

**YÜKSEK FREKANSTA ÇALIŞAN GÜÇ
YÜKSELTEÇLERİNİN SAYISAL ÖN BOZULUM
İLE DOĞRUSALLAŞTIRMASI VE
ÖLÇÜM SİSTEMİNİN ETKİSİNİN GİDERİLMESİ**

**2015
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Emine Betül ŞANLI

**YÜKSEK FREKANSTA ÇALIŞAN GÜÇ YÜKSELTEÇLERİNİN SAYISAL
ÖN BOZULUM İLE DOĞRUSALLAŞTIRMASI VE
ÖLÇÜM SİSTEMİNİN ETKİSİNİN GİDERİLMESİ**

Emine Betül ŞANLI

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2015**

Emine Betül ŞANLI tarafından hazırlanan “YÜKSEK FREKANSTA ÇALIŞAN GÜÇ YÜKSELTEÇLERİNİN SAYISAL ÖN BOZULUM İLE DOĞRUSALLAŞTIRMASI VE ÖLÇÜM SİSTEMİNİN ETKİSİNİN GİDERİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Hayrettin YÜZER
Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 16/01/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Raif BAYIR (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Hayrettin YÜZER (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ (KBÜ)

...../...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Emine Betül ŞANLI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FREKANSTA ÇALIŞAN GÜÇ YÜKSELTEÇLERİNİN SAYISAL ÖN BOZULUM İLE DOĞRUSALLAŞTIRILMASI VE ÖLÇÜM SİSTEMİNİN ETKİSİNİN GİDERİLMESİ

Emine Betül ŞANLI

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Hayrettin YÜZER

Ocak 2015, 66 sayfa

Haberleşme sistemlerinde kullanılan güç yükselteçlerinin en verimli şekilde doğrusallaştırılması genel sistem verimliliğini etkilemektedir. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada verimliliği bozucu yönde etkileyen ölçüm sisteminde oluşan bozulmaların sistem modelleme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Güç yükseltecini doğrusallaştırma için sayısal ön bozulum (DPD) yöntemi ve sistemi modellemek için ise hafıza etkili polinom modelleme çeşitlerinden biri olan ‘unit delay‘ modellenmesi kullanılmıştır. Ölçüm sisteminde ki oluşan bozukluğu gidermek için harici bir kalibrasyon programı geliştirilmiştir. Bu kalibrasyon uygulaması ile DPD sonucu frekans spektrumundaki iyileşme, kalibrasyon uygulanmayan ölçüme göre çok daha fazla olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Ön bozulum, doğrusallaştırma, güç yükselteçleri, ölçüm hataları.

Bilim Kodu :

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

LINEARIZATION WITH DIGITAL PRE-DISTORTION OF HIGH FREQUENCY POWER AMPLIFIER AND ELIMINATION OF THE EFFECTS OF THE MEASUREMENT SETUP

Emine Betül ŞANLI

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechatronics Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Ahmet Hayrettin YÜZER

January 2015, 66 pages

Linearizing the amplifier used in the telecommunication systems is affecting the overall communication system performance. In this thesis, the effect of error due to measurements on the linearization performance is investigated. Digital predistortion (DPD) technique is used to linearize power amplifier and also Unit delay memory polynomial, one of the memory polynomial techniques, is used to model and represent amplifier in DPD system. In order to fix the errors in the measurement system the calibration software is developed. Then, it is shown that the DPD system performance after calibration is better than the DPD system performance without calibration.

Key Words : Predistortion, linearizing, power amplifier, measurement error.

Science Code :

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının araőtırılmasında ve yűrűtűlmesinde ilgi ve desteęini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandıęım, yűnlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillendiren danıőman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet Hayrettin YŪZER'e sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmamı destekleyen ASELSAN A.Ő.'ye ve Hakan COŐKUN'a űzel teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmam boyunca laboratuvar ortamlarından faydalandıęım ODTŪ Elektrik Műhendislięi Mikrodalga laboratuvar çalıőanlarına, asistanlarına ve hocalarına teőekkűr ederim.

Çalıőmalarımda bulunduęu manevi desteklerinden dolayı sayın Prof. Dr. őimőek DEMİR'e ve sevgili PRF ArGE Műh. A.Ő. alıőanlarına da teőekkűrű bir borç bilirim.

Sevgili aileme maddi manevi her zaman yanımda oldukları için tűm kalbimle teőekkűr ederim. Manevi desteęini hiç esirgemeyen sevgili GŪLAN'a en derin sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
GÜÇ YÜKSELTECİ DOĞRUSALLAŞTIRMA	4
2.1. GY’NİN DOĞRUSAL OLMADIĞINI GÖSTEREN PARAMETRELER.....	5
2.1.1. P_{1dB} Bastırma Noktası.....	5
2.1.2. Ara Kiplenim Bozukluğu.....	5
2.1.3. Spektral Genişleme	6
2.2. DOĞRUSALLAŞTIRMA TEKNİKLERİ.....	7
2.2.1. Geri Besleme İle Doğrusallaştırma.....	7
2.2.2. İleri Besleme İle Doğrusallaştırma	8
2.2.3. Ön Bozulum İle Doğrusallaştırma	9
2.2.4. Temel Bant Ön Bozulum	12
BÖLÜM 3	13
GÜÇ YÜKSELTECİ MODELLEME YÖNTEMLERİ	13
3.1. HAFIZA ETKİLİ POLİNOM MODELLEME	13

3.1.1. Volterra Serisi.....	14
3.1.2. Wiener, Hammerstein, Wiener & Hammerstein.....	15
3.1.3. Hafıza Etkili ‘Unit Delay’ Modelleme	16
BÖLÜM 4	19
ÖLÇÜM SİSTEMİNİN KURULMASI VE DOĞRULANMASI.....	19
4.1. ÖLÇÜM SİSTEMİNİN KURULMASI	19
4.2 ÖLÇÜM SİSTEMİNDE OLUŞAN HATALAR	20
4.3. ÖLÇÜM SİSTEMİNDE OLUŞAN HATALARIN GİDERİLMESİ.....	27
BÖLÜM 5	32
GY MODELLEME VE DPD UYGULAMASI.....	32
5.1. GY’NİN İLERİ YÖNLÜ MODELLEMESİ	36
5.1.1. Üç Farklı Merkez Frekansında Yapılan Ölçümler ile GY’ nin İleri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	36
5.1.2. Üç Farklı Ortalama RF Gücü Seviyesinde Yapılan Ölçümler ile GY’ nin İleri Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	37
5.1.3 Üç Farklı İşaret Genişliğinde Yapılan Ölçümler ile GY’ nin İleri Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	38
5.2 GY’NİN GERİ YÖNLÜ MODELLEMESİ.....	38
5.2.1 Farklı Merkez Frekansında Yapılan Ölçümler ile GY’ nin Geri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	39
5.2.2 Farklı Ortalama RF Güç Seviyelerinde Yapılan Ölçümlere ile GY’ nin Geri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	39
5.2.3. Üç Farklı İşaret Genişliğinde Yapılan Ölçümlere ile GY’ nin Geri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi.....	40
5.3. GY DPD UYGULAMA ADIMLARI.....	40
5.3.1. Kalibrasyonun DPD Üzerindeki Etkisi.....	44
5.3.2. Üç Farklı Merkez Frekansında Yapılan DPD Modelleri.....	45
5.3.3. Farklı Ortalama RF Güç Seviyelerinde Yapılan DPD Modelleri.....	49
5.3.4. Farklı İşaret Genişliklerinde Yapılan DPD Modelleri.....	52
5.3.5. 8PSK Verisine Ait DPD Modeli.....	55
5.3.6. Model Geçerlilik Bölgesi.....	56

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6	62
SONUÇ	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	P_{1dB} bastırma noktası.....	5
Şekil 2.2.	Doğrusal olmayan sistemlerde ara kiplenim bozuklukları.....	6
Şekil 2.3.	IMD oluşumu	7
Şekil 2.4.	Geri besleme ile doğrusallaştırma	8
Şekil 2.5.	İleri besleme ile doğrusallaştırma	8
Şekil 2.6.	Ön bozulum ile doğrusallaştırma	9
Şekil 2.7.	Dolaylı ön bozulumlu doğrusallaştırma sistemi.....	10
Şekil 2.8.	RF ön bozulum.....	11
Şekil 2.9.	IF ön bozulum	11
Şekil 2.10.	Temel bant ön bozulum.....	11
Şekil 3.1.	Davranışsal modelleme temel blok diyagramı	13
Şekil 3.2.	Güç yükselticide hafıza etkisinin kaynakları	14
Şekil 3.3.	Wiener-Hammerstein sistemi.....	15
Şekil 3.4.	Wiener ve Hammerstein sistemleri	16
Şekil 3.5.	Unit delay modelleme blok diyagramı	17
Şekil 4.1.	Ölçüm sistemi.....	19
Şekil 4.2.	VSG' ye yüklenen giriş verisi(kırmızı) ve VSA' dan alınan çıkış verisi (mavi)	21
Şekil 4.3.	Başlangıç zaman ayarı hassasiyetini arttırmak.....	22
Şekil 4.4.	Kalibrasyon gerçekleştirilmemiş orijinal ve çıkış işareti genlik değerleri.....	23
Şekil 4.5.	Kalibrasyon gerçekleştirilmemiş orijinal ve çıkış işareti faz açısı değerleri.....	24
Şekil 4.6.	Genlik değerleri.....	24
Şekil 4.7.	Faz değerleri.....	24
Şekil 4.8.	Kalibrasyon yapılmamış orijinal ve ölçüm işareti arasındaki genlik hatası.....	24
Şekil 4.9.	Kalibrasyon yapılmamış orijinal ve ölçüm işaretleri arasında oluşan faz hatası.....	25
Şekil 4.10.	Hızalanmış ve genişletilmiş işaretlerin genlik değerleri	25

Şekil 4.11. Hizalanmış ve genişletilmiş işaretlerin faz açısı değerleri	26
Şekil 4.12. Genlik değerleri	26
Şekil 4.13. Faz değerleri	26
Şekil 4.14. Hizalanmış ve genişletilmiş işaretlerin genlik hata değeri	27
Şekil 4.15. Hizalanmış ve genişletilmiş işaretlerin faz açısı hata değeri	27
Şekil 4.16. Genlik kalibrasyonu uygulanmış işaretlerin genlik değerleri	29
Şekil 4.17. Genlik kalibrasyonu uygulanmış işaretler arasındaki hata değeri	29
Şekil 4.18. Faz kalibrasyonu uygulanmış işaretlere ait faz değerleri	30
Şekil 4.19. Faz kalibrasyonu uygulanmış işaretlerde oluşan faz hatası	30
Şekil 5.1. DPD ile doğrusallaştırma sistemi	33
Şekil 5.2. Ton başına -1dBm ve 0 dBm iki iki-tonlu uyartım işareti sonucu IMD ler arası asimetri	34
Şekil 5.3. Uygulanan işarete ait CCDF değeri	35
Şekil 5.4. Orjinal ve GY cevabı işaretleri genlik değerleri	41
Şekil 5.5. Orjinal ve GY cevabı işaretleri faz açısı değerleri	42
Şekil 5.6. Normalize edilmiş orjinal ve GY cevabı işaretleri genlik değerleri	42
Şekil 5.7. DPD doğrulama akış şeması	43
Şekil 5.8. Kalibrasyon uygulanmamış işaretlerin DPD performansı	44
Şekil 5.9. Kalibrasyon uygulanmamış işaretlerin DPD performansı	44
Şekil 5.10 Kalibrasyon uygulanmış ve uygulanmamış sistemin DPD üzerindeki performansı-giriş işaret(sarı), GY çıkışı(mavi), kalibrasyonsuz DPD çıkışı (yeşil), kalibrasyonlu DPD çıkışı (magenta)	45
Şekil 5.11. 4.8 MHz merkez frekansında yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü- giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	46
Şekil 5.12. 4.8 MHz merkez frekansında yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü- giriş işareti (magenta), DPD çıkışı mavi), GY çıkışı (sarı)	47
Şekil 5.13. 12 MHz Merkez frekansında yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	48
Şekil 5.14. Merkez frekansı 27 MHz'de yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	49

Şekil 5.15. -5 dBm Rf güç seviyesinde yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	50
Şekil 5.16. -1 dBm RF güç seviyesinde yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	51
Şekil 5.17. 3 dBm RF güç seviyesinde yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	52
Şekil 5.18. Bant genişliği 20 kHz olan işaretin ölçümüne ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	53
Şekil 5.19. Bant genişliği 27 kHz olan işaretin ölçümüne ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı)	54
Şekil 5.20. Bant genişliği 40 kHz olan işaretin ölçümüne ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).....	55
Şekil 5.21. 8PSK işaretinin ölçümüne ait DPD modellemesinin VSG ekranındaki görüntüsü, giriş işareti (sarı), DPD çıkışı (magenta), GY çıkışı (mavi)	56
Şekil 5.22. -1dBm RF giriş gücü seviyesine ait geri yönlü modelleme kullanılarak 3 dBm RF giriş gücündeki DPD etkisi, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).....	57
Şekil 5.23. -1dBm RF giriş gücü seviyesine ait geri yönlü modelleme kullanılarak +1 dBm RF giriş gücündeki DPD etkisi, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).....	58
Şekil 5.24. 4.8 MHz merkez frekansında gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 12 MHz merkez frekansındaki DPD uygulaması, giriş işareti (sarı)DPD çıkışı (magenta), GY çıkışı (mavi).....	59
Şekil 5.25. 4.8 MHz merkez frekansında gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 27 MHz merkez frekansındaki DPD uygulaması, giriş işareti (mavi) DPD çıkışı (magenta), GY çıkışı (sarı)	59
Şekil 5.26. 27 kHz bant genişliğinde gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 20 kHz bant genişliğindeki DPD uygulaması, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).....	60
Şekil 5.27. 27 kHz bant genişliğinde gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 40 kHz bant genişliğindeki DPD uygulaması, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Cihazların ölçüm sistemi içerisindeki bağlantıları.....	20
Çizelge 4.2. VSA'ya ait bant genişliklerine karşılık gelen örnekleme frekans değerleri	31
Çizelge 5.1. Üç farklı merkez frekansında yapılan ölçümlere göre elde edilen ileri modele ait değerler	36
Çizelge 5.2. Üç farklı RF gücü seviyesinde yapılan ölçümlerle elde edilen ileri modele ait değerler.	37
Çizelge 5.3. Üç farklı bant genişliğine sahip işaretin ölçümlerine göre elde edilen ileri modele ait değerler	38
Çizelge 5.4. Üç farklı merkez frekansında yapılan ölçümlere göre elde edilen geri yönlü modele ait değerler	39
Çizelge 5.5. Üç farklı RF güç seviyesinde yapılan ölçümlere göre elde edilen geri yönlü modellere ait değerler	40
Çizelge 5.6. Üç farklı bant genişliğine sahip işaretin ölçümlerine göre elde edilen geri yönlü modele ait değerler	40
Çizelge 6.1. DPD performans özeti.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

dB	: Decibel (Desibel)
dBc	: Decibel Relative to the Carrier (Taşıyıcıya Göre Desibel)
dBm	: Decibel-Milliwatts
kHz	: kilo Hertz
ms	: mili saniye
MHz	: Mega Hertz

KISALTMALAR

8PSK	: Eight Phase Shift Keying (Sekiz Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
ACPR	: Adjacent Channel Power Ratio (Komşu Kanal Güç Oranı)
AM	: Amplitude Modulation (Genlik Modülasyonu)
BER	: Bit Error Ratio (Bit Hata Oranı)
CCDF	: Complementary Cumulative Distribution Function (Bütünleyici Kümülatif Dağılım Fonksiyonu)
CFR	: Crest factor Reduction (Tepe Oranı Azaltma)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal Sinyal İşleme)
DPD	: Digital Predistortion (Sayısal Ön Bozulum)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
F _s	: Sample Frequency (Örnekleme Frekansı)
GM	: Geri yönlü Model
GY	: Güç Yükselteci
HF	: High Frequency (Yüksek Frekans)
I/Q veri	: In-phase (eş fazlı) ve out-of phase (90° faz farklı) veri
IBW	: Information Bandwidth (Taban-Bant İşaret Bant Genişliği)

IF	: Intermediate Frequency (Ara Frekans)
IMD	: Inter Modulation Distortion (Ara Kipleme Bozulumu)
IMDL	: Inter Modulation Distortion Low (Düşük Ara Kipleme Bozulumu)
IMDU	: Inter Modulation Distortion Up (Yüksek Ara Kipleme Bozulumu)
İM	: İleri Yönlü Model
MATLAB	: Matrix Laboratory
MEMR	: Memory Effect Modeling Ratio (Hafıza Etkisi Modelleme Oranı)
MP	: Memory Polynomial (Hafızalı Polinom)
NMSE	: Normalized Mean Square Error (Normalize Edilmiş Ortalama Hata Oranı)
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dikey Frekans Bölmeli Çoklama)
PAPR	: Peak-to-Average Power Ratio (Tepe ile Ortalama Güç Oranı)
PD	: Pre-Distortion (Ön Bozulum)
PM	: Phase Modulation (Faz Modülasyonu)
QAM64	: Quadrature Amplitude Modulation (Dörtlü Genlik Modülasyonu)
RF	: Radio Frequency (Radyo Frekansı)
TDL	: Tapped-Delay-Line (Dallı gecikme hattı)
VHF	: Very High Frequency (Çok Yüksek Frekans)
VSA	: Vector Signal Analyzer (Vektör İşaret Analizörü)
VSG	: Vector Signal Generator (Vektör İşaret Üreteci)
WCDMA	: Wideband Code Division Multiple Access (Genişbant Kod Bölmeli Çoklu Erişim)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde, radyo frekans (RF) haberleşme sistemi, artan kullanıcı sayısı ile gelişim göstermektedir. Kablosuz haberleşmenin kullanılan alan çeşitliliği ise sürekli artmaktadır. Yeni geliştirilen kodlama sistemleri (WCDMA, OFDM gibi) ile sinyallerin geniş zarf aralıkları ve tepe güçlerinin ortalama güç seviyesine oranları (PAPR) büyümektedir. Bu geniş alanlarda ki yoğun kullanım artışına karşın kullanılan frekanslar radyo frekans spektrumundaki değerlerle sınırlandırılmaktadır. Bu yüzden haberleşmede kullanılan sistemlerin verimliliği ve doğrusallığı çok önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, sayısal sinyal işleme ile haberleşmede kullanılan doğrusal olmayan sistemlerden kaynaklanan bozulmaların azaltılması hedeflenmiştir. Bu bozulmalar sisteme giren işaretler ile çıkan işaretler arasındaki farklılıkla kontrol edilmektedir. Oluşan bozulmalar ‘doğrusal bozulmalar’ ve ‘doğrusal olmayan bozulmalar’ olarak ayrılabilir. Doğrusal bozulmalar, herhangi başka sinyal karışmadan sabit genlik ya da faz farklılığıyla oluşan bozulmalardır. Bu bozulmalar kolaylıkla giderilebilir. Doğrusal olmayan bozulmalar da ise, sistem çıkışında elde edilen sinyallerde giriş sinyalinin içerdiği frekanslardan farklı frekansta sinyallerin eklendiği görülür ve sinyalde bölgesel genlik farklılıkları ve faz farkları görülür. Doğrusal olmayan bozulmalar diğer haberleşme sistemlerini etkilediğinden, verimli bir iletişim için giderilmesi gerekmektedir.

Günümüz haberleşmesinde çeşitli zarflarda ve spektrum verimliliği yüksek, modülasyonlar kullanılmaktadır. Aynı zamanda, birçok taşıyıcı frekansı aynı anda iletebilecek olan güç yükselteçleri tasarlanıyor ve kullanılıyor. Bu iki durumdan dolayı oluşan genlik ve faz bozulmaları ‘ara kipleme bozulumu’ (IMD) denilen istenmeyen sinyalleri oluşturmaktadır [1].

RF güç yükselteç (GY) kazançları tüm güç çıkış seviyeleri için aynı değildir. GY’de kullanılan aktif elemanlara bağlı olarak yükseltecin doyum (tepe noktası) bölgesine yaklaştıkça genlik kazancı azalırken faz değişimleri görülmektedir. Bu yüzden doğrusal olmayan bozulmalar genellikle yüksek güç seviyelerinde oluşmaktadır. Güç yükselteci türüne bağlı olmakla birlikte genel olarak düşük güç seviyesinde doğrusal bir kazanç olmasına karşın istenen verimlilik sağlanamamış olur, yüksek güç seviyesinde ise verim artarken kazanç artık doğrusallıktan uzaklaşır. Bu çalışmada ise yüksek güç seviyelerinde yüksek verim ve doğrusallık hedeflenmiştir.

Doğrusal olmayan bozulmaların giderilmesi için birçok doğrusallaştırma yöntemi ve modelleme yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır;

Andreoli vd. RF yükselteçleri için sayısal doğrusallaştırma yöntemlerinden, ileri beslemeli doğrusallaştırma ve ön bozulumlu doğrusallaştırma kullanmışlardır. Sonuç olarak ön bozulumlu doğrusallaştırmada komşu kanalların güç oranında yaklaşık 10db kadar iyileşme sağlamışlardır [2].

Nizamuddin hafıza etkisine sahip TDL modelini kullanarak sayısal ön bozulum gerçekleştirmiştir. Simülasyon ortamında yaptığı doğrusallaştırma da komşu kanallarda ki güç seviyesini yaklaşık 20dB aşağı indirmiştir [3].

Hyunchul vd. uzun hafıza etkisine sahip GY’nin davranışsal modellemesini elde etmek için paralel-kaskat LN modelini kullanmıştır ve gerçek GY çıkışının 4 dB yakınında bir sonuç elde etmişlerdir [4].

Boumaiza ve. Ghannouchi, ısısal hafıza etkisine sahip RF GY’lerin modellemesini gerçekleştirmiş ve DPD üzerindeki etkisini incelemişlerdir [5].

Vuolevi vd., elektriksel hafıza etkisini bulabilmek için üç tonlu test ölçüm sistemi hazırlamışlardır ve bu ölçüm sisteminde fazların üçüncü dereceden arakiplenim bozululuklarını incelemişlerdir [6].

Bu çalışmada kullanılan n bozulumlu doğrusallaştırma işlemi, GY çıkışında elde edilen n bozulumlu sinyalin bozucu etkilerini ortadan kaldıracak şekilde giriş işaretinin bozularak GY girişine uygulanmasıdır. Böylece bozucu etkiler birbirini yok ederek orijinal giriş sinyali elde edilmiş olur. n bozulum ile doğrusallaştırma sistemi detaylı olarak Bölüm 2’de verilmiştir.

İyi bir n bozulum performansı bekleniyorsa, sistemin hafıza etkisi mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. IMD’lerin giderilme prensibi, ters fazda aynı genlikte uygulanması ve bunların birbirini yok etmesidir. Fakat hafıza etkisi ile bu yok etme işlemi tam bir performansla yapılamamaktadır.

Bu tezde ki amaç hafıza etkili n bozulumlu doğrusallaştırma tekniği uygulamasında kullanılan ölüm cihazlarından kaynaklı bozulmaların belirlenmesi ve onların etkisinin ortadan kaldırılmasıdır.

BÖLÜM 2

GÜÇ YÜKSELTECİ DOĞRUSALLAŞTIRMA

Doğrusallaştırma yöntemleri geliştirmek için uzun yıllardır çalışmalar yürütülmektedir. Geçmişte gerçekleştirilen bazı analog teknikler geliştirilerek RF güç yükselteçleri için kullanılmaya başlanmıştır. Artık günümüzde analog teknikler yerine sayısal doğrusallaştırma teknikleri üzerinde yoğunlaşmaya başlanmıştır.

Son yıllarda, analog-sayısal ve sayısal-analog dönüştürücülerin geliştirilmesi ile sayısal işaret işleme hızında önemli bir ilerleme sağlanmıştır. Haberleşme sistemlerinde sadece sayısal işaret işleme ile temel-bant modülasyon gerçekleştirmek mümkün olmuştur. Bu sayede doğrusallaştırma uygulamalarında da sayısal işaret işleme kullanılmaya başlanmıştır.

GY'ye uygulanan giriş gerilimini $V(t)$, alınan çıkış gerilimini da $V_o(t)$ olarak gösterdiğimizde;

$$V_o(t) = +a_1V(t) + a_2V(t)^2 + \dots + a_nV(t)^n \quad (2.1)$$

Yükseltecin girişinden düşük bir gerilim uyguladığımızda, güç yükselteci doğrusal çalışmaya başlar ve bu durumda çıkış gerilimi;

$$V_o(t) \approx a_1V(t) \quad (2.2)$$

Bu eşitliklerde GY'nin doğrusal kazancı a_1 ' dir. Fakat GY her giriş gerilimi için doğrusal bir şekilde çalışmamaktadır. Özellikle giriş voltajı yükseldikçe ikinci harmonikler karesi ile orantılı, üçüncü harmonikler ise küpü ile orantılı olarak artarak ana bileşenden daha baskın olmaya başlamaktadırlar. Dolayısıyla yüksek dereceli

terimler etkisini gösterdikçe giriş ile çıkış arasında doğrusal olmayan bir ilişki ortaya çıkmaktadır.

