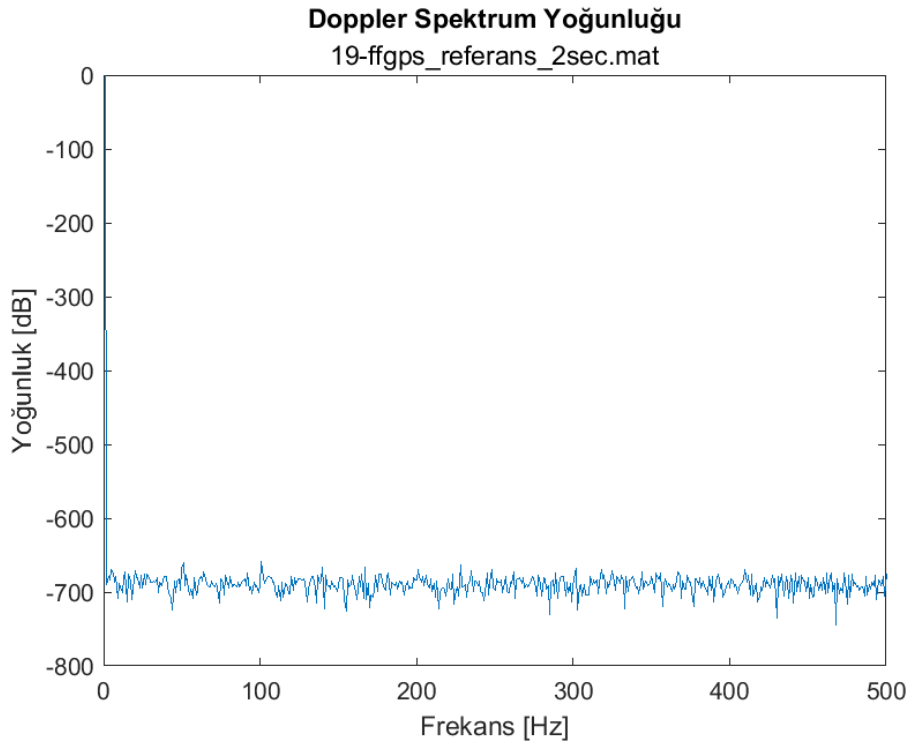
Şekil 5.73 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun PDP grafiği



Şekil 5.74 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun kayıt başındaki ve sonundaki spektrum grafiği

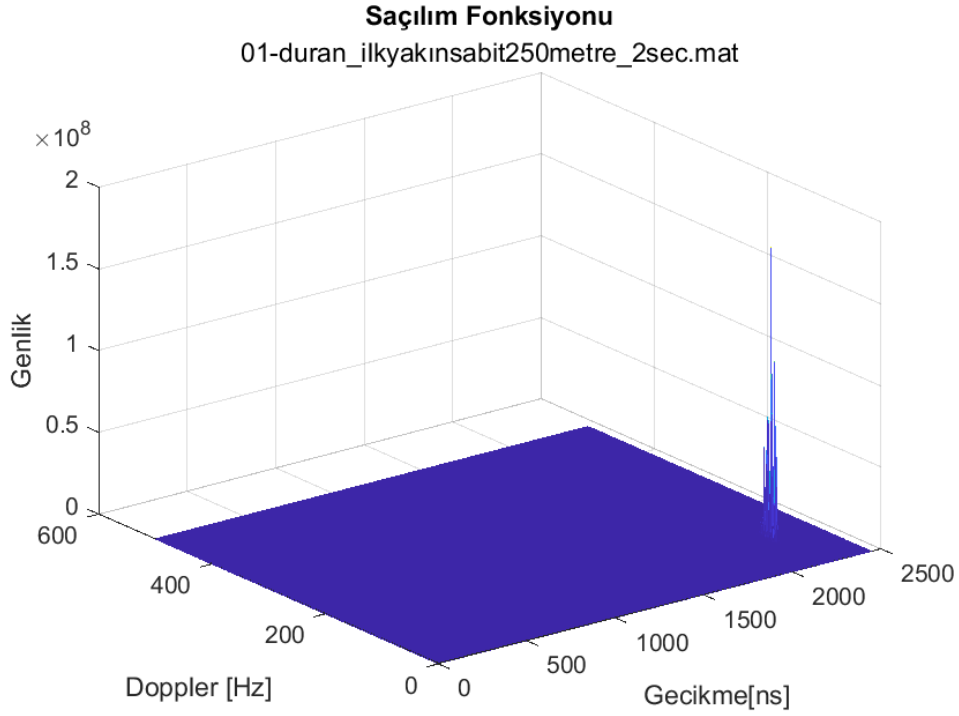


Şekil 5.75 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı ve frekans korelasyon fonksiyonunun grafiği

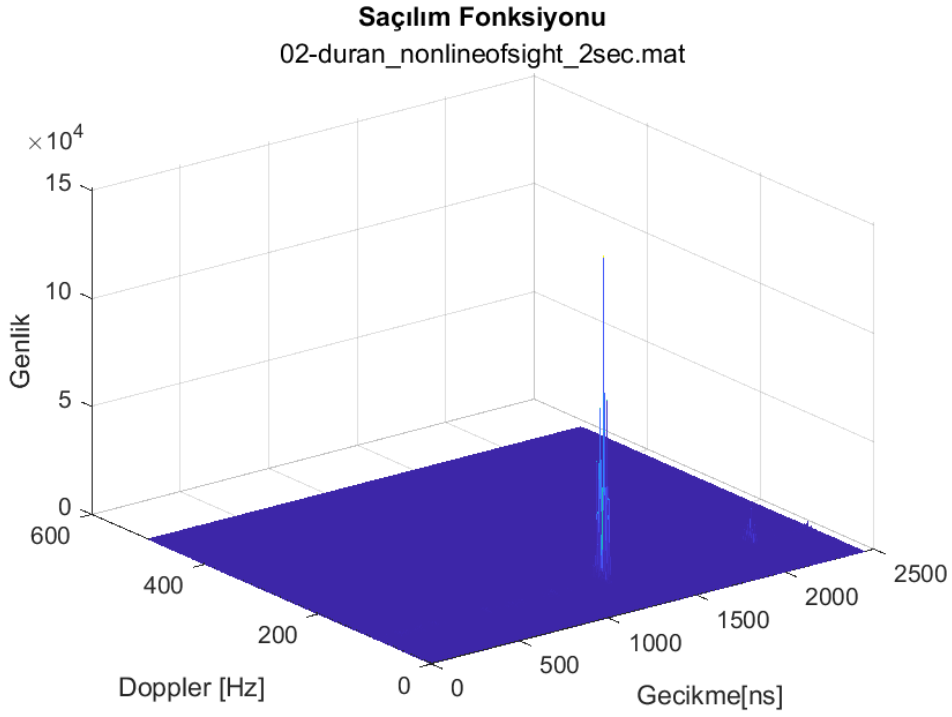


Şekil 5.76 19-ffgps_referans_2sec senaryosunun Doppler spektrum yoğunluğu grafiği

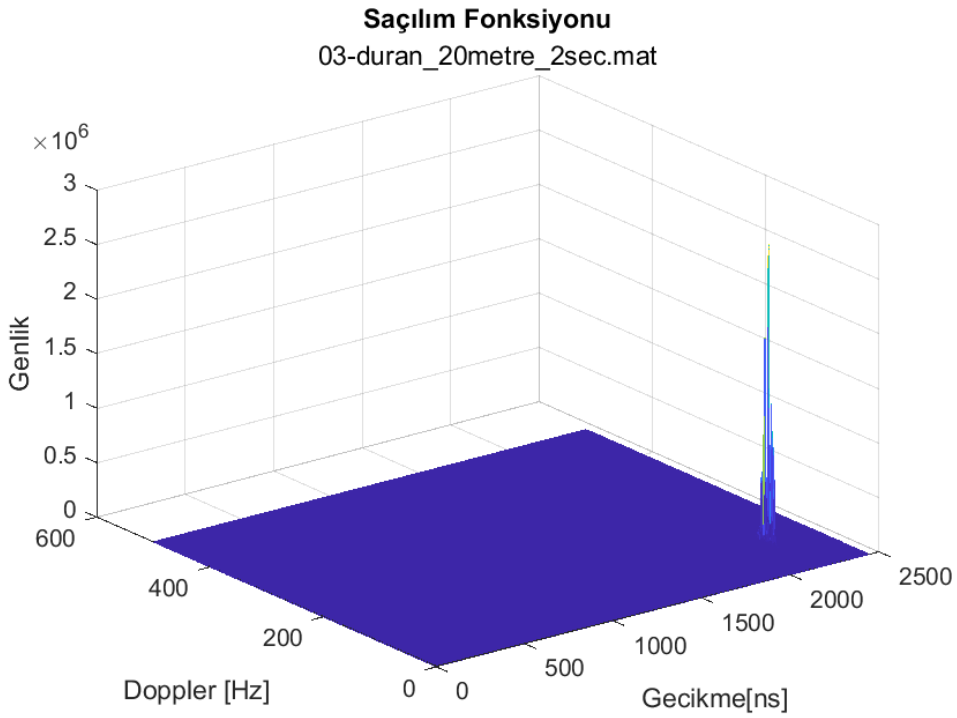
Bütün senaryolar için saçılım fonksiyonları Şekil 5.77 - Şekil 5.95 arasında verilmiştir. Saçılım fonksiyonu kanal için istatistiksel model sunmaktadır. Saçılım fonksiyonu grafiklerinde güç gecikme profili ve Doppler spektral yoğunluk aynı anda gözlenebilmektedir. Kanal parametreleri saçılım fonksiyonları üzerinden elde edilmiştir.



