UYARLAMALI SAYISAL ÖN BOZUCULARIN DONANIM VE TASARIM PARAMETRELERİNİN SİSTEM PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ

EFFECTS OF HARDWARE AND DESIGN PARAMETERS OF ADAPTIVE DIGITAL PREDISTORTION ON SYSTEM PERFORMANCE

ARMAĞAN BALTACI

Doç. Dr. EMRE AKTAŞ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

ARMAĞAN BALTACI' nın hazırladığı **"Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucuların Donanım ve Tasarım Parametrelerinin Sistem Performansı Üzerine Etkileri"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali Özgür YILMAZ

Başkan .....

Doç. Dr. Emre AKTAŞ

Danışman .....

Doç. Dr. Berkan DÜLEK

Üye .....

Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT

Üye .....

Yrd. Doç. Dr. Dinçer GÖKÇEN

Üye .....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

☒ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

☐ **Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım taktirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

☐ **Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

02 /03 /2018



Armağan BALTACI

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02 / 03 / 2018

Armağan BALTACI

ÖZET

UYARLAMALI SAYISAL ÖN BOZUCULARIN DONANIM VE TASARIM PARAMETRELERİNİN SİSTEM PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ

ARMAĞAN BALTACI

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. EMRE AKTAŞ

Mart 2018, 92 sayfa

Günümüzde haberleşme sistemleri için artan veri hızı ihtiyacıyla ve kullanılan bant genişliğinin sınırlı olmasıyla yüksek mertebeli kiplenim türlerinin kullanılma gereksinimi ortaya çıkmıştır. Haberleşme sistemlerinin giderek artan uzak mesafe haberleşmesini sağlama, daha az hata oranları ile haberleşme gibi ihtiyaçları da verici sistemlerinin çıkışlarında daha yüksek güç seviyelerine ulaşma ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yüksek çıkış gücü seviyelerine ulaşmak, verici sistemlerinde yer alan güç yükselteçlerinin kısılma ve doyum bölgelerinde çalışması ihtiyacını beraberinde getirmiştir.

Güç Yükselteçleri, girişlerine uygulanan işaret seviyesi arttıkça doğrusal olmayan giriş-çıkış karakteri gösterirler. Güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan etkileri haberleşme sistemlerinin haberleşme kalitesini düşürür. Yüksek mertebeli kiplenime sahip işaretlerin yüksek tepe-ortalama güç oranlarından dolayı doğrusal olmayan güç yükselteci etkilerinden daha fazla etkilenirler.

Buradan yükselteç için verimlilik ve doğrusallık arasında bir ödünleşme doğar. Doğrusallaştırma teknikleri, uygulandıkları sistemde doğrusal olmayan etkilerden kaynaklanan bozulmaların daha aza inmesini sağlarlar. Bu durumu doğrusal çalışılan bölgeleri genişleterek gerçekleştirir.

Uyarlamalı sayısal ön bozucular RF geri besleme yoluna ihtiyaç duyan doğrusallaştırıcı sistemleridir. Uyarlamalı sayısal ön bozucular bir güç yükselteci modeline bağlı kalmayan ve sayısal ortamda gerçeklenen esnek sistemlerdir.

Doğrusal olmayan sistemler giriş işaretlerinin bant genişliğini arttırırlar. Bu nedenle gözlem yolu bant genişliği yeterli genişlikte olmadığında doğrusallaştırıcı sisteminin performansı düşer.

Gözlem yolunda sayısallaştırılması gereken işaret, bant genişliği artmış olan işaret olduğu için yüksek hızlı sayısal/analog dönüştürücülere ihtiyaç duyulur. Verici yolunda yeterince yüksek örnekleme hızına sahip olmayan analog/sayısal dönüştürücü kullanılmadığı durumda da sistem performansı kötüleşir.

Bu tez çalışması, gözlem yolu bant genişliğinin yeterince geniş olmadığı durumda ve yeterince yüksek hızlı çalışan analog/sayısal dönüştürücü kullanılmadığında uyarlamalı sayısal ön bozucu sistemlerinin performansını incelemeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: doğrusal olmayan etkiler, doğrusallaştırma teknikleri, uyarlamalı sayısal ön bozucu

ABSTRACT

EFFECTS OF HARDWARE AND DESIGN PARAMETERS OF ADAPTIVE DIGITAL PREDISTORTION ON SYSTEM PERFORMANCE

ARMAĞAN BALTACI

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. EMRE AKTAŞ

March 2018, 92 pages

Due to the increasing need for data rate and the limit of bandwidth in communication systems, nowadays, usage of high order modulation types has become essential. Communication systems, ever increasing long distance communication as well as satisfy less error rates in order to reach more output power levels at transmitter outputs. The necessity of reaching higher power levels has led to development of power amplifiers operating at compression and saturation region.

Power amplifiers present nonlinear input-output behavior as the power level applied to the input of power amplifiers increases. The nonlinear effects of power amplifiers degrade the quality of communication systems. Signals with high order modulation are highly affected by nonlinear power amplifier behaviour because of their higher peak to average power ratios.

To this end, a trade-off should be obtained between efficiency and linearity for power amplifiers. At this point, linearization techniques help reduce the distortions

arising from the nonlinear effects of signals applied to the system input. This can be accomplished by extending the linear range of power amplifier.

Adaptive predistorters are linearization systems with RF feedback path. They are flexible systems as they do not require a power amplifier model and they are implemented on digital domain.

Nonlinear systems increase bandwidth of input signal. For this reason, the performance of linearization system reduces if the bandwidth of feedback path is not large enough.

Since the signal, which is to be digitized on the feedback path, has an increased bandwidth, analog to digital converters with high sampling rate are required. The system performance gets worse if sampling rate of analog to digital converter is high enough.

This thesis analyses the effects of analog to digital converter sampling rate and bandwidth of feedback path on the performance of adaptive digital predistortion systems.

Keywords: nonlinear effects, linearization techniques, adaptive digital predistorter

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Emre Aktaş'a,

Katılımları, görüşleri ve önerileri için değerli savunma sınavı jüri üyelerine,

Beni yetiştiren ve her zaman yanımda olan sevgili anneme ve babama,

Tez çalışmam süresince bana destek olan değerli iş arkadaşlarım Dr. Raşit Tutgun ve Emrah Öncü'ye

teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
ÇİZELGELER ix
ŞEKİLLER x
SİMGELER VE KISALTMALAR xiv
1. GİRİŞ 1
2. GÜÇ YÜKSELTEÇLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN ETKİLERİ 3
2.1 İşaret Bozulması 5
2.1.1 AM/AM Bozulması 5
2.1.2 AM/PM Bozulması 6
2.2 Güç Yükselteç Modellemesi 8
2.2.1 Polinom Modeli 8
2.2.2 Saleh Modeli 9
2.2.3 Ghorbani Modeli 9
2.2.4 Rapp Modeli 10
2.2.5 Arctan Modeli 10
2.3 Ara Kiplenim Bozulması 11
2.3.1 3. Seviye Kesişim Noktası 14
2.3.2 Spektrum Büyümesi 15
2.4 Hafıza Etkileri 16
3. DOĞRUSALLAŞTIRMA TEKNİKLERİ 18
3.1 Geriden sürme 18
3.2 Taramalı Tablo Tekniği 18

3.3 İleri Besleme Tekniği 19
3.4 Ön Bozucu Tekniği 20
4. SAYISAL ÖN BOZUCU 22
4.1 Uyarlamalı Olmayan Sayısal Ön Bozucu 22
4.2 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu 22
4.2.1 Açık Döngü Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu 23
4.2.2 Kapalı Döngü Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu 26
4.2.3 Ön Bozucu Katsayı Uyarlama Teknikleri 28
5. UYARLAMALI SAYISAL ÖN BOZUCU GERÇEKLEME BİRİMLERİ 31
5.1 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu RF Birimi 31
5.1.1 Karmaşık Ara Frekans Verici Yapısı 32
5.1.2 Gerçek Ara Frekans Gözlem Yolu 33
5.1.3 Karmaşık Ara Frekans Gözlem Yolu 34
5.2 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Tabanbant Birimi 35
5.2.1 İşaret İşleme Birimi 35
5.2.2 İşaret Çeviriciler 38
6. ÖN BOZUCU BENZETİMLERİ VE GERÇEKLEME ÇALIŞMALARI 40
6.1 Uyarlamalı Olmayan Sayısal Ön Bozucu 40
6.1.1 Model Bağımlı Ön Bozucu 40
6.1.2 USRP Kullanılarak Taramalı Tablo Yöntemi İle Sayısal Ön Bozucu Gerçeklemesi 46
6.2 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu 48
6.2.1 Yükselteç Modellerinin Genlik ve Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi 48
6.2.2 Uyarlamalı Olmayan Sayısal Ön Bozucu ve Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Karşılaştırması 50
6.2.3 İki Ton İşaret ile Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Benzetimleri 51
6.2.4 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Performansının Yıldız Şemasında İncelenmesi 54

6.2.5 Gözlem Yolu Vektör Boyutunun ve Yineleme Sayısının Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Performansına Etkisi 63
6.2.6 Uyarlamalı Ön Bozucuların SER Oranına Etkisi 64
6.2.7 Gözlem Yolu Bant Genişliğinin ve Örnekleme Oranlarının Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Performansına Etkileri 69
7. SONUÇLAR 84
KAYNAKLAR 86
EKLER 89
ÖZGEÇMİŞ 91

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge. 6.1. Yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının ara kiplenim ürünleri seviyesine etkisi 78
Çizelge. 6.2. Sınırlı bant genişliğinde yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının ara kiplenim ürünleri seviyesine etkisi 79
Çizelge. 6.3. Yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının EVM üzerine etkisi 81
Çizelge. 6.4. Sınırlı Bant genişliğine sahip gözlem yolu ile yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının EVM üzerine etkisi 83

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1. Güç yükselteçlerinin AM/AM dönüşüm grafiği 4
Şekil 2.2. 1 dB kısılma noktası 5
Şekil 2.3. İşaret genliğinde kesilme 6
Şekil 2.4. İşaret genliğinde kesilmenin frekans spektrumundaki etkisi 6
Şekil 2.5. Doğrusal olmayan AM/PM dönüşümünün işaret fazı üzerindeki etkisi ... 7
Şekil 2.6. Güç yükselteci giriş işaretleri 13
Şekil 2.7. Ara kiplenim ürünleri 14
Şekil 2.8. 3. Seviye kesişim noktası 15
Şekil 2.9. Spektrum büyümesi 16
Şekil 2.10. Hafıza etkilerinin spektrum üzerindeki etkileri 17
Şekil 3.1. İleri besleme metodu 20
Şekil 3.2. Ön bozucu tekniği 21
Şekil 3.3. Ön bozucu tekniğinin spektrum üzerinde görülen etkisi 21
Şekil 4.1. Uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği 23
Şekil 4.2. Açık döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısı 24
Şekil 4.3. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısı 26
Şekil 5.1. Uyarlamalı sayısal ön bozucu birimleri 31
Şekil 5.2. Karmaşık ara frekans verici yapısı 32
Şekil 5.3. Gerçek ara frekans gözlem yolu 33
Şekil 5.4. Karmaşık ara frekans gözlem yolu 34
Şekil 6.1. AML612P4401 yükselteç AM/AM dönüşümü grafiği 41
Şekil 6.2. Doğrusal olmayan etkilerin işaret genliğinde meydana getirdiği kesilme 42
Şekil 6.3. Model bağımlı sayısal ön bozucunun AM/AM bozulmasına etkisi 43
Şekil 6.4. Model bağımlı sayısal ön bozucu etkisinin frekans spektrumunda incelenmesi (QPSK, 80 Msps, α =0.65) 44
Şekil 6.5. Normalize edilmiş sayısal ön bozucu ve güç yükselteci çıkışlarının frekans spektrumundaki görüntüsü (QPSK, 80 Msps, α =0.65) 45
Şekil 6.6. Model bağımlı sayısal ön bozucu etkisinin zaman bölgesinde incelenmesi 46

Şekil 6.7. USRP kullanılarak doğrusallaştırıcı tasarımı blok şeması 47
Şekil 6.8. USRP üzerinde taramalı tablo yöntemi ile gerçeklenen sayısal ön bozucunun AM/AM bozulmasına etkisi..... 47
Şekil 6.9. Saleh modelinin genlik ve faz dönüşüm grafikleri 49
Şekil 6.10. Ghorbani modelinin genlik ve faz dönüşüm grafikleri..... 49
Şekil 6.11. Arctangent modelinin genlik ve faz dönüşüm grafikleri 50
Şekil 6.12. Uyarlamalı olmayan sayısal ön bozucu ile uyarlamalı sayısal ön bozucunun frekans spektrumundaki etkilerinin karşılaştırılması(QPSK, 80 Msps, α =0.65) 51
Şekil 6.13. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi ... 52
Şekil 6.14. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi (ana ton işaretler) 53
Şekil 6.15. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi (3. ara kiplenim ürünü)..... 53
Şekil 6.16. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi (5. ara kiplenim ürünü)..... 54
Şekil 6.17. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi 55
Şekil 6.18. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi..... 56
Şekil 6.19. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-PSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi 57
Şekil 6.20. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-PSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi..... 57
Şekil 6.21. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi 58
Şekil 6.22. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi..... 59
Şekil 6.23. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi 60