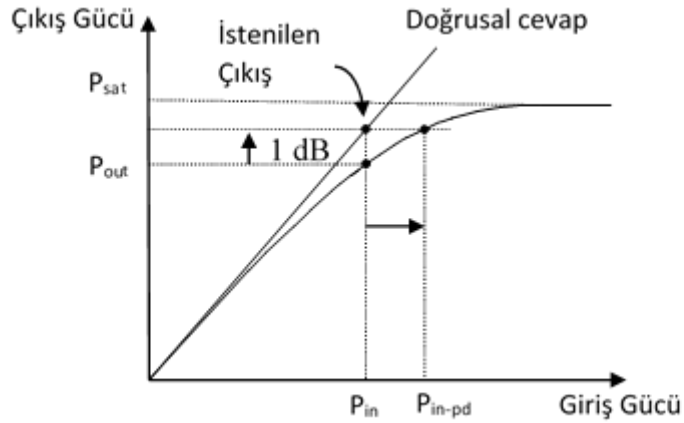
2.1. GY'NİN DOĞRUSAL OLMADIĞINI GÖSTEREN PARAMETRELER

GY'nin doğrusallığını karakterize eden birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanları;

1. P_{1dB} noktası
2. Ara kiplenim bozuklukları (IMD)
3. Komşu kanal güç oranı (ACPR)

2.1.1. P_{1dB} Bastırma Noktası

Güç yükseltecinin doğrusal çalışmadığı güç seviyesini tanımlamak için kullanılan en önemli parametrelerden bir tanesi P_{1dB} bastırma noktasıdır. Güç yükselteci çıkış güç seviyesinin, GY'nin doğrusal olması durumunda elde edilecek çıkış gücünden 1 dB az olduğu noktadır. Bu noktadan sonra doğrusallık bozuluyor diye kabul edilir. Güç yükseltecinin en yüksek güç çıkışına doyum gücü (P_{sat}) Şekil 2.1'de verilmiştir.



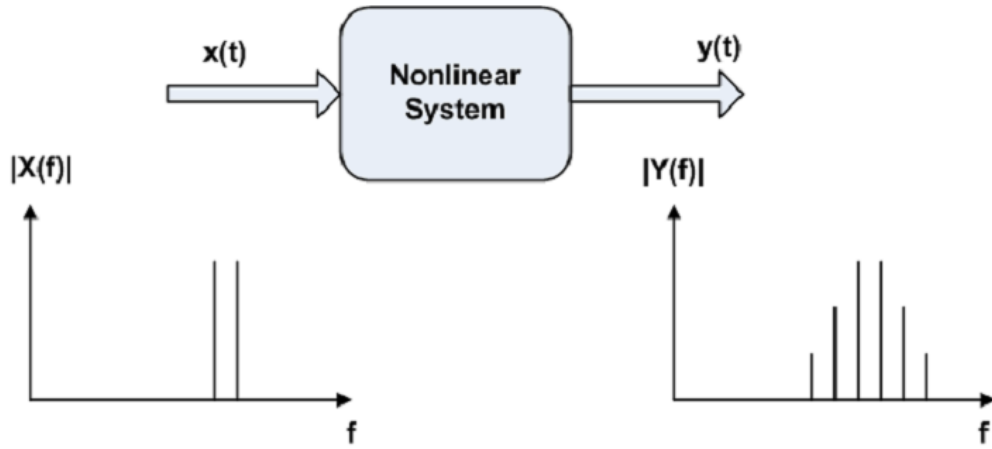
Şekil 2.1. P_{1dB} bastırma noktası.

2.1.2. Ara Kiplenim Bozukluğu

Güç yükseltecine uygulanan giriş işaretinin geniş bantlı olması güç yükseltecinin doğrusal olmayan bölgede çalışmasına sebep olmaktadır, bunun sonucunda da çıkış

işaretinde istenmeyen bozulmalar görülmektedir. Çıkışta oluşan farklı frekanstaki istenmeyen sinyallere “ara kiplenim bozuklukları (IMD)” denir (Şekil 2.2).

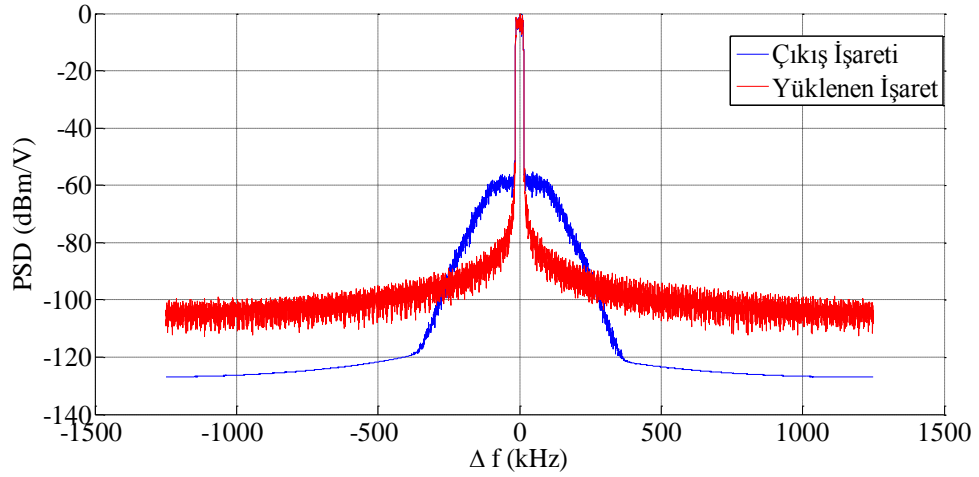
GY girişine çok tonlu bir sinyal uygulandığında, bazı güç seviyelerinde GY çıkışında ana tonların yanında giriş işaretinde olmayan frekanslarda işaretler ortaya çıkmaktadır. Örneğin girişe iki tonlu bir sinyal uyguladığımızda ($\cos\omega_1; \cos\omega_2$), $n\omega_1$ ve $m\omega_2$ harmonikleri $\pm n\omega_1$ ve $\pm m\omega_2$ frekanslarında gözlenmektedir [15].



Şekil 2.2. Doğrusal olmayan sistemlerde ara kiplenim bozuklukları.

2.1.3. Spektral Genişleme

GY'lerin doğrusal olmadığını gösteren başka bir parametre ise spektral yeniden oluşumdur. Arakiplenim bozukluğuyla hemen hemen aynıdır. Ara kiplenim bozukluğunda çok tonlu sinyal uygulanırken spektral kaymada modülasyonlu sinyal uygulanır. Bu durumda komşu kanallarda istenmeyen sızıntılar oluşur. Ana kanalda oluşan sinyallerin bu sızıntı sinyallerin oranına “komşu kanal güç oranı (ACPR)” denir. Modern haberleşme sisteminde doğrusallık genelde bu terimle tanımlanır. Bu tanıma uygun işaretler Şekil 2.3'te verilmektedir. Söz konusu ACPR'ın matematiksel ifadesi eşitlik (2.3), eşitlik (2.4) ve eşitlik (2.5)'te verilmektedir.



Şekil 2.3. IMD oluşumu.

$$ACPR_T = \frac{P_{anakanal}}{P_{altyankanal} + P_{üstyankanal}} \quad (2.3)$$

$$ACPR_L = \frac{P_{anakanal}}{P_{altyankanal}} \quad (2.4)$$

$$ACPR_U = \frac{P_{anakanal}}{P_{üstyankanal}} \quad (2.5)$$

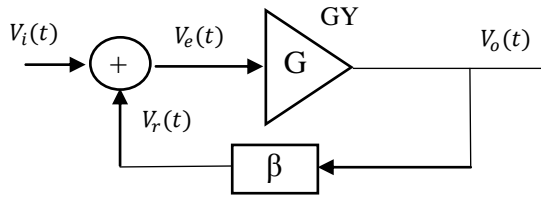
2.2. DOĞRUSALLAŞTIRMA TEKNİKLERİ

Güç yükselteçlerinin daha verimli kullanılabilmesi için doyum bölgesine yakın yerlerde kullanılması tercih edilir. Fakat bununla birlikte GY doğrusal olarak çalışmamaktadır. Doğrusallaştırma teknikleri kullanılarak, güç yükselteçlerinde doğrusal çalışmaya önlenebilmektedir. En yaygın kullanılan doğrusallaştırma yöntemleri:

1. Geri besleme ile doğrusallaştırma
2. İleri besleme ile doğrusallaştırma
3. Ön bozulum ile doğrusallaştırma

2.2.1. Geri Besleme İle Doğrusallaştırma

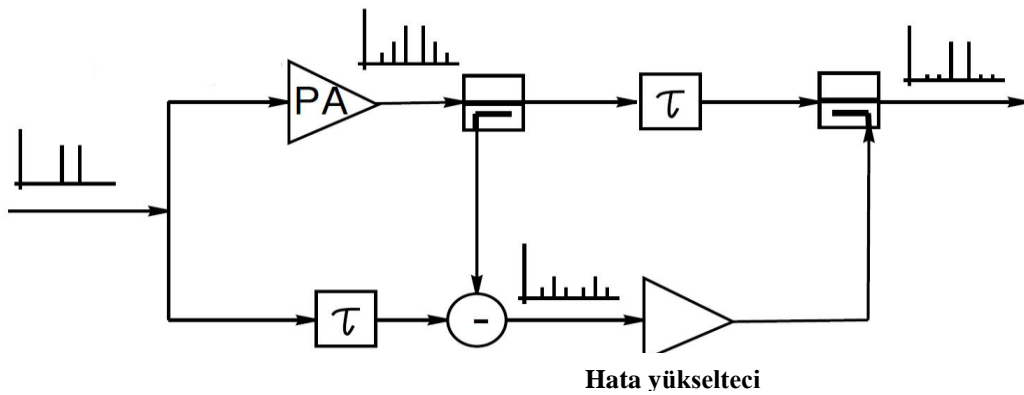
Geri besleme sistemleri basitçe, GY'nin çıkışından girişine negatif doğrusal geri besleme uygulamasıdır. Temel geri besleme blok diyagramı Şekil 2.4'te verilmiştir[14]. Bu metod düşük frekanslı uygulamalar için oldukça uygundur fakat yüksek frekanslarda önemli derecede kararlılık problemi ortaya çıkmaktadır. Özellikle giriş ve çıkış arasındaki gecikme kazanç ve bant genişliğini sınırlamaktadır.



Şekil 2.4. Geri besleme ile doğrusallaştırma.

2.2.2. İleri Besleme İle Doğrusallaştırma

İleri besleme ile doğrusallaştırmanın genel blok diyagramı Şekil 2.5'te verilmektedir. Bu yöntemde giriş ikiye bölünmektedir, bir giriş ana yükseltme işlemi, diğer giriş ise hata tahmini içindir. Hata tahmini için bölünmüş girişe ana yükselteçten gelen gecikmeyi telafi etmek için geciktirilir ve ana yükselteç çıkışı ile gecikmeli giriş işareti karşılaştırılarak hata yükselteciye verilir.

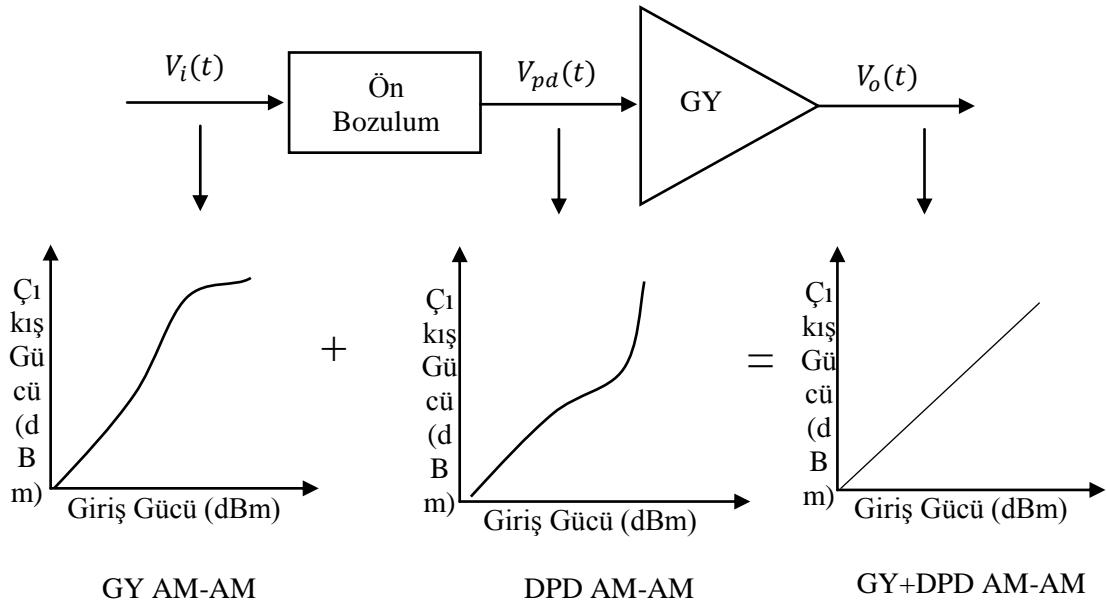


Şekil 2.5. İleri besleme ile doğrusallaştırma.

İleri besleme ile doğrusallaştırma geri beslemeli doğrusallaştırmaya göre en büyük avantajı geniş bantlarda kullanılabilmesidir. En büyük dezavantajı ise adaptif olmamasıdır. Güç yükseltecinin sıcaklığına, yaşlanmasına ya da devresindeki herhangi bir özellik değişikliğini telafi edememektedir.

2.2.3. Ön Bozulum İle Doğrusallaştırma

Temel olarak ön bozulum (PD); doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip GY' nin girişinde bulunan bir blok olarak modellenmektedir. DPD sisteminde GY' ye uygulanmak istenen uyarım işareti ilk olarak PD bloğundan geçer ondan sonra GY' ye uygulanır.



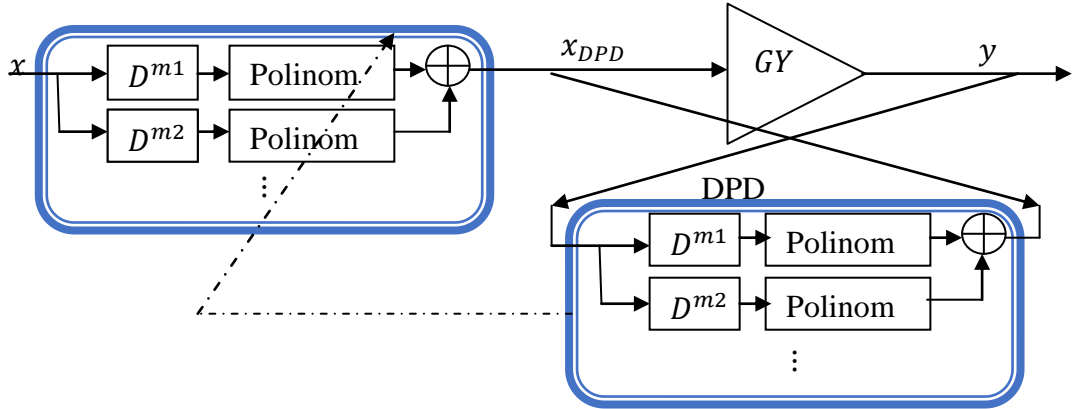
Şekil 2.6. Ön bozulum ile doğrusallaştırma.

DPD katsayılarını bulmak için doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki çeşit yöntem bulunmaktadır. Bu iki yöntem de temel olarak giriş işareti ve çıkış işaretini karşılaştırarak, giriş – çıkış arasında doğrusal bir orana en yakın karakteristik elde edilmesine yardımcı olacak bir PD modeli elde etmeyi amaçlamaktadır.

Doğrudan öğrenme yöntemi dolaylı öğrenme yöntemine göre çok daha iyi sonuç vermektedir. Fakat doğrudan öğrenme yönteminde, GY' nin model parametreleri

tespit edilmelidir. Yani GY'nin eleman bazında davranışların bilinmesi gerekir. Bu yüzden doğrudan öğrenme yöntemi pek tercih edilmemektedir. Dolaylı öğrenmenin avantajı ise, model varsayımı ve GY'nin parametreleri hakkında tahmin yapmaya gerek duyulmamasıdır [7].

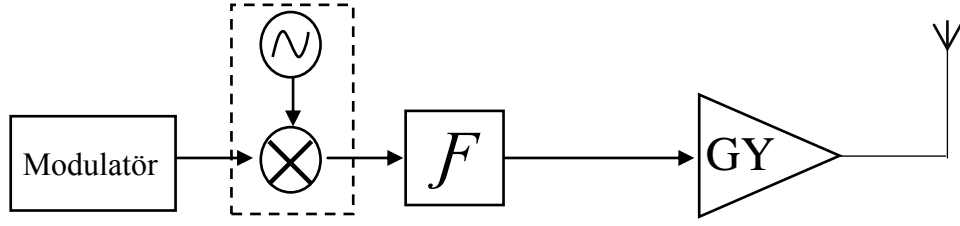
Dolaylı öğrenme DPD mimarisi Şekil 2.7'de verilmiştir. x_{DPD} , temel bant GY girişini aynı zamanda PD bloğu çıkışını; y ise GY çıkışını ve DPD öğrenme bloğu girişini belirtmektedir. Dolaylı öğrenme mimarisinde, x_{DPD} DPD sinyali ve GY'nin y sinyali kullanılarak ters giriş-çıkış ilişkisi kurulur ve sistemin giriş işareti, x , ters ilişki ile bulunmuş PD dan geçtikten sonra GY' ne uygulanır[8]. Böylece, ters modelleme ile GY'deki bozulmanın tersi PD' bloğunda yapılarak GY çıkışında sistem girişine göre doğrusal bir işaret alınması sağlanmaktadır.



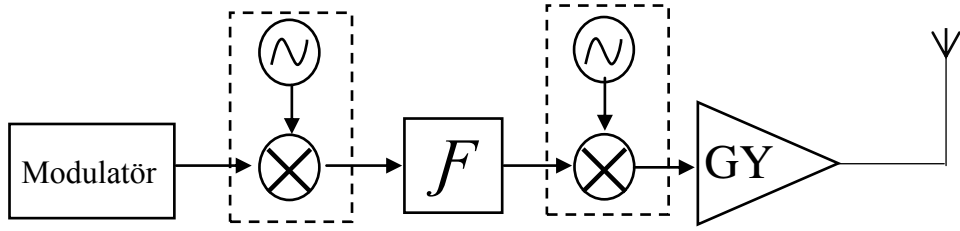
Şekil 2.7. Dolaylı ön bozulumlu doğrusallaştırma sistemi.

Ön bozulumlu doğrusallaştırma kullanıldığı frekanslara göre üç bölüme ayrılabilir;

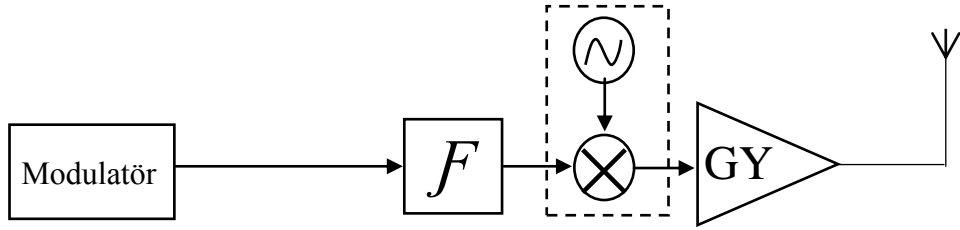
1. RF ön bozulum (Şekil 2.8)
2. IF ön bozulum (Şekil 2.9)
3. Temel bant ön bozulum (Şekil 2.10)



Şekil 2.8. RF ön bozulum.



Şekil 2.9. IF ön bozulum.



Şekil 2.10. Temel bant ön bozulum.

RF ön bozulumda, sinyal direkt GY'ye uygulanmaktadır. Sistemin uygulaması oldukça sade görünmesine rağmen yüksek frekanslarda zayıf performans vermesinden dolayı kısıtlı uygulama alanları bulunmaktadır. Bu ön bozulum bazı uydu göndermeç uygulamalarında yeterli görülüp kullanılmaktadır [12].

IF ön bozulum daha orta frekanslarda çalışır ve farklı taşıyıcı frekanslarda çalışmasını sağlar. Fakat RF ön bozuluma göre daha dar bantlı olduğundan çalışmayı daha kısıtlamaktadır ve yüksek örnekleme frekansı gerekliliğinden dolayı DSP uygulamalarında yüksek verimle çalışmamaktadır.

2.2.4. Temel Bant Ön Bozulum

Temel bant ön bozulum, sayısal ön bozulum(DPD) olarak da adlandırılmaktadır. DPD diğer doğrusallaştırma yöntemlerine göre devre boyutları ve fiyatları açısından maliyeti düşürme potansiyeline sahiptir ve günümüzde yazılımla çalışan yükselteçler ve yeni ağ topolojileri sayısal bölümler içerdikleri için bu yöntemi uygulamak için ekstra bileşen kullanımı gerektirmemektedir [16]. DPD genel modül verimliliği, uygulama performansı ve donanımsal uyum sağlayabilme gibi üstün özellikleriyle sık tercih edilen doğrusallaştırma tekniklerinden biridir. Genel olarak 20MHz üstü uygulamalarda kullanılabilir.

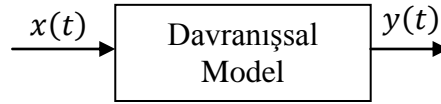
GY'nin doğrusal olmayan karakteristiğinin tam tersi karakteristiğe sahip bir giriş işareti GY'ye uygulanarak çıkışta doğrusal bir çıkış beklenmektedir. Buradaki en önemli husus GY'nin doğrusal olmayan davranışsal modellemesini çıkarmaktır. GY'ye tekrar uygulanacak işaret GY'nin modellemesinin ters fonksiyonu olacağından GY ne kadar doğru modellenirse doğrusallık o kadar yüksek olacaktır. GY'nin ters fonksiyonu giriş ile çıkış işaretinin yer değiştirilip ona uygun davranışsal modellemesinin elde edilmesiyle bulunmaktadır.

BÖLÜM 3

GÜÇ YÜKSELTECİ MODELLEME YÖNTEMLERİ

Güç yükselteçleri modellemesi, fiziksel modelleme ve davranışsal modelleme olarak ikiye ayrılabilir. Fiziksel modelleme yapılırken, güç yükseltecinin (GY) içerdiği elemanlar hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Bu tip modellemede, devre düzeyinde benzetim yapılmalıdır ve çok uzun zaman almaktadır. Davranışsal modellemede ise sistem düzeyinde benzetim yapılır. GY'lerin içerdikleri elemanlar hakkında bilgi sahibi olmaya gerek yoktur.

Davranışsal modellemenin performansı, parametreleri elde etme tekniğine ve kullanılan model yapısına bağlıdır. Davranışsal modelleme yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir.



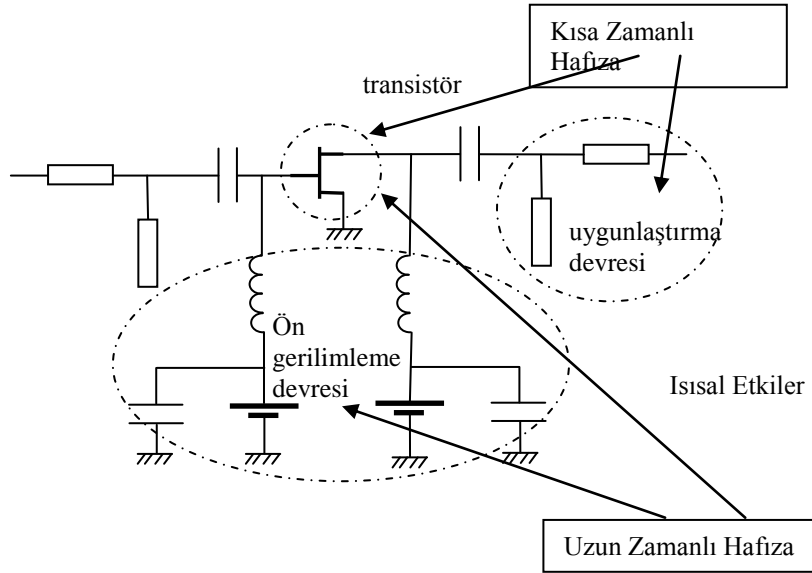
Şekil 3.1. Davranışsal modelleme temel blok diyagramı.

Şekil 3.1'de “ $x(t)$ ” uyarma işaretini, “ $y(t)$ ” uyarma işaretine karşı sistem cevabını ve “Davranışsal Model” ismi ile verilen kapalı kutu ise model fonksiyonunu belirtmektedir. Bu çalışmada davranışsal model olarak “Hafıza Etkili Polinom Modeli” model fonksiyonu olarak seçilmiştir.