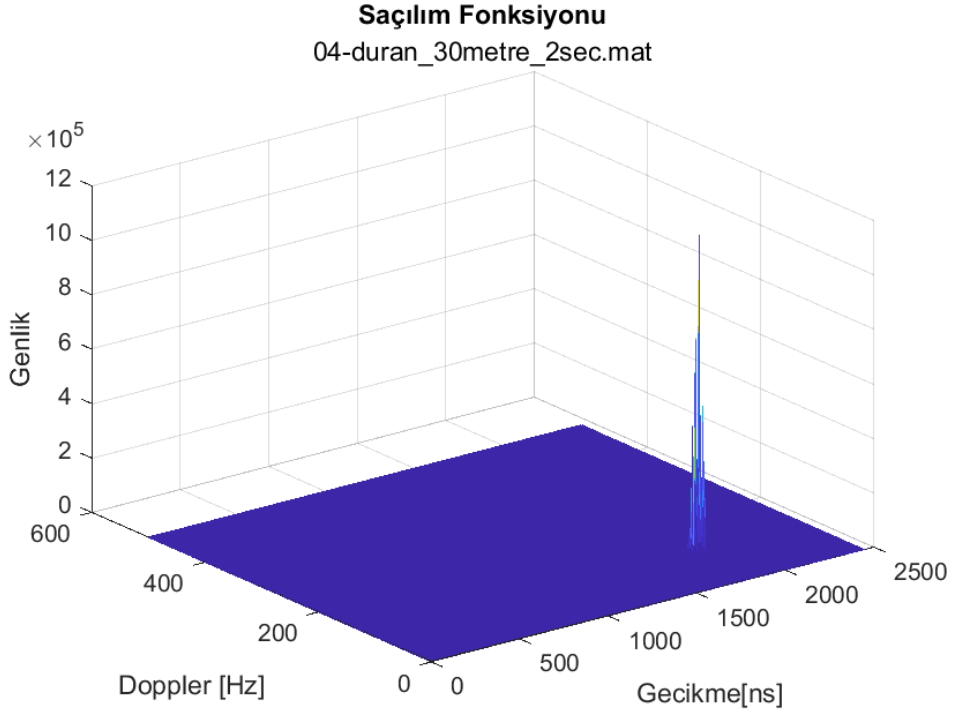
Şekil 5.77 01-duran_ilkyakinsabit250metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



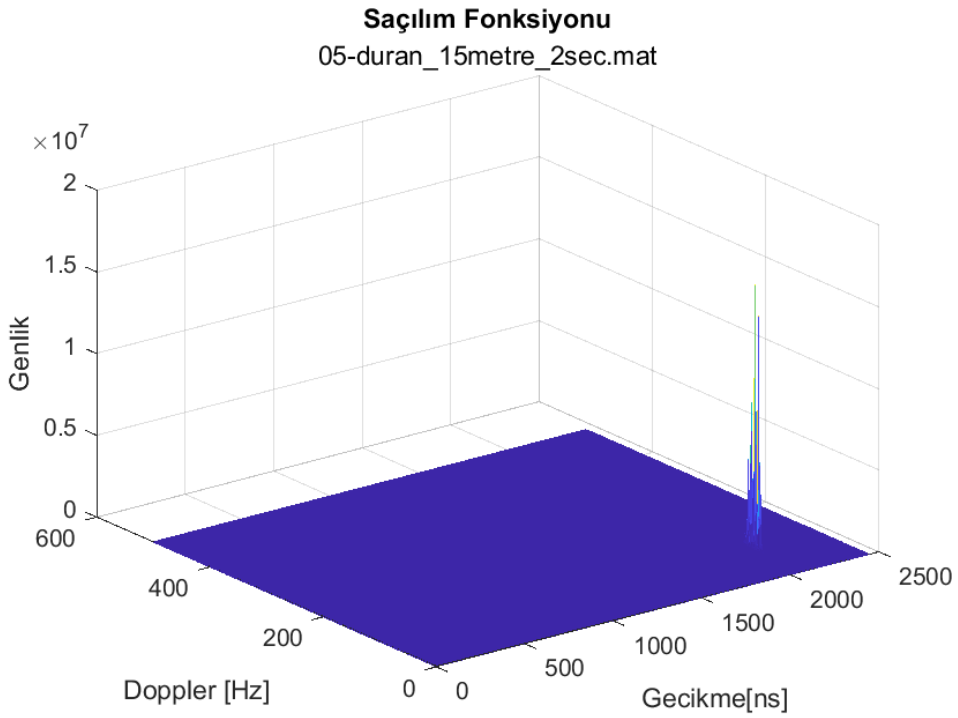
Şekil 5.78 02-duran_nonlineofsight_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



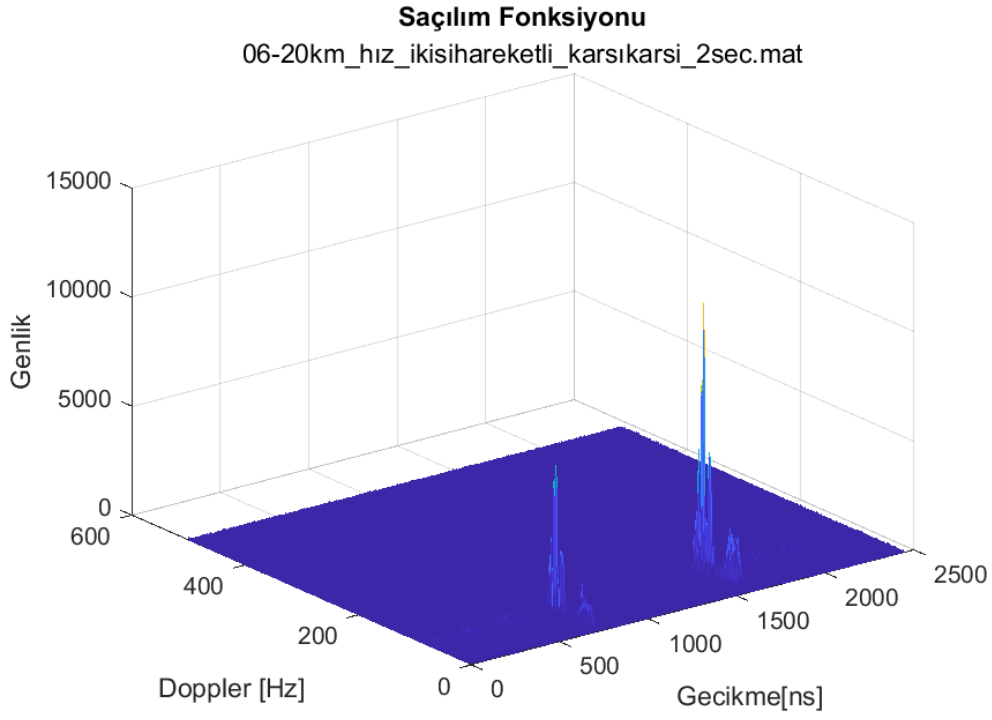
Şekil 5.79 03-duran_20metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



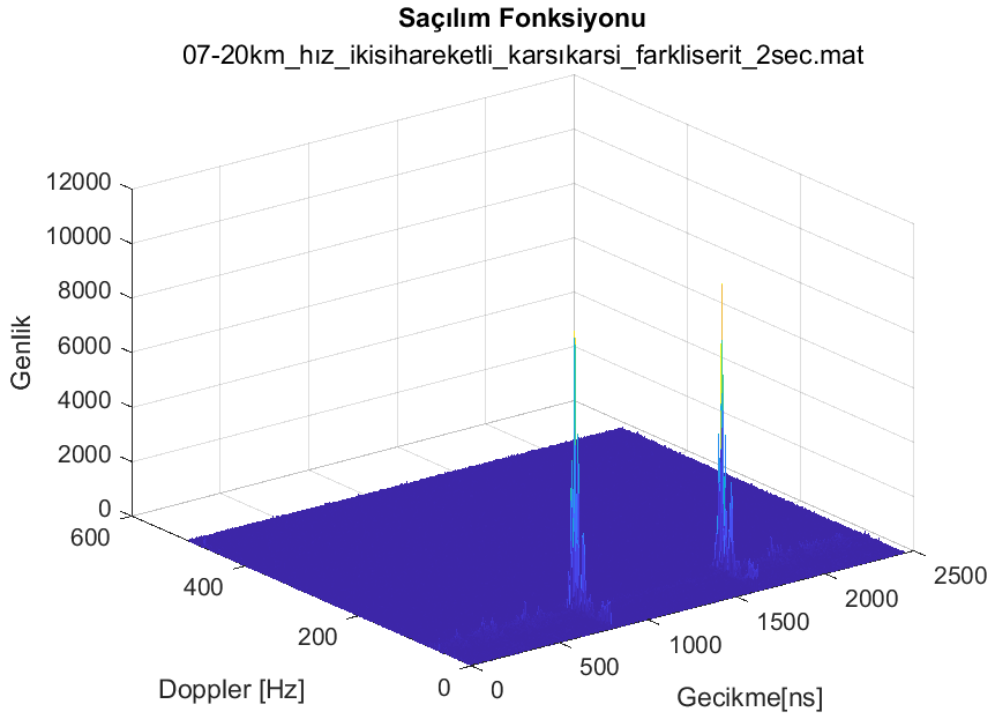
Şekil 5.80 04-duran_30metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



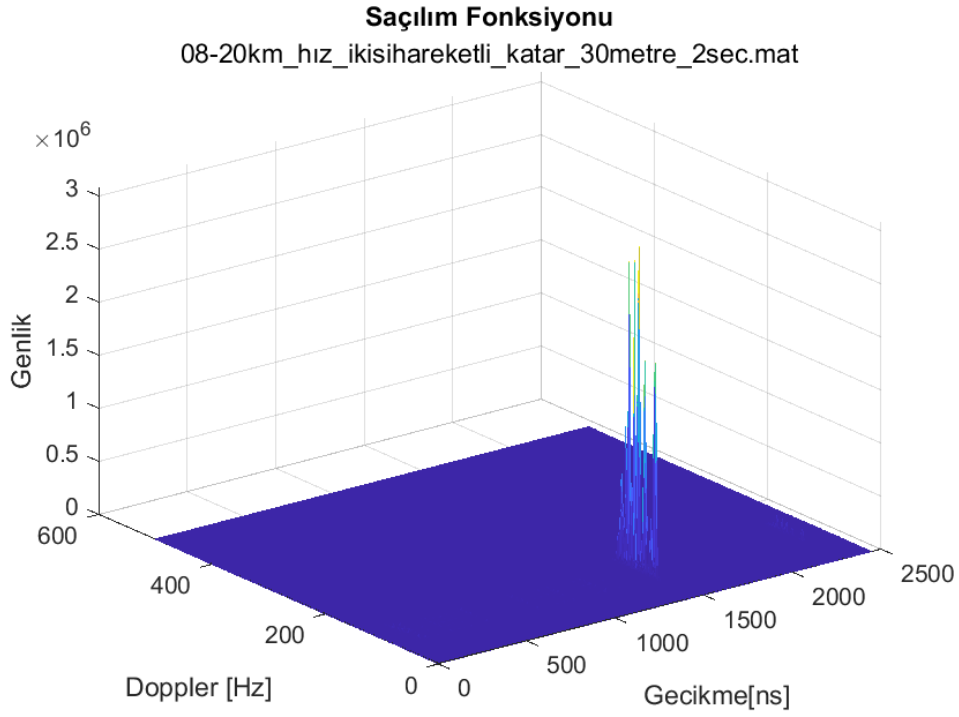
Şekil 5.81 05-duran_15metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