Şekil 6.24 Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi 60
Şekil 6.25. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-PSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında İncelenmesi 61
Şekil 6.26. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi 61
Şekil 6.27. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi 62
Şekil 6.28. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi 63
Şekil 6.29. Gözlem vektörü ve iterasyon sayısının uyarlamalı sayısal ön bozucu performansına etkisinin hata vektörü elemanlarının ortalamasıyla incelenmesi ... 64
Şekil 6.30. Saleh modeli güç yükseltecinin AM/AM dönüşümü ve uyarlamalı ön bozucunun sağladığı doğrusallaştırma 65
Şekil 6.31. Saleh modeli güç yükseltecinin AM/PM dönüşümü ve uyarlamalı ön bozucunun faz değişimine etkisi 66
Şekil 6.32. Uyarlamalı sayısal ön bozucunun 8-PSK kiplenimli işaret ile giriş gücüne karşılık sembol enerjisinin gürültü enerjisine oranının etkisi 67
Şekil 6.33. Uyarlamalı sayısal ön bozucunun 16-PSK kiplenimli işaret ile giriş gücüne karşılık sembol enerjisinin gürültü enerjisine oranının etkisi 67
Şekil 6.34. 8-PSK kiplenimli işaretin doğrusal olmayan güç yükseltecinin giriş gücü seviyesine göre SER değişimine uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisi 68
Şekil 6.35. 16-PSK kiplenimli işaretin doğrusal olmayan güç yükseltecinin giriş gücü seviyesine göre SER değişimine uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisi 69
Şekil 6.36. Yukarı ve aşağı örnekleme bloklarının yer aldığı uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısı 69
Şekil 6.37. Katsayı uyarlama sırasında blok şema üzerindeki frekans görüntüleri 73
Şekil 6.38. Katsayı uyarlaması gerçekleştikten sonra blok şema üzerindeki frekans görüntüleri 74
Şekil 6.39. Filtre kesim frekansı işaret bandından dar olduğu durumda filtre çıkışının frekans spektrumu 75

Şekil 6.40. Sınırlı olmayan gözlem yoluna sahip uyarlamalı sayısal ön bozucunun etkisinin iki ton işaret ile incelenmesi 76
Şekil 6.41. Uyarlamalı sayısal ön bozucu sınırsız gözlem yolu bant genişliğinin 3. ara kiplenim ürünü ve 5. ara kiplenim ürünlerinin bastırmasına etkisi 77
Şekil 6.42. 3. ve 5. derece ara kiplenim ürünlerinin geçemeyeceği gözlem yolunun frekans cevabı 78
Şekil 6.43. Uyarlamalı sayısal ön bozucu sınırlı gözlem yolu bant genişliğinin 3. ve 5. ara kiplenim ürünlerinin bastırmasına etkisi..... 79
Şekil 6.44. 20 MHz bant genişliğine sahip QPSK kiplenimli işaretin uyarlamalı sayısal ön bozucu ile yan kanal bastırması (QPSK, 20 Msps, α =0.65) 80
Şekil 6.45. QPSK kiplenimli işaret için 5. ara kiplenim ürününün geçemeyeceği gözlem yolu frekans cevabı 82
Şekil 6.46. 20 MHz bant genişliğine sahip QPSK kiplenimli işaretin sınırlı gözlem yolu olan uyarlamalı sayısal ön bozucu performansı (QPSK, 20 Msps, α =0.65) 82

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$g(A)$	çıkış genliği
$\emptyset(A)$	çıkış fazı
N_g	genlik fonksiyonu derecesi
$N_\emptyset$	faz fonksiyonu derecesi
a_p	genlik fonksiyonu katsayıları
p	genlik fonksiyonu adımı
A	giriş genlik seviyesi
b_q	faz fonksiyonu katsayıları
q	faz fonksiyonu adımı
y_0	doyum bölgesi gerilimi
r	yumuşaklık faktörü
$y(A)$	çıkış işareti
γ_1, γ_2	model parametreleri
θ	giriş işareti fazı
V_1, V_2	giriş işaretlerinin genlikleri
ω_1, ω_2	giriş işaretlerinin frekansı
$\emptyset_1, \emptyset_2$	giriş işaretlerinin fazı
a_i	i durumundaki model katsayıları
φ	faz ifadesi
τ	zaman ifadesi
ω	açısal frekans
$u[k]$	ön bozucu giriş örneği

$u'[k]$	ön bozucu çıkış örneği
$y[k]$	sayısallaştırılmış güç yükselteç çıkış örneği
$y(t)$	güç yükselteç çıkışı zaman-alanındaki işaret
G	güç yükselteç kazancı
u	ön bozucu giriş vektörü
ε	hata vektörü
N	hata vektörü eleman sayısı
ρ_n	kısma faktörü
Δ_{a_n}	ön bozucu model katsayıları farkı
$\mathrm{u'_i}$	ön bozucu çıkış vektörü
Y	yükselteç çıkış vektörü
a	ön bozucu model katsayı vektörü
$\hat{\mathrm{a}}_\mathrm{i}$	kestirilen ön bozucu model katsayıları
U	ön bozucu giriş vektörü
μ	yakınsama katsayısı
$\mathrm{u_n(t)}$	zaman-alanında ön bozucu giriş işareti
$\mathrm{y_n(t)}$	zaman-alanında güç yükselteci çıkış işareti
$\mathrm{u_n[k]}$	ön bozucu giriş örneği
$\mathrm{y_n[k]}$	güç yükselteç çıkış örneği
$\mathrm{U_{n-1}}$	n-1 durumundaki ön bozucu giriş vektörü
$\emptyset_\mathrm{n}$	kazanç ifadesi hesaplamasında kullanılan değişken
φ_n	model katsayıları kestiriminde kullanılan değişken
$\mathrm{P_n}$	kazanç ifadesi hesaplamasında kullanılan değişken
$\mathrm{G_n}$	kazanç ifadesi

$h_{int}[n]$	ara değer kestirim filtresi
$b[n]$	ara değer kestirim filtresi çıkış işareti
f_{DPD}	uyarlamalı sayısal ön bozucu fonksiyonu
$x[n]$	uyarlamalı sayısal ön bozucu çıkış işareti
$x(t)$	analoglaştırılmış uyarlamalı sayısal ön bozucu çıkış işareti
f_{FW}	sayısal/analog dönüştürücü örnekleme frekansı
f_{PA}	güç yükselteç fonksiyonu
$y(t)$	güç yükselteç çıkış işareti
$a(t)$	güç yükseltecinin doğrusal kazancı oranında zayıflatılmış güç yükselteç çıkış işareti
$h_b(t)$	sınırlı gözlem yolunu temsil eden alçak geçirgen filtre
$z(t)$	filtrelenmiş gözlem yolu işareti
f_{FB}	analog/sayısal dönüştürücü örnekleme frekansı
$z[n]$	sayısallaştırılmış gözlem yolu işareti

Kısaltmalar

AM/AM	Genlik/Genlik
AM/PM	Genlik/Faz
IF	Ara Frekans
RF	Radyo Frekansı
DC	Doğru Akım
Vds	Savak-Kaynak Doğru Akım Gerilimi
Vknee	Diz Gerilimi
Vdc	Doğru Akım Gerilimi

PAPR	Tepe Değerin Ortalama Değere Oranı
QAM	Dördün Genlik Kiplenimi
PSK	Evre Kaydırmalı Kiplenim
QPSK	Dördün Evre Kaydırmalı Kiplenim
OFDM	Dik Frekans Bölmeli Çoğullama
EVM	Hata Vektörü Büyüklüğü
ACLP	Yan Kanal Kaçak Gücü
TWTA	Gezen Dalga Güç Yükselteci
Vin	Giriş Gerilimi
D/A	Sayısal/Analog Çevirme
A/D	Analog/Sayısal Çevirme
IQ	Dördün Bileşenli
i/q	Eş Fazlı / Dördün Bileşen
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
ASIC	Uygulamaya Özel Tüm Devreler
DSP	Sayısal İşaret İşleyici
CPU	Merkezi İşlemci Birimi
USRP	Evrensel Yazılımlı Radyo Çevrebirimi
SNR	İşaret Gürültü Oranı
BER	Bit Hata Oranı
SER	Sembol Hata Oranı
VNA	Vektör Ağ Çözümleyici

1. GİRİŞ

Güç yükselteçleri, girişlerine uygulanan işaret güç seviyelerine göre giriş işaretlerine doğrusal veya doğrusal olmayan kazanç uygulayabilirler. Doğrusal olmayan kazanç uygulayacak kadar yüksek güç seviyelerinde işaret uygulanan güç yükselteçleri kısılma veya doyum bölgesinde çalışırlar. Kısılma veya doyum bölgesinde çalışan güç yükselteçleri çıkışlarındaki işaretin genliğinde ve fazında bozulmalara neden olurlar [1–5].

Güç yükselteçlerinin giriş işaretlerinin genliğinde ve fazında meydana getirdiği değişimler bir matematiksel formülle ifade edilebilir, bu formülasyona güç yükselteçlerinin davranışsal modellenmesi denir. Güç yükselteçlerinin davranışsal modellenmesiyle ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur [6–10].

Güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan bölgelerde çalışırken çıkışındaki işaret genliğinde ve fazında meydana getirdiği bozulmalardan etkilenmemek için çeşitli yöntemler ve doğrusallaştırma teknikleri de literatürde çalışılmıştır [11–16].

Tez kapsamında doğrusallaştırma tekniklerinden biri olan uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği çalışılmıştır. Uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği tabanbant ve RF birimlerinden oluşur. Güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan etkileri sebebiyle güç yükselteci çıkışındaki işaretin bant genişliği artar. Uyarlamalı sayısal ön bozucu sisteminin RF birimlerinin bant genişliği artan işaretin iletimini sağlayabilecek bant genişliğine sahip olması gerekmektedir. Tabanbant birimlerinin de bant genişliği artan işaretin işlenebileceği örnekleme ve saat hızlarında çalışmaları gerekmektedir [17–22].

Uyarlamalı sayısal ön bozucu gözlem yolunun bant genişliği artan işareti geçirebilecek kadar geniş banda sahip olmadığı durumlar ve gözlem yolunda sayısallaştırılan işaretin bant genişliğinden daha düşük örnekleme hızı ile örneklendiğinde karşılaşılan problemler benzetim ortamında incelenmiştir [23–25].

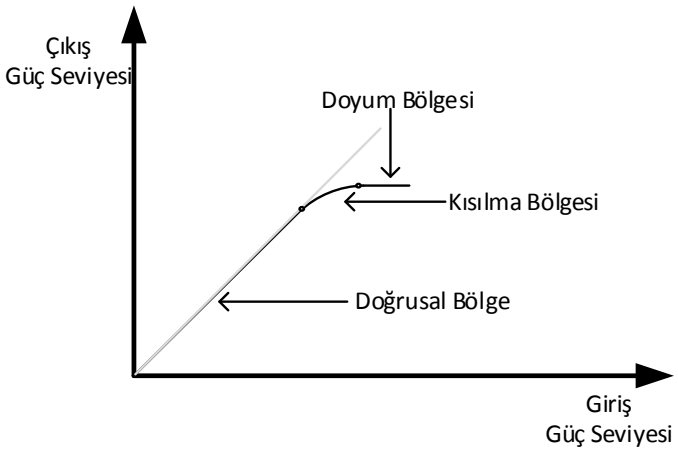
Model bağımlı sayısal ön bozucu yapısının sistem performansına etkisi, farklı güç yükselteci modellerine uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısının uygulandığı durumlar, uyarlamalı sayısal ön bozucu sisteminin haberleşme sistemlerinin

kalitesine etkileri benzetim ortamında incelenmiştir. Tez kapsamında USRP ile taramalı tablo yöntemiyle sayısal ön bozucu gerçeklenmiştir.

2. GÜÇ YÜKSELTEÇLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN ETKİLERİ

Haberleşme sistemlerinin kalitesini belirleyen en kritik tasarım bloklarından birisi olan güç yükselteçleri, antenden önceki son haberleşme bloğudur. Güç yükselteçlerinin tasarımları sırasında dikkat edilen temel parametreler güç yükseltecinin çalıştığı frekans aralığı, bant genişliği, sağladığı güç kazancı, sağladığı çıkış gücü ve verimlilik olarak sıralanabilir. Güç yükselteç karakterinin en önemli parametrelerinden biri olan güç kazancı, güç yükseltecinin giriş gücü, çıkış gücü grafiği ile ele alınabilir. Bu grafik yeterince geniş bir pencerede izlendiğinde güç yükselteçlerinin her giriş gücü seviyesine aynı kazancı vermediği fark edilir. Başka bir deyişle güç yükselteci giriş gücü, çıkış gücü grafiği doğrusal bir davranış sergilemez. RF yükselteçlerin giriş ve çıkışındaki işaretler arasındaki ilişki, yükselteç girişindeki işaret genliğine bağlı olarak çıkıştaki işaretin genliğindeki değişimi gösteren genlik-genlik (AM/AM) dönüşümü ve yükselteç girişindeki işaret genliğine bağlı olarak çıkıştaki işaretin fazındaki değişimi gösteren genlik-faz (AM/PM) dönüşümü ile karakterize edilir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi güç yükselteçleri doğrusal kazanç verebildiği, doğrusal kazancını azaltarak verebildiği ve girişe uygulanan gücün seviyesine göre değişmeyen sabit çıkış gücü verebildiği üç farklı bölgede çalışırlar. Bahsedilen bu bölgeler doğrusal bölge, kısılma bölgesi ve doyum bölgesi olarak adlandırılırlar. İdeal yükselteçlerde, AM/AM dönüşümünün doğrusal, AM/PM dönüşümünün ise sabit bir fonksiyona sahip olması beklenir. Ancak, devre elemanı olan transistörlerin doğrusal olmayan karakteristiği yukarıda verilen dönüşümlerin idealde beklenenden farklı olmasına yol açmaktadır.

Güç yükselteci girişindeki RF işaretin genliğinin artması savak-kaynak DC geriliminin (V_{ds}) diz geriliminin (V_{knee}) altına düşmesine neden olur. Bu durum işaret tepe değeriyle gerilimin düşmesine neden olur. Bu durumun önüne geçmek için savak DC gerilimi (V_{dc}) arttırılabilir ancak bu da yukarıdan transistörün kırılma gerilimi ile sınırlıdır ve verimliliğin düşmesine neden olur. Dolayısıyla etkisi sınırlı bir çözümdür. Güç yükselteç AM/AM dönüşümünün doğrusal karaktere sahip olamamasının temel nedeni bu yapıdır.