3.1. HAFIZA ETKİLİ POLİNOM MODELLEME

Sistem cevabında daha önceki bir zamanda uygulanan uyarma işaretinin etkisinin görülmesi bu sistemin “Hafıza Etkisine Sahip” olması olarak tanımlanır. Hafıza etkisi ilgili zaman sabitesine göre “kısa zamanlı hafıza etkisi” ve “uzun zamanlı

hafıza etkisi” olarak ikiye ayrılır. Kısa zamanlı hafıza etkisi, RF bandında aktif cihaz ve uygun ağlarda, sabit taşııcı süresi ve reaktif bileşenlerden kaynaklanır. Bu zaman sabitleri bilgi zaman ölçeğinde çok küçük olduğu için bu GY’ler hafızasız olarak kabul edilmektedir. Buna karşılık uzun süreli hafıza etkisi düşük frekanslı olgulardır. Bu zaman sabitleri içeriği bilgi zaman ölçeğinde karşılaştırılabilir, oluşan dinamik etkiler zarf üzerinde görülebilir. Bu durum genelde DC besleme (bias) devrelerinde ve aktif elemanların şarj taşıyıcılarında dinamik termal etkisi olarak bilinir. Bir GY devresi ve hafıza etkisinin kaynakları örnek bir GY devresi üzerinde Şekil 3.2’de belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Güç yükselticinde hafıza etkisinin kaynakları.

3.1.1. Volterra Serisi

$Z(n)$ girişi ile $z_a(n)$ çıkışı arasındaki doğrusal olmayan karmaşık zarf ilişkisi, hafıza etkili modelleme yöntemlerinden karmaşık yapıda olan Volterra Serileri ile ilgili ifade edilebilir (Eşitlik 6);

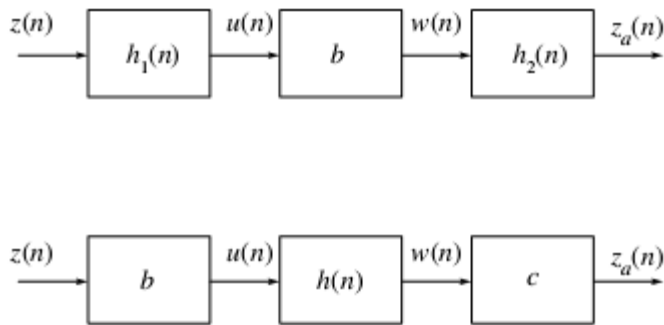
$$z_a(n) = \sum_{i=0}^N h_1(i)z(n-i) + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N h_3(i, j, k)z(n-i)z(n-j)z^*(n-k) \dots + \epsilon(n) \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'da “h1” ve “h3” Volterra kernellerine ait alçak geçiren eşdeğerleri, “n” ayrık zaman ifadesini, “N” hafıza uzunluğunu ve “e” model hatasını belirtmektedir. “h1” kerneli doğrusallığı, “h3” kerneli ise kübik kerneli temsil etmektedir. “h5” gibi kernel sayıları yüksek derecelere kadar gitmektedir. Volterra serileri ilk başta gerçel sayılar için tasarlanmış olsa da sonradan alçak eşdeğerlere ait kernellerde kullanılmaya başlanmıştır. Volterra serisinde $(N+1)^K$ sayısı kadar volterra kernel katsayısına ihtiyaç vardır. “K” burada doğrusal olmama derecesini belirtmektedir. Bu katsayı adedi pratikte uygulamak için oldukça fazladır. Bu yüzden Volterra serisinden faydalanarak bazı özel durumlar için başka hafıza modelleri geliştirilmiştir.

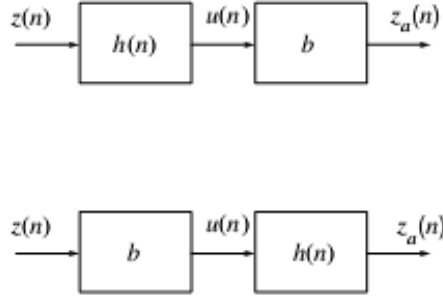
3.1.2. Wiener, Hammerstein, Wiener & Hammerstein

Doğrusal dinamik sistemlerin ve statik doğrusal olmayan durumların birleştirilmesiyle elde edilen doğrusal olmayan bloklarla ifade edilirler. En genel Wiener-Hammerstein modeli ya da Hammerstein-Wiener modeli Şekil 3.3'de, basitleştirilmiş Wiener ve Hammerstein ayrı modelleri ise Şekil 3.4'te verilmektedir. Hafızasız doğrusal olmayan çıkışı Eşitlik (3.2)' de verilmektedir.

$$u(n) = \sum_{k=1}^K b_k z(n) |z(n)|^{k-1} \quad (3.2)$$



Şekil 3.3. Wiener-Hammerstein sistemi.



Şekil 3.4. Wiener ve Hammerstein sistemleri.

Doğrusal dinamik sistem çıkışı, giriş ile uygulanan “ h ” darbesinin cevabına göre hesaplanabilir:

$$z_a(n) = \sum_{q=0}^Q h(q)u(n-q) \quad (3.3)$$

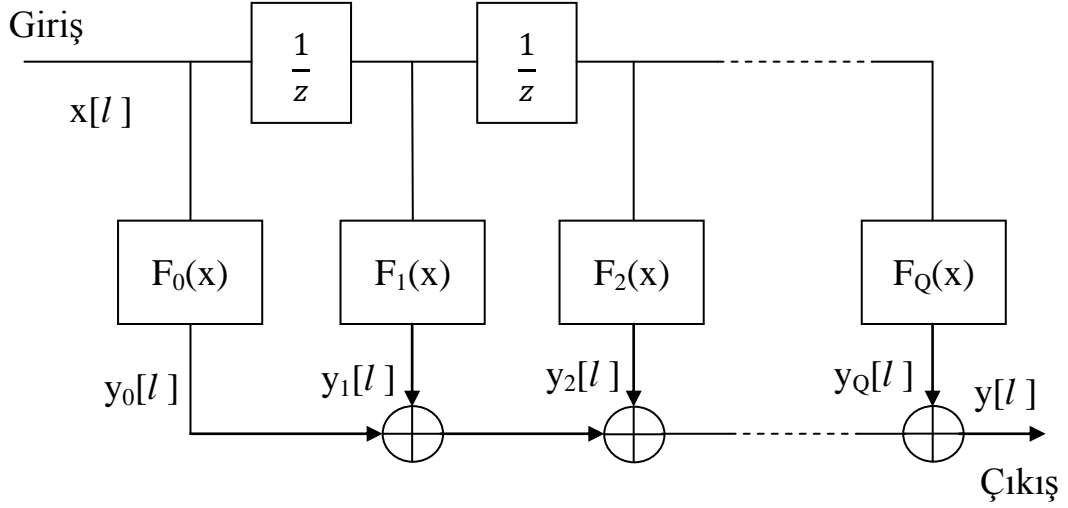
Bu iki eşitliğin birleşiminden oluşan eşitlik:

$$z_a(n) = \sum_{q=0}^Q h(q) \sum_{k=1}^K b_k z(n-q) |z(n-q)|^{k-1} \quad (3.4)$$

“ b_k ”, doğrusal olmayan polinom katsayılarını, “ $h(q)$ ” ise doğrusal kısmın darbeye karşı olan cevabının katsayılarını içermektedir.

3.1.3. Hafıza Etkili ‘Unit Delay’ Modelleme

Unit delay’ yapısı, ilk doğrusal olmayan davranışsal modelleme yapısı olan ‘Volterra Series’ in basitleştirilmiş halidir. Bu modelde Volterra Series’ deki köşegen katsayıları göz önüne alınarak sistem oluşturulmuştur. Böylece katsayı sayısı azaltılmıştır. Volterra Series’ ta kullanılması gereken katsayı sayısı M^K iken, Unit delay model fonksiyonu $M \times K$ adet katsayı içermektedir. Sistemin blok diyagramı Şekil 3.5’te verilmektedir.



Şekil 3.5. Unit delay modelleme blok diyagramı.

$$y[n] = \sum_{q=0}^{M-1} \sum_{k=1}^K a_{k,q} |x[n-q]|^{k-1} \cdot x[n-q] \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5) da bulunan “x[n]” ve “y[n]” sırasıyla karmaşık ayrık işaretli sinyalin giriş ve çıkışını; “a_{k,q}” karmaşık değerli polinom katsayılarını (M × K adet), “K” polinom derecesini, “M” ise gecikme hattı sayısını temsil etmektedir.

GY modelinin belirlenmesi olarak ifade edilen “a_{k,q}” katsayılarının sayısal değerlerinin bulunması için gerekli işlem adımları sırası ile açıklanmıştır.

İlk olarak model fonksiyonu Eşitlik (3.6)de olduğu gibi matrissel formda tekrar yazılır.

$$\vec{y} = \vec{a} \times \vec{s} \quad (3.6)$$

‘y’, ‘a’ ve ‘s’ eşitlik (3.7), (3.8) ve (3.9)’da olduğu gibi tanımlanır.

$$\vec{y} = [y(1) \dots y(N)]^T ; N=\text{örnek sayısı} \quad (3.7)$$

$$\vec{a} = [a_{1,0} \ a_{2,0} \ \dots \ a_{K,0} \ \dots \ a_{K,M-1}] \quad (3.8)$$

$$\vec{s} = \begin{cases} B_{1,0}(1) \cdots B_{1,0}(N) \\ B_{2,0}(1) \cdots B_{2,0}(N) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ B_{K,0}(1) \cdots B_{K,0}(N) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ B_{K,M-1}(1) \cdots B_{K,M-1}(N) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$B_{K,M-1}(N) = |x(N - (M - 1))|^{K-1} \cdot x(N - (M - 1)) \quad (3.10)$$

Taban bant ölçüm sonuçları ‘y’ gibi vektör formatında ve GY’ ye uygulanan uyarma işareti kullanılarak ‘s’ matrisi yukarıda verilen tanımına göre hesaplandıktan sonra, model katsayıları eşitlik (3.11)’da görüldüğü gibi ‘s’ matrisinin tersi ile ‘y’ matrisinin çarpımından hesaplanabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ‘s’ matrisinin tersinin alınma sürecidir. Çünkü polinom derecesi olan K’ nin hafıza hattı sayısı olan M’ in değerinden bir eksik olmaması durumu haricindeki hiçbir değerde ‘s’ matrisi kare matris olmamaktadır. Bu sebeple de tersinin alınması için standart matris tersi alma işlemlerinden farklı yöntemler gerekmektedir. Bilgisayar ortamında kare olmayan matrislerin tersinin bulunması için Matlab programının, Moore-Penrose pseudoinverse yöntemini kullanarak matris tersi alma algoritması kullanan “pinv” komutu kullanılmaktadır. Böylece, eşitlik (3.11) kullanılarak elde edilmiş olan ‘α’ sayılarının bulunması ile modele ait $a_{k,q}$ karmaşık değerli polinom katsayıları bulunmuş olacak ve GY’ nin istenen herhangi bir taban bant işaretine cevabı eşitlik (3.5) kullanılarak bulunabilecektir.

$$\vec{a} = \vec{y} \times \text{pinv}(\vec{s}) \quad (3.11)$$

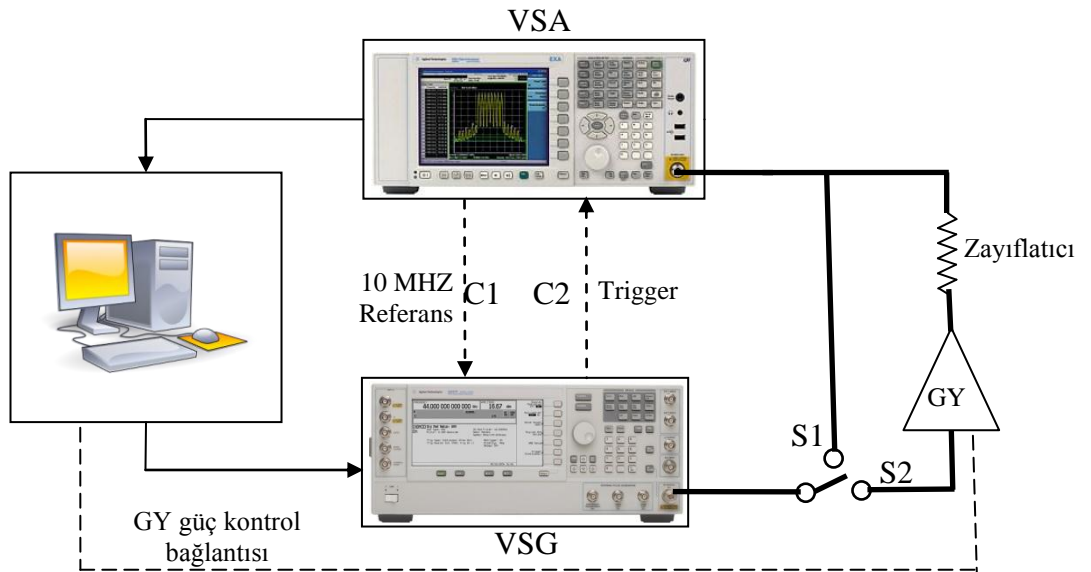
BÖLÜM 4

ÖLÇÜM SİSTEMİNİN KURULMASI VE DOĞRULANMASI

4.1. ÖLÇÜM SİSTEMİNİN KURULMASI

Taban bant güç yükselteç davranışsal modeli ile önbozulumlu doğrusallaştırma sisteminde Şekil 4.1' de verilen ölçüm ve doğrulama devresi kurulmuştur. Kullanılan cihazlar;

1. AGILENT tarafından üretilen E8267D vektör işaret üretici (VSG)
2. AGILENT tarafından üretilen EXA N9010A vektör spektrum analizörü (VSA)
3. Çıkışının önbozulum ile doğrusallaştırılması hedeflenen GY
4. GY çıkış gücünün VSA güvenli ölçüm sınırları içine indirmek için zayıflatıcı
5. DPD sisteminde yazılımsal işlemleri (GY kontrolü, ölçüm sonucunun kaydedilmesi, modellerin çıkarılması, giriş işaretinin önbozuluma uğratılması vs) yapabilmek için MATLAB programı yüklenmiş bir bilgisayar.



Şekil 4.1. Ölçüm sistemi.

VSA ile VSG arasında donanımsal olarak Şekil 4.1’ de verilen C1 ve C2 numaralı bağlantıların yapılması gerekmektedir. Sinyal jeneratöründe (VSG) 10 MHz referans için harici giriş seçeneği aktif hale getirilerek yerel osilatörünü VSA’ ya göre ayarlaması sağlanır. Bu aktifleştirmeden sonra sinyal üretici 10 MHz referans girişi algılar ve gerekli işlemleri otomatik olarak yapar. Spektrum analizöründe (VSA) ise 10 MHz referans girişi olarak dâhili işaret üretici seçilir. Ölçüm sırasında ve test sırasında referans kendini doğrulamaktadır. C2 numaralı bağlantı ise VSG’ nin “EVENT1” çıkışı ile VSA’ nın “EXT Trigger 1” girişi arasında bir bağlantıdır. VSG sayısal modülasyonlu işaretin ilk değerinde bu hat üzerinden bir darbe gönderir böylece VSA işaret başlama anını bulur ve GY çıkışındaki yüksek frekans üzerindeki işareti taban banda indirir. Bilgisayar ile cihazlar arasındaki bağlantı ‘tcpip’ protokolü üzerinden gerçekleştirilmektedir. Ölçüm sistemi içinde yapılan bu bağlantılar Çizelge 4.1 ’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Cihazların ölçüm sistemi içerisindeki bağlantıları.

	VSG	VSA
10 MHz referans (C1)	10 MHz OUT	EXT REF IN
Trigger(C2)	EVENT 1	Trigger 1 in

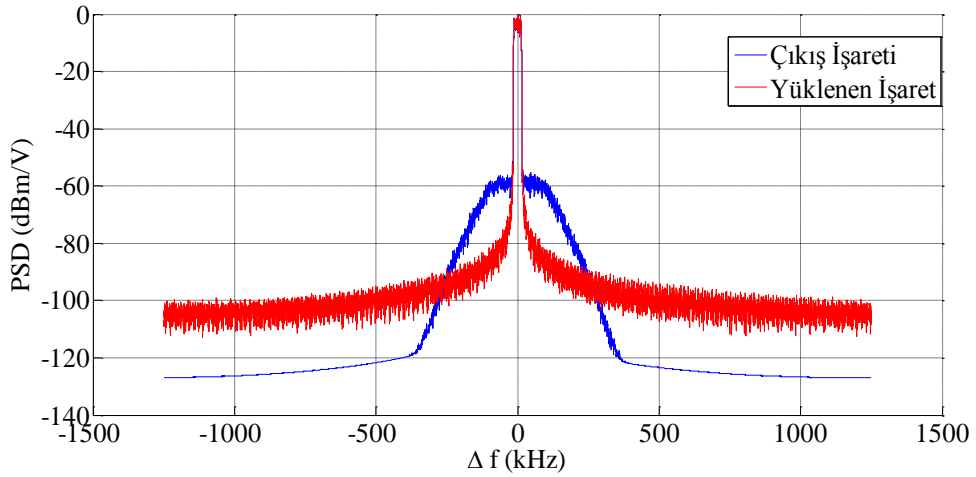
Şekil 4.1’da görüldüğü gibi anahtar S1 konumunda iken VSA ile VSG direkt olarak bağlıdır. S2 konumunda ise GY ile ölçüm yapılmak için kullanılmaktadır. S1 bağlantısında VSG’ye gönderilen giriş sinyali ile VSA’dan ölçülen sinyallerde hem genlik hem de faz olarak farklılıklar gözlenmektedir.

4.2. ÖLÇÜM SİSTEMİNDE OLUŞAN HATALAR

Ölçüm esnasında faz ve genlik kaymaları gözlenmiştir ve bundan dolayı ölçüme başlamadan önce VSA ve VSG arasında yazılımsal olarak kalibrasyon işlemine gerek duyulmaktadır. Bu ölçümlerde 100.000 verilik QAM64 IQ datası kullanılmaktadır.

GY’ nin ölçüm devresine dâhil edilmediği durumda yani S1 konumunda, VSG’ ye yüklenen ve VSA’ dan ölçülen örnek bir taban-bant işaretinin frekans spektrumu

Şekil 4.2’ de verilmiştir. Kırmızı renkli olarak görülen eğri bilgisayar ortamında sayısal veri olarak saklı tutulan QAM64 verisi, mavi renkli olarak görülen eğri ise FFT’si alınarak frekans spektrumu elde edilmiş VSA dan alınmış taban-bant veridir (Grafik çizdirilirken verilerin maksimum seviyesi 0 dBm olacak şekilde normalize edilmiştir). Yüklenen-ölçülen karşılaştırması yapıldığında, ana kanal güç seviyeleri açısından farklılık yok iken yan kanallar arasında yaklaşık 20dB lik farklılık görülmektedir. Yüklenen işaret, Matlab ortamında matematiksel olarak üretilen bir işaret iken, ölçülen işaret matematiksel olarak üretilen işaret üzerine gürültü işaretinin de karışmış olduğu bir işaretdir. Bu sebeple bir miktar fark beklenmekle birlikte, ölçülen işaret kalibrasyon yapılmayan bir işaret olması sebebiyle 20dB lik fark oluşmuştur. VSA’dan IBW ayarı değiştirilerek yan kanarlarda oluşan seviye farkı azaltılabilmektedir.



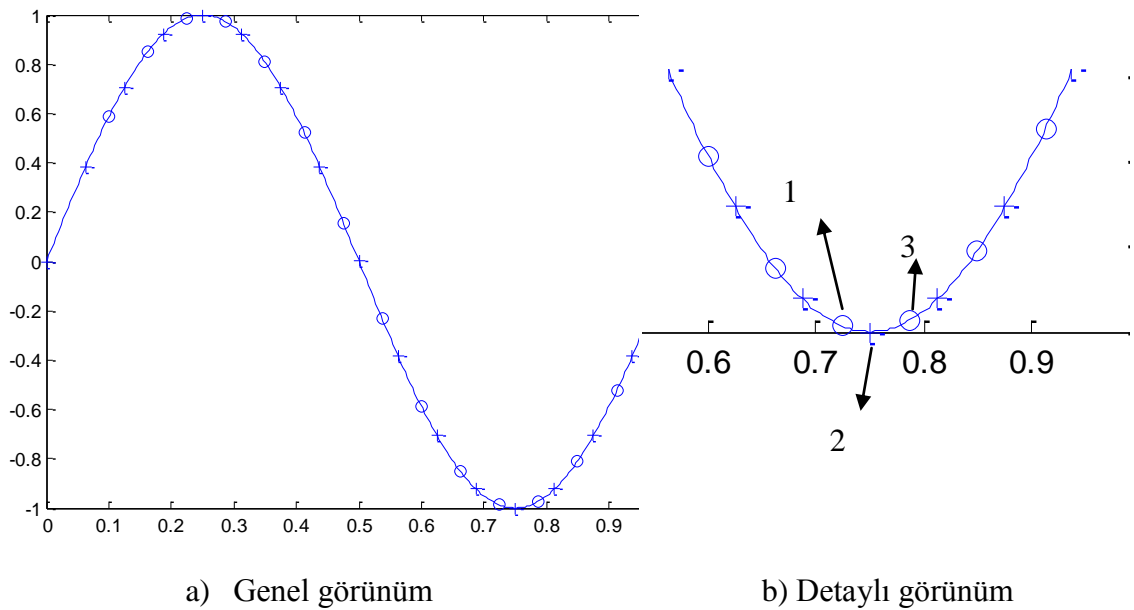
Şekil 4.2. VSG’ ye yüklenen giriş verisi(kırmızı) ve VSA’dan alınan çıkış verisi (mavi).

Şekil 4.1’ da verilen C2 (Trigger) bağlantısı yapılmış olsa da aradaki kablonun uzunluğuna bağlı olarak VSG ve VSA arasında işaretin sıfır geçişleri arasında bir miktar zaman kayması olabilmektedir. Bu sebeple, giriş ve çıkış verileri çapraz korelasyona tabii tutularak işaretlerin başlangıçları aynı olacak şekilde bir periyotluk veri çembersel olarak kaydırılır.

Kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için Şekil 4.1’da verilen ‘S1’ bağlantısı yapılarak 3 adet ölçüm alınmaktadır. GY’ nin devrede olmadığı VSG ve VSA nın

direkt olarak birbirine bağlandığı durumda alınan ilk ölçüm verisi ile genlik kalibrasyon katsayıları; ikinci ölçüm verisi ile faz kalibrasyon katsayıları bulunur. Genlik kalibrasyon ve faz kalibrasyon katsayıları üçüncü ölçüm üzerinde uygulanarak kalibrasyon yapılmış ölçüm sonucu bulunur ve yüklenen veri ile karşılaştırılır.

VSG tarafından üretilen ve VSA tarafından kaydedilen işaretlerin başlangıç zamanı ayarlamasında bir periyoda ait örneğin alındığı anın önemi büyüktür. Diğer bir deyişle, zaman uzayındaki bir işaretin sayısal ortama alınırken çevrime başlandığı an yüklenen ve ölçülen işarete aynı olmalıdır. Üretilen işarete ait örnek ilgili zaman diliminde sinüs fonksiyonunun minimum olduğu noktada alınmış ise ve kaydedilen işarete aynı zaman dilimine ait alınan örnekler minimum noktasından hemen önce ve hemen sonra alınmışsa, yüklenen ve ölçülen işaretler arasında faz hatası kaçınılmaz olacaktır. Örneğin Şekil 4.3’ de verilen tam bir periyotluk sinüs işareti örnek alma zamanları farklı olarak iki farklı şekilde örneklenmiş olsun. Bunlardan birini (‘+’ markerli olanı) VSG’ den üretilen işaret değerini ise (‘o’ markerli olanı) VSA’ da kaydedilen işaret olarak düşünelim. Tek boyutlu bu iki verinin zaman başlangıçları eşitlenmek istendiğinde Şekil 4.3-b’ de verilen ‘2’ numaralı örnek ya ‘1’ numaralı örnek ile veya ‘3’ numaralı örnek ile eşleştirilecek ve faz hatası meydana gelecektir.

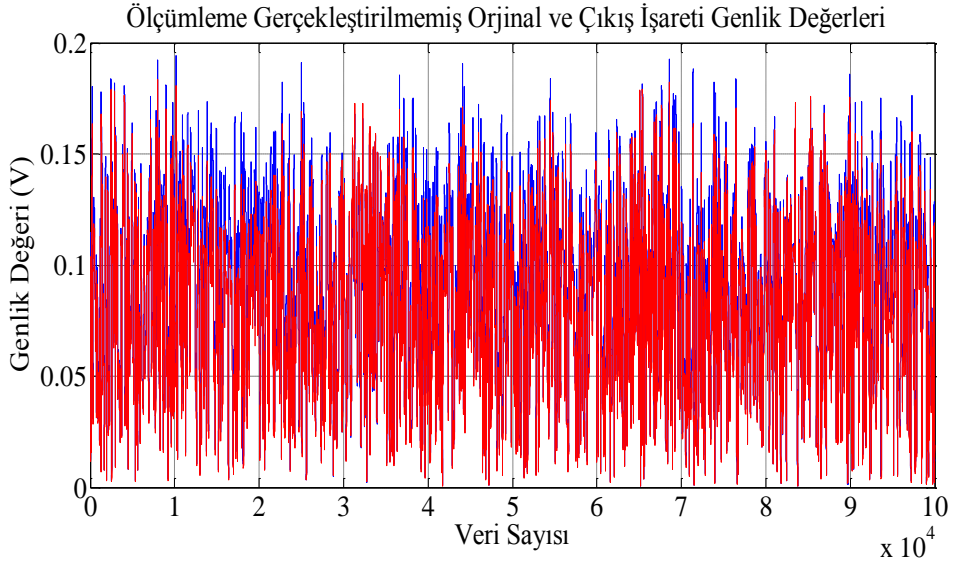


Şekil 4.3. Başlangıç zaman ayarı hassasiyetini arttırmak.