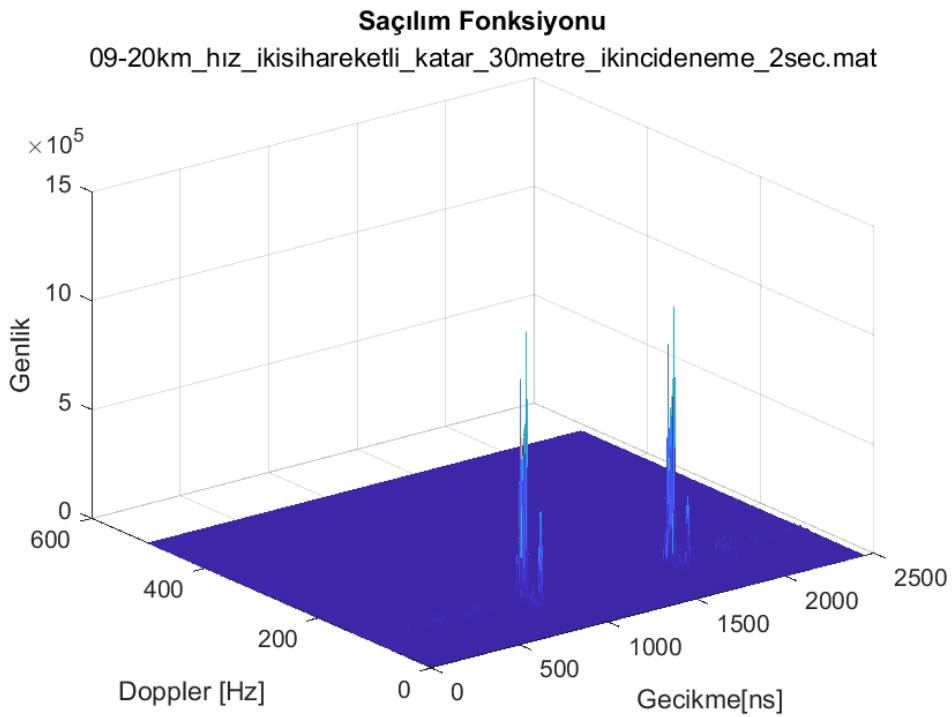
Şekil 5.82 06-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



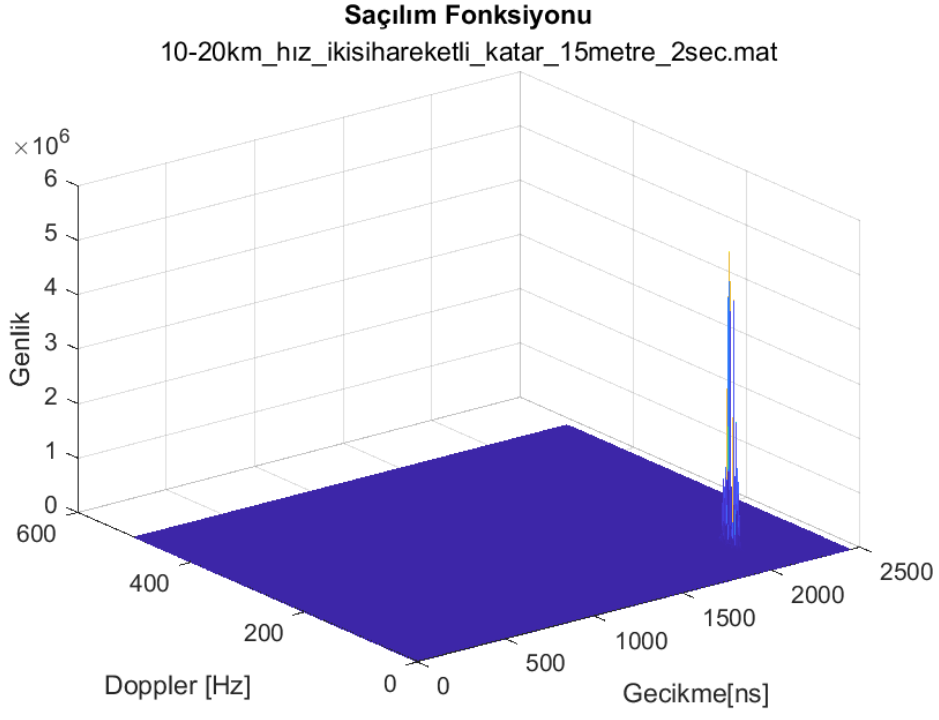
Şekil 5.83 07-20km_hız_ikisihareketli_karsikarsi_farkliserit_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



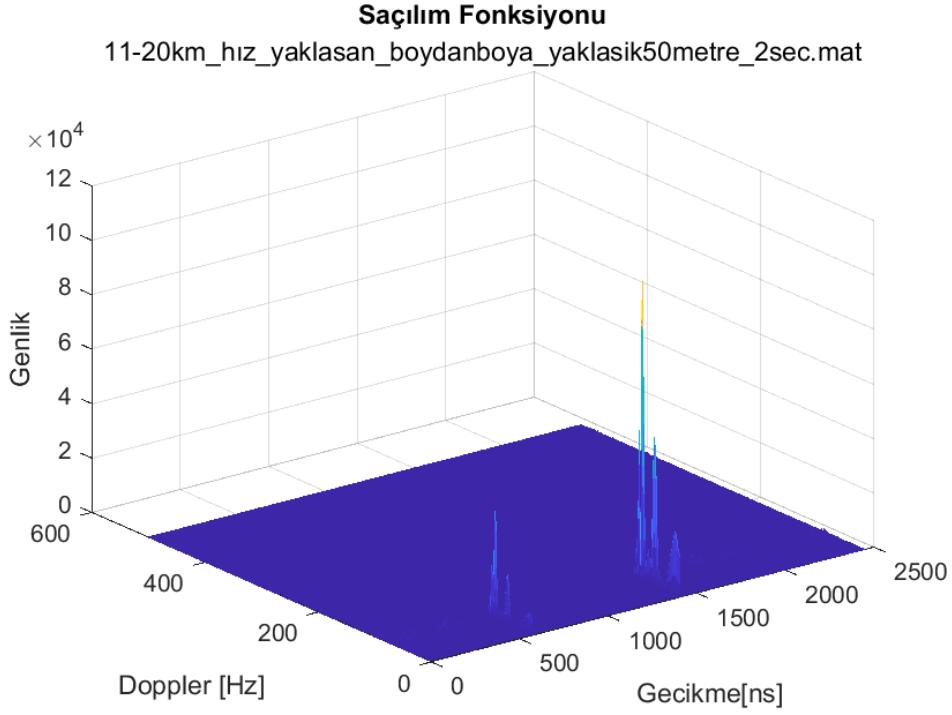
Şekil 5.84 08-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



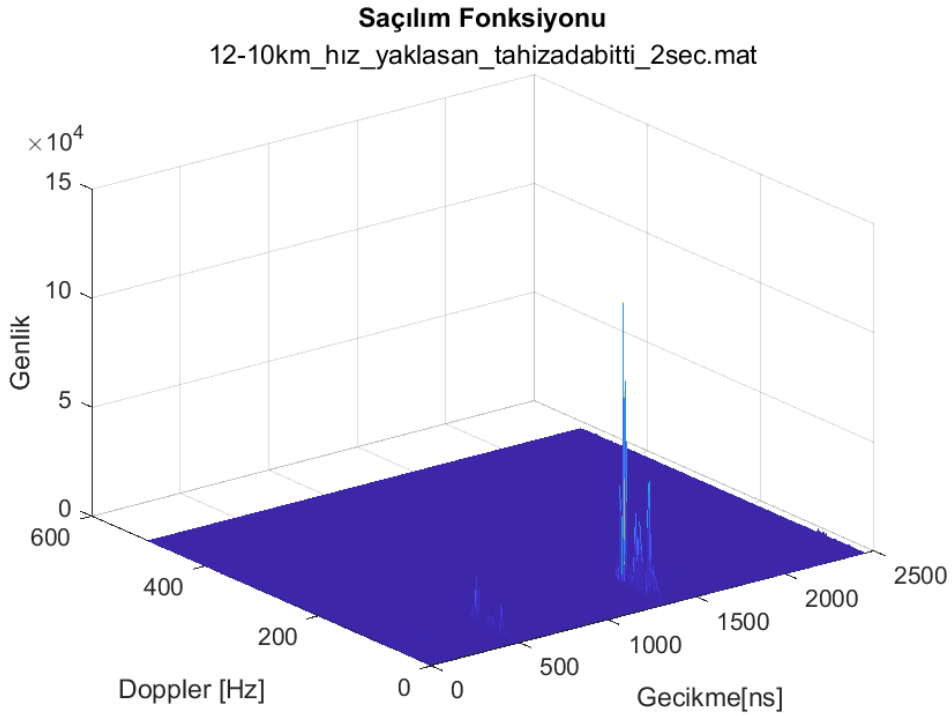
Şekil 5.85 09-20km_hız_ikisihareketli_katar_30metre_ikincideneme_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



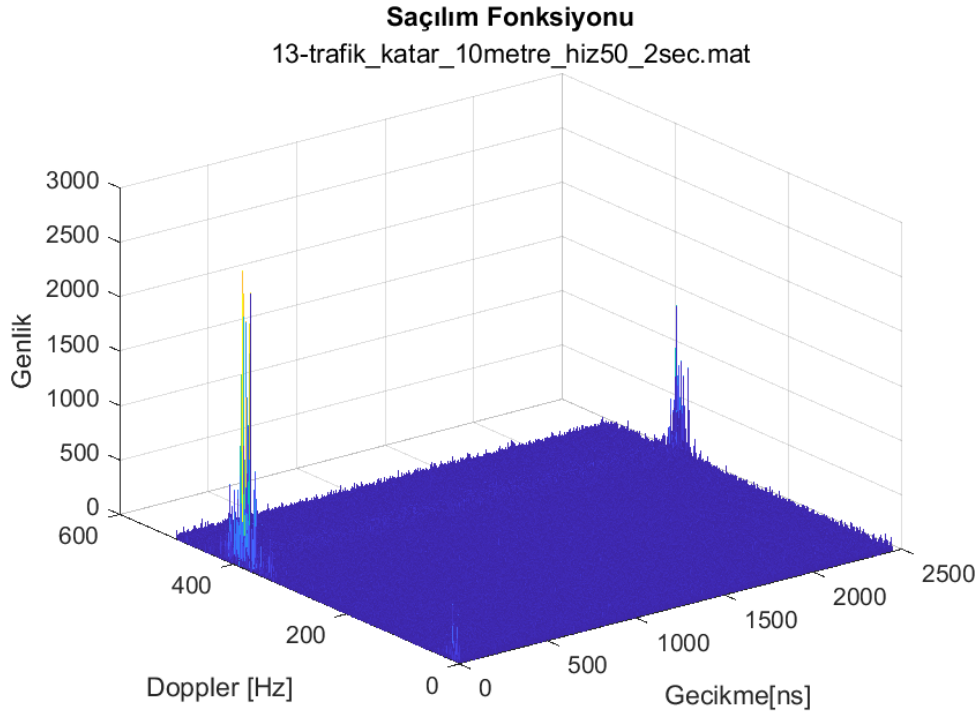
Şekil 5.86 10-20km_hız_ikisihareketli_katar_15metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