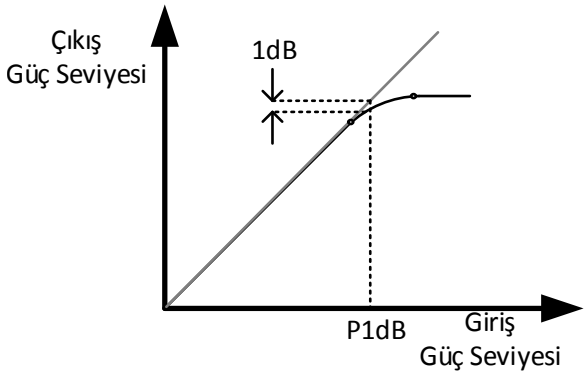
Şekil 2.1. Güç yükselteçlerinin AM/AM dönüşüm grafiği

Verimlilik güç yükselteci tasarımında güç tüketimi açısından büyük önem taşıyan bir parametredir. Verimliliğin göstergelerinden biri 1 dB kısılma noktasıdır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi güç yükselteçlerinin AM/AM dönüşümünün doğrusal olduğu bölgeden uzaklaşmaya başlayıp doğrusal eğriden 1 dB ayrıldığı noktaya 1 dB kısılma noktası adı verilir [1]. Bu noktanın konumu güç yükseltecinin ne kadar doğrusal bir karaktere sahip olduğuyla ilgili bilgi verir.

Verimlilik, güç yükseltecinin çıkışındaki işaretin seviyesi ile güç yükseltecinin DC olarak çektiği gücün arasındaki fark ile ölçülebilir. Bir başka ifadeyle bir güç yükselteci çıkışındaki işaret ne kadar yüksek güç seviyesinde ise o kadar verimli çalıştığı söylenebilir. Güç yükselteç verimliliği pil ile çalışan mobil sistemlerde güç tüketimi açısından oldukça önemli bir parametredir. Verimliliği yüksek değerlere çıkarmak doğrusallıktan uzaklaşma ile mümkün olmaktadır. Kısılma bölgesinde veya doyum bölgesinde çalışan bir güç yükselteci doğrusallıktan uzaklaşmış demektir. Doğrusallığın bozulması, hem işaret genliği hem de işaret fazı üzerinde olumsuz etkilere neden olur.

Haberleşme sistemlerinde veri hızı arttırma ihtiyacıyla kullanılan karmaşık kiplenim yöntemleri daha az genlik ve faz aralıklarına daha fazla sembol sığdırarak gerçeklenir. Doğrusallıktan uzaklaşan güç yükselteçlerinin işaret genlik ve fazında meydana getirdiği olumsuz etkiler karmaşık kiplenim kullanılan sistemlerde haberleşme kalitesini daha fazla düşürmektedir.

Bu durumlar göz önüne alındığında verimlilik ve doğrusallık seviyeleri arasında bir ters ilişki olduğu görülebilir.



Şekil 2.2. 1 dB kısılma noktası

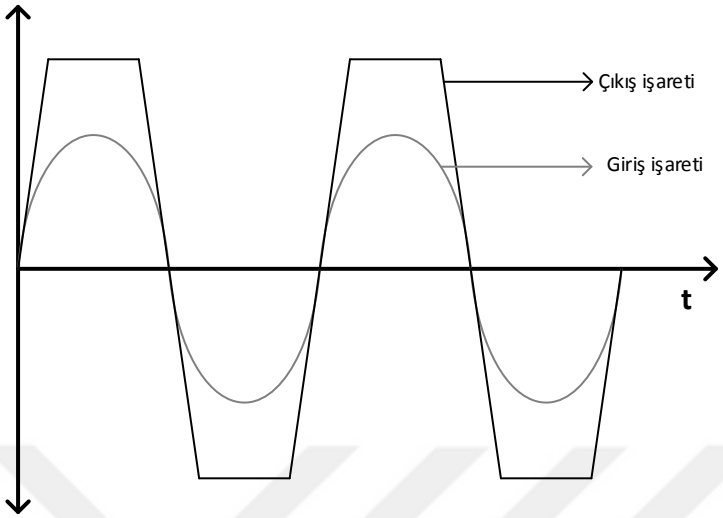
2.1 İşaret Bozulması

Kazanç kısılmasının sebep olduğu işaret genliğindeki bozulmalar AM/AM bozulması olarak nitelendirilirken, işaretin fazında meydana gelen bozulmalar ise AM/PM bozulması olarak nitelendirilir.

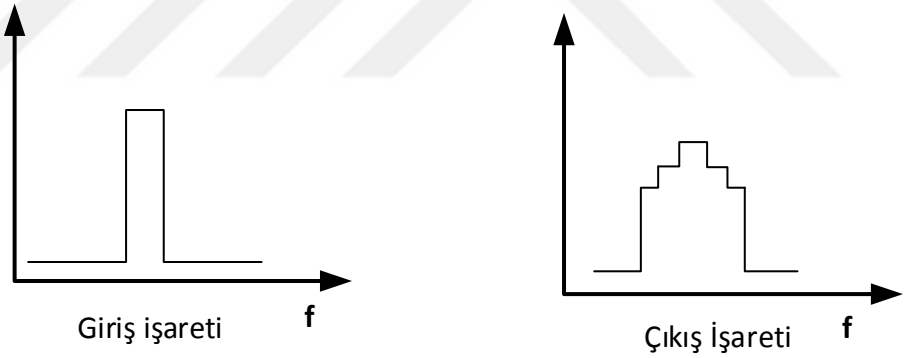
2.1.1 AM/AM Bozulması

AM/AM bozulması, güç yükseltecinin giriş işaretinin farklı genlik seviyeleri için farklı kazanç uygulamasından dolayı genlik bileşeni olan kiplenimlerde haberleşme hatalarına sebep olmaktadır. Yükseltecin neden olduğu AM/AM bozulması temelde yükseltece uygulanan sinüssel işaretin ortalama ve tepe değerleri arasındaki farkın çok olduğu durumda kritik olur. Tepe değerin ortalama değere oranı PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) olarak tanımlanır. PAPR'ın yüksek olması, yükseltece uygulanan işaretin farklı genlik seviyelerine farklı kazanç uygulanmasından kaynaklanan bozulmaya daha fazla maruz kalmasına neden olur. PAPR değeri yüksek olan genlik kiplenimine sahip işaretler (QAM, OFDM), AM/AM bozulmasından daha fazla etkilenmektedir [2]. Doğrusal olmayan bölgede çalışan güç yükselteci, girişine uygulanan işareti Şekil 2.3'te görüldüğü gibi belirli bir genlik seviyesinden sonra keser. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi zaman düzleminde

görülen bu kesilme kendisini frekans spektrumunda yeni frekans bileşenlerinin oluşması şeklinde gösterir.



Şekil 2.3. İşaret genliğinde kesilme



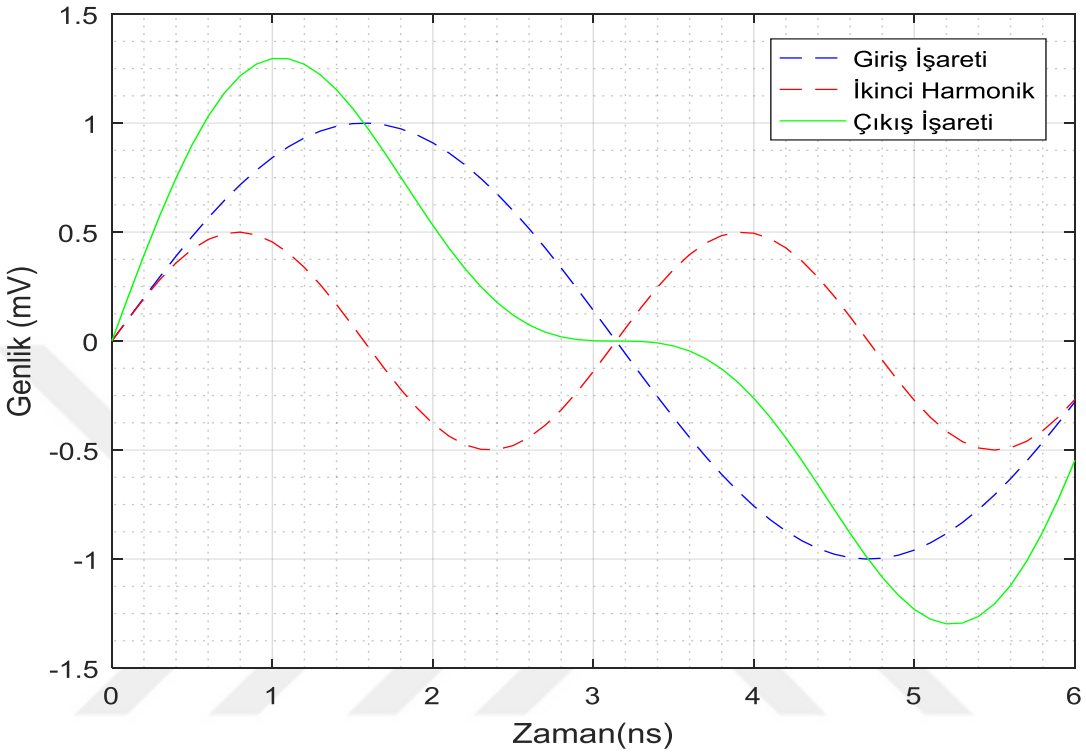
Şekil 2.4. İşaret genliğinde kesilmenin frekans spektrumundaki etkisi

2.1.2 AM/PM Bozulması

Farklı frekans bileşenlerinin işaret fazı üzerinde oluşturduğu değişimler grup gecikmesi, belirli bir frekans için işaret fazında meydana gelen değişim ise faz gecikmesi ile ölçülür.

İdeal durumda sabit bir fonksiyonla tanımlanması beklenen AM/PM karakteristiği grup ve faz gecikmelerinden dolayı değişken bir fonksiyona dönüşmektedir. Bu değişken karakteristik, faz bileşeni olan kiplenime sahip işaretlerde faz

bozulmasına sebep olduğundan haberleşme kalitesi açısından olumsuz etkiler doğurur. AM/PM bozulması, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, oluşan harmonik ve ara kiplenim ürünlerinin toplamının çıkışta görülmesinden kaynaklanır.



Şekil 2.5. Doğrusal olmayan AM/PM dönüşümünün işaret fazı üzerindeki etkisi

Güç yükselteçlerinin yukarıda bahsedilen olumsuz etkileri yükselteç kısılma ve doyum bölgesinde çalışırken görülür. Bu etkilerden kurtulmak için yükselteçler kazanç kısılması görülmeyen, çıkış gücünün düştüğü doğrusal bölgede çalıştırılabilir. Ancak bu durum yükseltecin verimliğini oldukça düşürmektedir. Buradan yükselteç için verimlik ve doğrusallık arasında bir ödünleşme doğar.

Kiplenime sahip işaret sembolleri yıldız şeması üzerinde genlik ve faz bileşenlerine göre bir noktada konumlanırlar. Çeşitli bozucu etkilerle İşaret sembollerinin konumlandıkları noktaların sapması hata vektörü büyüklüğü (EVM) ile ölçülür. EVM yıldız şemasında, sembollerin olması gerektiği yerden sembollerin saptığı noktaya olan vektör büyüklüğünün, orijinden sembollerin olması gerektiği noktaya olan vektör büyüklüğüne oranıdır.

Belirli bir frekans bant genişliği olan, kiplenime sahip işaretlerin verici çıkışında işaret frekans bandının dışındaki kanallara girişim yapmaması istenir. Yan kanallara yapılan girişimler yan kanal kaçak gücü (ACLP) parametresi ile ölçülür.

Haberleşme sistemlerinde EVM ve ACLP parametreleriyle ölçülen verici çıkışındaki işaret kalitesinin, vericinin doğrusal çalışması durumuyla doğrudan ilişkisi vardır. Özellikle kiplenime sahip işaretlerin idealde sahip olması beklenen dalga formları verici doğrusallıktan uzaklaştıkça bozulmakta, dolayısıyla bu bozulma haberleşme performansını düşürücü bir etki olarak ortaya çıkmaktadır. Doğrusallık gereksinimi, özellikle kiplenim mertebesi arttıkça daha da kritik bir hal alır. Bununla birlikte, sınırlı bant genişliğine karşın ihtiyaç duyulan veri hızlarındaki artış, yüksek mertebeli kiplenim (8-PSK, 16-QAM, vs.) kullanma ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Artan veri hızı ihtiyacını karşılayacak, doğrusal çalışan ama aynı zamanda yüksek verimliliğe sahip verici tasarımı, oldukça zorlayıcı bir mühendislik problemidir.

2.2 Güç Yükselteç Modellemesi

Yükselteçlerin AM/AM ve AM/PM bozulma karakteristiklerinin modellenmesi bir matematik problemidir. Bu probleme çeşitli matematiksel eğri uydurma yöntemleri ile çözüm getirilebilir. Yükselteç karakteristiği yükseltecin devre serimi, giriş ve çıkış uyumlandırma devreleri, yükselteç tasarım topolojisi gibi birden çok parametreye bağlıdır. Literatürde, AM/AM dönüşümü ve AM/PM dönüşümünü matematiksel fonksiyonlara oturtan doğrusal olmayan matematiksel modeller kullanılmaktadır [6].