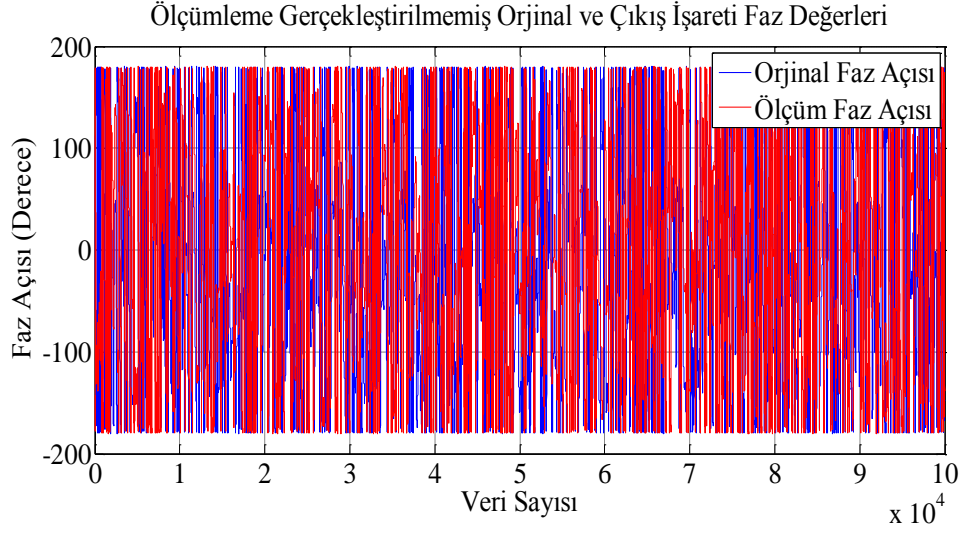
Faz hatasını azaltmak için kaydedilen işaretin örnek sayısı artırılarak faz hatası azaltılmaya çalışılmasına rağmen uzun süreli kayıt yapılmasından dolayı ölçülen işarete büyüklük hatası oluşmaktadır. Bu hataları ortadan kaldırmak için işaretler 8 katı kadar genişletilip (örnek sayısı artırılıp) ve kalibrasyon işlemi uygulanmaktadır.

100.000 verilik QAM64 sayısal modülasyonlu bir işaret kullanılarak düz kablo ile direkt ölçüm yapılmış ve kalibrasyon işlemi uygulanmıştır. Kalibrasyon işleminin her adımı grafiksel olarak Şekil 4.4 ile Şekil 4.19 arasında açıklanmaktadır.

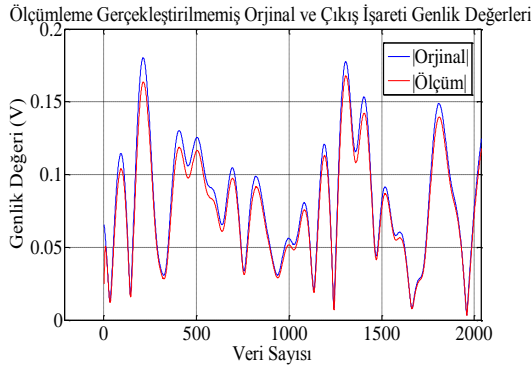
İlk olarak kalibrasyon uygulanmamış giriş ve çıkış işareti için, orijinal VSG' ye yüklenen işaret ile VSA' dan direkt kablo ile alınan ölçüm işaretlerinin genlik değerleri Şekil 4.4'da, faz açısı değerleri ise Şekil 4.5'de verilmektedir. Bu grafiklerin daha detaylı görüntüsü Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmektedir. Ölçülen işaretle orijinal işaret karşılaştırıldığında hem genlik hatası (Şekil 4.8) hem faz hatası (Şekil 4.9), hem de başlangıç noktasını ayarlama ile ilgili hata olduğu görülmektedir. Bu hatalar model performansını olumsuz etkilemektedir ve bundan dolayı kalibrasyon işlemi uygulanmaktadır.



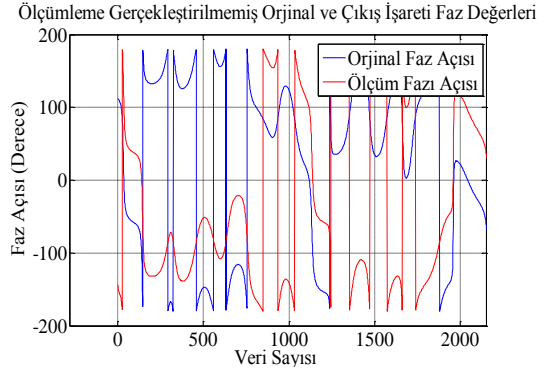
Şekil 4.4. Kalibrasyon gerçekleştirilmemiş orijinal ve çıkış işareti genlik değerleri.



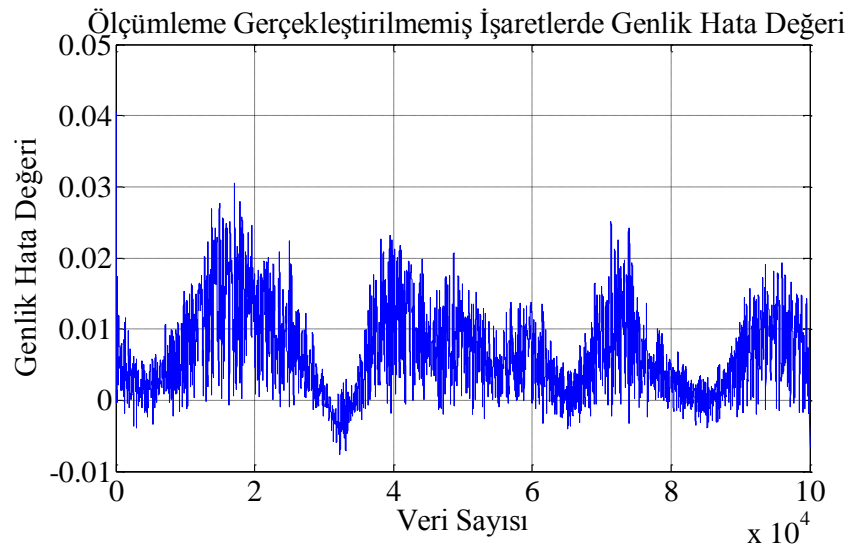
Şekil 4.5. Kalibrasyon gerçekleştirilmemiş orjinal ve çıkış işareti faz açısı değerleri.



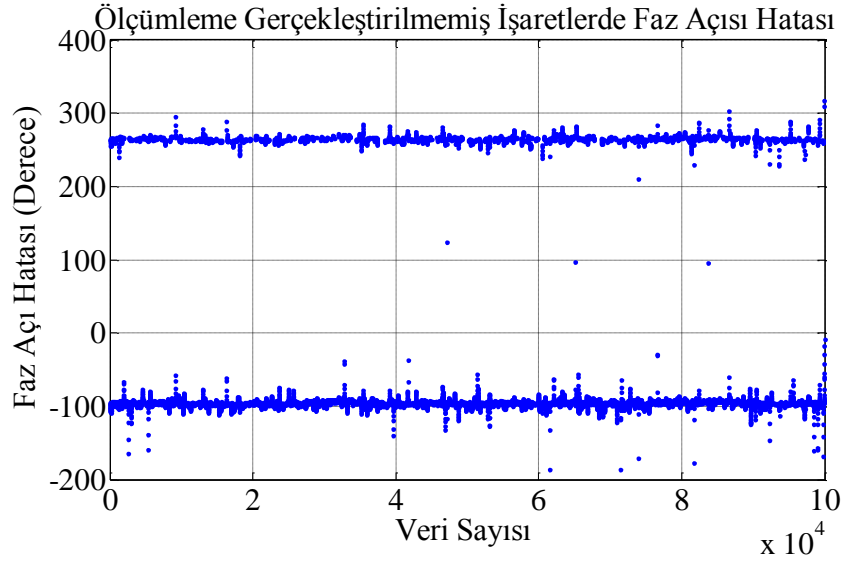
Şekil 4.6. Genlik değerleri.



Şekil 4.7. Faz değerleri.

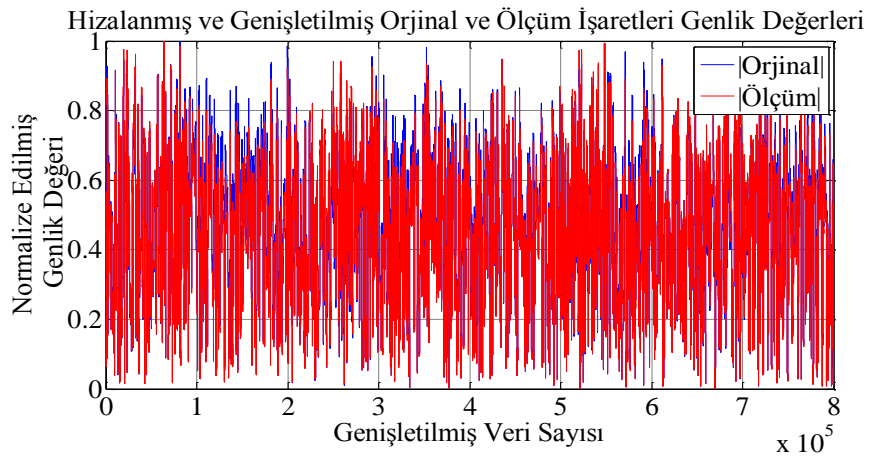


Şekil 4.8. Kalibrasyon yapılmamış orjinal ve ölçüm işareti arasındaki genlik hatası.

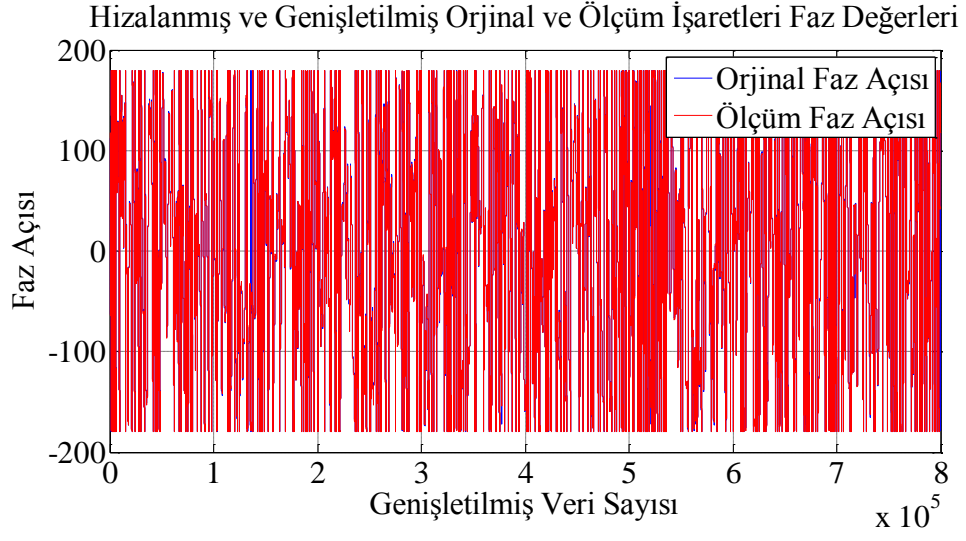


Şekil 4.9. Kalibrasyon yapılmamış orijinal ve ölçüm işaretleri arasında oluşan faz hatası.

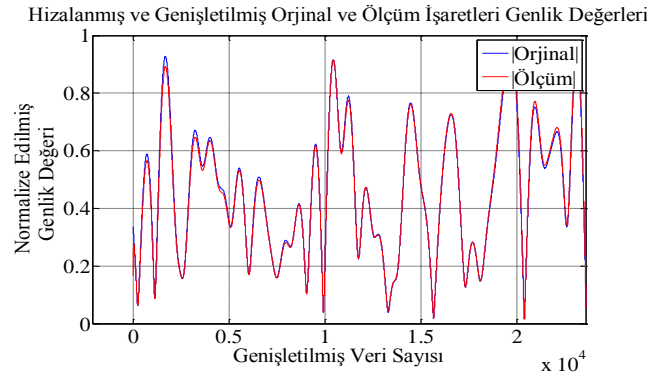
Alınan ölçüm ve orijinal işaretlerde öncelikle en yüksek değer bulunur ve en yüksek değere göre bütün noktalar ölçeklendirilir (normalize edilir). Hata değerleri daha iyi belirlemek ve düzeltmek için işaretler 8 kat genişletilmiştir. 8 kat genişletildiğinde veri sayısı 100.000'den 800.000'e yükselmiş olur. Ardından burada kullanılan iki işaret çapraz korelasyon ile başlangıç noktaları eşitlenerek aynı hizaya getirilir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 'da aynı hizaya getirilmiş normalize edilen orijinal ve ölçüm işaretlerinin genlik ve faz değerleri verilmektedir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15' da kalibrasyon öncesi oluşan genlik ve faz hataları verilmektedir.



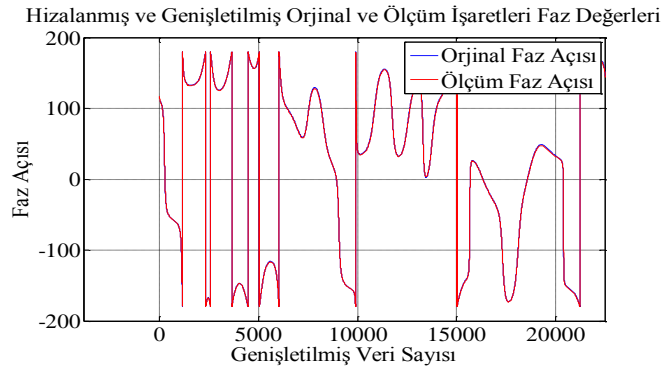
Şekil 4.10. Hizalanmış ve genişletilmiş işaretlerin genlik değerleri.



Şekil 4.11. Hızalanmış ve genişletilmiş işaretlerin faz açısı değerleri.

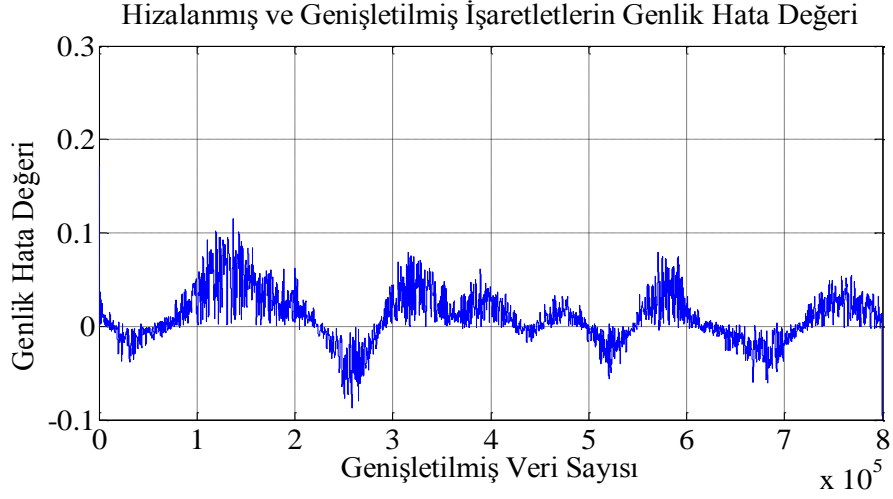


Şekil 4.12. Genlik değerleri.

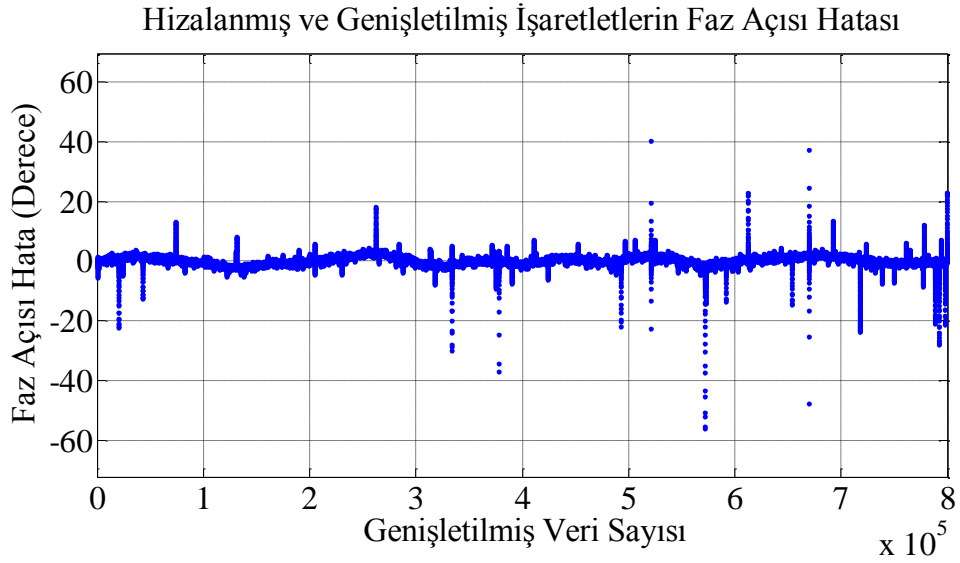


Şekil 4.13. Faz değerleri.

Oluşan genlik hatası ± 0.1 bulup, faz hatası ise ortalama ± 20 dereceleri bulmaktadır. Kalibrasyon sonrasında Şekil 4.12 ve Şekil 4.13' dan da daha net görülebileceği gibi bozukluklar kısmen giderilmiştir.



Şekil 4.14. Hızlanmış ve genişletilmiş işaretlerin genlik hata değeri.



Şekil 4.15. Hızlanmış ve genişletilmiş işaretlerin faz açısı hata değeri.

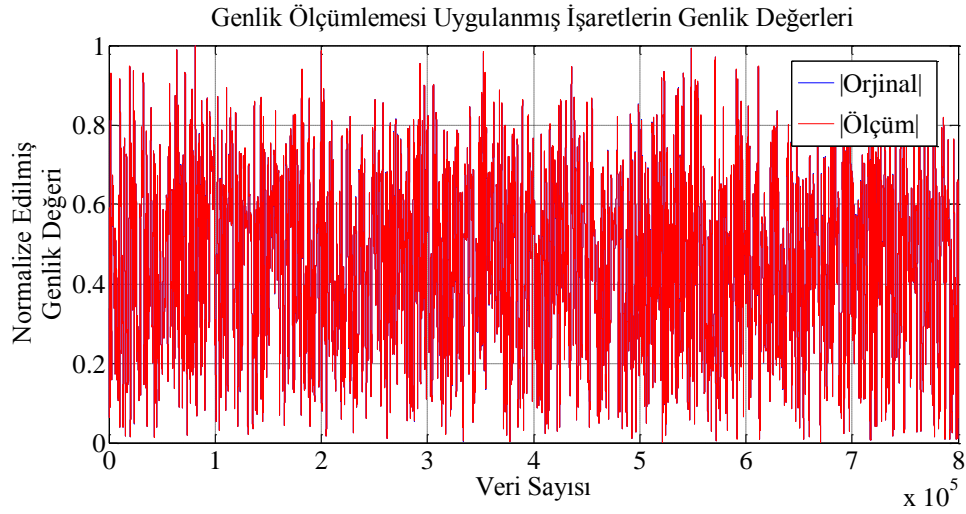
4.3. ÖLÇÜM SİSTEMİNDE OLUŞAN HATALARIN GİDERİLMESİ

Genişletilip aynı hizaya getirilen orijinal işaret ve ölçüm işaretinde biraz düzelme olsa da hatalar tam olarak önlenememiştir. Bu hatalar aşağıdaki açıklanan üç adım ile kalibrasyon ile düzeltilebilmektedir.

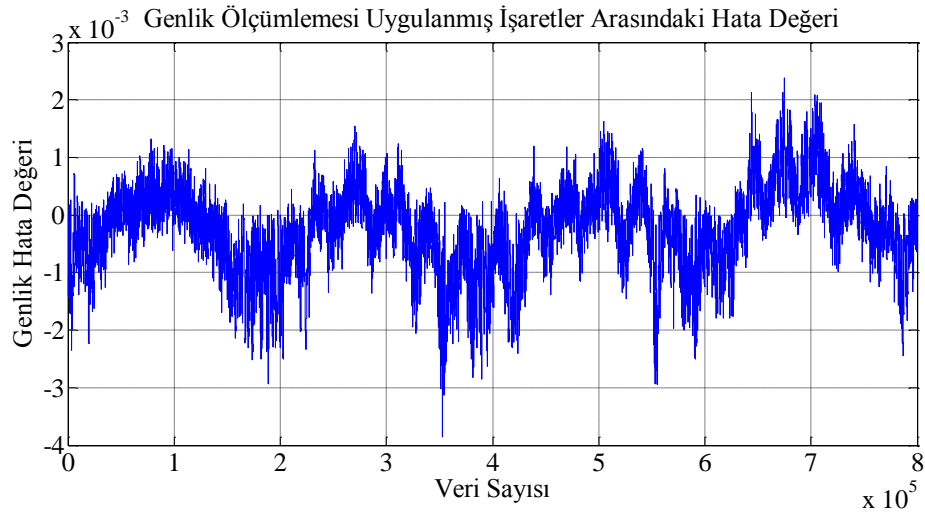
1. VSA ya gönderilen 3 farklı ortalama güçteki (RF power level) giriş işaretine GY cevabı taban bant I/Q veri olarak ölçülür. Bu ölçüm için ölçüm sistemi S1 bağlantısı (GY sistemden çıkarılır) yapılır ve VSG çıkışı direkt olarak VSA girişine yönlendirilir.
2. İlk olarak genlik kalibrasyonu yapılmaktadır. Bunun için uygulanan işaretin genlik değeri birinci ölçüm sonucunun genlik değerine bölünür ve her bir anlık veri için genlik kalibrasyon katsayısı olarak kaydedilir. Genlik kalibrasyonunun kontrolü amaçlı olarak ikinci ölçüm sonucunun genliği, genlik kalibrasyon katsayısı ile çarpılır ve uygulanan giriş ile kontrol edilir.
3. İkinci olarak faz kalibrasyonu yapılmaktadır. Genlik kalibrasyonu yapılmış ikinci ölçüm sonucun fazı ile uygulanan işaretin fazı arasındaki fark faz kalibrasyon verisi olarak saklanır. Faz kalibrasyonunun kontrolü amaçlı olarak üçüncü ölçüm sonucun genliği genlik kalibrasyonun katsayısı ile çarpılır daha sonra faz kalibrasyonu verisi kadar fazı kaydırılır. Giriş işareti ile kalibrasyonu yapılmış işaretin genlik ve faz karşılaştırması yapılır. Kalibrasyon başarılı olamamışsa VSA cihazının “align all” butonu ile kendi iç kalibrasyonunu yapması sağlanır ve yukarıdaki adımlar tekrarlanır.

Modelleme ve DPD performansının istenen düzeyde iyi olabilmesi için ölçülen her GY cevabı genlik ve faz kalibrasyonu ile düzeltildikten sonra güvenle kullanılabilir hale gelmektedir. Yukarıda maddeler halinde anlatılan kalibrasyonu uygulama verileri ile daha detaylı olarak bu bölümün devamında anlatılmaktadır. Genişletilip aynı hizaya getirilen orijinal işaret ve ölçüm işaretine ilk olarak genlik kalibrasyonu uygulanır. Bu iki işaret arasındaki genlik farkı, faz durumları gözetilmeden, her bir veri için bulunur ve daha sonra işaretlere uygulanmak için kayıt edilir. Benzer bir işlem faz kalibrasyonu için yapılır. Orijinal işaret ile ikinci alınan ölçüm işareti arasında oluşan faz farkı yine her bir veri için bulunur ve daha sonra işaretlere uygulanmak için kayıt edilir. Daha sonra bulunan genlik ve faz kalibrasyon

verilerinin doğruluğunu test etmek için, bu veriler yeni bir ölçüme uygulanır. Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’te genlik ve faz katsayılarının üçüncü bir ölçüme uygulama sonuçları verilmektedir. Bulunan genlik kalibrasyon katsayılarının işarete uygulanmış hali Şekil 4.16 de verilmektedir. İşaretler üst üste gelmiştir. Orijinal işaretin genlik değerinden kalibrasyonu yapılmış işaretin genlik değeri çıkarılarak genlik hatası bulunmaktadır. Şekil 4.17’de verildiği gibi ise hata değeri ± 0.1 den ± 0.002 ye düşürülmüştür.