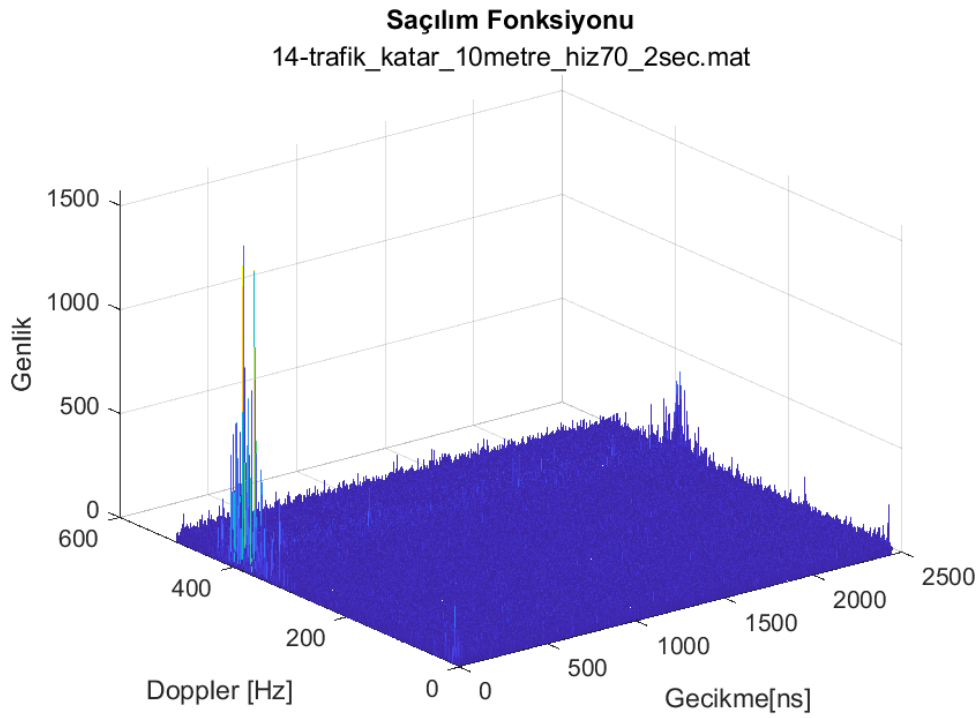
Şekil 5.87 11-20km_hız_yaklaşan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



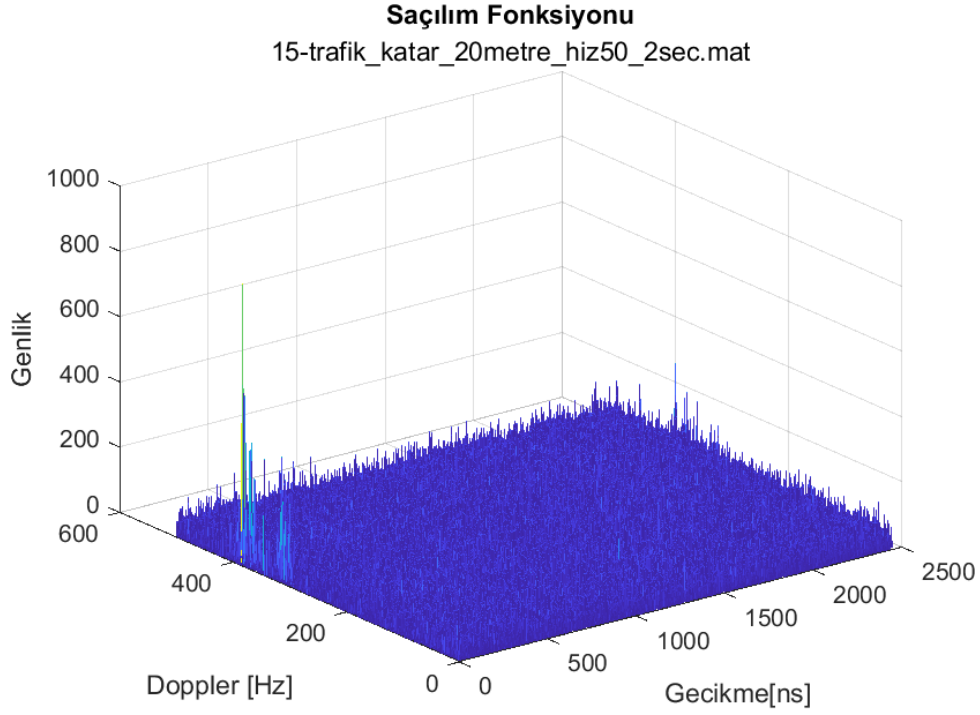
Şekil 5.88 12-10km_hız_yaklaşan_tahizadabitti_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



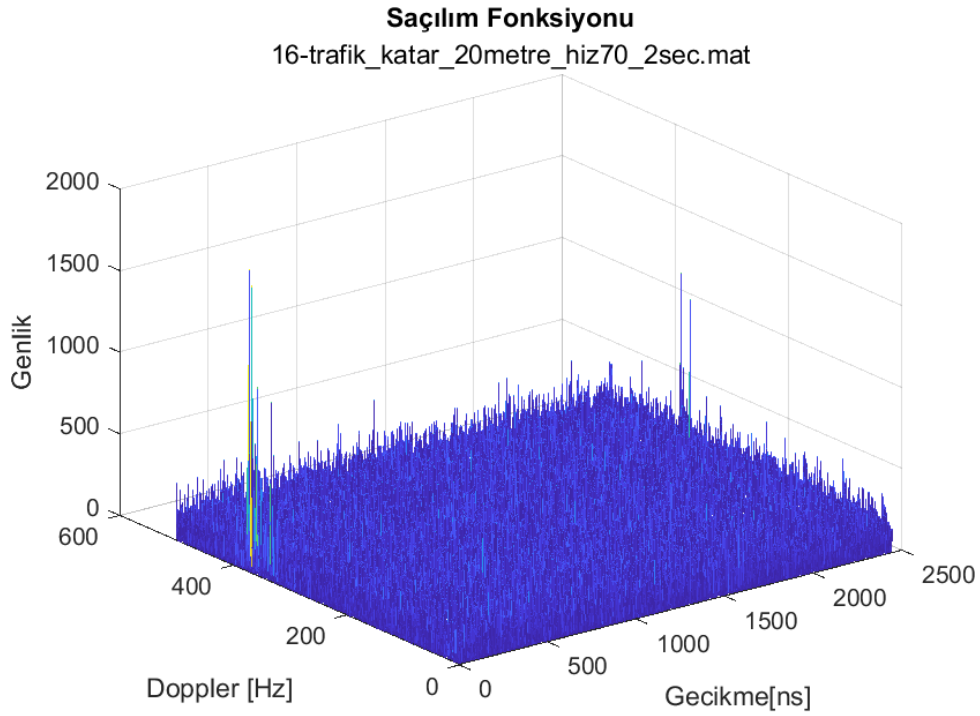
Şekil 5.89 13-trafik_katar_10metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



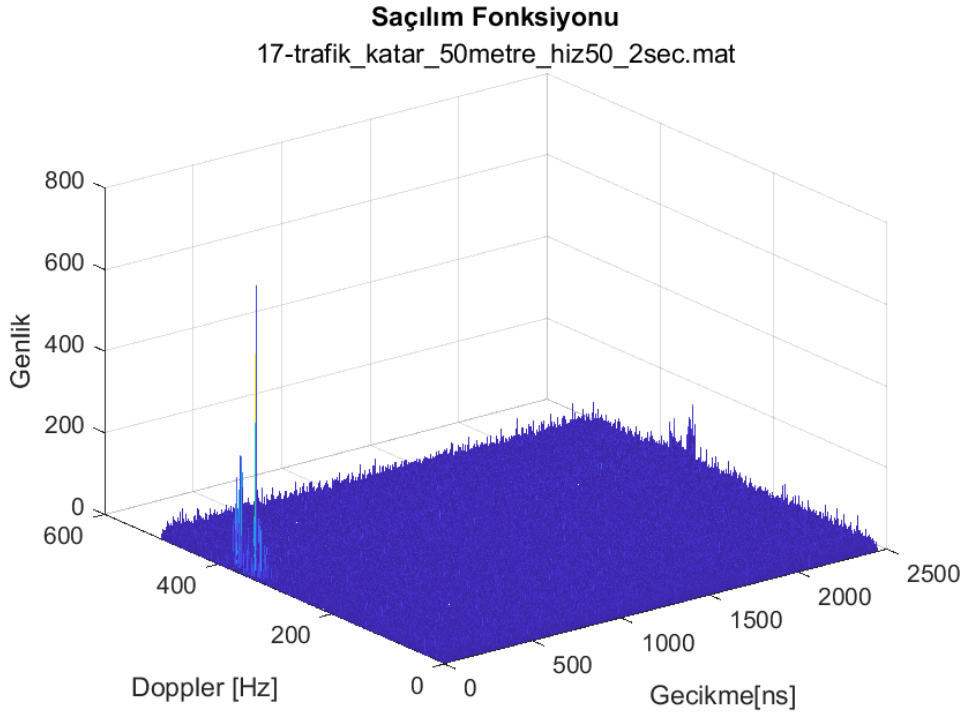
Şekil 5.90 14-trafik_katar_10metre_hiz70_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



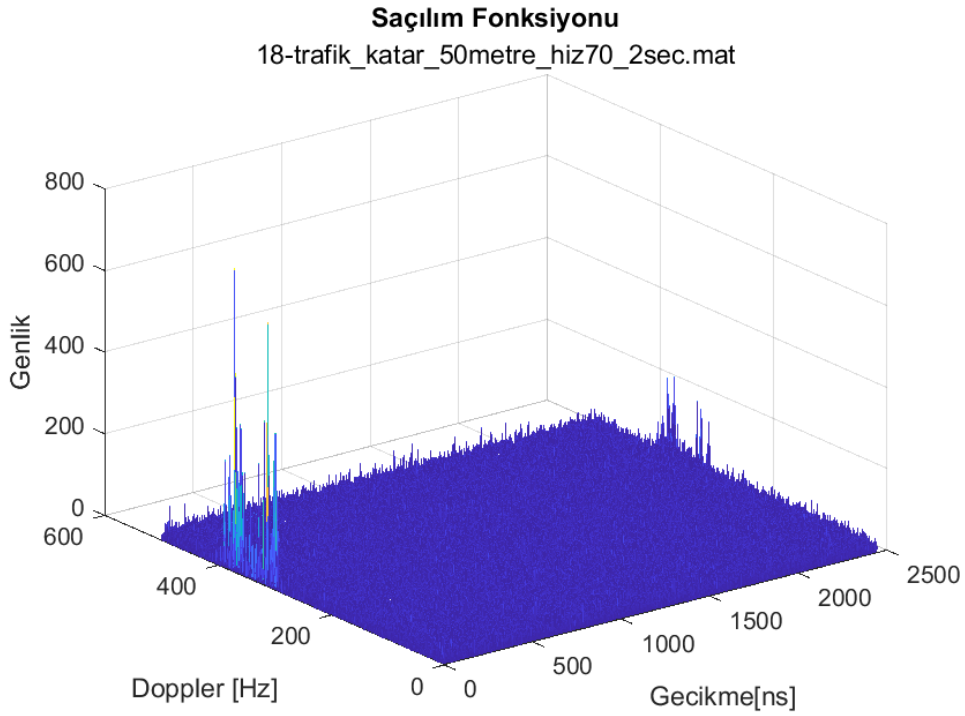
Şekil 5.91 15-trafik_katar_20metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