2.2.1 Polinom Modeli

Polinom modeli hem faz hem de genlik dönüşümünü modeller, AM/AM ve AM/PM genlik dönüşüm ve faz dönüşüm fonksiyonları iki ayrı fonksiyondan oluşmaktadır [7].

$$g(A) = \sum_{p=0}^{N_g} a_p A^p = a_0 + a_1 A + a_2 A^2 + \cdots + a_{N_g} A^{N_g} \qquad (2.1)$$

$$\emptyset(A) = \sum_{q=0}^{N_\emptyset} b_q A^q = b_0 + b_1 A + b_2 A^2 + \cdots + b_{N_\emptyset} A^{N_\emptyset} \quad (2.2)$$

Polinom modeline göre eğer girişe uygulanan işaret gerilimi düşükse işaret genliğinin kuvvetleri belirginleşmez, işaret üzerinde en fazla, doğrusal kazanç olan a_1 katsayısının etkisi görülür. Eğer girişe uygulanan işaretin gerilimi artarsa işaret genlik seviyesinin kuvvetleri belirginleşmeye başlar ve işaret üzerinde a_2 , a_3, . . . ,a_n katsayılarının da etkisi görülmeye başlar. Güç yükselteçleri için doğrusal kazanç a_1 pozitif, doğrusal olmamanın karakterine göre de diğer katsayıların bazıları veya tamamı negatif olabilir.

2.2.2 Saleh Modeli

Saleh modeli Adel A. M. Saleh tarafından Gezen Dalga Güç Yükselteçleri (TWTA) için sunulmuştur [8]. Saleh modeli de genlik ve faz dönüşümleri için iki farklı fonksiyondan oluşmaktadır. Saleh modeli standart güç yükselteçleri için daha yakın bir modelleme yapabilir [6].

$$g(A) = \frac{a_0 A}{1 + a_0 A^2} \quad (2.3)$$

$$\emptyset(A) = \frac{b_0 A^2}{1 + b_1 A^2} \quad (2.4)$$

a_0, a_1 parametreleri AM/AM dönüşümünü, b_0, b_1 parametreleri AM/PM dönüşümünü etkileyen model parametreleridir.

2.2.3 Ghorbani Modeli

Ghorbani modeli Katı Hal Güç Yükselteçlerinin (SSPA) daha uygun bir matematiksel modelle modellenmesine imkan verir. Ghorbani modeli de frekans ve faz dönüşümü için iki ayrı fonksiyon kullanır [9].

$$g(A) = \frac{a_0 A^{a_1}}{1+a_2 A^{a_1}} + a_3 A \quad (2.5)$$

$$\emptyset(A) = \frac{b_0 A^{b_1}}{1+b_2 A^{b_1}} + b_3 A \quad (2.6)$$

a_0, a_1, a_2 parametreleri AM/AM dönüşümünü, b_0, b_1, b_2 parametreleri AM/PM dönüşümünü etkileyen model parametreleridir.

2.2.4 Rapp Modeli

Rapp modeli Christoper Rapp tarafından 1991 yılında yayınlanmıştır [10]. Rapp modeli de katı hal güç yükselteçlerinin daha iyi modellenmesine imkan verir [6]. Rapp modelinde faz dönüşümü ihmal edilmiştir.

$$g(A) = A \frac{1}{\left[1+\left(\frac{A}{y_0}\right)^{2r}\right]^{\frac{1}{2r}}} \quad (2.7)$$

$$\emptyset(A) = 0 \quad (2.8)$$

y_0 parametresi doyum bölgesi gerilimi, r parametresi ise AM/AM dönüşümünün yumuşaklık parametresidir.

2.2.5 Arctan Modeli

Arctan modeli de güç yükselteçlerinin giriş-çıkış ilişkisini hafıza etkilerini göz önüne almadan modeller [17].

$$y(A) = \{\gamma_1 tan^{-1}[\alpha_1 A] + \gamma_2 tan^{-1}[\alpha_2 A]\} e^{j\theta} \quad (2.9)$$

$\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ model parametreleridir. θ ise giriş işaretinin fazıdır.

2.3 Ara Kiplenim Bozulması

Güç yükselteçlerinin doğrusallığının göstergelerinden biri de ara kiplenim etkileridir. Güç yükselteçleri büyük işaret koşullarında çalışırken ara kiplenim etkileri ile karşılaşılır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi doğrusal olmayan bir sistem veya elemanın girişine f_1 ve f_2 frekansındaki iki işaret uygulanırsa, sistem çıkışında Şekil 2.7'deki gibi girişe uygulanan işaretlerin frekanslarından farklı frekanslarda işaretler oluşur. Güç yükselteç çıkışında, giriş işaretlerinin frekanslarından başka frekanslarda oluşan işaretler sınırlı olan toplam enerjinin bir kısmını alırlar. Bu yüzden ana tondaki işaretlerin doğrusal kazançtan daha düşük bir kazançla sistemden çıktığı görülür. Yeni frekanslarda oluşan işaretlerin ana tondaki işaretlerin kazancını etkilediği miktar, o sistemin ne kadar doğrusal olmadığı ile doğrudan ilgilidir. Ara kiplenim etkileri ile sonradan oluşması gereken işaretlerin frekansları bellidir [7]. Doğrusal olmayan sisteme uygulanan f_1 ve f_2 frekansındaki iki sinüssel işaret için bu frekanslar şöyledir:

$2\mathrm{f}_1$, $2\mathrm{f}_2$	2. harmonikler
$3\mathrm{f}_1$, $3\mathrm{f}_2$	3.harmonikler
⋮	
$2\mathrm{f}_1 - \mathrm{f}_2, 2\mathrm{f}_2 - \mathrm{f}_1$	3. Seviye ara kiplenim ürünleri
$3\mathrm{f}_1 - 2\mathrm{f}_2, 3\mathrm{f}_2 - 2\mathrm{f}_1$	5. Seviye ara kiplenim ürünleri
$4\mathrm{f}_1 - 3\mathrm{f}_2, 4\mathrm{f}_2 - 3\mathrm{f}_1$	7. Seviye ara kiplenim ürünleri
⋮	

Ara kiplenim ürünleri matematiksel olarak çıkarılmak istenirse;

ω_1 ve ω_2 frekanslarında, $\emptyset_1$ ve $\emptyset_2$ faz bileşenlerine sahip, genlikleri V_1 ve V_2 olan iki sinüssel işaret doğrusal olmayan bir sistemin girişine beraber uygulandığında giriş işareti şu şekilde yazılabilir:

$$v_{in}(t) = V_1\, cos(\omega_1 t + \emptyset_1) + V_2\, cos(\omega_2 t + \emptyset_2) \quad (2.10)$$

Giriş işaretinin uygulanacağı doğrusal olmayan sistem karmaşık değerli, polinom modeli ile modellenmiş bir sistem olsun ve bu sistemin katsayıları aşağıdaki gibi belirlensin:

$$a_i = |a_i|e^{j\varphi_i} = |a_i|e^{j\omega\tau_i} \quad (2.11)$$

Giriş işaretinin sistem çıkışında oluşturduğu 1. derece ürünler

$$\varphi_{ij} = \omega_i * \tau_j \quad (2.12)$$

için aşağıdaki gibi olur:

$$a_1 V_1\, cos(\omega_1 t + \emptyset_1 + \varphi_{11}) \quad (2.13)$$

$$a_1 V_2\, cos(\omega_2 t + \emptyset_2 + \varphi_{21}) \quad (2.14)$$

Sistem çıkışındaki işaretin 3. derece ürünlerinden olan 3. derece ara kiplenim ürünleri de aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{3}{4} a_3 V_1^2 V_2 cos((2\omega_1 - \omega_2)t + (2\emptyset_1 - \emptyset_2) + (2\varphi_{13} - \varphi_{23})) \quad (2.15)$$

$$\frac{3}{4} a_3 V_1 V_2^2 cos((2\omega_2 - \omega_1)t + (2\emptyset_2 - \emptyset_1) + (2\varphi_{23} - \varphi_{13})) \quad (2.16)$$

$$\frac{3}{4} a_3 V_1^2 V_2 cos((2\omega_1 + \omega_2)t + (2\emptyset_1 + \emptyset_2) + (2\varphi_{13} + \varphi_{23})) \quad (2.17)$$

$$\frac{3}{4} a_3 V_1 V_2^2 cos((2\omega_2 + \omega_1)t + (2\emptyset_2 + \emptyset_1) + (2\varphi_{23} + \varphi_{13})) \quad (2.18)$$

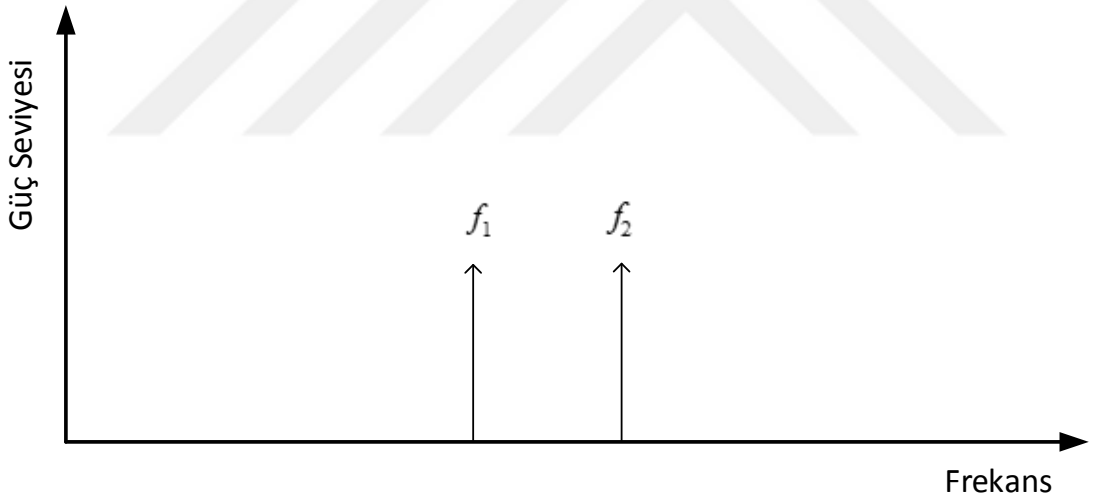
Sistem çıkışındaki işaretin 5. derece ürünlerden olan 5. derece ara kiplenim ürünleri de aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{5}{8}a_5V_1^3V_2^2cos((3\omega_1-2\omega_2)t+(3\emptyset_1-2\emptyset_2)+(3\varphi_{15}-2\varphi_{25})) \quad (2.19)$$

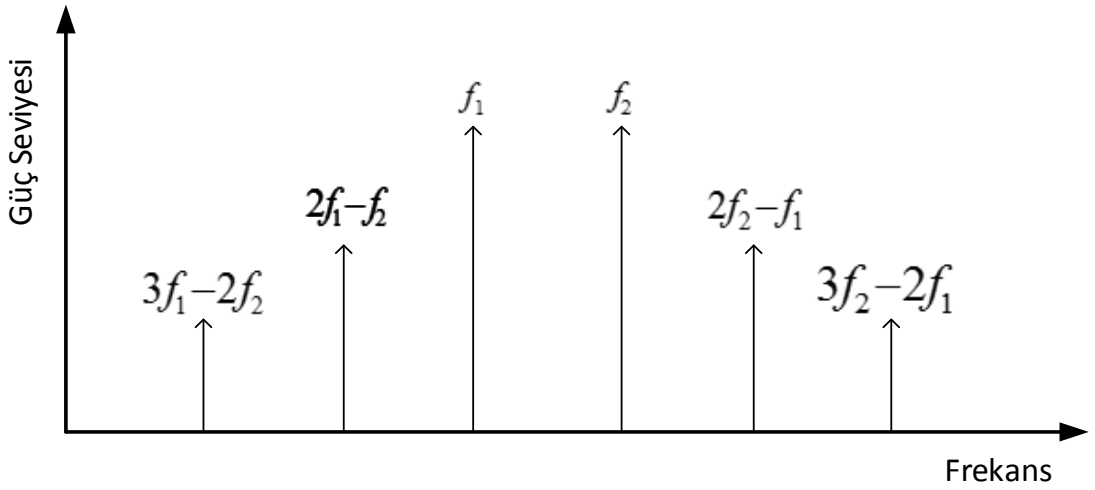
$$\frac{5}{8}a_5V_1^2V_2^3cos((3\omega_2-2\omega_1)t+(3\emptyset_2-2\emptyset_1)+(3\varphi_{25}-2\varphi_{15})) \quad (2.20)$$

$$\frac{5}{8}a_5V_1^3V_2^2cos((3\omega_1+2\omega_2)t+(3\emptyset_1+2\emptyset_2)+(3\varphi_{15}+2\varphi_{25})) \quad (2.21)$$

$$\frac{5}{8}a_5V_1^2V_2^3cos((3\omega_2+2\omega_1)t+(3\emptyset_2+2\emptyset_1)+(3\varphi_{25}+2\varphi_{15})) \quad (2.22)$$



Şekil 2.6. Güç yükselteci giriş işaretleri

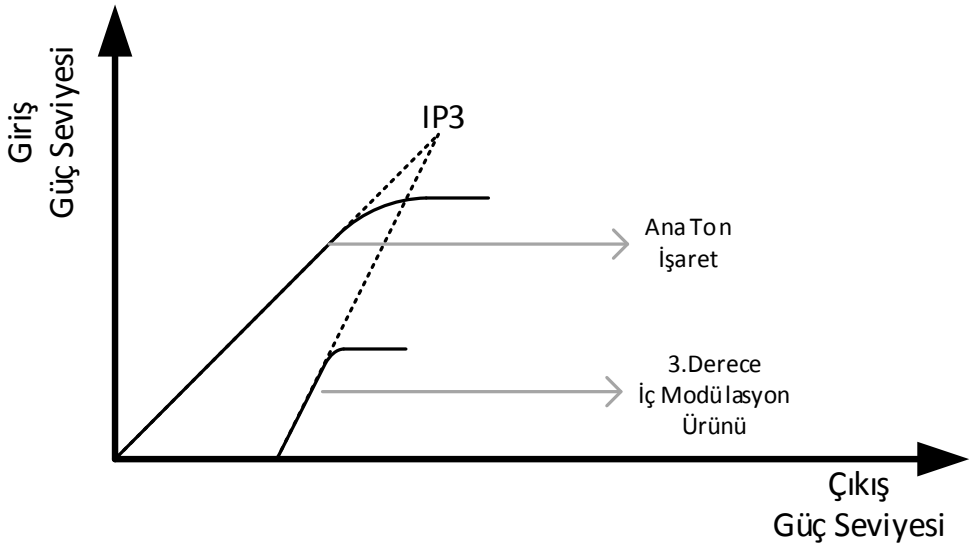


Şekil 2.7. Ara kiplenim ürünleri

Harmoniklerden kaynaklanan bozulma ara kiplenim ürünlerinin etkisiyle karşılaştırıldığında ihmal edilecek kadar küçüktür ve ara kiplenim ürünlerinin aksine genellikle sistemin bant genişliğinin dışında kalırlar. Bu sebeple harmoniklerin kolaylıkla süzülmesi mümkündür. Tek katlar şeklinde oluşan ara kiplenim ürünlerinin seviyesi sistem veya elamanın doğrusal olmama derecesine göre artabilir.