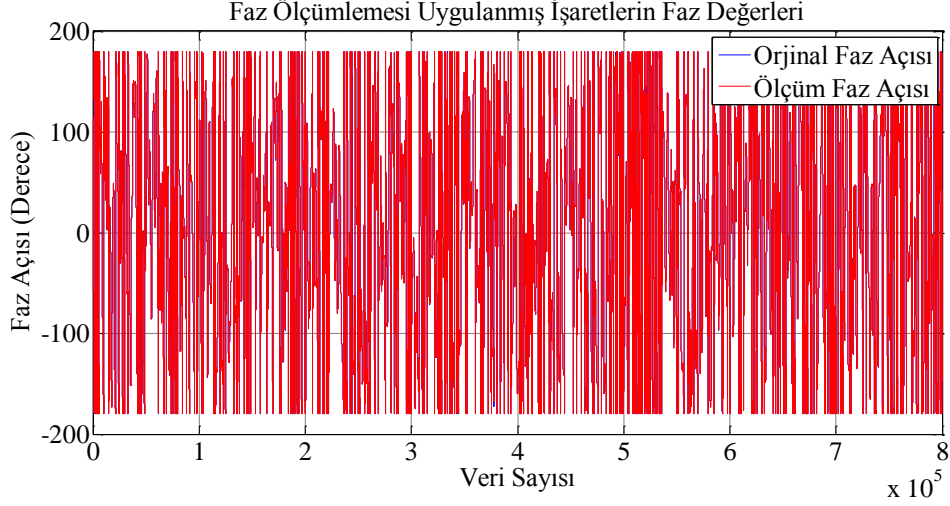


Şekil 4.16. Genlik kalibrasyonu uygulanmış işaretlerin genlik değerleri.

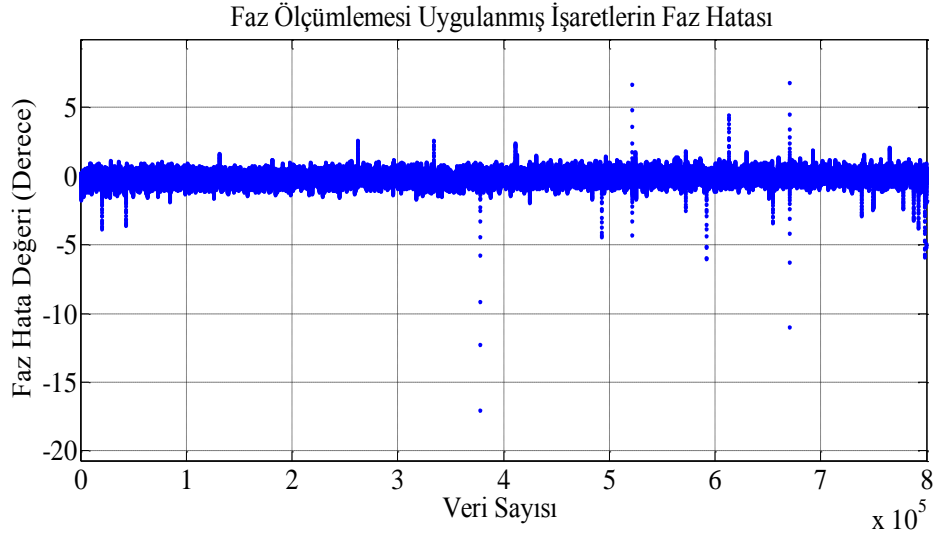


Şekil 4.17. Genlik kalibrasyonu uygulanmış işaretler arasındaki hata değeri.

Bulunan faz kalibrasyon katsayılarının ölçüm sonucu elde edilen işarete uygulanmış hali Şekil 4.18’te verilmektedir. İşaretlerin fazları arasında gözle görünecek kadar faz farkı kalmamıştır. Şekil 4.19’da görüldüğü gibi ise önceden ortalama ± 10 dereceyi bulan hata değeri ortalama ± 1 derece ye düşürülmüştür.



Şekil 4.18. Faz kalibrasyonu uygulanmış işaretlere ait faz değerleri.



Şekil 4.19. Faz kalibrasyonu uygulanmış işaretlerde oluşan faz hatası.

Kalibrasyon işlemi sonucu genlik hatası $\pm 2 \times 10^{-3}$ iken faz hatası ortalama ± 1 dereceye kadar düşürülmüştür. Bu kalibrasyon işleminin yapılabilmesi için VSG tarafından üretilen işaret (bilgisayarda kayıtlı bulunan sayısal modülasyonlu taban bant giriş işareti) ile VSA tarafından ölçülen işaretlerin örnekleme frekansı aynı

olmalıdır. Hâlihazırda ölçüm sisteminde kullanılan cihazların donanımsal kısıtlamalarından dolayı örnekleme frekansı birbirine eşit olarak ayarlanamamaktadır. VSA' ya ait bant genişliklerine karşılık gelen örnekleme frekans değerleri Çizelge 4.2'de verilmektedir. Bu sebeple VSA' nin örnekleme frekansı, VSG' nin örnekleme frekansından daha büyük olacak şekilde ve çıkış işareti spektrumuna bakıldığında oluşan IMD işaretleri doğru şekilde kaydedebilmek için uygun bir değere ayarlanır. Bu işlem sonucu giriş işareti ile ölçülen çıkış işareti arasında oluşan örnekleme frekansı farklılığı yazılımsal olarak düzeltilmesi gerekmektedir. Bu farkı düzeltmek için iki yol vardır; ya yukarı örnekleme ile örnekleme frekansı düşük olan verinin örnekleme frekansı yükseltilir veya aşağı örnekleme ile örnekleme frekansı yüksek olan verinin örnekleme frekansı azaltılır. Örnekleme frekansının azaltılması sıfır geçiş noktasının ayarlanmasını zorlaştırarak faz hatasını artırdığından bu projede örnekleme frekansının artırılması tercih edilmektedir.

Ölçüm sisteminden kaynaklanan kalibrasyon ve örnekleme hataları bu şekilde giderilmiş olup GY modelleme ve DPD uygulaması doğru bir şekilde uygulanabilmektedir. Model belirleme işleminden önce GY ölçüm sonuçlarına bu süreçte kayıt edilen genlik ve faz kalibrasyonu katsayıları uygulanır ve modelleme işlemlerine geçilir.

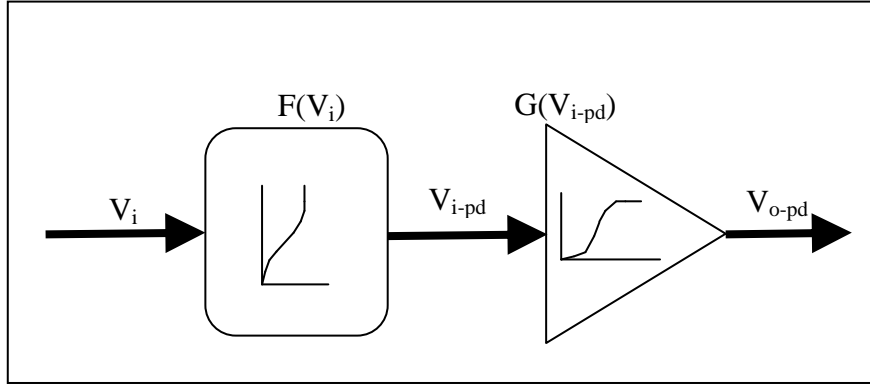
Çizelge 4.2. VSA' ya ait bant genişliklerine karşılık gelen örnekleme frekans değerleri.

IBW(kHz)	Fs(MHz)	IBW(kHz)	Fs(MHz)
$62 < \text{IBW} \leq 68$	0.88	$150 < \text{IBW} \leq 160$	2.14
$68 < \text{IBW} \leq 75$	1	$160 < \text{IBW} \leq 200$	2.5
$75 < \text{IBW} \leq 82$	1.071	$200 < \text{IBW} \leq 240$	3
$82 < \text{IBW} \leq 91$	1.25	$240 < \text{IBW} \leq 330$	3.75
$91 < \text{IBW} \leq 100$	1.363	$330 < \text{IBW} \leq 510$	5
$100 < \text{IBW} \leq 110$	1.5	$510 < \text{IBW} \leq 1000$	7.5
$110 < \text{IBW} \leq 130$	1.666	$1000 < \text{IBW}$	15
$130 < \text{IBW} \leq 150$	1.875		

BÖLÜM 5

GY MODELLEME VE DPD UYGULAMASI

Simülasyon ortamında DPD iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşama GY' nin modellenmesidir. Bölüm 3.1.1, 3.1.2 ve 3.1.3 de anlatılan modelleme yapılarından birini kullanarak GY' nin modeli elde edilir. Bu modelin elde edilmesi için ölçüm sistemi kullanılarak GY belirli bir taban bant işareti ile uyarılır ve GY çıkışı ölçülüp I/Q veri olarak saklanır. Karar verilen model türüne göre verilen denklemde “x” verisi model giriş işareti olarak alınır ve ölçülen GY çıkış işareti ise “y” verisi olarak alınır ve model parametreleri modelleme yapısının anlatıldığı bölümdeki gibi bulunur. Bu model “ileri yönlü model (İM)” olarak isimlendirilmektedir. Aslında DPD sisteminin çalışması için İM' in bulunması olmazsa olmaz bir şart değildir. İM' in bulunmasındaki amaç simülasyon ortamında DPD sisteminin çalıştırılabilmesini sağlamanın yanında seçilen modelleme türünün GY' yi modelleyebilme yeteneğinin/performansının kontrol edilmesidir. İM' in GY karakteristiği modelleme performansının kabul edilebilir derecede iyi olduğu görüldükten sonra PD blok yapısının elde edilmesi işlemine geçilir. Bu aşamada yine, ölçüm sistemi kullanılarak GY girişine uygulanan giriş işareti ve ölçülen çıkış işareti kullanılacaktır. Fakat bu adımda İM' dekinden farklı olarak GY giriş işareti “y” verisi olarak alınır ve çıkış işareti “x” verisi olarak alınır ve model parametreleri bulunur. Yapılan bu yeni modelleme ise “Geri yönlü Modelleme (GM)” olarak adlandırılır. PD ve GY modelinin kaskad olarak bağlanmasıyla oluşturulan doğrusallaştırma sisteminin blok diyagramı Şekil 5.1' de verilmektedir. DPD sisteminin gerçekleşmesinde GY modelinin yerine gerçek GY bağlanacaktır. Yani GY' ye uygulanması gereken giriş işareti bilgisayar ortamında DPD sistemi için belirlenen PD bloğundan geçirildikten sonra GY' ye uygulanacaktır.

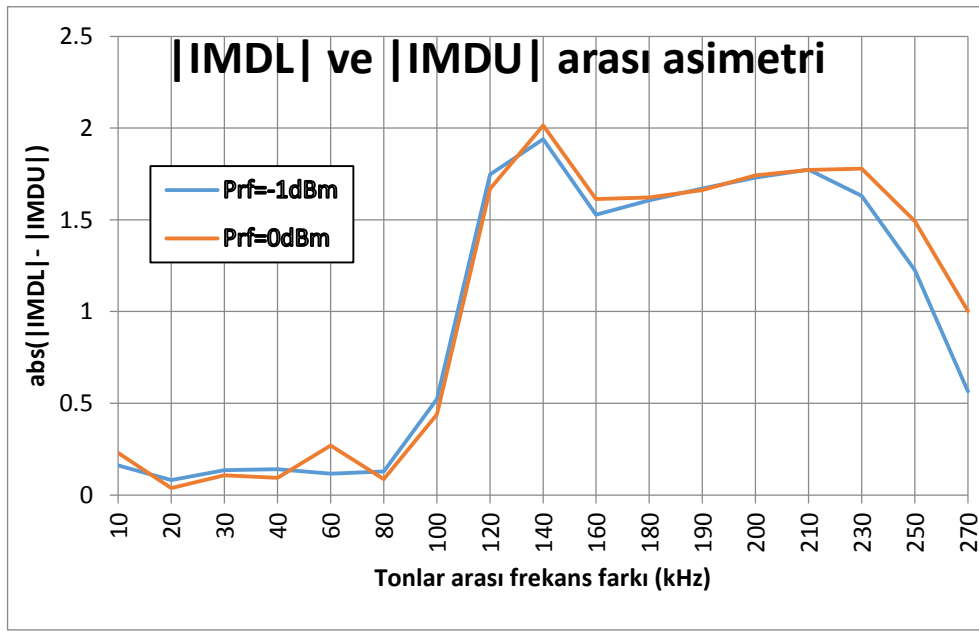


Şekil 5.1. DPD ile doğrusallaştırma sistemi.

İM ile GM arasındaki temel fark giriş ve çıkış işareti tanımıdır. İleri model parametreleri bulunurken, GY giriş işareti İM giriş işareti ve GY çıkış işareti de İM çıkış işareti olarak seçilir. Fakat GM parametreleri bulunurken, hayali bir GY varmış gibi kabul edilir ve gerçek GY çıkışı hayali GY' nin (GM) girişi olarak seçilir. Benzer şekilde hayali GY (GM) çıkışı gerçek GY' nin girişi olarak seçilir. Ardından bu hayali GY' nin parametreleri GM parametreleri olarak tanımlanır. İM ve GM parametrelerinin bulunmasında kullanılan giriş ve çıkış işaretleri normalize edilir.

DPD' den tam performans ile yararlanılması isteniyorsa, hafıza etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Hafıza etkisinin sebepleri; bakınız Şekil 3.2'de verildiği gibi işaret zarfına bağlı hafıza etkisinde artışa sebep olan öngerilimleme devrelerinin yanında iletim gecikmesi ve aktif elemanın hızlı artan ısısal zaman geciktirme sabiti olarak özetlenebilir [9]. GY' nin yapısından dolayı ısısal hafıza etkisinin olup-olmadığını incelemek için merkez frekansı 4.8 Mhz ayarlanarak, 10 kHz' den başlayıp 270 kHz' e kadar tonlar arası frekans farkı artan iki tonlu işaret GY' ye uygulanmış ve IMD seviyeleri kaydedilmiştir. Isısal etkinin baskın olabileceği düşük frekans bandı bölgesinde yüksek asimetri, tonlar arası frekans farkı arttıkça cihazın ısınıp soğuyacağı zaman kalmayacağı için ise tonlar arası frekans farkı arttıkça azalan bir asimetri görülmesi beklenmektedir. Tonlar arası fark iyice arttıkça IMD seviyeleri arası ısısal etkiden kaynaklanan bir asimetri beklenmemektedir. Fakat tonlar arası frekans farkı arttıkça da uyumlama ve DC besleme devrelerindeki kapasitans ve endüktanstan dolayı hafıza etkisinin ortaya çıkması beklenen bir davranıştır. -1dBm ve 0dBm RF gücü seviyelerinde yapılan asimetri ölçümüne ait

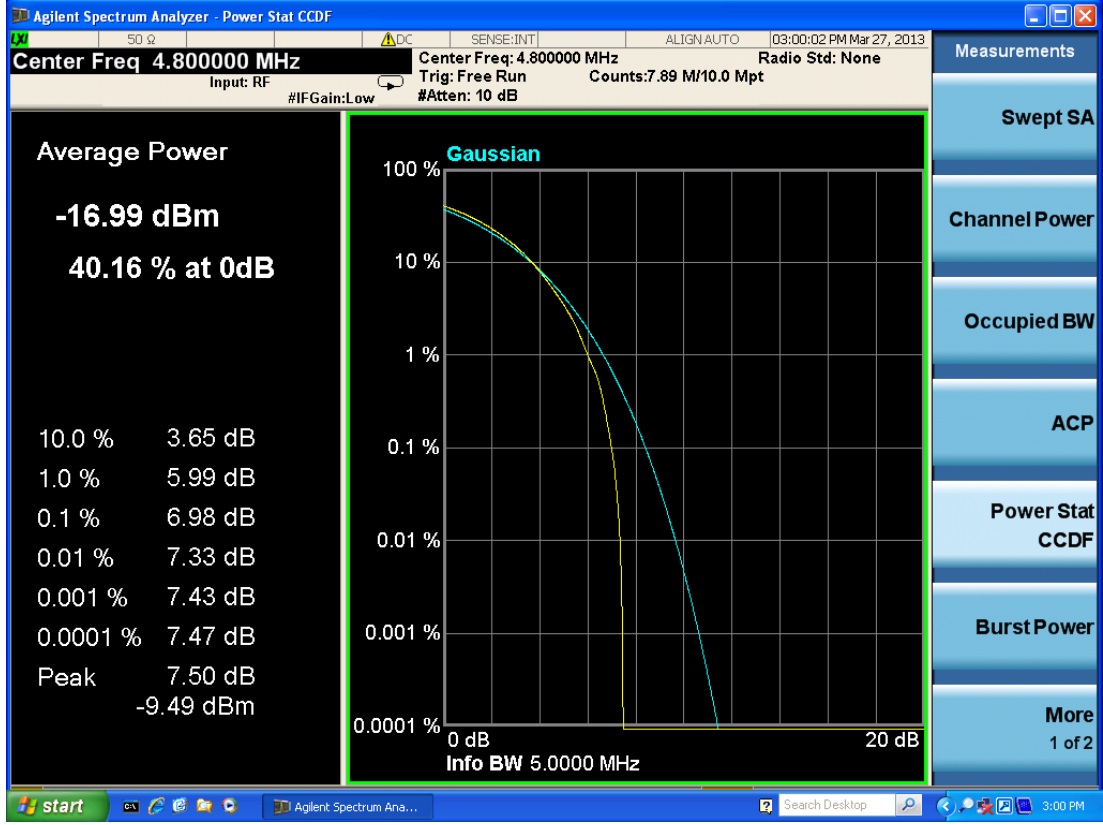
grafik Şekil 5.2’ de verilmektedir. Grafikten de görüleceği üzere düşük frekans bandında asimetri az iken frekans yükseldikçe asimetri artmaktadır. Yani düşük tonlar arası frekans farkı bölgesinde ısıl hafıza etkisi görülmemektedir. Bunun yanında tonlar arası frekans farkının yüksek olduğu bölgede ise asimetrinin görülmesi elektriksel hafıza etkisini var olduğunu göstermektedir. Bu durumda modelleme yöntemlerinden ‘Unit Delay’ kullanmak yeterli olacaktır. Eğer ısıl hafıza etkisi görülmüş olsaydı daha ileri modelleme yöntemlerinden biri tercih edilebilirdi.



Şekil 5.2. Ton başına -1 dBm ve 0 dBm iki iki-tonlu uyarım işareti sonucu IMD ler arası asimetri.

Yapılan ölçümlerde PAPR değeri 7.5 dB olan 100.000 verilik bir QAM64 sayısal modülasyonlu giriş işareti kullanılmıştır. Bu işarete ait CCDF grafiği Şekil 5.3’ te verilmiştir.

Gerçekleştirilen model ve algoritma doğruluğu; seçilen doğrusal olmayan polinom derecesine, VSA ayarlarına, yakalanan sinyal seviyesine ve MATLAB hesaplama doğruluğuna bağlıdır.



Şekil 5.3. Uygulanan işarete ait CCDF değeri.

Modelleme doğruluğu NMSE kullanılarak değerlendirilebilir. Çıkan NMSE değerinin küçük olması tercih edilir.

$$NMSE[dB] = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=1}^N |\gamma_{mes}[k] - \gamma_{mod}[k]|^2}{\sum_{k=1}^N |\gamma_{mes}[k]|^2} \right] \quad (5.1)$$

Eşitlik (5.1)'de γ_{meas} , ölçülen işaret, γ_{mod} modellenen işaret, N ise veri boyutudur.

Modelleme doğruluğunu değerlendirilebilecek başka bir ifade ise MEMR değeridir. MEMR parametresi ile hafıza etkili modellemede gerçekleştirilen iyileştirme gözlenebilmektedir. MEMR değeri 0 olduğunda hafıza etkisi hiç modellenememiş, 1 olduğunda ise hafıza etkisi tamamen modellenebilmiş demektir.

$$MEMR_m = 1 - \frac{\|E^{(m)}\|_2}{\|E^{(o)}\|_2} \quad (5.2)$$

Eşitlik (5.2)'de $E^{(m)}$, hafıza etkili modelleme ile, $E^{(o)}$ ise hafızasız modelleme ile matematiksel olarak hesaplanan işareti göstermektedir.

Bu bölümde 3 farklı merkez frekansında, 3 farklı RF güç seviyesinde ve 3 farklı işaret genişliğinde İM modellemesi, GM modellemesi ve DPD uygulama sonuçları açıklanmıştır.

5.1. GY'NİN İLERİ YÖNLÜ MODELLEMESİ

GY ileri yönlü modeli hafıza etkili polinom modellemelerinden unit delay ile yapılmıştır. Bu bölümde yapılan tüm ölçümlerde QAM64 sayısal modülasyonlu işaret kullanılmıştır. VSG' ye yüklenen QAM64 sayısal modülasyonlu veri GY' den geçirilmiş ve VSA girişinde zayıflatıcılarla güvenli ölçüm seviyesine indirilen GY çıkış işareti taban-bant verisi olarak kayıt edilmiştir. Yapılan ölçüm kaydına göre GY'nin ileri yönlü davranışsal modeli (model katsayıları) elde edilmiştir.

5.1.1. Üç Farklı Merkez Frekansında Yapılan Ölçümler ile GY' nin İleri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi

QAM64 sayısal modülasyonlu işaretin belirlenen RF giriş gücü -1 dBm ve bant genişliği ise 27 kHz ($F_s=2.5$ MHz) dir. RF gücü ve bant genişliği sabit kalmak üzere sırası ile merkez frekansı 4.8 MHz, 12 MHz ve 27 MHz' de ölçümler alınarak 'unit delay' yöntemi ile GY ileri modeli bulunmuştur. Model polinomunun derecesi 10 hafıza derinliği ise; hafızasız modelde 0, unit modelde ise 3 seçilmiştir. İleri modellemede elde edilen NMSE ve MEMR değerleri 5.1' de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Üç farklı merkez frekansında yapılan ölçümlere göre elde edilen ileri modele ait değerler.

Fc (MHz)	HAFIZASIZ		UNIT MODEL	
	MEMR	NMSE(dB)	MEMR	NMSE(dB)
4.8	0	-31.764	0.014148	-31.888
12	0	-32.517	0.012149	-32.623
27	0	-32.772	0.02055	-32.953

5.1.2. Üç Farklı Ortalama RF Gücü Seviyesinde Yapılan Ölçümler ile GY' nin İleri Modelinin Gerçekleştirilmesi

QAM64 sayısal modülasyonlu işaretin belirlenen merkez frekansı 4.8 MHz ve bant genişliği ise 27 kHz ($F_s=2.5$ MHz) merkez frekansı ve bant genişliği sabit kalmak üzere ortalama RF gücü sırası ile -5 dBm, -1 dBm ve 3 dBm değerine ayarlanarak ölçümler alınmış ve 'unit delay' yöntemi ile ileri modeller elde edilmiştir. Model polinomunun derecesi 10 hafıza derinliği ise; hafızasız modelde 0, unit modelde ise 3 seçilmiştir. Modellemeye ait değerler 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2. Üç farklı RF gücü seviyesinde yapılan ölçümlerle elde edilen ileri modele ait değerler.

RF (dBm)	HAFIZASIZ		UNIT MODEL	
	MEMR	NMSE(dB)	MEMR	NMSE(dB)
-5	0	-29.493	0.038063	-29.83
-1	0	-31.764	0.014148	-31.888
3	0	-33.192	0.017278	-33.324

Giriş gücü seviyesi arttıkça model performansı artmıştır. Fakat bu her zaman DPD performansımızın artacağı anlamına gelmez. Özellikle de giriş gücü arttıkça çıkış işaretinde kırılmalar oluşmaya başlamışsa, modelleme performansı artsa da DPD performansının kötüleşmesi beklenir; kırılan bölgelerde giriş değişse de çıkış değişmemektedir, dolayısı ile model bu davranışı başarılı bir şekilde taklit edebilir. Fakat aynı karakteristiğe sahip kırılmayacak kadar küçük giriş işaretlerine karşılık çıkış değişeceği için DPD kararsız çalışmaya başlayacak ve IMD seviyesindeki iyileştirmenin azalması beklenmektedir.

5.1.3. Üç Farklı İşaret Genişliğinde Yapılan Ölçümler ile GY' nin İleri Modelinin Gerçekleştirilmesi

Bu adımda QAM64 sayısal modülasyonlu işaretin merkez frekansı 4.8 MHz olup ortalama RF gücü -1dBm olarak belirlenmiştir. VSG örnekleme frekansları (F_s) değiştirilerek 20 kHz, 27 kHz ve 40 kHz bant genişliklerinde oluşturulan işaretlerde ölçümler alınmıştır. Model polinomunun derecesi 10 hafıza derinliği ise; hafızasız

modelde 0, unit modelde ise 3 seçilmiştir. İleri modellemeye ait MEMR ve NMSE değerleri her bir ölçüm için Çizelge 5.3’ te verilmektedir.

Çizelge 5.3. Üç farklı bant genişliğine sahip işaretin ölçümlerine göre elde edilen ileri modele ait değerler.