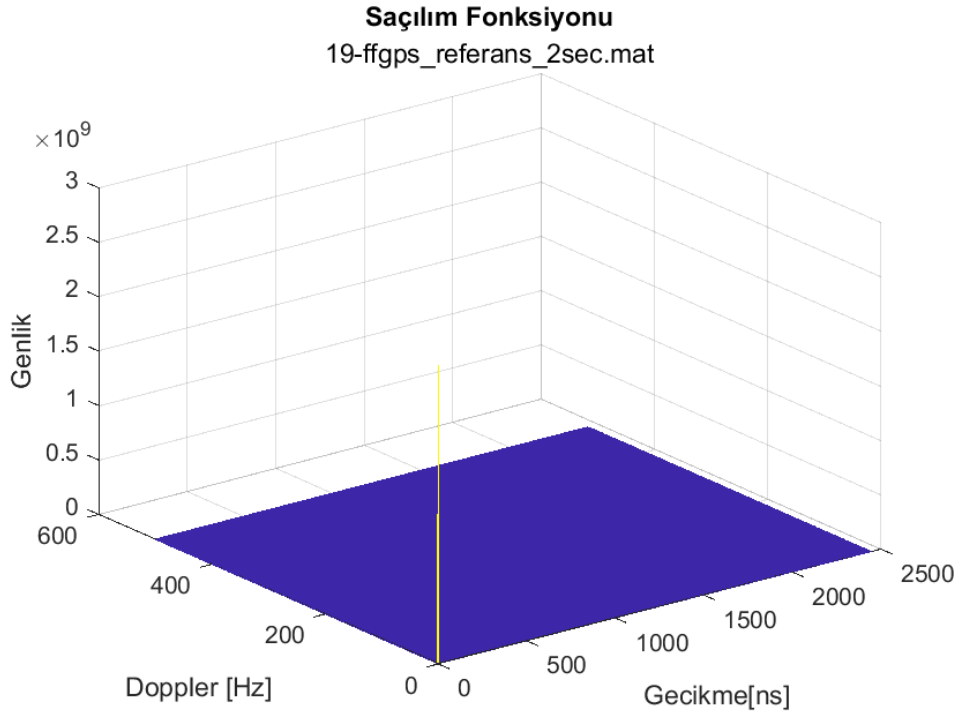
Şekil 5.92 16-trafik_katar_20metre_hiz70_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



Şekil 5.93 17-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



Şekil 5.94 18-trafik_katar_50metre_hiz50_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu



Şekil 5.95 19-ffgps_referans_2sec senaryosu için saçılım fonksiyonu

6. SONUÇLAR

Bu Tez çalışmasında araçların haberleşmesinde yeni nesil hücresele V2V için ölçümler yapılmıştır. Ölçümler hareket halinde ve hareketsiz olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinin nasıl kurulduğu ve ölçümün nasıl alındığı üzerinde durulmuştur.

Ölçümlerle elde edilen veriler ve ölçüm sonrası sinyal işleme yöntemleri ve adımları anlatılmıştır. Zamana göre değişen kanal parametrelerinin matematiksel açıklaması sunulmuştur. Kanal parametreleri elde edilmiştir.

Parametreler 6 ay boyunca gerçekleştirilen 100 adet senaryodan 19 adeti için çıkarılmıştır. 19 senaryo için Şekil 5.1 - Şekil 5.76 arasında sırasıyla güç gecikme profili, zaman korelasyon fonksiyonu, frekans korelasyon fonksiyonu, zaman korelasyon fonksiyonunun zarfı, frekans korelasyon fonksiyonunun zarfı, kayıt başındaki ($t=0s$) ve sonundaki ($t=2s$) spektrum, Doppler spektrum yoğunluğu grafikleri her senaryo için verilmiştir. Hareketsiz senaryolarda güç gecikme profilinden verici ve alıcı arasındaki mesafe; hareketli senaryolarda ise Doppler spektrum yoğunluğundan hız bilgileri elde edilmiştir. Uyumlu zaman ve uyumlu bant genişliği hakkında yorum yapılabilmesi için zaman ve frekans korelasyon fonksiyonları elde edilmiştir. Ölçümlerde meydana gelen sapmaların mesafe ve hız bilgilerinin yaklaşık olarak belirlenmesinden kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

Ölçümlerde kullanılan sinyalin ne olduğu konusunda test cihazlarının üretici firması olan Keysight Technologies Inc. herhangi bir bilgi paylaşmamıştır. Sinyalin bir 5G sinyali olduğunu söylemekten öteye gitmedikleri için eldeki sinyalle ilgili kayda değer bir bilgi bulunmamaktadır. Kanal modeli çıkarmak için kullanılacak sinyal kesinlikle bilinmelidir. Gelecek çalışmalarda bilinen sinyallerle kanal sondajlama ölçümleri üzerinde analizler yapılması daha doğru ve kesin sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Ölçümler sürüş testi ile gerçekleştirildiği için üreteç ve analizörler aynı referansa bağlanamamıştır. GPS'e kilitli bir şekilde ölçüm almak kanal modeli çıkarmak için daha doğru bir yöntem olacağı düşünülmüştür. Aksi takdirde sinyalleri karşılaştırarak incelemek için farklı sinyal işleme yöntemlerine başvurulması gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda GPS gibi harici bir referans kullanılarak ölçümler alınabilir.

Kayıtlar 2 saniye ile sınırlı kalmıştır. Olayları 2 saniyeden fazla sürecek şekilde kayıt edebilecek bir alt yapı sağlanması olaylar hakkında daha çok veri sağlayacaktır. Böylelikle incelemelerde elde edilecek sonuçlar gerçeği daha çok yansıtabilecektir.

Bu tez V2V teknolojisi için Türkiye'nin kendisine ait kanal parametrelerine sahip olması için yapılan bir çalışmadır. Gelecekte Türkiye'de tasarlanacak OBU(on board unit) ve RSU(road side unit) ürünlerinin performanslarını etkileyecek parametrelerin belirlenmesi, ürünlerin AR-GE çalışmaları için oldukça faydalı olacaktır.

Park yeri yönetimi, trafik akışı izleme, acil durumları belirleme ve tespit etme, çarpışma uyarıları gibi birçok güvenliği artıracak sistemler geliştirilebilecektir.

Elde edilen parametrelerin dağılımına göre kanal modeli oluşturulabilecektir.

7. REFERANSLAR

- A. F. Molisch, "6," in *Wireless Communications, Second edition*, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2011.
- A. Molisch, F. Tufvesson, J. Karedal, and C. Mecklenbrauker, "A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels," *IEEE Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 12–22, 2009.
- A. Paier, J. Karedal, N. Czink, H. Hofstetter, C. Dumard, T. Zemen, F. Tufvesson, A. F. Molisch, and C. F. Mecklenbrauker, "Car-to-car radio channel measurements at 5 GHz: Pathloss, power-delay profile, and delay-doppler spectrum," *2007 4th International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2007.
- A. Paier, L. Bernado, J. Karedal, O. Klemp, and A. Kwoczek, "Overview of vehicle-to-vehicle radio channel measurements for Collision Avoidance Applications," *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, 2010.
- Abbas, T. (2014). Measurement Based Channel Characterization and Modeling for Vehicle- to-Vehicle Communications, Doktora Tezi, Lund University
- T. Abbas, A. Thiel, T. Zemen, C. F. Mecklenbrauker, and F. Tufvesson, "Validation of a non-line-of-sight path-loss model for V2V communications at street intersections," *2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2013.
- A. Chelli and M. Patzol, "A non-stationary MIMO vehicle-to-vehicle channel model derived from the geometrical T-junction model," *Vehicular Technologies: Increasing Connectivity*, 2011.
- Abbas, T., Nuckelt, J., Kurner, T., Zemen, T., Mecklenbrauker, C. & Tufvesson, T., Simulation and Measurement Based Vehicle-to-Vehicle Channel Characterization: Accuracy and Constraint Analysis, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 7, pp. 3208-3218, July 2015.
- Bjornborg, N. (2016). Real world applications and analysis of V2X communication in the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge, Yüksek Lisans Tezi, 2016
- Campuzano, A. J., Fernández, H., Balaguer, D., Vila, A., Bernardo-Clemente, B., Rodrigo-Peñarrocha, V. M., Rubio, L. (2012). Vehicular-to-Vehicular Channel Characterization. Waves, 1-10 Defining a Channel Sounding Measurement System for Characterization of 5G Air Interfaces Retrieved from <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1064EN.pdf>
- C. Kmetovicz, "N9040B UXA signal analyzer, 2 Hz to 50 GHz," *Keysight Technologies*, 02-Jan-2018. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/product/N9040B/uxa-signal-analyzer-multi-touch-2-hz-50-gHz.html>. [Accessed: 19-Sep-2021].

- C. Sommer, D. Eckhoff, R. German, and F. Dressler, "A computationally inexpensive empirical model of IEEE 802.11p radio shadowing in urban environments," *2011 Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, 2011.
- C. Li, J. Yu, W. Chen, K. Yang, and F. Li, "Shadowing correlation and a novel statistical model for Inland River Radio channel," *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019.
- C. Sommer, D. Eckhoff, R. German, and F. Dressler, "A computationally inexpensive empirical model of IEEE 802.11p radio shadowing in urban environments," *2011 Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services*, 2011.
- D. A. Demery, J. D. Parsons, and A. M. D. Turkmani, "Sounding techniques for Wideband Mobile Radio Channels: A Review," *IEE Proceedings I Communications, Speech and Vision*, vol. 138, no. 5, p. 437, 1991.
- G. Acosta, K. Tokuda, and M. A. Ingram, "Measured joint doppler-delay power profiles for vehicle-to-vehicle communications at 2.4 GHz," *IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04*.
- Harding, J., Powell, G., R., Yoon, R., Fikentscher, J., Doyle, C., Sade, D., Lukuc, M., Simons, J., & Wang, J. (2014, August). Vehicle-to-vehicle communications: Readiness of V2V technology for application. (Report No. DOT HS 812 014). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Horani, M. & Szmatala, A. V2X Emerging Connectivity Technologies Comparison for Safety and Mobility, P3 Group
- I. Tan, W. Tang, K. Laberteaux, and A. Bahai, "Measurement and analysis of wireless channel impairments in DSRC vehicular communications," *2008 IEEE International Conference on Communications*, 2008.
- J. Kunisch and J. Pamp, "Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 GHz," *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008.
- J. Liang, G. Lu, and X. Jia, "Characteristic analysis of large scale fading using wavelet method in urban environment," *2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*, 2019.
- J. Nuckelt, M. Schack, and T. Kürner, "Deterministic and stochastic channel models implemented in a physical layer simulator for car-to-X communications," *Advances in Radio Science*, vol. 9, pp. 165–171, 2011.
- J. Nuckelt, T. Abbas, F. Tufvesson, C. Mecklenbrauker, L. Bernado, and T. Kurner, "Comparison of Ray Tracing and channel-sounder measurements for Vehicular Communications," *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013.