2.3.1 3. Seviye Kesişim Noktası

Ara kiplenim ürünlerinden en belirgin olanı 3. seviye ara kiplenim ürünüdür. 3. seviye ara kiplenim ürünü seviyesinin girişe uygulanan işaret seviyesine göre grafiği çizildiğinde bu grafiğinde belirli giriş seviyesinden sonra doğrusallığının bozulduğu görülebilir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi ana ton işaretin doğrusal eğrisi ve 3. seviye ara kiplenim ürününün doğrusal eğrisinin uzatılarak kesiştirildiği noktaya 3. seviye kesişim noktası adı verilir. 3. seviye kesişim noktasının seviyesi de kullanılan sistem veya elemanın doğrusallığı hakkında ara kiplenim ürünlerini göz önüne alarak bilgi verir. 3. seviye kesişim noktasının yüksek olması doğrusallık adına olumlu bilgi verir.



Şekil 2.8. 3. Seviye kesişim noktası

2.3.2 Spektrum Büyümesi

Güç yükselteçlerinin büyük işaret uygulamalarında ara kiplenim etkisiyle oluşan ara kiplenim ürünleri frekans spektrumunda ana ton işaretlerin uzağında oluşurlar. Güç yükselteçlerinin girişine iki tondan oluşan bir işaret uygulandığında bu durum kiplenimli bir işaret uygulamasının eş değeri gibi düşünülebilir. Frekans spektrumunda ara kiplenim ürünlerinin oluştuğu bölgeler, doğrusal olmayan güç yükselteci girişine kiplenimli işaret uygulandığında kesintisiz olarak belirli bir güç seviyesinde bulunurlar. Bu durumda Şekil 2.9'da görüldüğü gibi frekans spektrumu genişler ve giriş işaretinin bant genişliği artar. Bunun sonucunda yan frekans kanallarına girişim başlar [4]. Ayrıca sınırlı toplam gücün yan kanallara dağılması işaretin bant genişliği içindeki bölgede güç seviyesinin düşmesine neden olur.



Şekil 2.9. Spektrum büyümesi

2.4 Hafıza Etkileri

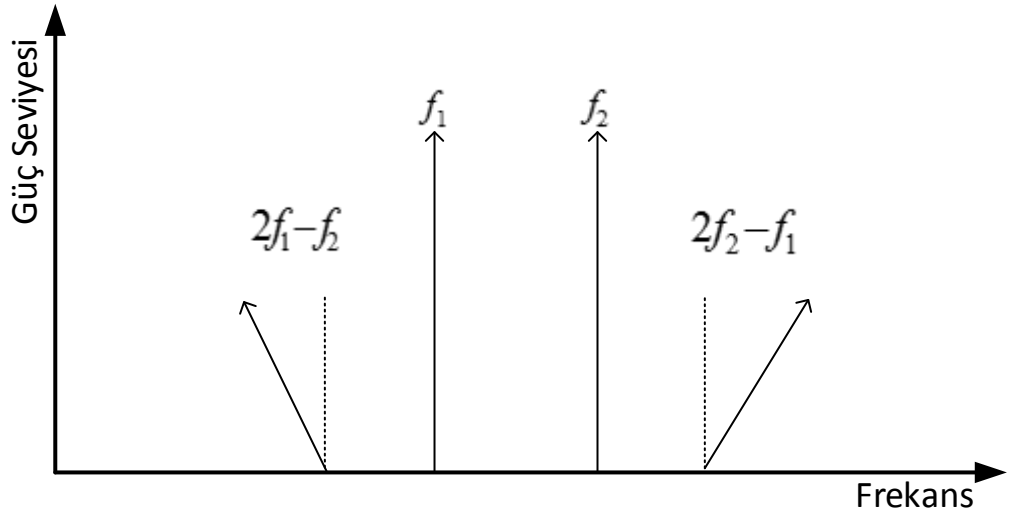
Güç yükselteci, doğrusal çalıştığı giriş gücü seviyelerinde de girişine uygulanan işaret için çıkışında her durumda aynı genlik ve faza sahip işaret üretemeyebilir. Güç yükselteçlerinin çıkışta verdiği işaret doğrusal olmayan sistemin içindeki hafıza bloklarının da etkisiyle güç yükseltecine daha önce uygulanan işaretlerin etkilerini gösterir. Hafıza blokları, güç yükselteç devrelerinde yer alan hafıza etkisine sebebiyet veren reaktif elemanlardan oluşur. Hafıza etkileri temel olarak reaktif elemanlar üzerindeki enerji birikiminin sonucudur [7].

Hafıza etkileri kısa dönem ve uzun dönem hafıza etkileri olarak 2'ye ayrılır. Kısa dönem hafıza etkileri elektriksel kaynaklı, uzun dönem hafıza etkileri ise sıcaklık değişiminden kaynaklı etkilerdir.

Kısa dönem hafıza etkilerinin nedenleri arasında uyumlandırma devrelerinde kullanılan reaktif pasif elemanlar, kapasitörler ve indüktörler, komponent paketi içerisindeki elektriksel bağlantılar ve kapasitörler sayılabilir.

Uzun dönem hafıza etkilerine sebep olarak da sıcaklık değişimlerinin yarı iletken teknolojisine sahip transistörlerin davranışında meydana getirdiği etkiler, DC besleme devreleri üzerinde oluşan DC direnç etkileri gösterilebilir [7].

Hafıza etkilerinin frekans spektrumundaki etkileri Şekil 2.10'da görüldüğü gibi ara kiplenim ürünlerinin bulunduğu frekanslardaki dalgalanma şeklinde görülür, bu şekilde spektral büyümeye neden olur [5]. Hafıza etkileri yukarıda bahsedildiği şekilde güç yükseltecinin doğrusallığına etki eder, hafıza etkileri dinamik doğrusal olmama şeklinde isimlendirilir [11].



Şekil 2.10. Hafıza etkilerinin spektrum üzerindeki etkileri

3. DOĞRUSALLAŞTIRMA TEKNİKLERİ

Güç yükselteçlerinin kısılma ve doyum bölgelerinde çalışmasından kaynaklanan doğrusal olmayan olumsuz etkilerin en aza indirilmesi, güç verimliliğinin daha yüksek seviyeye çıkarılabilmesi ve frekans spektrumunun daha verimli kullanılabilmesi için literatürde farklı doğrusallaştırma teknikleri çalışılmıştır [12-14].

- Geriden Sürme (Power Back Off)
- Taramalı Tablo Tekniği (Look-Up-Table Linearization)
- İleri Besleme Tekniği (Feedforward Linearization)
- Ön Bozucu Tekniği (Predistortion)

3.1 Geriden sürme

Güç yükselteçleri küçük işaret uygulamalarında daha doğrusal karakterde çalışırlar. Güç yükselteçlerinin girişlerine, güç yükseltecinin kısılma ve doyum bölgelerinde çalışacağı seviyelerden daha düşük giriş seviyelerinde işaret uygulandığında, güç yükselteçleri doğrusal olmayan sonuçları çıkışlarında göstermezler. Doğrusal olmayan etkilerle karşılaşmamak için bu yöntem uygulama kolaylığı sağladığı, sistemin güç tüketimini ve maliyetini arttırmadığı için sıkça tercih edilir. Ancak bu yöntem uygulandığında yüksek çıkış gücü seviyelerine ulaşmak mümkün olmayacaktır. Bu yöntem ile güç yükseltecinin bozucu etkiler gösterdiği kısılma ve doyum bölgelerinde sistem performansı açısından iyileşme sağlanmaz, bu nedenlerden dolayı güç yükselteçlerinin verimsiz kullanıldığı bir uygulamadır.

3.2 Taramalı Tablo Tekniği

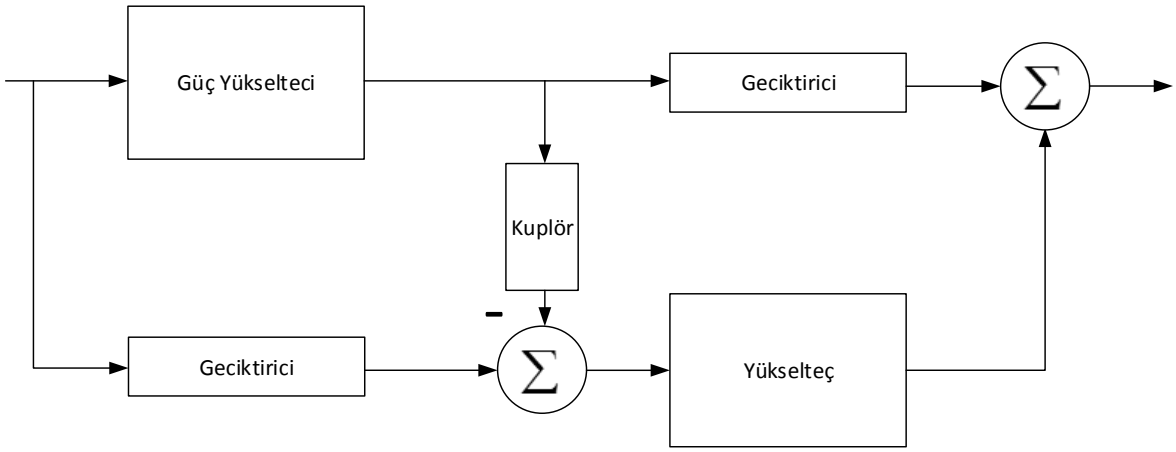
Taramalı tablo tekniği ile güç yükselteç çıkışında oluşan olumsuz etkileri azaltmak mümkündür. Bu teknikte güç yükseltecinin doğrusal çalıştığı giriş güçleri için bir doğrusallaştırıcı bloğu kullanılmasına gerek yoktur. Güç yükselteçleri kısılma bölgesinde çalışırken işaret bozulmasının gerçekleşeceğinin önceden bilindiği genlik seviyeleri değiştirilerek doğrusallaştırma yapılır [12]. Eğer AM/PM

bozulması da doğrusallaştırılmak istenirse karmaşık değerli bir matematiksel fonksiyona ihtiyaç vardır.

Güç yükselteci bloğundan önce konumlandırılan taramalı tablo bloğu güç yükseltecinin doğrusal tepki vermeyeceği giriş seviyesinde bir işaret algıladığında o işareti daha önce belirlenen doğrusallaştırma tablosundan geçirir. Doğrusallaştırma tablosundan geçen işareti farklı bir genlik seviyesine çevirip güç yükseltecine aktarır ve doğrusallaşma gerçekleşir. Taramalı tablo tekniği hafıza etkilerini modelleyecek bir yapıya sahip olmadığı için hafızasız bir teknik olduğu söylenebilir.

3.3 İleri Besleme Tekniği

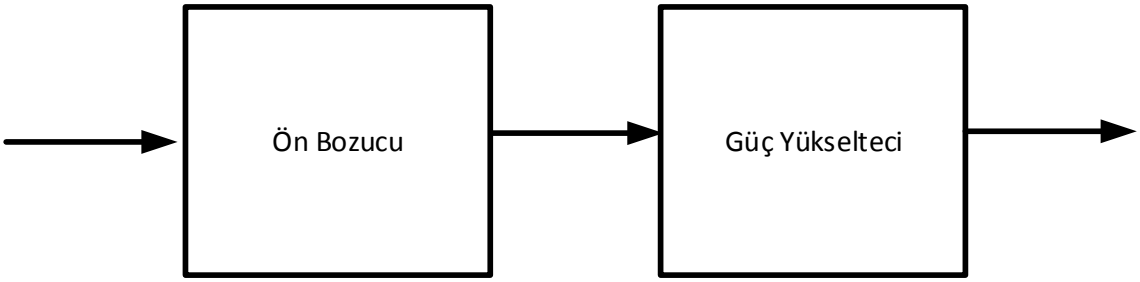
İleri besleme tekniğinde geriden sürme tekniğinin aksine kısılma ve doyum bölgelerinde çalışan güç yükselteçlerinin ortaya çıkardığı olumsuz etkiler analog olarak sönümlendirilir. İleri besleme tekniğinde Şekil 3.1'deki yapıda olduğu gibi, güç yükseltecine uygulanan işaret daha önceden ikiye bölünür. İkiye bölünen işaret güç yükseltecine ve güç yükseltecinin neden olduğu işaret gecikmesini modellemek için kullanılan bir geciktirici girişine uygulanır. Güç yükselteci çıkışındaki işaret, güç yükseltecinin kazancı oranında bir kuplör ile alınır, bu işaretten geciktirici bloğu çıkışındaki işaret çıkarılarak sadece işaret üzerinde meydana gelen bozulma elde edilir. Elde edilen bozulma farklı bir hata yükselteciyle kuvvetlendirilerek sistem çıkışında güç yükseltecinden çıkarılarak doğrusal olmayan bozucu etkilerden işaret temizlenerek sistemden çıkarılır [13]. İleri besleme tekniğinde tasarım blokları tamamen analog elemanlardan oluşur ve bu bloklar güç yükseltecinin karakterine birebir sadık kalınarak tasarlanması gereken bloklardır. Sistem elemanlarının analog elemanlar olması sistemin tasarımını daha zor bir hale getirmektedir. Ayrıca zaman, sıcaklık, besleme koşullarından kaynaklanan güç yükselteci karakterinde meydana gelen değişikliklere uyum sağlaması beklenemez. Güç yükselteci karakterinde meydana gelen değişiklikler tüm sistem elemanlarının tekrar tasarlanması ihtiyacını doğurabilir.