BW (kHz)	HAFIZASIZ		UNIT MODEL	
	MEMR	NMSE(dB)	MEMR	NMSE(dB)
20	0	-30.893	0.012372	-31.001
27	0	-31.764	0.014148	-31.888
40	0	-31.849	0.014523	-31.975

Giriş işaretine ait bant genişlikleri değişse de modelleme performansı yaklaşık aynı çıkmıştır. Giriş işareti bant genişlikleri değiştiğinde ölçüm sistemi taban-bant olarak kaydedilirken, RF gücü taban-bant sayısal veri olarak örnekleme ile ilgili sınırlamaları olmazsa model performansı tamamen GY davranışına bağlı olacaktır. GY tasarımında kullanılan filtre, çıkış katı uyumlaştırma devreleri ve bant genişliğine göre çıkış kanalı değiştirme durumlarından dolayı ani davranış değişiklikleri olmadığı sürece model performanslarında bir değişiklik beklenmemektedir.

5.2. GY’NİN GERİ YÖNLÜ MODELLEMESİ

Geri Yönlü Model; Bölüm 5’ te detaylı anlatılmıştır. Fakat bir kez daha kısaca özetlemek gerekirse; giriş işaretini çıkış işareti, çıkış işaretini ise giriş işareti olarak kabul edip yeni giriş çıkış değerlerine göre model katsayılarını elde etmektir. Geri yönlü modelin performansı direkt olarak DPD performansını etkilemektedir. İleri yönlü model ile modelleme türünün GY için uygun olup-olmadığı kontrol edilirken, giriş işareti geri yönlü model ile ön bozuluma uğratıldığı için geri yönlü model performansı ile DPD performansı benzer özellikler gösterir.

5.2.1. Farklı Merkez Frekansında Yapılan Ölçümler ile GY' nin Geri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi

Ortalama bir RF giriş gücü ve işaret genişliği değeri için üç farklı merkez frekansında geri yönlü model elde edilmiştir. QAM64 sayısal modülasyonlu işaretin belirlenen RF giriş gücü -1 dBm ve bant genişliği ise 27 kHz ($F_s=2.5$ MHz) dir. RF gücü ve bant genişliği sabit kalmak üzere sırası ile merkez frekansı 4.8 MHz, 12 MHz ve 27 MHz' de ölçümler alınarak 'unit delay' yöntemi ile GY ters yönlü modeli bulunmuştur. Model polinomunun derecesi 10 hafıza derinliği ise; hafızasız modelde 0, unit modelde ise 3 seçilmiştir. Geri yönlü modelde elde edilen NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.4'te verilmektedir.

Çizelge 5.4. Üç farklı merkez frekansında yapılan ölçümlere göre elde edilen geri yönlü modele ait değerler.

Fc (MHz)	HAFIZASIZ		UNIT MODEL	
	MEMR	NMSE(dB)	MEMR	NMSE(dB)
4.8	0	-33.811	0.021183	-33.998
12	0	-34.302	0.016141	-34.443
27	0	-34.172	0.026169	-34.402

5.2.2. Farklı Ortalama RF Güç Seviyelerinde Yapılan Ölçümlere ile GY' nin Geri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi

Belirlenen bir merkez frekansı ve işaret genişliğinde üç farklı ortalama RF gücü uyarım işaretine, GY cevabına göre geri yönlü modelleri elde edilmiştir. QAM64 sayısal modülasyonlu işaretin belirlenen merkez frekansı 4.8 MHz ve bant genişliği ise 27 kHz ($F_s=2.5$ MHz) merkez frekansı ve bant genişliği sabit kalmak üzere ortalama RF gücü sırası ile -5 dBm, -1 dBm ve 3 dBm değerine ayarlanarak ölçümler alınmış ve 'unit delay' yöntemi ile ters yönlü modeller elde edilmiştir. Model polinomunun derecesi 10 hafıza derinliği ise; hafızasız modelde 0, unit modelde ise 3 seçilmiştir. Modellemeye ait değerler 5.5' te verilmektedir.

Çizelge 5.5. Üç farklı RF güç seviyesinde yapılan ölçümlere göre elde edilen geri yönlü modellere ait değerler.

RF (dBm)	HAFIZASIZ		UNIT MODEL	
	MEMR	NMSE(dB)	MEMR	NMSE(dB)
-5	0	-31.706	0.064567	-32.285
-1	0	-33.811	0.021183	-33.998
3	0	-32.606	0.014616	-32.735

Bölüm 5.1.2' de anlatıldığı gibi en iyi model performansı -1 dBm için elde edilmiştir. DPD grafikleri incelendiğinde en iyi IMD iyileştirmesi -1dBm RF gücü seviyesi için yapılabilmektedir.

5.2.3. Üç Farklı İşaret Genişliğinde Yapılan Ölçümlere ile GY' nin Geri Yönlü Modelinin Gerçekleştirilmesi

Belirlenen bir merkez frekansı ve ortalama RF gücü uyartım seviyesinde üç farklı işaret genişliğine sahip uyartım işaretine, GY cevabına göre geri yönlü modelleri elde edilmiştir. Bu adımda QAM64 sayısal modülasyonlu işaretin merkez frekansı 4.8 MHz olup ortalama RF gücü -1 dBm olarak belirlenmiştir. VSG örnekleme frekansları (F_s) değiştirilerek 20 kHz, 27 kHz ve 40 kHz bant genişliklerinde oluşturulan işaretlerde ölçümler alınmıştır. Model polinomunun derecesi 10 hafıza derinliği ise; hafızasız modelde 0, unit modelde ise 3 seçilmiştir. Geri yönlü modellemeye ait MEMR ve NMSE değerleri her bir ölçüm için Çizelge 5.6' da verilmektedir.

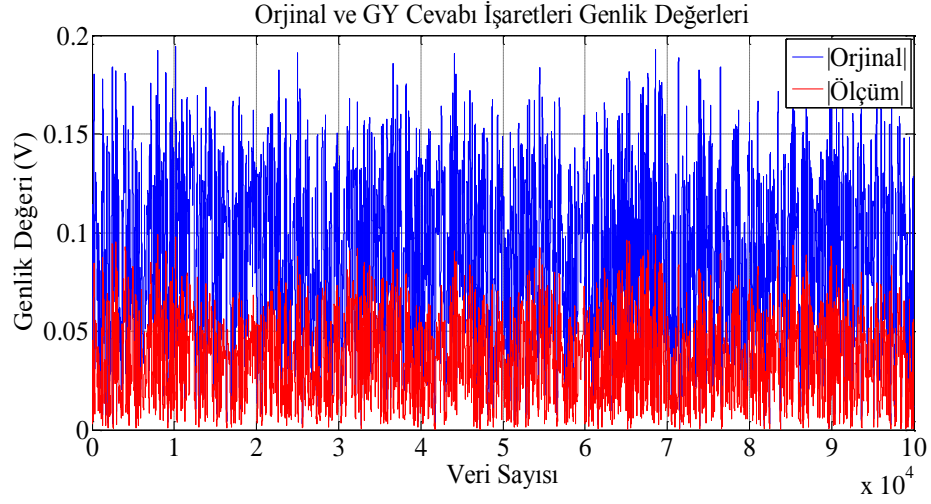
Çizelge 5.6. Üç farklı bant genişliğine sahip işaretin ölçümlerine göre elde edilen geri yönlü modele ait değerler.

BW (kHz)	HAFIZASIZ		UNIT MODEL	
	MEMR	NMSE(dB)	MEMR	NMSE(dB)
20	0	-33.008	0.016571	-33.153
27	0	-33.811	0.021183	-33.998
40	0	-33.839	0.022887	-34.04

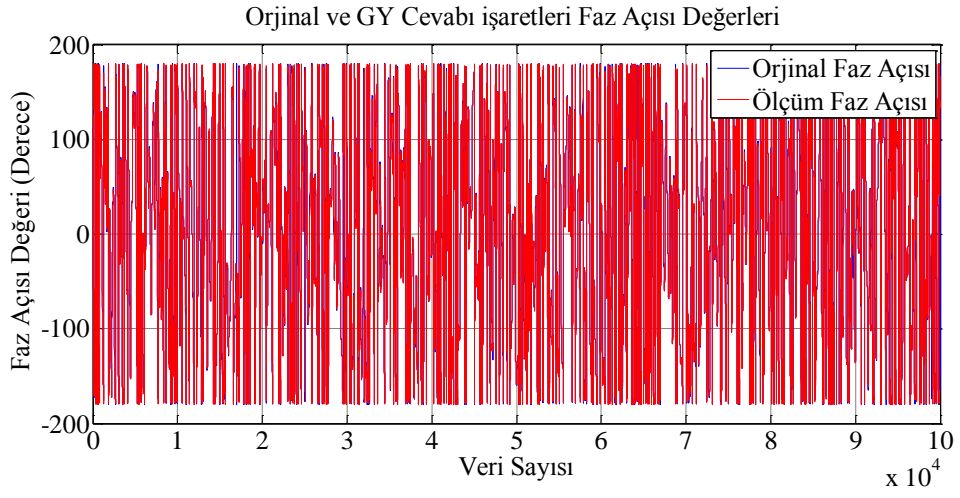
5.3. GY DPD UYGULAMA ADIMLARI

DPD sistemi ile doğrusallaştırma, gerçekleştirme ve uygulama işlemi aşağıda verilen sırayla verilen adımlar takip edilerek yapılmaktadır;

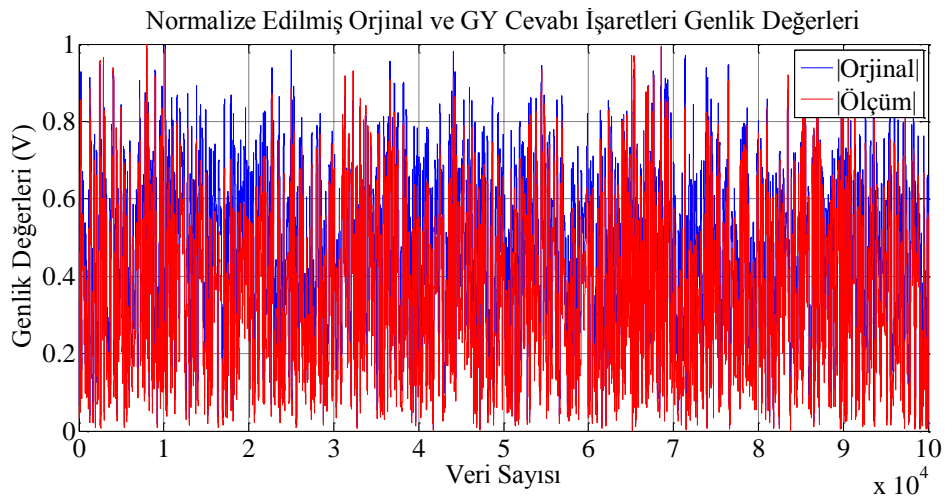
1. Modelleme amaçlı olarak sayısal modülasyonlu bir işaret için GY cevabı ölçülür (Şekil 5.4, Şekil 5.5).
2. Giriş ve çıkış işaretlerinin maksimum değerleri 1 olacak şekilde normalize edilir (Şekil 5.6).
3. Ölçüm sonuçları kullanılarak üst kısımda anlatılan şekilde İM ve GM elde edilir. İM ve GM fonksiyonlarının doğru sonuç vermesi için giriş işaretinin genliği 1' den daha büyük olmamalıdır.
4. Matlabda hazırlanmış olan DPD benzetim ortamına model parametreleri tanımlanır. Sayısal modülasyonlu giriş işareti en büyük genlik değerine bölünerek normalizasyon gerçekleştirilir.
5. Benzetim ortamında DPD sisteminin performansını görmek için normalize edilmiş giriş işareti DPD girişine uygulanır (önce GM' den geçirilir ve GM çıkışı İM' den geçirilir) ve DDP sistemi çıkış işareti hesaplanır. DPD çıkışı normalizasyon katsayısı ile çarpılarak denormalizasyonla gerçek çıkış işareti hesaplanmış olur.
6. Gerçek GY kullanılarak DPD sisteminin performansını görmek için normalize edilmiş giriş işareti PD bloğundan geçirilir. PD bloğu çıkış işaretinin en büyük genlik değeri 1 olacaktır. PD çıkış işareti normalizasyon katsayısı ile çarpılarak denormalize edilir böylece bozuluma uğratılmış işaretin en büyük genlik değeri PD olmadığı durumda GY' ye uygulanmış işaretin en büyük genlik değerine eşit olur. Bozuluma uğratılıp denormalize edilmiş işaret gerçek GY' ye uygulanır ve GY cevabı gözlemlenir.



Şekil 5.4. Orjinal ve GY cevabı işaretleri genlik değerleri.

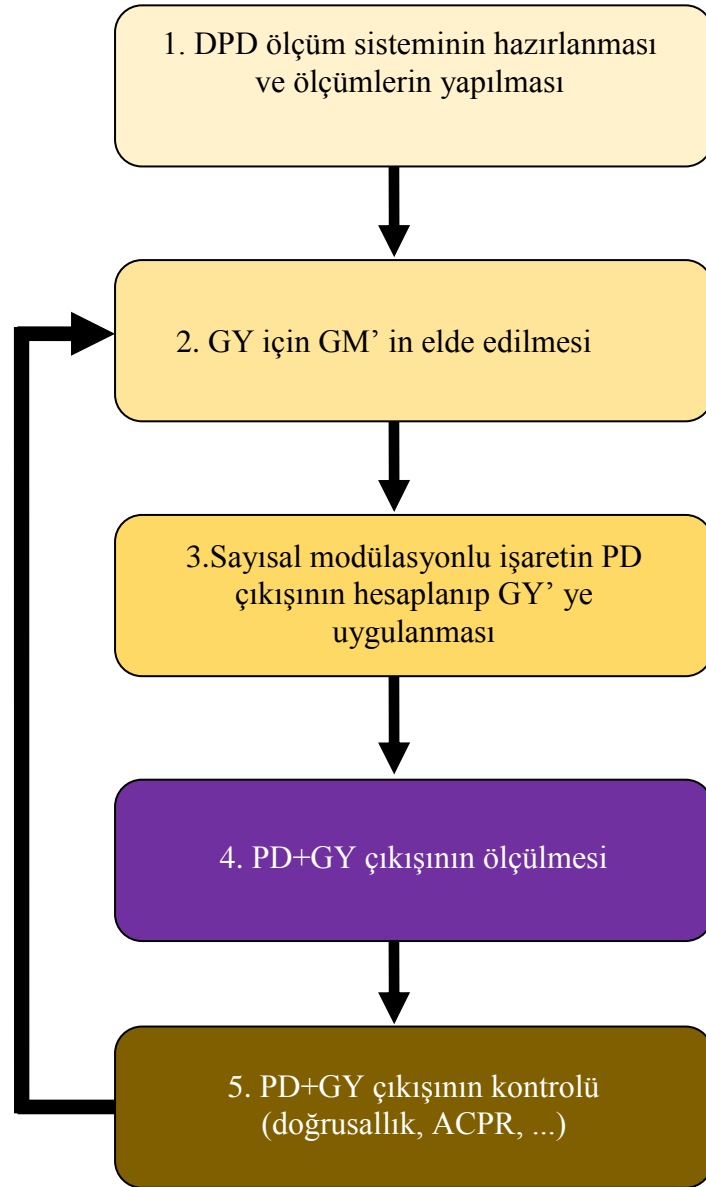


Şekil 5.5. Orjinal ve GY cevabı işaretleri faz açısı değerleri.



Şekil 5.6. Normalize edilmiş orjinal ve GY cevabı işaretleri genlik değerleri.

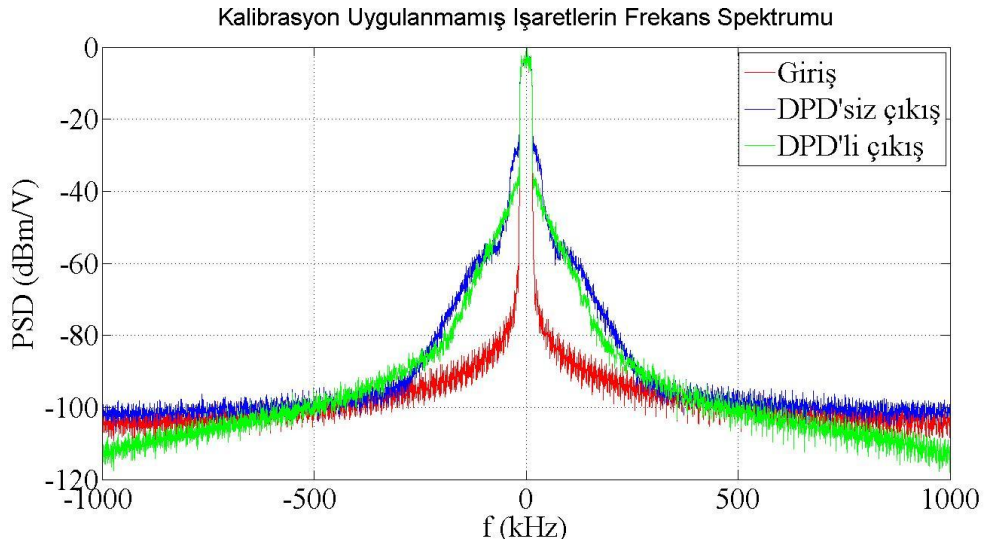
Bölüm 4’te açıklanan ileri ve geri modeller kullanılarak ilgili RF güç seviyesi, merkez frekansı ve bant genişliği için DPD sistemi geliştirilmiştir. Daha sonra giriş işareti DPD sisteminde belirlenen geri yönlü modelden geçirilerek bozuluma uğratılmış ve sonrasında VSG’ ye yüklenerek DPD öncesi duruma göre GY çıkışındaki IMD seviyesindeki azalma/düşme ölçülmüştür. Şekil 5.7’de sistemin doğrulama algoritması verilmektedir.



Şekil 5.7. DPD doğrulama akış şeması.

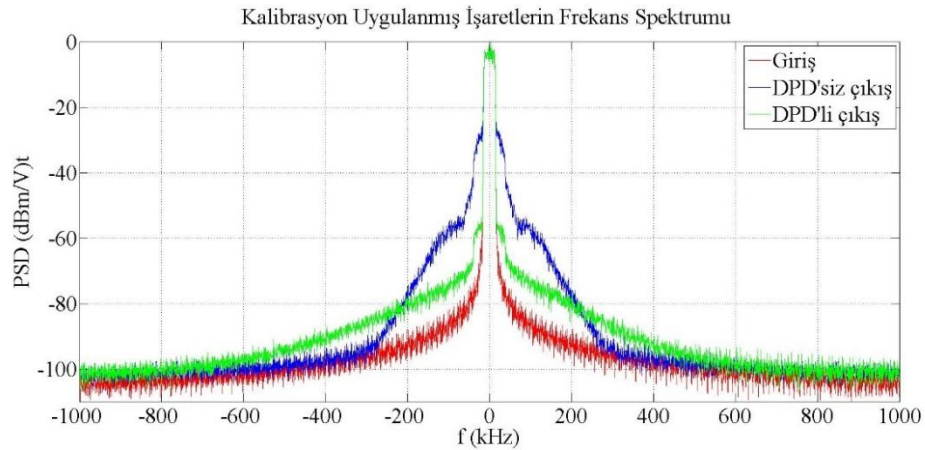
5.3.1. Kalibrasyonun DPD Üzerindeki Etkisi

Simülasyon ortamında alınan bu sonuçta, öncelikle veriler kalibrasyon işlemine tabi tutulmadan sadece hizalanarak İM'leri ve GM'leri elde edilerek DPD performansı gözlenmiştir. Şekil 5.8'de de verildiği gibi DPD uygulanan çıkışta DPD uygulanmayan çıkışa göre sadece 5 dB'lik bir iyileştirme olmuştur.



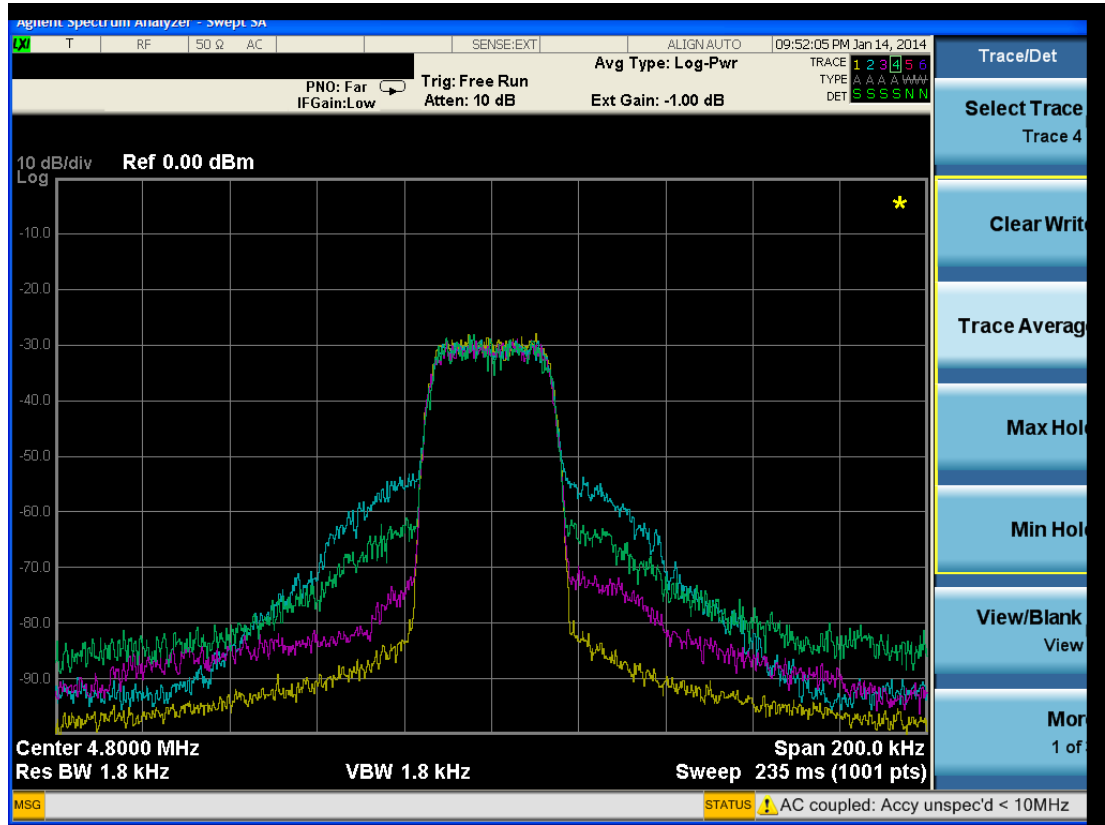
Şekil 5.8. Kalibrasyon uygulanmamış işaretlerin DPD performansı.

Aynı verileri kalibrasyon işlemine tabi tuttuğumuzda, İM ve GM değerlerini bulduktan sonra elde edilen DPD modelinde, Şekil 5.9'da da verildiği gibi DPD uygulanan çıkış DPD uygulanmayan çıkışa göre 30 dB iyileşme sağlamıştır.



Şekil 5.9. Kalibrasyon uygulanmamış işaretlerin DPD performansı.

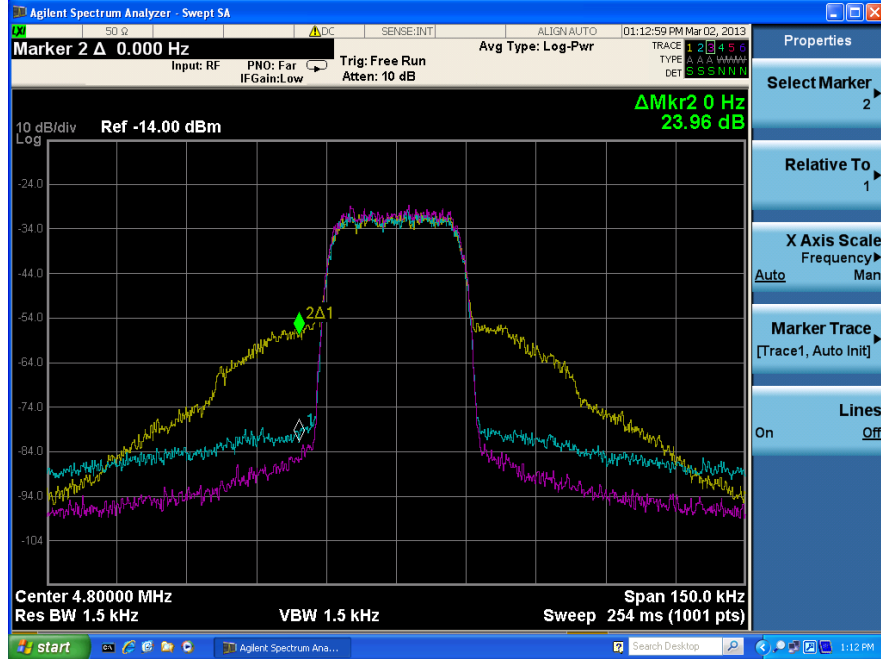
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da simülasyonda gerçekleştirilen işaretler gerçek GY ye uygulandığında Şekil 5.10’da verildiği gibi, GY’ ye uygulanan giriş sarı, GY’den çıkan çıkış mavi, kalibrasyon uygulanmamış DPD çıkışı yeşil, kalibrasyon uygulanmış DPD çıkışı magenta ile verilmektedir. Kalibrasyon uygulanmadığında yaklaşık 32 dBc’lik bir iyileşme sağlanırken, kalibrasyon uygulandığında yaklaşık 43 dBc’lik bir iyileşme gözlenmiştir.