- J. Karedal, F. Tufvesson, T. Abbas, O. Klemp, A. Paier, L. Bernado, and A. F. Molisch, "Radio channel measurements at street intersections for vehicle-to-vehicle safety applications," *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, 2010.
- J. Maurer, T. Fugen, T. Schafer, and W. Wiesbeck, "A new inter-vehicle communications (IVC) channel model," *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004*.
- Keysight, "89601200C pathwave VSA basic vector signal analysis and hardware connectivity," *Keysight Technologies*, 08-Feb-2021. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/product/89601200C/pathwave-vsa-basic-vector-signal-analysis-hardware-connectivity.html>. [Accessed: 19-Sep-2021].
- K. Guan, D. He, B. Ai, D. W. Matolak, Q. Wang, Z. Zhong, and T. Kurner, "5-GHz obstructed vehicle-to-vehicle channel characterization for internet of intelligent vehicles," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 100–110, 2019.
- Keysight Technologies, *N9040B UXA X-Series Signal Analyzer, Multi-touch Data Sheet*. 2020.
- L. Cheng, B. Henty, D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, "Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band Channel Measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated Short Range Communication (DSRC) frequency band," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 8, pp. 1501–1516, 2007.
- L. Bernado, T. Zemen, F. Tufvesson, A. F. Molisch, and C. F. Mecklenbrauker, "Delay and Doppler spreads of nonstationary vehicular channels for safety-relevant scenarios," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 82–93, 2014.
- L. Zhu, Y. He, F. R. Yu, B. Ning, T. Tang, and N. Zhao, "Communication-based train control system performance optimization using Deep Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 10705–10717, 2017.
- I. Tan, W. Tang, K. Laberteaux, and A. Bahai, "Measurement and analysis of wireless channel impairments in DSRC vehicular communications," *2008 IEEE International Conference on Communications*, 2008.
- I. Sen and D. W. Matolak, "Vehicle-vehicle channel models for the 5-ghz band," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 235–245, 2008.
- Mecklenbrauker, Christoph F., ark., "Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance." *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, 2011, pp. 1189–1212., doi:10.1109/jproc.2010.2101990.
- M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in Mobile Radio Systems," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, p. 2145, 1991.

- M. Ghoraiishi, J. Takada, and T. Imai, "Identification of scattering objects in Microcell Urban Mobile Propagation Channel," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11, pp. 3473–3480, 2006.
- "M9099T waveform creator software," *Keysight Technologies*. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/lib/software-detail/computer-software/m9099t-waveform-creator-software-2376020.html>. [Accessed: 19-Sep-2021].
- M. Yang, B. Ai, R. He, L. Chen, X. Li, Z. Huang, J. Li, and C. Huang, "Path loss analysis and modeling for vehicle-to-vehicle communications with vehicle obstructions," *2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2018.
- O. Renaudin, V.-M. Kolmonen, P. Vainikainen, and C. Oestges, "Wideband MIMO Car-to-car radio channel measurements at 5.3 GHz," *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008.
- Oestges, C. . Vehicular Channel Characterization and Modeling,
https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A179928/datastream/PDF_01/view
- O. Renaudin, V.-M. Kolmonen, P. Vainikainen, and C. Oestges, "Wideband MIMO Car-to-car radio channel measurements at 5.3 GHz," *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008.
- P. Paschalidis, K. Mahler, A. Kortke, M. Peter, and W. Keusgen, "Pathloss and Multipath Power Decay of the wideband car-to-car channel at 5.7 GHz," *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011.
- S. A. Hosseini Tabatabaei, M. Fleury, N. N. Qadri, and M. Ghanbari, "Improving propagation modeling in urban environments for vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 705–716, 2011.
- T. Abbas, J. Nuckelt, T. Kurner, T. Zemen, C. F. Mecklenbrauker, and F. Tufvesson, "Simulation and measurement-based vehicle-to-vehicle channel characterization: Accuracy and constraint analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 7, pp. 3208–3218, 2015.
- T. Mangel, O. Klemp, and H. Hartenstein, "A validated 5.9 GHz non-line-of-sight path-loss and fading model for inter-vehicle communication," *2011 11th International Conference on ITS Telecommunications*, 2011.
- T. Gaugel, L. Reichardt, J. Mittag, T. Zwick, and H. Hartenstein, "Accurate simulation of wireless vehicular networks based on Ray Tracing and physical layer simulation," *High Performance Computing in Science and Engineering '11*, pp. 619–630, 2012.
- Wang, X., Mao, S., & Gong, M. X. (2017). An Overview of 3GPP Cellular Vehicle-to-Everything Standards. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 21(3), 19-25. doi:10.1145/3161587.3161593

- W. Li, Q. Zhu, C.-X. Wang, F. Bai, X. Chen, and D. Xu, "A practical non-stationary channel model for vehicle-to-vehicle mimo communications," *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2020.
- W. Fan, L. Hentila, F. Zhang, P. Kyosti, and G. F. Pedersen, "Virtual drive testing of adaptive antenna systems in dynamic propagation scenarios for Vehicle Communications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7829–7838, 2018.
- W. Wiesbeck and S. Knorz, "Characteristics of the mobile channel for high velocities," *2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, 2007.
- X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, "Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 7, pp. 3899–3911, 2015.
- X. Cheng, C.-X. Wang, D. I. Laurenson, S. Salous, and A. V. Vasilakos, "New deterministic and stochastic simulation models for non-isotropic scattering mobile-to-mobile rayleigh fading channels," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 11, no. 7, pp. 829–842, 2009.
- X. Cheng, C.-X. Wang, D. Laurenson, S. Salous, and A. Vasilakos, "An adaptive geometry-based stochastic model for non-isotropic MIMO Mobile-to-mobile channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 9, pp. 4824–4835, 2009.
- Y. Zeng, H. Yi, Z. Xia, S. Wang, B. Ai, D. Fei, W. Li, and K. Guan, "Measurement and simulation for vehicle-to-infrastructure communications at 3.5 ghz for 5G," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, pp. 1–13, 2020.
- Y. Morioka, T. Sota, and M. Nakagawa, "An anti-car collision system using GPS and 5.8 GHz inter-vehicle communication at an off-sight intersection," *Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No.00CH37152)*.

8. EKLER

```
1. %% SECTION 1
2. % %Call once reference signal
3. % if ~exist('refSig','var')
4. %     cd C:\Users\sedes\Desktop\ChannelModeling
5. %     refSig = load('ffgps_referans_2sec.mat');
6. % end
7. %
8. % %Call once senario signal
9. % if ~exist('senSig','var')
10. %     cd C:\Users\sedes\Desktop\ChannelModeling
11. %                                     senSig           =
12. %     load('10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec.mat');
13. % end
14. sen_table = ["01-duran_ilkyakınsabit250metre_2sec.mat",
15.             "02-duran_nonlineofsight_2sec.mat",
16.             "03-duran_20metre_2sec.mat",
17.             "04-duran_30metre_2sec.mat",
18.             "05-duran_15metre_2sec.mat",
19.             "06-20km_hız_ikisihareketli_karsıkarsi_2sec.mat",
20.             "07-
21.             20km_hız_ikisihareketli_karsıkarsi_farkliserit_2sec.mat",
22.             "08-20km_hız_ikisihareketli_katar_3metre_2sec.mat",
23.             "09-
24.             20km_hız_ikisihareketli_katar_3metre_ikincideneme_2sec.mat",
25.             "10-20km_hız_ikisihareketli_katar_5bucukmetre_2sec.mat",
26.             "11-
27.             20km_hız_yaklasan_boydanboya_yaklasik50metre_2sec.mat",
28.             "12-10km_hız_yaklasan_tahizadabitti_2sec.mat",
29.             "13-trafik_katar_10metre_hız50_2sec.mat",
30.             "14-trafik_katar_10metre_hız70_2sec.mat",
31.             "15-trafik_katar_20metre_hız50_2sec.mat",
32.             "16-trafik_katar_20metre_hız70_2sec.mat",
33.             "17-trafik_katar_50metre_hız50_2sec.mat",
34.             "18-trafik_katar_50metre_hız70_2sec.mat",
35.             "19-odaanten_record_2sec.mat",
36.             "20-ffgps_referans_2sec.mat"];
37. sen_table = sen_table';
38. ref_name = '20-ffgps_referans_2sec.mat';
39. % %Call once reference signal
40. if ~exist('refSig','var')
41.     cd C:\Users\sedes\Desktop\ChannelModeling
42.     refSig = load(ref_name);
43. end
44.
45. set(groot, 'DefaultTextInterpreter', 'none') %Default tex
46.
47. %%
48. for i=1:10
49.     RESULTS_ = struct;
50.     sen_name = convertStringsToChars(sen_table(i));
51.     sen_id = str2double(sen_name(1:2));
```

```

48.     senSig = load(sen_name);
49.     msg = sprintf('CALCULATING FOR SEN: %s', sen_name);
50.     disp(msg);
51.     %% SECTION 1 - SUB 1 Synchronization
52.     % Periyot 3277'dir.
53.
54.     sync_window = 20000;
55.
56.     % Select as many points as sync_window from REF and SEN
57.     sampled_sen = senSig.Y(1:sync_window);
58.     sampled_ref = refSig.Y(1:sync_window);
59.
60.     % Find the cross-corelation peak
61.     corr_before_sync = xcorr(sampled_sen, sampled_ref);
62.     [val, idx] = max(abs(real(corr_before_sync)));
63.     msg = sprintf('Point shift between SEN and REF: %d', idx);
64.     disp(msg);
65.     msg = sprintf('Diff between REF and SEN corr center: %d',
abs(sync_window-idx));
66.     disp(msg);
67.     % Circular shifting to overall REF signal by idx
68.     if sync_window > idx
69.         refSig.Y_sync = circshift(refSig.Y, -(sync_window -
idx));
70.     else
71.         refSig.Y_sync = circshift(refSig.Y, (sync_window -
idx));
72.     end
73.
74.     %Re-sample from shifted REF signal by sync_window
75.     sampled_ref_sync = refSig.Y_sync(1:sync_window);
76.
77.     corr_after_sync = xcorr(sampled_sen, sampled_ref_sync);
78.
79.     % figure
80.     % subplot(2,1,1)
81.     % plot(1:length(corr_before_sync), corr_before_sync);
82.     % title ('SEN vs REF Cross Correlation before SYNC')
83.     %
84.     % subplot(2,1,2)
85.     % plot(1:length(corr_after_sync), corr_after_sync);
86.     % title ('SEN vs REF Cross Correlation after SYNC')
87.
88.     %SYNC VERIFIED. CHANGING ORIGINAL SIGNAL
89.     %refSig.Y = refSig.Y_sync;
90.     %     msg = sprintf('SYNC NOT APPLIED. ONLY CALCULATION FOR
RESULT TABLE');
91.     %     disp(msg);
92.
93.     RESULTS(sen_id).senaryo = sen_name;
94.     RESULTS(sen_id).korelasyon_fark = abs(sync_window-idx);
95.
96.     %% SECTION 2
97.     %Define dimension of matrix
98.     total_record_sec = 2; %sec
99.     time_window_sec = 38.2e-6; %38us