Şekil 3.1. İleri besleme metodu

3.4 Ön Bozucu Tekniği

Ön bozucu tekniğinde ileri besleme tekniğinden farklı olarak güç yükseltecine girecek olan işaret üzerinde değişiklikler yapılır. Şekil 3.2'deki gibi, ön bozucu bloğu güç yükselteci bloğunun gerisinde yer alır. Güç yükselteci doğrusal olmayan bölgelerde çalışırken girişine uygulanan işaret üzerinde bir takım bozulmalar meydana getirir. Bu problemi çözmek için sistem tanımlamaları [15] veya uyarlamalı kontrol yöntemleri [14] literatürde mevcuttur. Ön bozucu metodunda güç yükseltecinin meydana getireceği bozucu etkiler hesaplanarak, güç yükseltecine bozulmuş olan işaret uygulanır, güç yükseltecinin bozulmuş olan işareti tekrar bozması beklenir. Bozulmuş olan işaret güç yükseltecinin işareti bozacağı matematiksel fonksiyonun tersi olan başka bir matematiksel fonksiyon ile bozulduğu için sistem çıkışında bozulmamış bir işaret görülür. Güç yükselteci modeli kaçıncı dereceden bir yükselteç modeli ile modellenebiliyorsa ön bozucu modeli de idealde o derecen bir modele sahip olmalıdır [16]. Ön bozucu tekniği ile doğrusallaştırma performansı, güç yükselteç modelinin gerçeğe uygun çıkarılmasına oldukça bağlıdır [3]. Şekil 3.3'te ön bozucu kullanılan yapıda frekans spektrumu üzerinde giriş işaretinin uğradığı değişim gösterilmiştir.



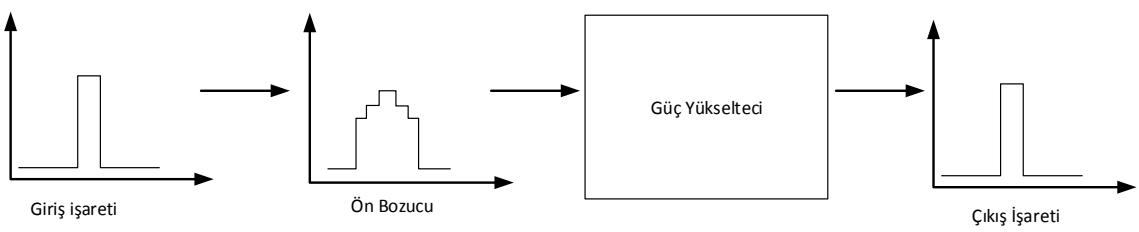
Şekil 3.2. Ön bozucu tekniği

Ön bozucu bloğu ile güç yükselteci bloğunun arasına frekans yükseltme birimleri girebilir, bu durumda ön bozucu sistemi tabanbant ön bozucu sistemi veya IF ön bozucu sistemi olarak isimlendirilebilir.

Eğer RF frekansında çalışan bir ön bozucu sistemi tasarlanmışsa ön bozucu bloğu RF güç yükseltecinin girişinde yer alır. Tasarımı IF ve tabanbant ön bozucu tekniklerinden daha kolay olan RF ön bozucu bloğunun yüksek frekansta çalışması gerekir. Bu nedenle örnekleme frekanslarının yüksek mertebelerde olması gerekir. Örnekleme frekansı teknik sebeplerle çok arttırılamayacağı için IF ve tabanbant ön bozucu tekniklerine göre daha düşük performans sağlar.

IF ön bozucu tekniğinde sistem istenilen farklı bir ara frekansta çalışmaya izin verir. Daha düşük frekanslarda çalışılması ön bozucu performansını RF ön bozucu tekniğine göre iyileştirilir.

Tabanbant ön bozucu tekniği tabanbant işaret işleme birimlerinde gerçekleştirilir, sayısal bir blok olan tabanbant ön bozucu bloğu için sayısal ön bozucu bloğu adı da verilir.



Şekil 3.3. Ön bozucu tekniğinin spektrum üzerinde görülen etkisi

4. SAYISAL ÖN BOZUCU

Günümüzde sayısal işaret işleme birimlerinde algoritma ve sistem gerçeklemenin kolaylaşmasıyla, analog ortamda gerçeklenen birçok sistem sayısal işaret işleme elemanlarının içinde yer almaya başlamıştır. Doğrusallaştırma tekniği olarak kullanılan ön bozucu tekniğinde de ön bozucu bloğu sayısal bir ortamda gerçeklenebilmektedir [7]. Ön bozucu bloğunun sayısal ortamda gerçeklendiği teknik de sayısal ön bozucu tekniği veya tabanbant ön bozucu tekniği olarak isimlendirilir.

Sayısal ön bozucu bloğu, güç yükseltecinin öncesinde yer alarak üzerinde koşan ön bozucu algoritması ile sayısal işareti ön bozulmaya uğratır. Sayısal işaretin güç yükselteci girişine uygulanabilmesi için güç yükselteci ve sayısal ön bozucu bloğunun arasında sayısal/analog çevirme işlemi gerçekleşir.

Sayısal ön bozucu yapısı, düşük frekanslarda işlem yaptığı için tasarımcısına IF ve RF ön bozucu tekniklerinden daha esnek bir çalışma ortamı sunar ve performans olarak da daha üstün sonuçlar ortaya çıkarır [22].

Sayısal ön bozucu sabit bir modele göre veya uyarlamalı olarak gerçeklenebilir.

4.1 Uyarlamalı Olmayan Sayısal Ön Bozucu

Ön bozucu tekniği sabit bir yükselteç modeli için uygulandığında bu yapıya uyarlamalı olmayan ön bozucu tekniği adı verilir. Uyarlamalı olmayan ön bozucu tekniğinde AM/AM dönüşümü ve AM/PM dönüşümü elde edilen güç yükseltecinin matematiksel fonksiyonundan yola çıkılarak ön bozucu fonksiyonu elde edilir. Elde edilen ön bozucu fonksiyonu güç yükseltecinin doğrusal olmayan bozucu etkilerinin ters fonksiyonudur. Bu yapı farklı bir güç yükselteci kullanımına izin vermez ve güç yükseltecinin zamanla, sıcaklıkla ve diğer çevresel etkenlerle karakterinde meydana gelen değişimlere uyum sağlayamaz.

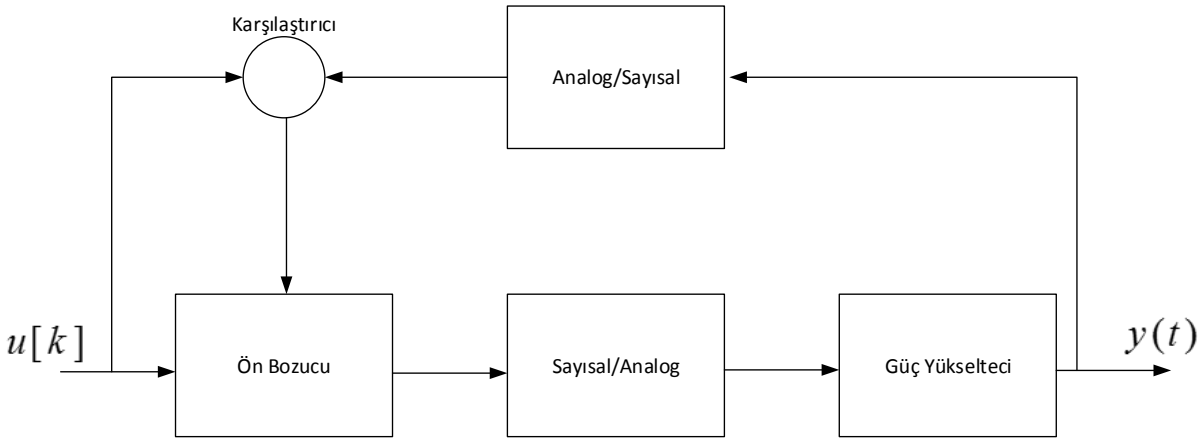
4.2 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu

Uyarlamalı ön bozucu tekniği sabit bir yükselteç modelinden bağımsız bir sistem oluşturmayı amaçlar. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi bu teknik bir algoritmaya bağlı

olarak, yükselteç çıkışından alınan bir geri besleme ile gerçeklenir. Geri beslenen örnekler ve verici çıkışındaki örnekler birbiri ile karşılaştırılarak ön bozucu sistemi uyarlanır ve bu döngü iteratif olarak çalışarak en doğru çözüme ulaşmayı hedefler.

Uyarlamalı ön bozucu algoritması sayısal bir ortamda koşar. Bu yüzden bu teknik uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği olarak adlandırılır. Verici sistemlerinin sayısal işaret işleme bloklarının sonunda yer alan uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğu çıkışı klasik bir verici mimarisinde olduğu gibi D/A bloğuna aktarılır, analog hale gelen işaret kiplenimlenerek taşıyıcı frekansına yükseltilir ve yükselteç bloğuna ulaşır.

Yükselteç çıkışından alınan verici işaret örnekleri klasik alıcı mimarisinde olduğu gibi bir karıştırıcı ile bir ara frekansa veya tabanbant frekansına indirilir. Düşük frekanslı işaret kip çözücü bloğuna beslenip devamında analog/sayısal çevirme işlemi gerçekleştirilerek bozulmamış verici işareti örnekleri ile karşılaştırılır. Ön bozucu bloğu güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkilerinin işaret üzerinde nasıl bir bozulmaya yol açtığına karar vererek işareti belirli bir algoritmayla bozar. Yinelemeli olarak bu işlemler güç yükselteci çıkışındaki işaret üzerindeki bozulma en aza inene kadar veya sürekli olarak tekrarlanır. Uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği kapalı ve açık döngü yöntemleriyle gerçekleştirilebilir [7].

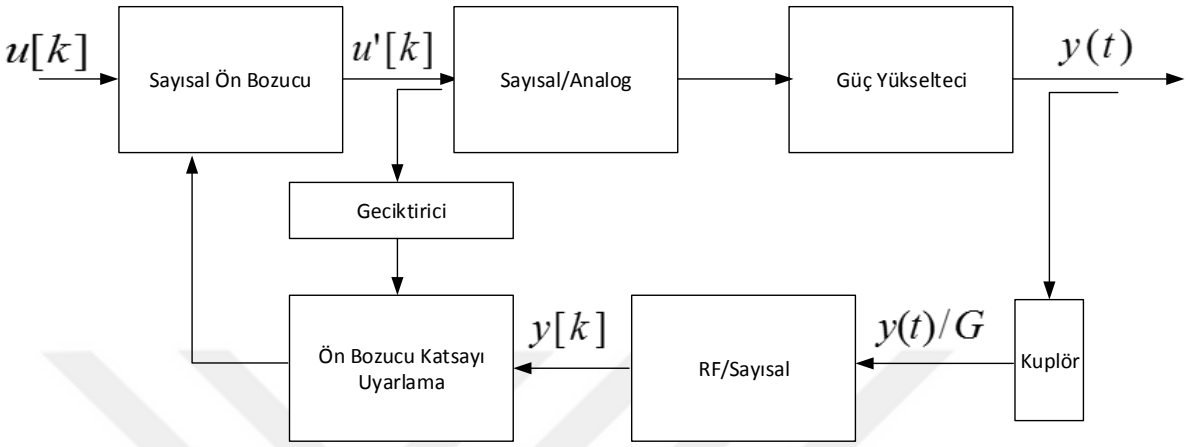


Şekil 4.1. Uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği

4.2.1 Açık Döngü Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu

Açık döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği (Indirect Learning) uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniklerinden bir tanesidir [18]. Açık döngü uyarlamalı sayısal

ön bozucu yönteminde sistem kestirim yapmak için Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ön bozucu bloğu çıkışındaki işaret ile güç yükselteci çıkışından alınan örnek işareti karşılaştırarak ön bozucu bloğunu günceller [19].



Şekil 4.2. Açık döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısı

Şekil 4.2'de görülen yapıda sayısal ön bozucu girişinde yer alan u vektörü bozulmamış verici işaret örneklerinden oluşur. Sayısal ön bozucu çıkışındaki u' vektörü ise ön bozucu algoritmasının bozduğu işaret örneklerinden oluşur. Güç yükselteci çıkışındaki $y(t)$ işareti, sayısal/analog dönüşüme uğrayan u' vektörünün güç yükselteci çıkışındaki halidir. Güç yükselteci çıkışından kuplör ile alınan işaret güç yükseltecinin doğrusal kazancına (G) bölünür. $y(t)$ işaretinin analaog/sayısal dönüşüm bloğundan geçmiş hali ise y vektörüdür.

Hata vektörü, uyarlamalı sayısal ön bozucu çıkışı ve güç yükselteci çıkışındaki örnekler ile bulunur [20]. Güç yükseltecinin doğrusal kazancı ile kuplör faktörü arasındaki farkın en aza indirilmesi için ρ_n kullanılır. a_n daha önce belirlenen ön bozucu katsayılarını, k parametresi k anındaki örneği, N parametresi ise yineleme sayısını temsil eder [7].