Şekil 5.10. Kalibrasyon uygulanmış ve uygulanmamış sistemin DPD üzerindeki performansı-giriş işaret(sarı), GY çıkışı(mavi), kalibrasyonsuz DPD çıkışı(yeşil), kalibrasyonlu DPD çıkışı (magenta).

5.3.2. Üç Farklı Merkez Frekansında Yapılan DPD Modelleri

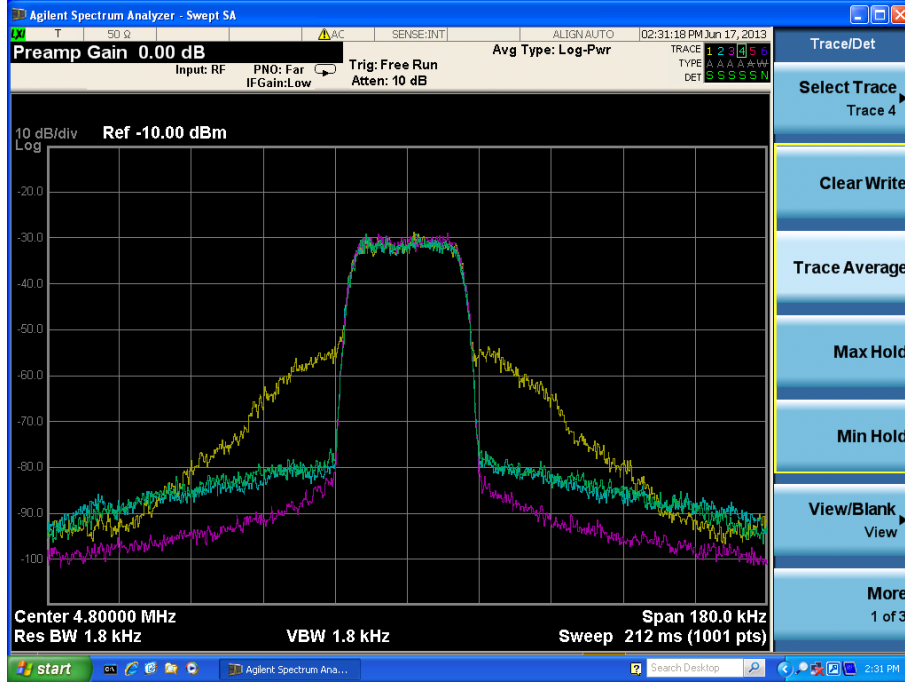
4.8 MHz, 12 MHz ve 27 MHz olmak üzere 3 farklı merkez frekansında ölçüm yapılmış QAM64 sayısal modülasyonlu işarete DPD uygulanarak yan kanallarda oluşan iyileştirmeler gözlemlenerek VSA ekran görüntüleri kaydedilmiştir.



Şekil 5.11. 4.8 MHz merkez frekansında yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü- giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

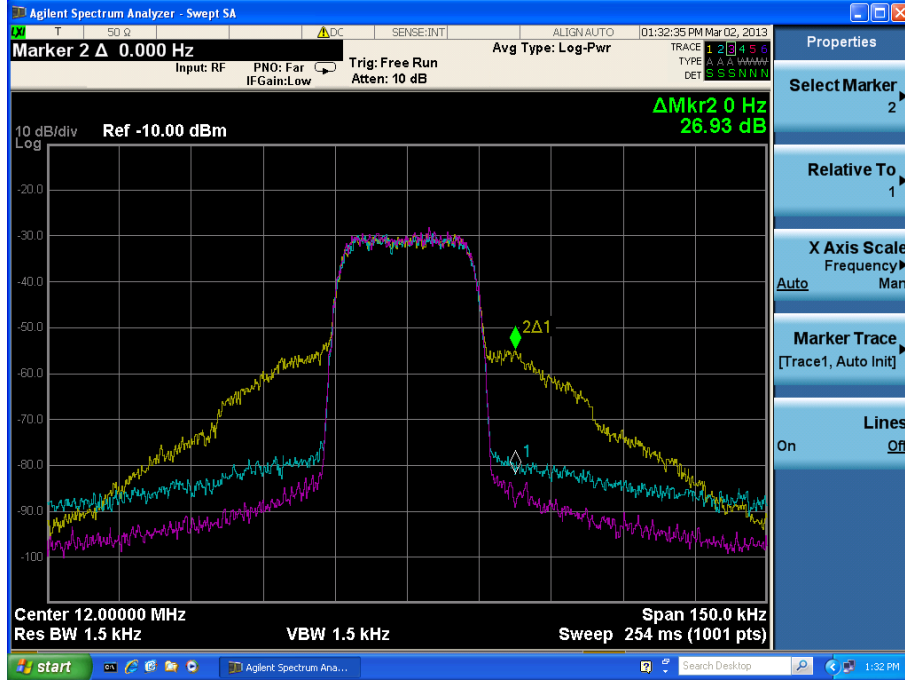
Merkez frekansı 4.8 MHz olarak ayarlanan ölçümde GY tepe çıkış gücü 50.4dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü model elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.4' te verilmiştir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD sistemi kurulmuştur. Şekil 5.11' de verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. DPD uygulanan çıkışın DPD uygulanmayan çıkışa göre IMD seviyesinde yaklaşık 24 dB lik iyileşme olmuştur.

Şekil 5.12' de ise hafızasız model ve unit delay ile yapılan modellemelere ait DPD uygulamaları aynı anda verilmektedir. VSA ekranı görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve unit model kullanılarak DPD uygulanan çıkış mavi renkli, hafızasız model kullanılarak DPD uygulanan çıkış yeşil renkli olarak frekans spektrumu görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi hafızasız model ile unit model neredeyse aynı çıkmaktadır.



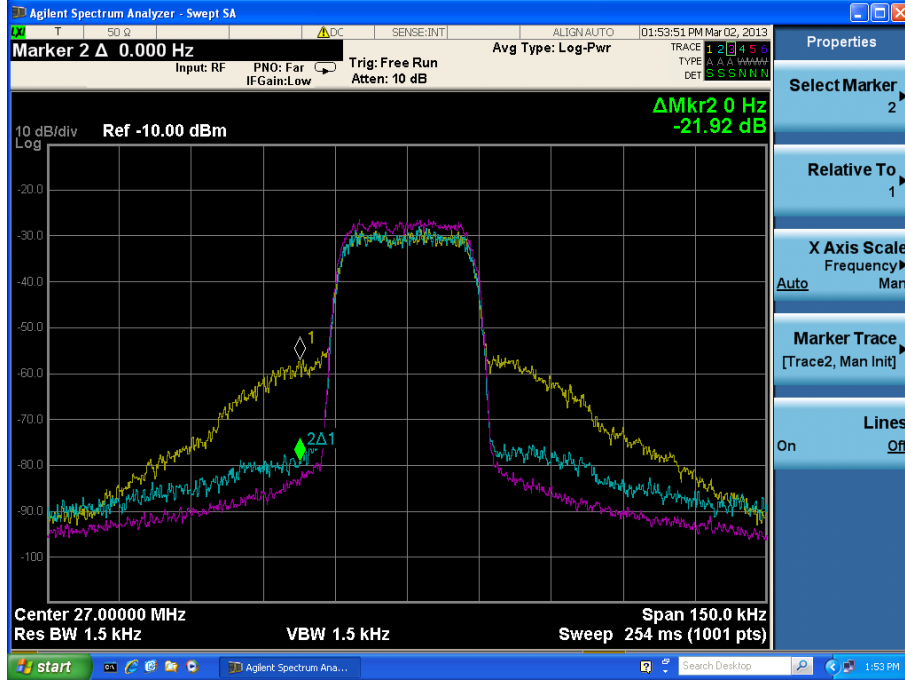
Şekil 5.12. 4.8 MHz merkez frekansında yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü- giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

Merkez Frekansı 12 MHz olarak ayarlanan ölçümde GY tepe çıkış gücü 50.59 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü model elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.4' de verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. Şekil 5.13'te verilen VSA ekranı görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 27 dB lik iyileşme olmuştur.



Şekil 5.13. 12 MHz Merkez frekansında yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

Merkez Frekansı 27 MHz olarak ayarlanan ölçümde GY tepe çıkış gücü 50.92 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak IM ve GM elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.4' te verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. Şekil 5.14' te verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 22 dB lik iyileşme olmuştur.



Şekil 5.14. Merkez frekansı 27 MHz’de yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

5.3.3. Farklı Ortalama RF Güç Seviyelerinde Yapılan DPD Modelleri

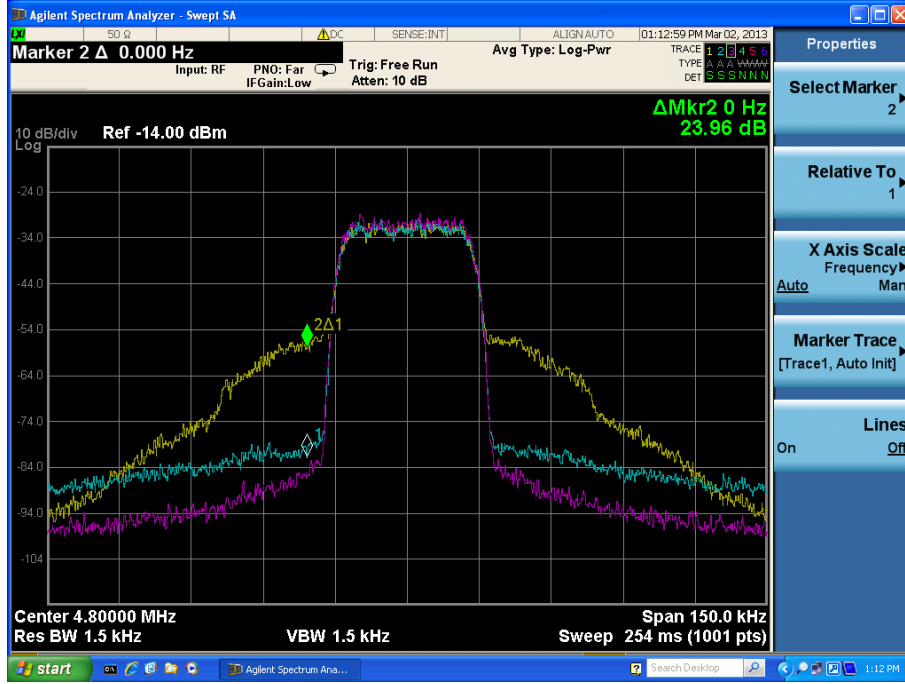
-5 dBm, -1 dBm ve 3 dBm olmak üzere 3 farklı RF güc seviyesinde ölçüm yapılmış QAM64 sayısal modülasyonlu işarete DPD uygulanarak yan kanallarda oluşan iyileştirmeler gözlemlenerek VSA ekran görüntüleri kaydedilmiştir.

Ortalama -5 dBm RF gücünde yapılan ölçümde GY tepe çıkış gücü 43.12 dBm’ dir. VSA’ dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden ‘unit delay’ modeli kullanılarak ileri model ve geri model elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.5’ te verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. DPD sonucunda Şekil 5.15’ te verilen VSA ekran görüntüsünde GY’ ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 20 dB lik iyileşme olmuştur.



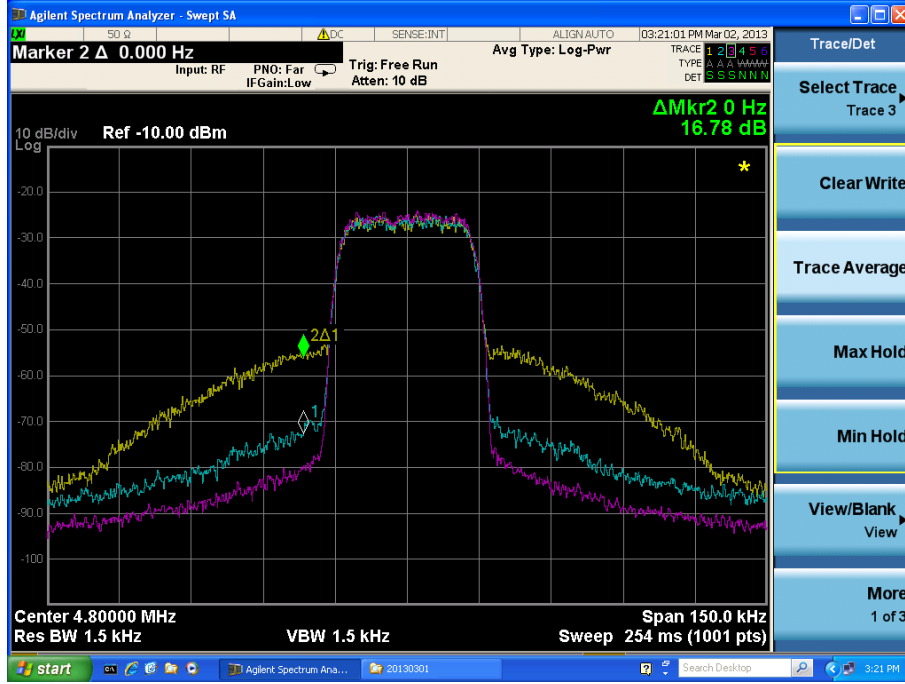
Şekil 5.15. -5 dBm RF güç seviyesinde yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

Giriş işareti ortalama RF gücü -1 dBm olarak ayarlandığı durumda GY tepe çıkış gücü 50.4 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü modeli elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.5' te verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. Şekil 5.16' da verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 24 dB lik iyileşme olmuştur.



Şekil 5.16. -1 dBm RF güç seviyesinde yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

Ortalama 3 dBm RF gücünde yapılan ölçümde GY tepe çıkış gücü 54.98 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü modeli elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.5' te verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. DPD sonucunda Şekil 5.17' de verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 17 dB lik iyileşme olmuştur.



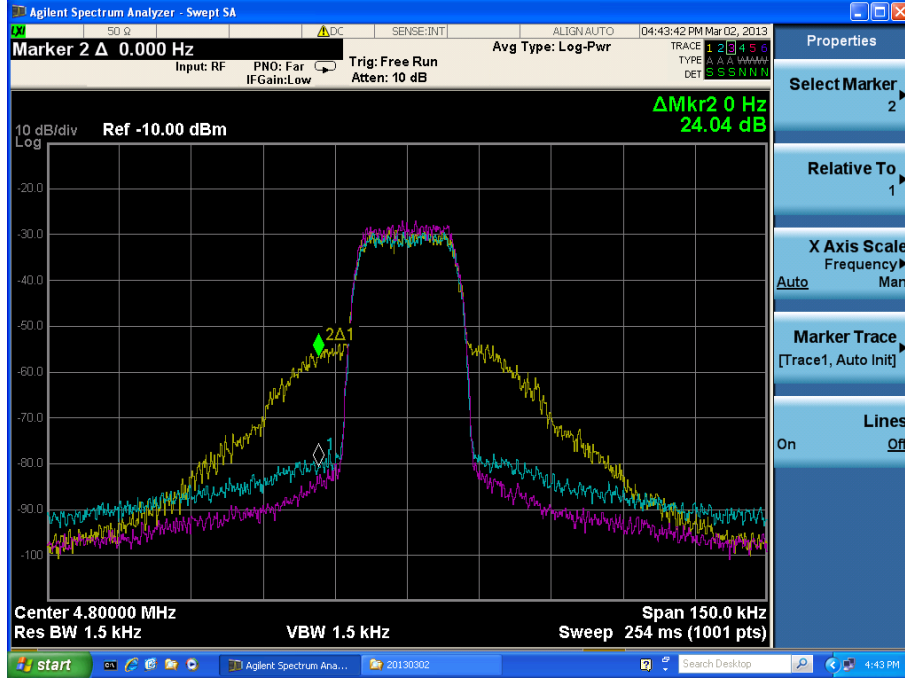
Şekil 5.17. 3 dBm RF güç seviyesinde yapılan ölçüme ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

5.3.4. Farklı İşaret Genişliklerinde Yapılan DPD Modelleri

Örnekleme frekansları değiştirilerek 20 kHz, 27 kHz ve 40 kHz olmak üzere 3 farklı bant genişliğinde ölçüm yapılmış QAM64 sayısal modülasyonlu işarete DPD uygulanarak yan kanallarda oluşan iyileştirmeler gözlemlenmiş ve VSA ekran görüntüleri kaydedilmiştir.

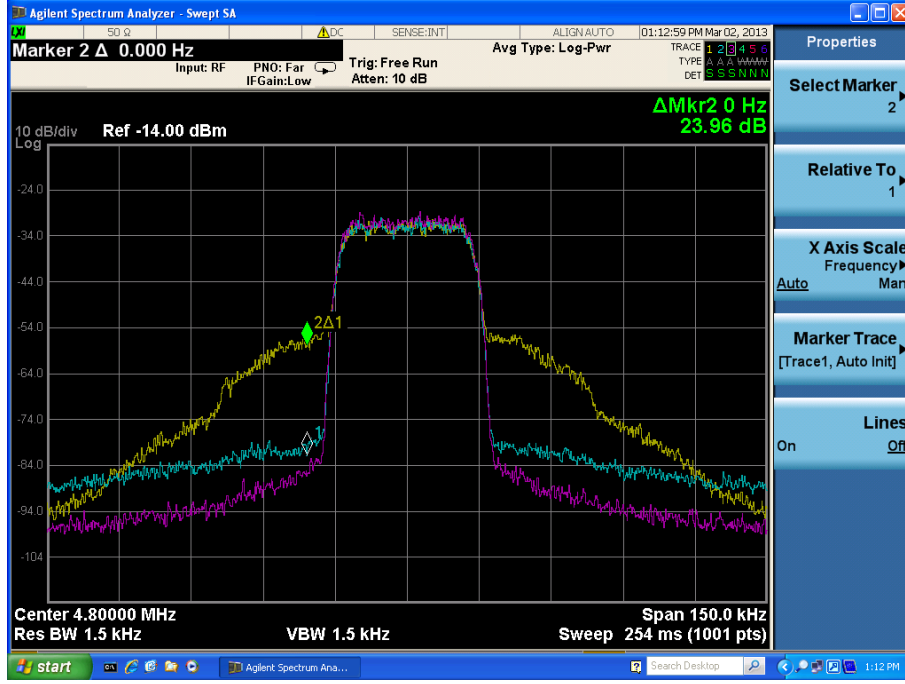
Giriş örnekleme frekansı 1.875 MHz ayarlanarak elde edilen 20 kHz bant genişliğine sahip işaret ölçümünde GY tepe çıkış gücü 52.98 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü model elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.6' da verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. DPD sonucunda Şekil 5.18'de verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi DPD

uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 24 dB lik iyileşme olmuştur.



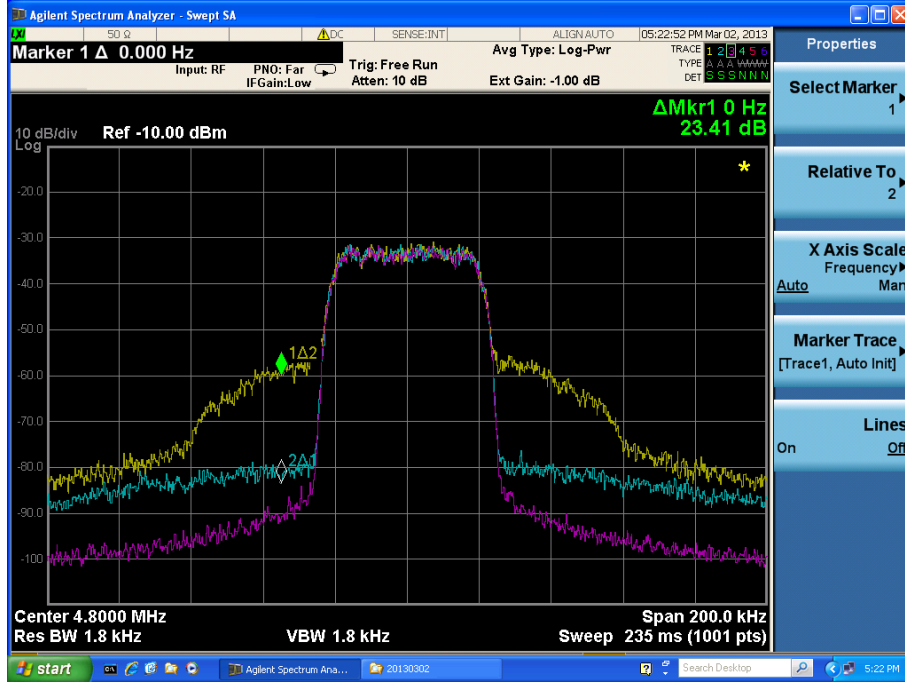
Şekil 5.18. Bant genişliği 20 kHz olan işaretin ölçümüne ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

Giriş örnekleme frekansı 2.5 MHz ayarlanarak elde edilen 27 kHz bant genişliğine sahip işaret ölçümünde GY tepe çıkış gücü 50.4 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü model elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.6' da verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. DPD sonucunda Şekil 5.19' da verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 24 dB lik iyileşme olmuştur.



Şekil 5.19. Bant genişliği 27 kHz olan işaretin ölçümüne ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

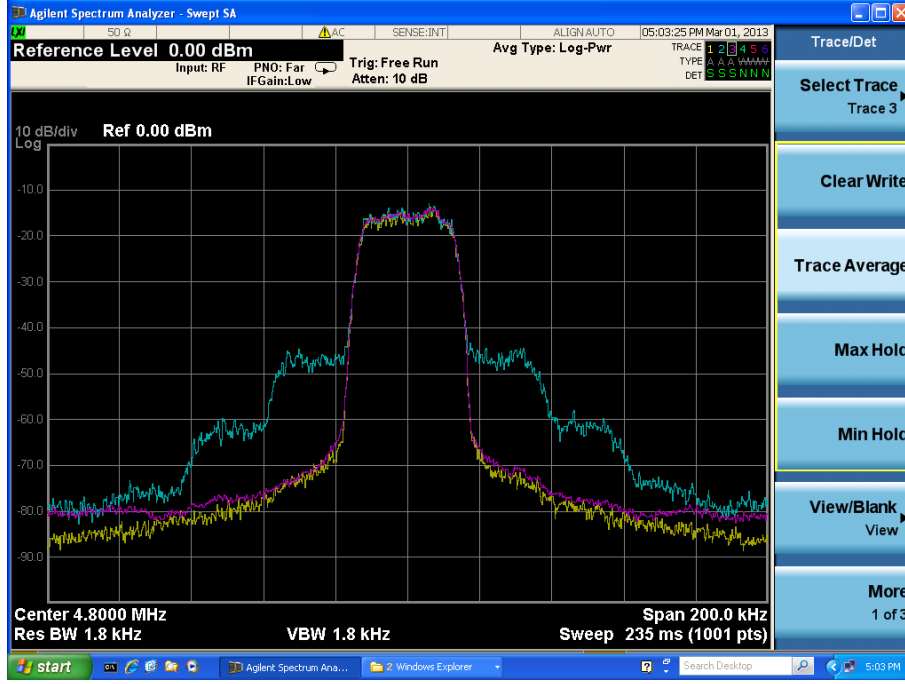
Giriş örnekleme frekansı 3.75 MHz ayarlanarak elde edilen 40 kHz bant genişliğine sahip işaret ölçümünde GY tepe çıkış gücü 51.2 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü model elde edilmiştir. Modellemeye ait NMSE ve MEMR değerleri Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.6' da verilmektedir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. DPD sonucunda Şekil 5.20' de verilen VSA ekran görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi renkli olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 23 dB lik iyileşme olmuştur.



Şekil 5.20. Bant genişliği 40 kHz olan işaretin ölçümüne ait DPD modellemesi sonucu VSA ekran görüntüsü, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

5.3.5. 8PSK Verisine Ait DPD Modeli

8PSK verisi 20 MHz ile örneklendirilerek merkez frekansı 4.8MHz, ortalama RF gücü 3 dBm olmak üzere üretilmiş ve GY' ye uygulanmıştır. Ölçüm sırasında GY tepe çıkış gücü 47.75 dBm' dir. VSA' dan alınan ölçümlere kalibrasyon işlemi uygulandıktan sonra hafıza etkili polinom modellerinden 'unit delay' modeli kullanılarak ileri model ve geri yönlü model elde edilmiştir. Model sonucunda elde edilen veriler ile DPD uygulanmıştır. DPD sonucunda Şekil 5.21' de verilen VSA ekranı görüntüsünde GY' ye uygulanan giriş işareti sarı, DPD uygulanmayan çıkış mavi ve DPD uygulanan çıkış magenta renkli olarak frekans spektrumu görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde yaklaşık 24 dB lik iyileşme olmuştur. GY çıkış işaretindeki IMD seviyeleri neredeyse giriş işareti seviyesine kadar indirilebilmiştir.