```

```

100.
101.     record_length_point = length(refSig.Y); %128e6 point for
      2 sec
102.     sec_per_point = total_record_sec / record_length_point;
103.
104.     %prepare adjustable time windowing
105.     time_window_point = round(record_length_point *
      time_window_sec / total_record_sec);
106.     nb_of_window_in_record = floor(record_length_point /
      time_window_point);
107.     segmented_total_point = time_window_point *
      nb_of_window_in_record;
108.
109.     %The excess is trimmed
110.     refSig_trimmed = refSig.Y(1:end-(record_length_point -
      segmented_total_point));
111.     senSig_trimmed = senSig.Y(1:end-(record_length_point -
      segmented_total_point)); %The senario signal assumed same
112.     % length with reference signal initially.
113.
114.     %Generate time variant matrix
115.     RESULTS_(sen_id).LTV_refSig_matrix =
      reshape(refSig_trimmed, [time_window_point,
      nb_of_window_in_record]); %h_ref(t,tau)
116.     RESULTS_(sen_id).LTV_senSig_matrix =
      reshape(senSig_trimmed, [time_window_point,
      nb_of_window_in_record]); %h_sen(t,tau)
117.     msg = sprintf('MATRIXS are GENERATED');
118.     disp(msg);
119.
120.
121.     % UL2_ref = sqrt(sum(abs((LTV_refSig_matrix.^2))));
122.     %           LTV_refSig_matrix =
      bsxfun(@rdivide,LTV_refSig_matrix,UL2_ref);
123.     %
124.     % UL2_sen = sqrt(sum(abs((LTV_senSig_matrix.^2))));
125.     %           LTV_senSig_matrix =
      bsxfun(@rdivide,LTV_senSig_matrix,UL2_sen);
126.
127.
128.     %% SECTION 3
129.     % % Test time variant signal
130.     % figure
131.     % plot(real(LTV_refSig_matrix(1,:)))
132.     % title 'Time variant ref'
133.     % xlabel 'Nokta'
134.     % ylabel 'Genlik (Real)'
135.
136.     %% SECTION 4
137.     %Generate transfer functions
138.     RESULTS_(sen_id).trans_func_refSig =
      zeros(nb_of_window_in_record, time_window_point);
139.     RESULTS_(sen_id).trans_func_senSig =
      zeros(nb_of_window_in_record, time_window_point);
140.     for k=1:nb_of_window_in_record

```

```

141.         RESULTS_(sen_id).trans_func_refSig(k,:)           =
fftshift(fft(RESULTS_(sen_id).LTV_refSig_matrix(k,          :)));
%H_ref(t, f) Transfer func of ref sig
142.         RESULTS_(sen_id).trans_func_senSig(k,:)          =
fftshift(fft(RESULTS_(sen_id).LTV_senSig_matrix(k,          :)));
%H_sen(t, f) Transfer func of sen sig
143.     end
144.     disp('transfer functions of signals calculated.');
```

```

145.
146.
147.     %trans_func_refSig = fft(refSig_trimmed);
148.     %trans_func_senSig = fft(senSig_trimmed);
149.
150.
151.
152.     %% SECTION 5
153.     % %Test your transfer functions
154.     % figure
155.     % subplot(2,2,1)
156.     % plot(db(trans_func_refSig(1, :)))
157.     % title('Reference Signal Spectrum')
158.     % xlabel 'Nokta'
159.     % ylabel 'Genlik (dB) '
160.     %
161.     % subplot(2,2,2)
162.     % plot(db(trans_func_senSig(1, :)))
163.     % title('Senario Signal Spectrum')
164.     % xlabel 'Nokta'
165.     % ylabel 'Genlik (dB) '
166.
167.     %% SECTION 6
168.     %Transfer function of Channel FFT(SEN) / FFT(REF)
169.     RESULTS_(sen_id).trans_func_channel                     =
zeros(nb_of_window_in_record, time_window_point);
170.     for k=1:nb_of_window_in_record
171.         RESULTS_(sen_id).trans_func_channel(k,             :) =
RESULTS_(sen_id).trans_func_senSig(k,:) ./
RESULTS_(sen_id).trans_func_refSig(k,:);
172.     end
173.     disp('transfer function of channel calculated.');
```

```

174.
175.     %     trans_func_channel     =     trans_func_senSig     ./
trans_func_refSig;
176.     %
177.     %     trans_func_channel     =     reshape(trans_func_channel,
[time_window_point, nb_of_window_in_record]);
178.
179.
180.     %% SECTION 7
181.     % %Test the transfer function of channel H(t,f)
182.     % figure
183.     % plot(db(trans_func_channel(1, :)))
184.     % title 'Kanalın Transfer Fonksiyonu'
185.     % xlabel 'Nokta'
186.     % ylabel 'Genlik (dB) '
187.
```

```

188.     %% SECTION 8
189.     %Impulse response of channel
190.     RESULTS_(sen_id).impulse_resp_channel =
        zeros(nb_of_window_in_record, time_window_point);
191.     for k=1:nb_of_window_in_record
192.         RESULTS_(sen_id).impulse_resp_channel(k, :) =
            ifft(RESULTS_(sen_id).trans_func_channel(k, :));
193.     end
194.     disp('impulse response of channel calculated.');
```

195. %% SECTION 8 - SUB 1

```

196.     % figure
197.     % for vbm=1:1000
198.     % hold on
199.     % plot(abs(impulse_resp_channel(vbm, :)))
200.     % title 'Kanalın Dürtü Cevabı'
201.     % xlabel 'Nokta'
202.     % ylabel 'Genlik (Lineer)'
203.     % end
204.     % hold off
205.
```

206. %% SECTION 9

```

207.     %Doppler impulse response s(v, tau)
208.     RESULTS_(sen_id).Doppler_impulse_resp =
        zeros(nb_of_window_in_record, time_window_point);
209.     for k=1:time_window_point
210.         RESULTS_(sen_id).Doppler_impulse_resp(:, k) =
            fft(RESULTS_(sen_id).impulse_resp_channel(:, k));
211.     end
212.     disp('doppler impulse response of channel calculated.');
```

213.

```

214.     % figure
215.     % plot(abs(Doppler_impulse_resp(1, :)).^2);
216.
```

217. %% SECTION 9

```

218.     %Scattering function of channel P_s(v, tau)
219.     RESULTS_(sen_id).scattering_func =
        abs(RESULTS_(sen_id).Doppler_impulse_resp) .^ 2;
220.     disp('scattering function of channel calculated.');
```

221.

222. %% SECTION 10

```

223.     % figure
224.     % mesh(scattering_func(1:time_window_point,1:1000));
225.     % ylabel('Tau')
226.     % xlabel('Doppler')
227.     % zlabel('Amplitude')
228.     % view(90, 0)
229.     % zlim([0 500])
230.     figure
231.     mesh(RESULTS_(sen_id).scattering_func(1:500, :))
232.     title 'Scattering Function for Scenario 1'
233.     xlabel 'Delay[ns]'
234.     ylabel 'Doppler [Hz]'
235.     zlabel 'Amplitude'
236.     % view(0,180)
237.     %% SECTION 11
238.     % for i=1:nb_of_window_in_record
```

```

239.     %           doppler_cross_spectral_density(i, :) =
        fft(scattering_func(i, :));
240.     % end
241.     % figure
242.     % plot(doppler_cross_spectral_density(:, 1));
243.     % title('Doppler Cross Spectral Density')
244.     % disp('Doppler Cross Spectral Density Calculated.');
```

245.

```

246.     %% SECTION 12
247.     %Power Delay Profile P_h(tau)x
248.     RESULTS_(sen_id).power_delay_profile(1:time_window_point)
        = 0;
249.     for k=1:time_window_point
250.         RESULTS_(sen_id).power_delay_profile(k) =
            trapz(RESULTS_(sen_id).scattering_func(:, k));
251.     end
252.     disp('Power Delay Profile of The Channel Calculated.');
```

253.

```

254.     %Normalization of power delay profile
255.     %UL2_ref =
        sqrt(sum(abs((RESULTS_(sen_id).power_delay_profile.^2))));
256.     %RESULTS_(sen_id).power_delay_profile_norm =
        bsxfun(@rdivide,RESULTS_(sen_id).power_delay_profile,UL2_ref);
257.     RESULTS_(sen_id).power_delay_profile_norm =
        RESULTS_(sen_id).power_delay_profile./max(RESULTS_(sen_id).powe
            r_delay_profile);
258.     %Find next peak in PDP
259.     trimmed_window = 100;
260.     [val, idx]=
        max(flip(RESULTS_(sen_id).power_delay_profile_norm(trimmed_wind
            ow:end-trimmed_window)));
261.     RESULTS(sen_id).GGP_tepe_noktasi = idx+trimmed_window;
262.     % power_delay_profile = power_delay_profile ./
        (time_window_point);
263.     % figure
264.     % plot((scattering_func(:, 500)));
265.     %
266.
```

```

267. %     fun = @(x) scattering_func(:,1);
268. %     aa = integral(fun, 0, nb_of_window_in_record,
        'ArrayValued', 1);
269. %     figure
270. %     plot((aa))
271.
```

```

272. %     figure
273. %     plot((power_delay_profile))
274. %     title 'Power Delay Profile of Channel'
275. %     disp('PDP of channel calculated.');
```

276.

```

277.     %% SECTION 13
278.     %Mean delay T_m and RMS delay spread S_tau
279.     power_delay_profile_reversed =
        flip(RESULTS_(sen_id).power_delay_profile);
280.     integrated_power_delay_profile =
        trapz(power_delay_profile_reversed); %integral of P_h(tau) dtau
281.
```

```

282.     %For integral of P_h(tau)*tau dtau, preapare P_h(tau) *
tau
283.     power_delay_profile_cross_i(1:time_window_point) = 0;
284.     for k=1:time_window_point
285.         power_delay_profile_cross_i(k)
power_delay_profile_reversed(k) * k;
286.     end
287.     % power_delay_profile_cross_i means that P_h(tau) * tau
288.     mean_delay = trapz(power_delay_profile_cross_i) /
integrated_power_delay_profile;
289.
290.     mean_delay = mean_delay * sec_per_point / 100;
291.
292.     %For integral of P_h(tau)*tau^2 dtau, preapare P_h(tau) *
tau^2
293.     power_delay_profile_cross_i_square(1:time_window_point) =
0;
294.     for k=1:time_window_point
295.         power_delay_profile_cross_i_square(k)
power_delay_profile_reversed(k) * k^2;
296.     end
297.
298.     rms_delay_spread
=
sqrt((trapz(power_delay_profile_cross_i_square)/
integrated_power_delay_profile) - mean_delay^2);
299.
300.     rms_delay_spread = rms_delay_spread * sec_per_point / 100;
301.
302.     RESULTS(sen_id).rms_gecikme_yayilim_ns
=
rms_delay_spread;
303.     RESULTS(sen_id).ortalama_gecikme_ns = mean_delay;
304.
305.
306.     %NOTE: rms_delay_spread value might be in terms of point.
307.     %This value can be changed by proportioning the total time
window to the corresponding time value.
308.
309.     %% SECTION 14
310.     %Frequency correlation function R_H(delta_f)
311.     RESULTS_(sen_id).freq_corr_func
=
fftshift(fft(RESULTS_(sen_id).power_delay_profile));
312.
313.
314.     %% SECTION 15
315.     %Doppler spectral density P_B(v)
316.
RESULTS_(sen_id).doppler_spectral_density(1:nb_of_window_in_rec
ord) = 0;
317.     for k=1:nb_of_window_in_record
318.         RESULTS_(sen_id).doppler_spectral_density(k)
=
trapz(RESULTS_(sen_id).scattering_func(k, :));
319.     end
320.     % figure
321.     % plot(doppler_spectral_density)
322.     % title 'Doppler Spectral Density of Channel'
323.