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^{N} a_n \, \rho_n(y[k]) - u'[k] \qquad (4.1)$$

En küçük kareler yöntemiyle hata vektörü elemanlarını en küçük seviyeye ulaştıracak ön bozucu modeli katsayıları uyarlanır [21]. Katsayı uyarlarken kullanılan Δ_{a_n}, en küçük kareler yönteminde (4.2) denklemini en düşük seviyeye ulaştıracak ve bir sonraki yinelemede kullanılacak ön bozucu modeli katsayılarıdır.

$$J = min \sum_k |\varepsilon - \sum_{n=1}^{N} \Delta_{a_n} \rho_n(y[k])|^2 \quad (4.2)$$

Bahsedilen işlemlerin sayısal işaret işleme biriminde gerçeklenecek matris formundaki ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$u'_i = Y.a \quad (4.3)$$

$$\hat{a}_i = (Y_i^H Y_i)^{-1} Y_i^H u'_i \quad (4.4)$$

Uyarlama işleminde ilk olarak başlama katsayılarıyla bulunan hata vektöründen yararlanılır, ilerleyen yinelemelerde ise bir önceki yinelemede elde edilen hata vektörü kullanılır. i yineleme adımı, Y güç yükselteci çıkışındaki örneklerden oluşan vektör, a ön bozucu modeli katsayıları, u' ise sayısal ön bozucu çıkışındaki örneklerden oluşan vektördür.

$$\varepsilon = Y_{i+1}.\hat{a}_1 - u'_{i+1} \quad (4.5)$$

Matematiksel işlemler aşağıdaki gibi genişletilebilir.

$$Y_{i+1}^H \varepsilon = Y_{i+1}^H Y_{i+1}.\hat{a}_i - Y_{i+1}^H.u'_{i+1} \quad (4.6)$$

$$(Y_{i+1}^H Y_{i+1})^{-1} Y_{i+1}^H \varepsilon = \hat{a}_1 - (Y_{i+1}^H Y_{i+1})^{-1} Y_{i+1}^H u'_{i+1} \quad (4.7)$$

$$(Y_{i+1}^{H} Y_{i+1})^{-1} Y_{i+1}^{H} \varepsilon = \hat{a}_1 - \hat{a}_{i+1} = -\Delta_a \quad (4.8)$$

$$\varepsilon = -Y_{i+1}.\Delta_a \quad (4.9)$$

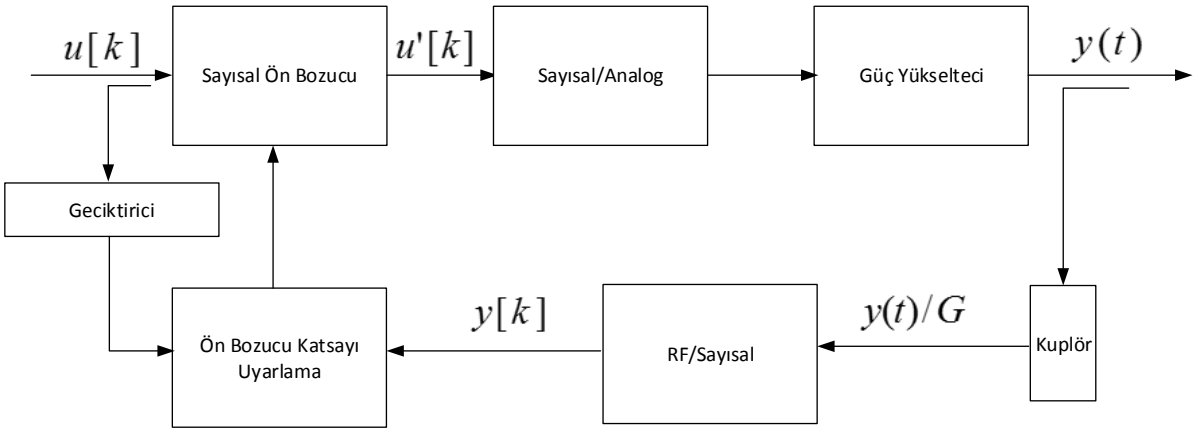
Uyarlanan sayısal ön bozucu modelinin katsayıları ($\hat{a}_{i+1}$) aşağıdaki gibi bulunur.

$$\hat{a}_{i+1} = \hat{a}_i - \mu.\Delta_a \quad (4.10)$$

4.2.2 Kapalı Döngü Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu

Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu yönteminde (Model Reference) sistem Şekil 4.3'te görüldüğü gibi güç yükselteci çıkışındaki işaret ile ön bozulmaya uğramamış olan ön bozucu girişindeki işareti karşılaştırarak ön bozucu bloğunun katsayılarını günceller.

Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniği ve açık döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu tekniğinin birbiri üzerine performans olarak bir üstünlüğü bulunmamaktadır, ön bozucu tasarımı aşamasında her iki yöntemde kullanılmaya uygundur [7].



Şekil 4.3. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısı

Şekil 4.3'te görülen yapıda sayısal ön bozucu girişinde yer alan u vektörü bozulmamış verici işaret örneklerinden oluşur. Sayısal ön bozucu çıkışındaki u' vektörü ise ön bozucu algoritmasının bozduğu işaret örneklerinden oluşur. Güç yükselteci çıkışındaki $y(t)$ işareti, sayısal/analog dönüşüme uğrayan u' vektörünün güç yükselteci çıkışındaki halidir. Güç yükselteci çıkışından kuplör ile alınan işaretin güç yükseltecinin doğrusal kazancına (G) bölünen $y(t)$ işaretinin analaog/sayısal dönüşüm bloğundan geçmiş hali ise y vektörüdür.

Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu hata vektörü açık döngü yapısından farklı olarak uyarlamalı sayısal ön bozucu girişi ve güç yükselteci çıkışındaki örnekler ile bulunur.

$$\varepsilon = y[k] - u[k] \tag{4.11}$$

Hata vektörü elemanlarını en düşük seviyeye ulaştıracak uyarlamalı ön bozucu modeli katsayı hesaplaması sırasında en küçük kareler yöntemi kullanılabilir. Güç yükseltecinin doğrusal kazancı ile kuplör faktörü arasındaki farkın en aza indirilmesi için ρ_n kullanılır. Katsayı uyarlarken kullanılan Δ_{a_n}, en küçük kareler yönteminde (3.12) denklemini en düşük seviyeye ulaştıracak ve bir sonraki yinelemede kullanılacak ön bozucu modeli katsayılarıdır [7].

$$J = min \sum_k |\varepsilon - \sum_{n=1}^{N} \Delta_{a_n} \rho_n(y[k])|^2 \tag{4.12}$$

İşlemlerin matris formundaki ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$y - u = U.\Delta_a \tag{4.13}$$

$$\Delta_a = (U^H U)^{-1} U^H.(y - u) \tag{4.14}$$

Δ_a parametresi ön bozucu modeli katsayıları uyarlanırken kullanılan katsayı fark vektörüdür. μ parametresi ise yakınsama katsayısı olarak nitelendirilebilir. Uyarlanan ön bozucu katsayıları ($\hat{a}_{i+1}$) aşağıdaki gibi bulunur.

$$\hat{a}_{i+1} = \hat{a}_i - \mu.\Delta_a \quad (4.15)$$

4.2.3 Ön Bozucu Katsayı Uyarlama Teknikleri

Uyarlamalı sayısal ön bozucu sistemlerinde güç yükselteci çıkışından alınan örnek işaret güç yükseltecine girmemiş olan işaret ile karşılaştırılarak sistem katsayıları her bir yinelemede güncellenir. Katsayı uyarlama işlemleri sırasında geri beslenen işaret ile orijinal işaretin farkı alınarak hata vektörü elde edilir. Elde edilen hata vektörü kullanılarak ön bozucu modelinde kullanılan modelin derecesi kadar model katsayısı güncellenir. Ön bozucu katsayılarını uyarlamak için kullanılan teknikler şöyle sıralanabilir:

- En Küçük Kareler Yöntemi
- En Küçük Ortalama Kareler Yöntemi
- Tekrarlanan En Küçük Kareler Yöntemi

4.2.3.1 En Küçük Kareler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi ön bozucu içinde elde edilen hata vektörünün elemanlarını sıfıra yaklaştırmak için vektör elemanlarının karelerini alarak uyarlama işlemini gerçekleştirir. Kare alma işlemi hata vektörü elemanlarının pozitif veya negatif olmasından kaynaklanacak hesaplama hatalarını ortadan kaldırmak için kullanılır. Kullanılan ön bozucu katsayı uyarlama teknikleriyle kıyaslandığında en iyi çözümü elde eden yöntemdir [7].

$$\theta = \frac{\sum_{t=1}^{N} \emptyset(t)y(t)}{\sum_{t=1}^{N} \emptyset(t)\emptyset(t)^T} \quad (4.16)$$

En Küçük Kareler Yöntemi matris formunda şöyle yazılabilir:

$$\hat{a} = (U^H U)^{-1} U^H . y \quad (4.17)$$

4.2.3.2 En Küçük Ortalama Kareler Yöntemi

En küçük ortalama kareler yöntemi en Küçük kareler yöntemindeki gibi her bir hata vektörü elemanını sıfıra yaklaştırmaya çalışmak yerine hata vektörünün elemanlarının karelerini alarak hata vektöründeki elemanlarının yönsüz ortalamalarını sıfıra yaklaştırmayı amaçlar [23]. Hesaplama karmaşıklığı az olduğu için bu sistemi uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğu içerisinde gerçeklemek diğer ön bozucu katsayı uyarlama tekniklerinden daha kolaydır.

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \mu\varepsilon(n)\rho_n(t) \quad (4.18)$$

$$\varepsilon(n) = u_n(t) - y_n(t) \quad (4.19)$$

Ön bozucu sistemi içinde çalışacak en küçük ortalama kareler yöntemi matris formunda şöyle yazılabilir:

$$\varepsilon_n = u_n[k] - y_n[k] \quad (4.20)$$

$$\hat{a}_{n+1} = \hat{a}_n + \mu\varepsilon_n U_{n-1} \quad (4.21)$$

4.2.3.3 Tekrarlanan En Küçük Kareler Yöntemi

Tekrarlanan en küçük kareler yönteminde ön bozucu model katsayıları uyarlanırken hesaplamalar en küçük kareler yöntemindeki gibi ilerler ancak en küçük kareler yönteminden farklı olarak uyarlama işleminde daha önceki uyarlanan model katsayıları da hesaplamalarda kullanılarak yeni model katsayıları güncellenir. Bu sistemde hesaplamalar her döngüde önceki katsayıları da

kullandığı için çok daha hızlı yakınsama sağlanabilir, ancak hesaplama karmaşıklığı tekniğin gerçeklenmesini zorlaştırır [7].

$$\varepsilon_n = u'_n - y_n.\hat{a}_n \quad (4.22)$$

$$\emptyset_n = \sum_{i=1}^{n} u'[i]u'^T[i] = \emptyset_{n-1} + u'[n]u'^T[n] \quad (4.23)$$

$$\varphi_n = \sum_{i=1}^{n} u'[i]y[i] = \varphi_{n-1} + u'[n]y[n] \quad (4.24)$$

$$\hat{a}_n = \frac{\varphi_n}{\emptyset_n} = \frac{\varphi_n}{\emptyset_{n-1} + u'[n]u'^T[n]} \quad (4.25)$$

Tekrarlanan en küçük kareler yönteminin matris formu:

$$A = B^{-1} + CD^{-1}C^T \quad (4.26)$$

$$A^{-1} = B - BC(D + C^TBC)^{-1}C^TB \quad (4.27)$$

$$\emptyset_n^{-1} = \emptyset_{n-1}^{-1} - \frac{\emptyset_{n-1}^{-1}u'[n]u'^T[n]\emptyset_{n-1}^{-1}}{1 + u'^T[n]\emptyset_{n-1}^{-1}u'[n]} \quad (4.28)$$

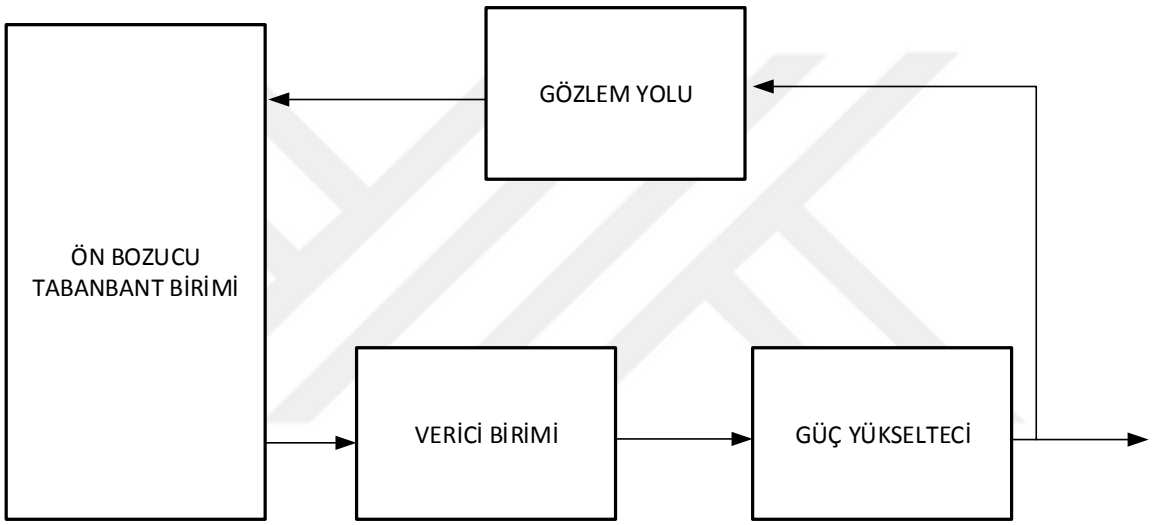
$$P_n = \emptyset_n^{-1} \quad (4.29)$$

$$G_n = \frac{P_{n-1}u'[n]}{1 + u'^T[n]P_{n-1}u'[n]} \quad (4.30)$$

$$\hat{a}_n = \hat{a}_{n-1} + \varepsilon_n G_n \quad (4.31)$$

5. UYARLAMALI SAYISAL ÖN BOZUCU GERÇEKLEME BİRİMLERİ

Uyarlamalı sayısal ön bozucular haberleşme sistemlerinin verici bloklarında güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan bozucu etkilerini en aza indirmek için kullanılırlar. Verici birimleri tasarlanırken tabanbant ve RF birim bloklarının tasarımı esnasında uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğunun gereksinimleri göz önüne alınmalıdır. Başka bir deyişle uyarlamalı sayısal ön bozucu, tabanbant işaret işleme blokları, işaret çeviriciler ve RF donanım bloklarından oluşur (Şekil 5.1).