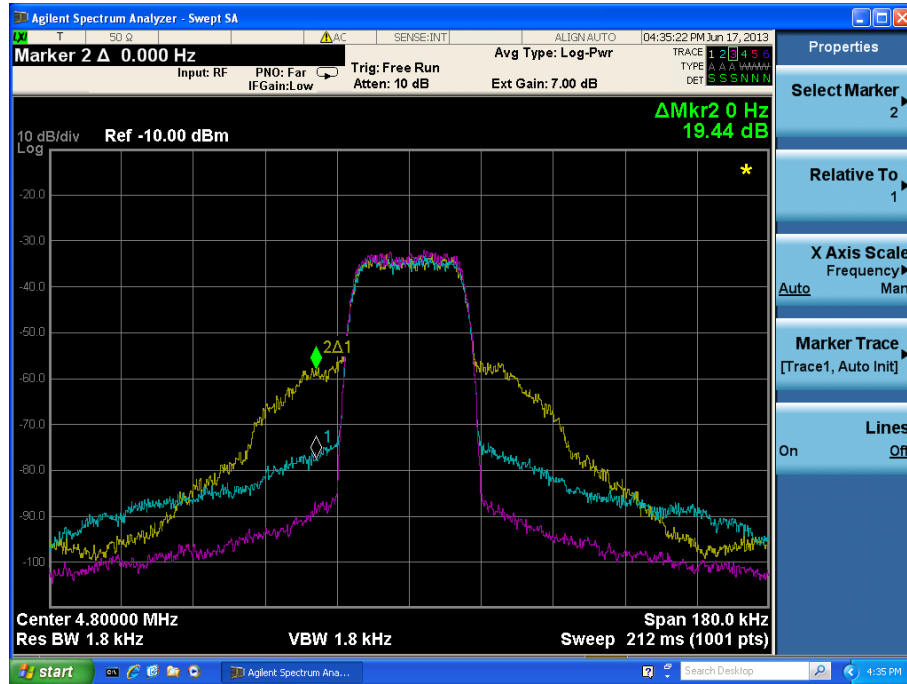
Şekil 5.21. 8PSK işaretinin ölçümüne ait DPD modellemesinin VSG ekranındaki görüntüsü, giriş işareti (sarı), DPD çıkışı (magenta), GY çıkışı (mavi).

5.3.6. Model Geçerlilik Bölgesi

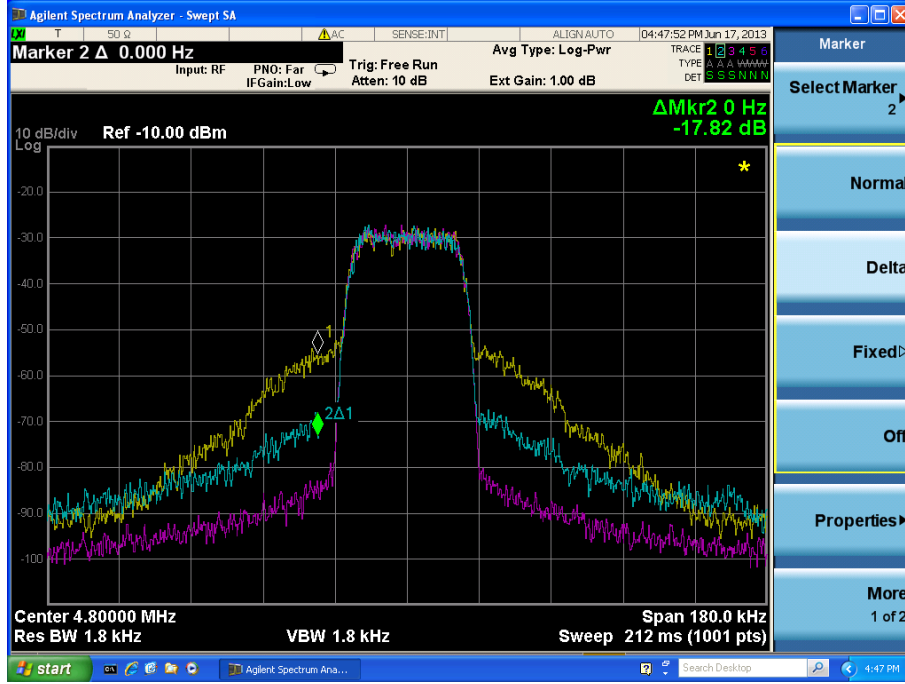
Bu aşamada 4.8MHz, -1dBm RF giriş gücüne sahip 27 kHz'lik bant genişliğine sahip QAM64 modülasyonlu işaret ölçümüne ait geri yönlü modeli farklı giriş güç seviyesi, farklı merkez frekans ve farklı bant genişliğinde ayarlanan GY' ye uygulanmıştır.

Öncelikle yukarıda belirtilen ayarlamalara ait ölçümle gerçekleştirilen geri yönlü model; RF giriş gücü hariç diğer parametreleri aynı kalacak şekilde sırası ile -3 dBm ve +1 dBm giriş gücüne ayarlanmış GY' ye uygulanarak DPD' si gerçekleştirilmiştir. Önceden elde edilen geri yönlü modelin farklı giriş gücündeki iyileştirmesi Şekil 5.22 ve Şekil 5.23' te verilmektedir. Verilen VSA görüntülerinde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde -3 dBm'de yaklaşık 19.5 dB, +1'de ise yaklaşık 18 dB lik iyileşme olmuştur. Modelin yapıldığı ayarlarla gerçekleştirilen DPD uygulamasında IMD seviyesinde yaklaşık 24 dB

iyileştirme elde edildiği Şekil 5.16' daki DPD performansı grafiğinde görülürken RF giriş gücündeki ± 2 dB lik değişimde IMD seviyesindeki iyileşme 18 dB seviyesine inmiştir. Diğer bir deyişle modelin yapıldığı ayarlarla yapılan DPD' de yan kanal güç seviyesi ana-ton a göre 50dBc iken RF giriş gücü 2dB artırıldığında yan kanal güç seviyesi 44dBc olmuştur. GY' nin kullanılacağı sistemin tanımlı standartlarına göre bu seviyenin kabul edilip-edilmeyeceğine karar verilebilir. Diğer önemli nokta ise RF gücü 2dB azaltıldığında durumda DPD çıkışı ana-ton dan 2 bant genişliği kadar frekans geri gidildiğinde orijinal GY çıkışının üzerine çıkmaktadır. Bu durum kullanım durumuna göre göz ardı edilebilir. Ana-ton güç seviyesine göre -55dBc güç seviyesini gürültü kabul eden bir uygulama için bu durum sorun olarak görülmeyebilir ama radar uygulamaları gibi bu seviyeden daha aşağı güç seviyelerini kullanan sistemlerde farklı çıkış yolları aranabilir. Mesela model katsayıları her iki RF gücü sonuçlarına göre optimize edilmeye çalışılabilir.



Şekil 5.22. -1dBm RF giriş gücü seviyesine ait geri yönlü modelleme kullanılarak -3 dBm RF giriş gücündeki DPD etkisi, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

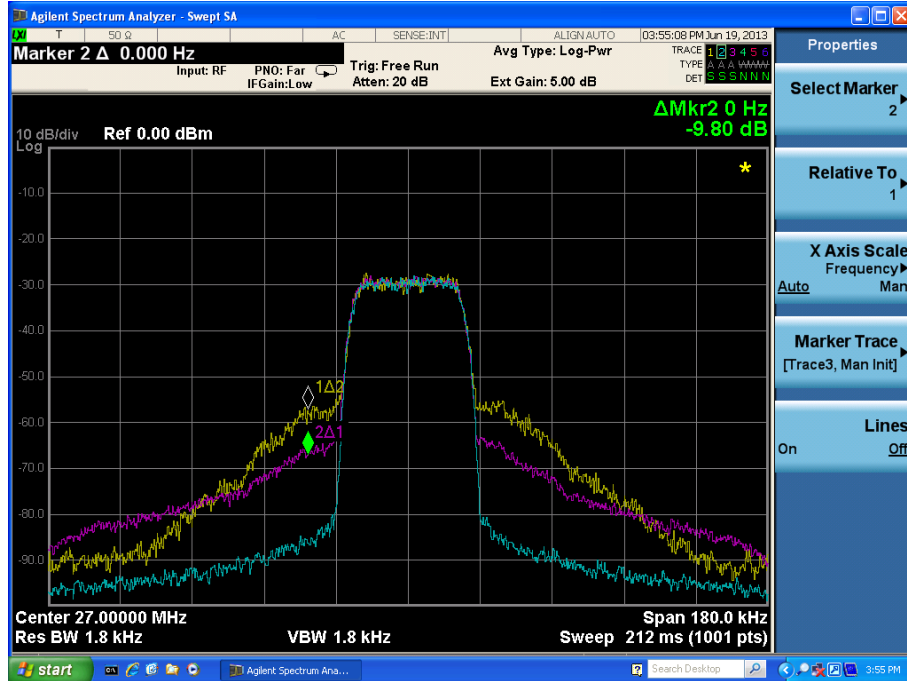


Şekil 5.23. -1dBm RF giriş gücü seviyesine ait geri yönlü modelleme kullanılarak +1 dBm RF giriş gücündeki DPD etkisi, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

İkinci olarak, ilk paragrafta belirtilen ayarlamalara (4.8MHz, -1dBm RF giriş gücü, 27 kHz'lik bant genişliği) ait ölçümle gerçekleştirilen geri yönlü model; merkez frekansı hariç diğer parametreleri aynı kalacak şekilde sırası ile 12 MHz ve 27 MHz merkez frekansına ayarlanmış GY' ye uygulanarak DPD' si gerçekleştirilmiştir. Önceden elde edilen geri yönlü modelin farklı merkez frekanslarında uygulanarak gerçekleşen iyileşmeler Şekil 5.24 ve Şekil 5.25' de verilmektedir. Verilen VSA görüntülerinde Şekil 5.24'te GY' ye uygulanan giriş işareti sarı, DPD uygulanmayan çıkış mavi ve DPD uygulanan çıkış magenta, Şekil 5.25 'de ise GY' ye uygulanan giriş işareti mavi, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış magenta olarak frekans spektrumu verilmektedir. Şekillerde de verildiği gibi DPD uygulanan çıkış DPD uygulanmayan çıkışa göre IMD seviyesinde 12 MHz'de yaklaşık 21 dB, 27 MHz'de ise yaklaşık 10 dB lik iyileşme olmuştur. GY devre yapısı hakkında detaylı bilgiye sahip olunmadığı için tahminen modelin yapıldığı 4.8 MHz ile 27 MHz için GY çalışma koşulları arasında çok büyük farklılıklar mevcuttur diye düşünülmektedir; mesela 4.8MHz ve 27MHz frekanslarda çalışırken ki GY çıkışında bulunan filtreler, uyumlama devreleri birbirlerinden çok farklı olabilir.

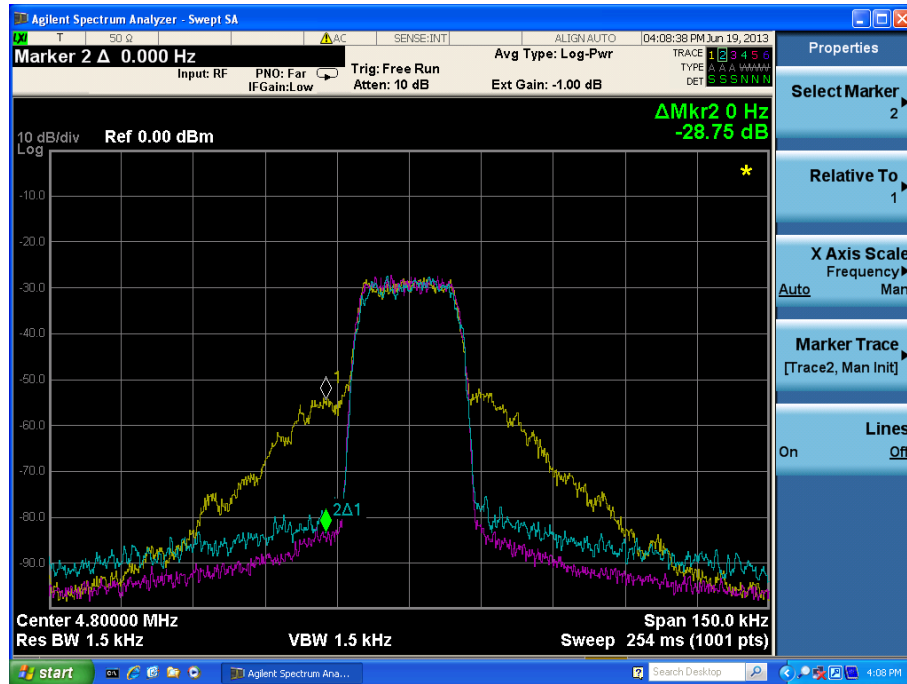


Şekil 5.24. 4.8 MHz merkez frekansında gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 12 MHz merkez frekansındaki DPD uygulaması, giriş işareti (sarı), DPD çıkışı (magenta), GY çıkışı (mavi).

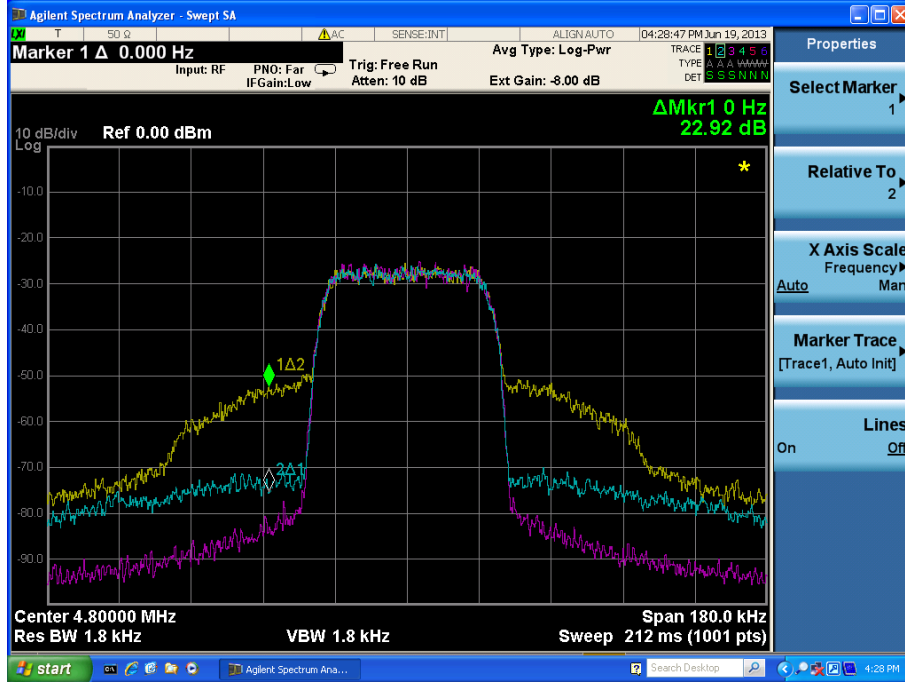


Şekil 5.25. 4.8 MHz merkez frekansında gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 27 MHz merkez frekansındaki DPD uygulaması, giriş işareti (mavi), DPD çıkışı (magenta), GY çıkışı (sarı).

Son olarak ilk paragrafta belirtilen ayarlamalara ait (4.8MHz, -1dBm RF giriş gücü, 27 kHz'lik bant genişliği) ölçümle gerçekleştirilen geri yönlü model; bant genişliği hariç diğer parametreleri aynı kalacak şekilde bant genişliği sırası ile 20 kHz ve 40 kHz ayarlanıp GY 'ye uygulanarak DPD' si gerçekleştirilmiştir. Önceden elde edilen geri yönlü modelin farklı bant genişliğinde uygulanarak gerçekleşen iyileşme Şekil 5.26 ve Şekil 5.27' de verilmektedir. Verilen VSA görüntülerinde GY' ye uygulanan giriş işareti magenta, DPD uygulanmayan çıkış sarı ve DPD uygulanan çıkış mavi olarak frekans spektrumu görülmektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi DPD uygulanmayan çıkışa göre DPD uygulanan çıkış sonucu IMD seviyesinde 20 kHz bant genişliğinde yaklaşık 30 dB, 40 kHz bant genişliğinde ise yaklaşık 23 dB lik iyileşme olmuştur. Orijinal modelin elde edildiği bant genişliği olan 27 kHz deki IMD seviyesindeki iyileştirme 24 dB idi. Bant genişliği 20 kHz' e daraldığında IMD seviyesindeki iyileşme beklenmedik bir şekilde 30 dB olup neredeyse giriş işareti güç seviyelerine yaklaşmıştır.



Şekil 5.26. 27 kHz bant genişliğinde gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 20 kHz bant genişliğindeki DPD uygulaması, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).



Şekil 5.27. 27 kHz bant genişliğinde gerçekleştirilen geri yönlü modellemenin 40 kHz bant genişliğindeki DPD uygulaması, giriş işareti (magenta), DPD çıkışı (mavi), GY çıkışı (sarı).

BÖLÜM 6

SONUÇ

Bu yüksek lisans tezi konusuna uygun literatür taramaları yapılarak sistem gereksinimleri belirlendikten sonra sistem parametreleri oluşturulmuştur. Bu doğrultuda ölçümler alınmış, ileri ve geri yönlü modeller elde edildikten sonra DPD uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm sisteminde Agilent firmasına ait biri VSG (E8267D – opsiyon 602) diğeri VSA (N9010A) olmak üzere iki cihaz kullanılmıştır. Ölçüm çerçevesinde kullanılan sayısal modülasyon işaretin kayıt süresinin 2ms'den büyük olmasından dolayı daha uzun süreli işareti ölçerken cihazlar arası yerel osilatör zaman kaymasını minimize etmek için kalibrasyon programı hazırlanmıştır. Kalibrasyon programı yardımıyla merkez frekansı, ortalama RF gücü ve BW ayarlarından ikisi sabit tutulup diğeri ayar için üç farklı değerde ölçüm yapılmak suretiyle toplam 9 farklı ölçüm yapılmıştır. Sabit olan değerler Çizelge 6.1' de koyu renkli olarak belirtilmiştir. Yapılan ölçümler ile GY' ye ait ileri yönlü ve geri yönlü modeller bulunmuştur. İleri yönlü model başarısı ölçüm yapılan ayarlardaki GY davranışını modelleme yeteneğinin olup olmadığını göstermesi açısından önemlidir. Modelleme hatası olarak NMSE değerinin 30dB den daha kötü olması DPD performansı açısından endişe verici bir durumdur. NMSE değerinin 38 dB ler seviyesinde olması ise modelleme polinomunun derecesinin daha fazla artırmaya gerek olmadığını gösteren bir parametredir. Bölüm 5.2' de listelenen model performanslarının 30 dB den daha iyi olması bu modelleme ile DPD yapılabileceğini göstermektedir.

İleri modelleme ile kabul edilebilir bir DPD performansı elde edilebileceği öngörüsü ile geri yönlü modellemeler yapılmış sonuçlar Bölüm 5.3'te listelenmiştir. DPD sisteminde GY' ye uygulanacak giriş işareti geri model kullanılarak ön bozuluma uğratılacağı için geri yönlü model başarımı DPD performansı ile direkt ilgilidir.

Unutulmamalıdır ki her zaman için çok başarılı geri yönlü modelleme sonucunda çok iyi IMD iyileştirmesi olan bir DPD sistemi elde edilebilecek anlamına gelmez. Bu önerme, yapılan ölçüm başarısı ile alakalıdır. Eğer yapılan ölçümde kırılma (giriş işareti değişirken çıkış işareti sabit kalması) durumu söz konusu ise çok başarılı bir geri modelleme ile beklenen kadar başarılı bir DPD yapılamayabilir. Bu sebeple yapılan ölçümde kırılma olmaması istenir. Bu duruma en iyi örnek bölüm 5.1.2 , bölüm 5.2.2 ve bölüm 5.3.2 bölümlerinde verilen 3dBm ortalama RF gücü için yapılan ölçümdür. 3 dBm için ileri yönlü model performansı -5dBm ve -1 dBm RF gücü seviyelerinden daha iyi olmasına rağmen geri yönlü modeli ve DPD iyileştirme miktarı diğer güç seviyelerinden daha azdır.

Sonuç olarak GY çıkışında oluşan IMD seviyesinde 20dB ile 27dB arasında değişen değerlerde iyileştirmeler yapılabilmektedir. 4.8MHz merkez RF frekansında -1dBm RF giriş gücüne ve 27 kHz' lik bant genişliğine sahip QAM64 modülasyonlu işaret ölçümü temel alınarak geliştirilmiş DPD sistemi kullanılarak giriş işareti ortalama RF gücü ± 2 dB, bant genişliği $\pm 35\%$ den daha fazla ve iki farklı merkez frekansında denemiştir. 27MHz merkez frekanslı deneme haricinde çok büyük sorun görülmemiştir.

Ayrıca QAM64' ten farklı olarak sayısal modülasyonlu 8PSK verisinin kullanılarak ta bir DPD yapılmıştır. Bu veri ile GY' ye ait ölçümler yapılarak DPD uygulaması gerçekleştirildiğinde Şekil 55' den de görülebileceği gibi GY çıkışında oluşan IMD seviyeleri yaklaşık olarak giriş işareti seviyesine kadar Unit Delay yöntemi ile indirilebilmiştir.

Çizelge 6.1. DPD performans özeti.

	Fc (MHz)			Pin (dBm)			BW (kHz)		
	4.8	12	27	-5	-1	3	20	27	40
IMD seviyesinde iyileştirme (dB)	24	27	22	20	24	17	24	24	23

KAYNAKLAR

1. Lindenmeier, S., and Weigel, R., “Electromagnetics and Network Theory and Their Microwave Technology Applications”, *Springer*, Berlin, 263-265 (2011).
2. Andreoli, S., McClure, H. G., Banelli, P., and Cacopardi, S. “Digital linearizer For RF amplifiers”, *IEEE Transactions on Broadcasting*, 43 (1): 12-19 (1997).
3. Nizamuddin, M. A., “Predistortion for nonlinear power amplifiers with memory”, M. Sc. Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, US (2002).
4. Hyunchul, K., McKinley, M. D., and Kenney, J. S., “Extraction of accurate behavioral models for power amplifiers with memory effects using two-tone measurements”, *Microwave Symposium Digest*, 2002 IEEE MTT-S International, 1: 139–142 (2002).
5. Boumaiza, S. and Ghannouchi, F., “Thermal memory effects modeling and compensation in rf power amplifiers and predistortion linearizers”, *Microwave Theory and Techniques*, 51 (12): 2427–2433 (2003).
6. Vuolevi, J., Rahkonen, T., and Manninen, J., “Measurement technique for characterizing memory effects in RF power amplifiers”, *Radio and Wireless Conference*, RAWCON, 195 –198 (2000).
7. Tornblad, O., Wu, B., Dai, W., Blair, C., Ma, G., and Dutton, R., “Modeling and measurement of electrical and thermal memory effects for RF power Ldmos”, *2007 Microwave Symposium*, Honolulu, 2015–2018 (2007).
8. Chen, H. B., Jin, L., Deng, Z. R., and Shen, D., “Simplified parameter-extraction process for digital predistortion based on the indirect learning architecture”, *Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 1665- 1668 (2011).
9. Zhou, H., Wan, G., and Chen, L., “A nonlinear memory power amplifier behavior modeling and identification based on memory polynomial model in soft-defined shortwave transmitter”, *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 1 –4 (2010).
10. Morgan, D. R., Ma, Z., Kim, J., Zierdt, M. G., and Pastalan, J., “A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers”, *IEEE Transactions On Signal Processing*, 3852 (2006).
11. Kim, W., Stapleton, S. P., Kim, J. H., and Edelman, C. “Digital predistortion linearizes wireless power amplifiers”, Agilent EEsofEDA, *IEEE Microwave Magazine*, 55-61 (2005).

12. Yüzer, A. H., “Modeling of asymmetric intermodulation distortion and memory effects of power amplifiers”, Ph. D. Thesis, *Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Ankara, (2011).
13. Marsalek, R., “Contributions to the power amplifier linearization using digital baseband adaptive predistortion”, Ph. D. Thesis, *Universite de Marne La Vallee*, Paris (2003).
14. Şekerlisoy, B. and Köse, S., “Adaptive digital predistortion senior project design”, M. Sc. Thesis, *Bilkent University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Ankara (2005).
15. Teriaki, I., “Digital predistortion linearization methods for RF amplifier”, Ph.D. thesis, *Helsinki University of Technology*, Helsinki (2008).
16. Aslan, M., “Adaptive digital predistortion for power amplifier linearization”, Ph. D. Thesis, *Bilkent University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Ankara (2008).
17. Eroğlu, G., “Linearization of RF power amplifiers by using memory polynomial digital predistortion technique”, M. Sc. Thesis, *Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Ankara (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Emine Betül ŞANLI 1989'da Ankara'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Türk Telekom Anadolu Meslek Lisesi, Telekomünikasyon Eğitimi Bölümü'nden mezun olduktan sonra 2007 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Öğretmenliği Bölümü'ne girdi; 2011 yılında "onur" derecesi ile mezun olmuştur. Halen PRF ArGe Mühendislik A.Ş.'de test mühendisliği pozisyonunda çalışmakta ve 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını sürdürmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma içinde SİU'13 konferansında 'Yeniden Örneklemenin Ön Bozulumlu Doğrusallaştırma Sistemi Performansına Etkisi' adı ile sunum gerçekleştirilmiştir.