```



```

324.     %% SECTION 16
325.     %Mean doppler shift v_m and RMS doppler spread S_v
326.     doppler_analyze_window = 500; %point
327.     doppler_spectral_density =
RESULTS_(sen_id).doppler_spectral_density(1:doppler_analyze_win
dow);
328.     integrated_doppler_spectral_density =
trapz(doppler_spectral_density); %integral of P_B(v) dv
329.     [val, idx]= max(doppler_spectral_density);
330.     RESULTS(sen_id).doppler_tepe_noktasi = idx;
331.     %For integral of P_B(v)*v dv, preapare P_B(v) * v
332.
doppler_spectral_density_cross_i(1:doppler_analyze_window) = 0;
333.     for k=1:doppler_analyze_window
334.         doppler_spectral_density_cross_i(k) =
doppler_spectral_density(k) * k;
335.     end
336.     mean_doppler_shift =
trapz(doppler_spectral_density_cross_i) /
integrated_doppler_spectral_density;
337.
338.     %For integral of P_B(v)*v^2 dv, preapare P_B(v) * v^2
339.
doppler_spectral_density_cross_i_square(1:doppler_analyze_windo
w) = 0;
340.     for k=1:doppler_analyze_window
341.         doppler_spectral_density_cross_i_square(k) =
doppler_spectral_density(k) * k^2;
342.     end
343.
344.     rms_doppler_spread =
sqrt((trapz(doppler_spectral_density_cross_i_square)/
integrated_doppler_spectral_density) - mean_doppler_shift^2);
345.
346.     RESULTS(sen_id).rms_doppler_yayilim_nokta =
rms_doppler_spread;
347.     RESULTS(sen_id).ortalama_doppler_kaymasi_nokta =
mean_doppler_shift;
348.
349.
350.     %% SECTION 17
351.     %Time correlation function R_H(delta_f)
352.     RESULTS_(sen_id).time_corr_func =
fftshift(fft(RESULTS_(sen_id).doppler_spectral_density));
353.
354.     %Normalization of time_corr_func
355.     UL2_ref =
sqrt(sum(abs((RESULTS_(sen_id).time_corr_func.^2))));
356.     RESULTS_(sen_id).time_corr_func_norm =
bsxfun(@rdivide,RESULTS_(sen_id).time_corr_func,UL2_ref);
357.
358.
359.     %% Graph All Results - SECTION 18
360.     tau = linspace(0, sec_per_point*time_window_point/100,
time_window_point);
361.     f_carrier = 5.89e9;

```

```

362.     f_spec = linspace(-
    (time_window_point*1/time_window_sec)/2,
    +(time_window_point*1/time_window_sec)/2, time_window_point);
363.     f_doppler =
    linspace(0,1/(sec_per_point*time_window_point)*nb_of_window_in_
    record, nb_of_window_in_record);
364.
365.     %Plot Ref and Sen Spectrums
366.     figure
367.     subplot(2,2,1)
368.     plot((f_carrier+f_spec)*1e-9,
    db(RESULTS_(sen_id).trans_func_refSig(1, :)))
369.     title('Referans Sinyal Spektrumu @t=0s')
370.     subtitle(sen_table(sen_id))
371.     xlabel('Frekans [GHz]')
372.     ylabel('Genlik [dB]')
373.     subplot(2,2,2)
374.     plot((f_carrier+f_spec)*1e-9,
    db(RESULTS_(sen_id).trans_func_senSig(1, :)))
375.     title('Senaryo Sinyali Spektrumu @t=0s')
376.     subtitle(sen_table(sen_id))
377.     xlabel('Frekans [GHz]')
378.     ylabel('Genlik [dB]')
379.
380.     subplot(2,2,3)
381.     plot((f_carrier+f_spec)*1e-9,
    db(RESULTS_(sen_id).trans_func_refSig(1, :)))
382.     title('Referans Sinyal Spektrumu @t=2s')
383.     subtitle(sen_table(sen_id))
384.     xlabel('Frekans [GHz]')
385.     ylabel('Genlik [dB]')
386.
387.     subplot(2,2,4)
388.     plot((f_carrier+f_spec)*1e-9,
    db(RESULTS_(sen_id).trans_func_senSig(nb_of_window_in_record,
    :)))
389.     title('Senaryo Sinyali Spektrumu @t=2s')
390.     subtitle(sen_table(sen_id))
391.     xlabel('Frekans [GHz]')
392.     ylabel('Genlik [dB]')
393.     %End of Plot Ref and Sen Spectrums
394.     saveas(gcf, sprintf('%d_spectrum.png', sen_id))
395.
396. %     %Plot Power Delay Profile and Doppler Spectral Density
397.     figure
398.     plot(tau.*1e9, db(
    flip(RESULTS_(sen_id).power_delay_profile_norm)))
399.     title('Güç Gecikme Profili')
400.     subtitle(sen_table(sen_id))
401.     xlabel('Zaman [ns]')
402.     ylabel('Güç Yoğunluğu [dB]')
403.     xlim([0 380])
404.     limsy=get(gca, 'YLim');
405.     set(gca, 'Ylim', [limsy(1) 0]);
406.     saveas(gcf, sprintf('%d_pdp.png', sen_id))
407.

```

```

408.     figure
409.     doppler_spectral_density_norm =
RESULTS_(sen_id).doppler_spectral_density(1:doppler_analyze_win
dow)
max(RESULTS_(sen_id).doppler_spectral_density(1:doppler_analyze
_window));
410.     plot(db(doppler_spectral_density_norm))
411.     title('Doppler Spektrum Yoğunluğu')
412.     subtitle(sen_table(sen_id))
413.     xlabel('Frekans [Hz]')
414.     ylabel('Yoğunluk [dB]')
415.     saveas(gcf, sprintf('%d_doppler.png', sen_id))
416.
417. %
418.     figure
419.     plot(db(RESULTS_(sen_id).time_corr_func_norm));
420.     xlabel('Nokta')
421.     ylabel('Genlik [dB]')
422.     title 'Normalize Edilmiş Zaman Korelasyon Fonksiyonu')
423.     subtitle(sen_table(sen_id))
424.
425.     saveas(gcf, sprintf('%d_norm_time_corr.png', sen_id))
426.
427.     figure
428.     subplot(2,2,1)
429.
RESULTS_(sen_id).time_corr_func((nb_of_window_in_record+1)/2) =
RESULTS_(sen_id).time_corr_func((nb_of_window_in_record+1)/2-
1);
430.     time_corr_func_norm = RESULTS_(sen_id).time_corr_func ./
max(abs(RESULTS_(sen_id).time_corr_func));
431.     plot(db(time_corr_func_norm))
432.     xlabel('Nokta')
433.     ylabel('Genlik [dB]')
434.     title 'Zaman Korelasyon Fonksiyonu'
435.     subtitle(sen_table(sen_id))
436.
437.     subplot(2,2,2)
438.     [up, low]= envelope(db(time_corr_func_norm), 800, 'rms');
439.     plot((up))
440.     yline(max(up)-3);
441.     xlabel('Nokta')
442.     ylabel('Genlik [dB]')
443.     title 'Zaman Korelasyon Fonksiyonunun Zarfı'
444.     subtitle(sen_table(sen_id))
445.
446.     subplot(2,2,3)
447.     RESULTS_(sen_id).freq_corr_func((time_window_point+1)/2)
= RESULTS_(sen_id).freq_corr_func((time_window_point+1)/2-1);
448.     freq_corr_func_norm = RESULTS_(sen_id).freq_corr_func ./
max(abs(RESULTS_(sen_id).freq_corr_func));
449.     plot(db(freq_corr_func_norm))
450.     xlabel('Nokta')
451.     ylabel('Genlik [dB]')
452.     title 'Frekans Korelasyon Fonksiyonu'
453.     subtitle(sen_table(sen_id))

```

```

454.
455.     subplot(2,2,4)
456.     [up, low]= envelope(db(freq_corr_func_norm), 100, 'rms');
457.     plot(up)
458.     yline(max(up)-3);
459.     xlabel('Nokta')
460.     ylabel('Genlik [dB]')
461.     title 'Frekans Korelasyon Fonksiyonunun Zarfı'
462.     subtitle(sen_table(sen_id))
463.
464.     saveas(gcf, sprintf('%d_correlations.png', sen_id))
465.     close all
466.     % clc
467.
468.     msg = sprintf('RMS DELAY SPREAD: %f nsec',
RESULTS(sen_id).rms_gecikme_yayilim_ns*1e9);
469.     disp(msg);
470.     msg = sprintf('MEAN DELAY: %f nsec',
RESULTS(sen_id).ortalama_gecikme_ns*1e9);
471.     disp(msg);
472.     msg = sprintf('MEAN DOPPLER SHIFT: %f Hz',
RESULTS(sen_id).ortalama_doppler_kaymasi_nokta);
473.     disp(msg);
474.     msg = sprintf('RMS DOPPLER SPREAD: %f Hz',
RESULTS(sen_id).rms_doppler_yayilim_nokta);
475.     disp(msg);
476.
477.     sound(sin(1:3000))
478.
479.     %%
480.
481.     for i=1:length(RESULTS)
482.         RESULTS(i).gecikme_ns = RESULTS(i).korelasyon_fark *
sec_per_point / 100;
483.         RESULTS(i).korelasyon_mesafe_m =
RESULTS(i).gecikme_ns * physconst('LightSpeed');
484.         RESULTS(i).GGP_mesafe_m = RESULTS(i).GGP_tepe_noktasi
*sec_per_point / 100 * physconst('LightSpeed');
485.
486.     end
487.     %%
488.     % figure
489.     % plot(flip(power_delay_profile))
490.     % title('Power Delay Profile')
491.     % xlabel('Point')
492.     % ylabel('Power ')
493. end
494.

```