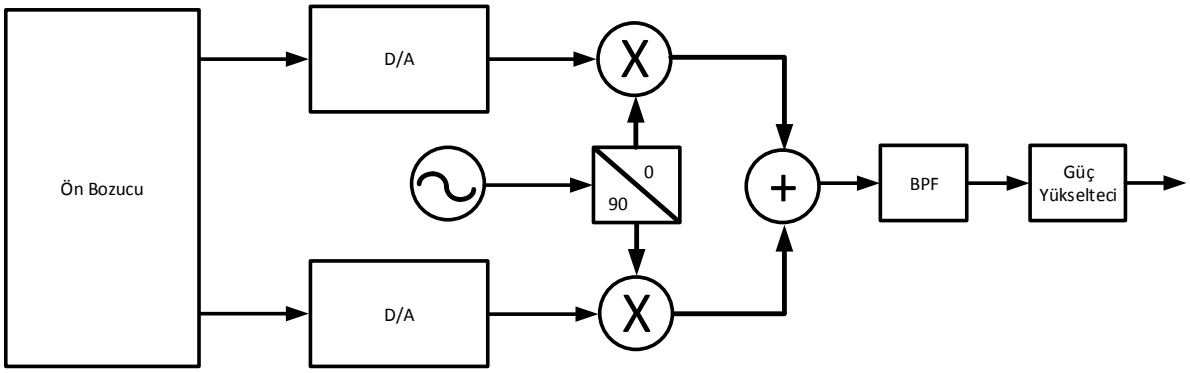


Şekil 5.1. Uyarlamalı sayısal ön bozucu birimleri

5.1 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu RF Birimi

Uyarlamalı sayısal ön bozucu RF birimi verici ve alıcı eşleniği olan gözlem birimlerinden meydana gelir.

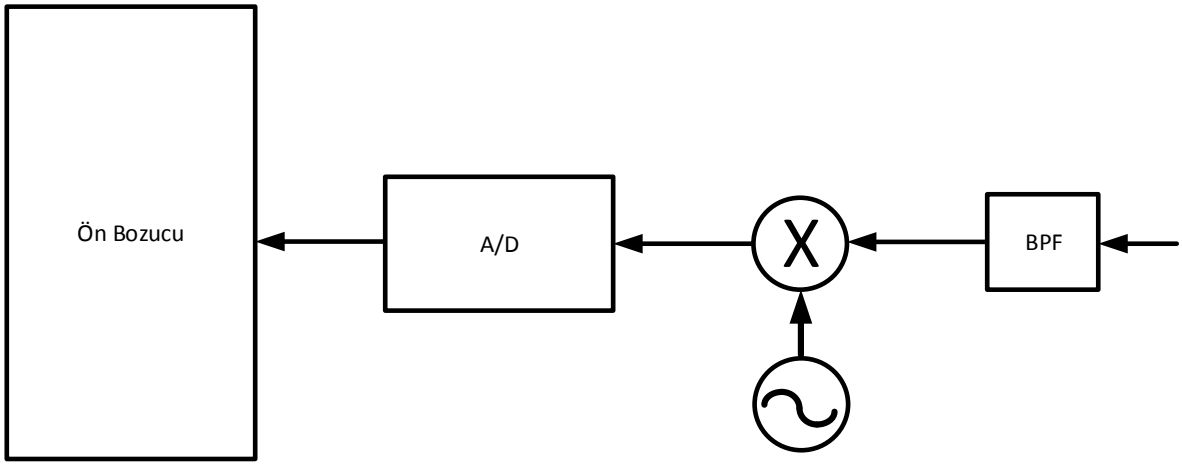
5.1.1 Karmaşık Ara Frekans Verici Yapısı



Şekil 5.2. Karmaşık ara frekans verici yapısı

Verici birimi RF mimarisinde eş fazlı (inphase) ve dördün bileşen (quadrature) işaretleri tabanbant birimi üzerinde bulunan uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğundan ayrı ayrı RF birimine aktarıldığı yapı karmaşık ara frekans verici yapısı olarak adlandırılır (Şekil 5.2). Bu yapıda uyarlamalı sayısal ön bozucudan ayrı ayrı çıkan eş fazlı ve dördün bileşen işaretler D/A bloğundan geçerek analoglaştırılır. IQ kipleyici ve yerel osilatör ile taşıyıcı frekansına yükseltilirler. Dördün bileşenleri olan bir kiplenim kullanıldığında verici RF birimleri mimarisinde genellikle karmaşık ara frekans yapısı kullanılır. Uyarlamalı sayısal ön bozucunun verici sisteminde yer almasıyla, güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkilerinden kaynaklanan ara kiplenim ürünlerinin mertebesi oranında artan bant genişliğini destekleyecek RF bloklarının tasarımı zorunlu hale gelmektedir.

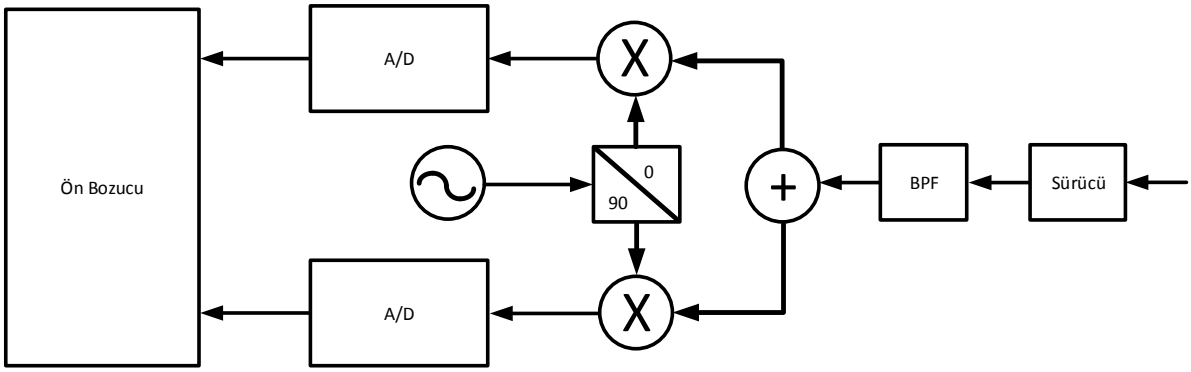
5.1.2 Gerçek Ara Frekans Gözlem Yolu



Şekil 5.3. Gerçek ara frekans gözlem yolu

Gözlem birimi, verici birimi çıkışından bir kuplör ile alınan örnek işaretin uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğuna geri beslenmesini sağlar. RF gözlem birimi, verici birimi çıkışından örnek işaret almayı sağlayan bir kuplör ile başlar. Alınan örnek işaret alıcı yolu üzerinde eş fazlı ve dördün bileşenlerine ayrılmadan taşıyıcı frekansından bir ara frekansa veya tabanbant frekansına indirilirse bu yapıya gerçek ara frekans gözlem yolu denir. Ara frekans veya tabanbant frekansına indirilen işaret A/D bloğunda sayısallaştırılarak uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğuna geri beslenir. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi gerçek ara frekans gözlem yolunda, geri besleme hattı boyunca tek yoldan iletim sağlanır. Bu sebeple eş fazlı ve dördün bileşen denksizliği gibi bir sorunla karşılaşılmaz ve yine iletim tek yol üzerinden sağlandığı için tasarım kolaylığı sunar. Ancak eş fazlı ve dördün bileşenlerin ayrılmaması yol üzerinde kullanılacak A/D bloğunun daha yüksek örnekleme hızında çalışmasını zorunlu kılar. Bir başka deyişle teknolojik olarak sınırlanan A/D örnekleme frekansı sistemin bant genişliğinin sınırlandırılmasına daha fazla etki eder. Güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkilerinden kaynaklanan ara kiplenim ürünlerinin mertebesi oranında artan işaret bant genişliğinin desteklenmesine dikkat edilmelidir.

5.1.3 Karmaşık Ara Frekans Gözlem Yolu



Şekil 5.4. Karmaşık ara frekans gözlem yolu

Gözlem biriminde kuplör ile alınan işaretin eş fazlı ve dördün bileşenlerine ayrılıp iki ayrı yol üzerinde ara frekans veya tabanbant frekansına indirildiği yapıya karmaşık ara frekans gözlem yolu adı verilir. Bu yapıda eş fazlı ve dördün bileşen işaretler ayrı A/D bloklarında sayısallaştırıldıktan sonra uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğuna geri beslenirler. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi geri besleme iki ayrı yol üzerinden ilerlediği için gerçeklenmesi gerçek ara frekans gözlem yoluna göre daha zahmetlidir. Ancak işaret eş fazlı ve dördün bileşenlerine ayrıldığı için kullanılan A/D elemanları gerçek ara frekans gözlem yoluna giren işaretin yarısı kadar örnekleme oranıyla çalışabilirler. Gözlem yolunda eş fazlı ve dördün bileşenlerine ayrılan işaret geri beslendiğinde i/q denksizliği sorunuyla karşılaşılabilir, i/q denksizliği kazanç ve faz hatalarına neden olur [24]. Bu durum uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğunun katsayılarının hatalı uyarlanmasına neden olacaktır. i/q denksizliğinin önüne geçmek için eş fazlı ve dördün bileşenler için gözlem yollarındaki elemanların ve iletim hatlarının işaret geciktirmeleri çok iyi hesaplanarak ve testleri gerçekleştirilerek faz ve işaret gecikmelerinin önlenmesi gerekmektedir.

5.2 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Tabanbant Birimi

Uyarlamalı sayısal ön bozucu tabanbant birimi, işaret çeviriciler ve işaret işleme elemanlarından meydana gelirler. Uyarlamalı sayısal ön bozucu eklenmek istenen bir verici yapısında uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme elemanı, verici hattında sayısaldan analoğa çevirici elemanları, gözlem hattında ise analogdan sayısala çevirici elemanlarının seçimi büyük önem taşımaktadır.

Uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme algoritmaları, güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan etkilerinden doğan ara kiplenim ürünlerini kullanarak ön bozulma gerçekleştirir. Güç yükselteçlerinin doğrusallık karakterine ve kullanılan güç yükseltecinin doyum bölgesinde veya kısılma bölgesinde çalıştırılacağı duruma göre kaçıncı dereceden ara kiplenim ürünlerinin oluşacağı farklılık gösterir. Güç yükselteci uygulamasında oluşan ara kiplenim ürünlerinin derecesi oranında tabanbant sistem elemanlarının örnekleme hızları ve işaret işleme hızlarının artması gerekir. Aksi taktirde uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanması gereken işaretleri kullanamayacağından istenen performansı sağlayamayacaktır.

5.2.1 İşaret İşleme Birimi

İşaret işleme biriminde uyarlamalı sayısal ön bozucu algoritması koşar. Uyarlamalı sayısal ön bozucu algoritması belirlenen uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli için katsayı uyarlamasını gerçekleştirir.

Tabanbant uyarlamalı sayısal ön bozucu tasarımında işaret işleme birimi algoritma tasarımı bir uyarlamalı sayısal ön bozucu modelinin üzerine kurulur. Uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli temel olarak güç yükselteci AM/AM ve AM/PM bozulması fonksiyonlarının tersi olan bir model olarak belirlenir. Ters fonksiyon güç yükseltecinin doğrusal kazancını düşürmeyecek, sadece doğrusal olmayan etkilerini modelleyecek bir fonksiyon olarak belirlenir. Taramalı tablo modeli, Volterra modeli, Polinom modeli, Hafıza polinomu modeli, Wiener modeli bu modeller içinde sayılabilir.

Uyarlamalı sayısal ön bozucu verici birimi çıkışında yer aldığı için uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme elemanı donanımsal ayrı bir eleman olarak tasarlanıp verici işaret işleme elemanının çıkışına yerleştirilebileceği gibi, verici

işaret işleme elemanının içerisinde, verici işaret işleme bloklarının çıkışında bir işaret işleme bloğu olarak da yer alabilir. İşaret işleme birimi elemanı olarak alanda programlanabilir kapı dizileri (FPGA), uygulamaya özel tüm devreler (ASIC), mikro işlemciler veya DSP işlemciler tercih edilebilir.

Güç Yükselteci çıkışında oluşan ara kiplenim ürünleri de gözlem yolundan geri beslenerek işaret işleme biriminde işlenmelidir. İşlenmesi gereken işaretin bant genişliği verici işaretinin bant genişliği değil, oluşan ara kiplenim ürünlerinin derecesi oranında artmış verici işaretinin bant genişliği kadardır. İşaret işleme birimi elemanı ve saat frekansı bu bakış açısı ile belirlenir.

Uyarlamalı sayısal ön bozucu sisteminde işaret işleme birimleri temel olarak verici tarafına iletilen işaretin güç yükselteci çıkışında uğradığı değişimi kestirmeye çalışırlar. Bu işlem gönderilen işaret örnekleri teker teker karşılaştırılarak yapılır. Dolayısıyla işaret işleme elemanı verici tarafına ilettiği işaret örneklerini, örnekler verici ve gözlem yolundan geçip tekrar işaret işleme elemanına gelene kadar hafızasında tutarlar. Örnekler, uygulanan sisteme ve sistemde kullanılan işaret çeviricilere, RF elemanlarının karakterine, iletim hattı uzunluklarına, işaretlerin bant genişliğine göre bir gecikmeyle verici ve gözlem yolunu kat ederler. Gözlem yolundaki gecikme deneysel olarak ölçülebilir, ancak zaman ve sıcaklık etkisiyle karakteri değişebilen güç yükselteçleri bu gecikmede farklılıklara neden olabilir. Ayrıca uyarlamalı bir ön bozucu sisteminin tasarlanmasının amacı sistemde kullanılacak elemanlara bağımlılığı ortadan kaldırılması olduğu için bu yöntemin tercih edilmemesi gerekir. Verici çıkışından gönderilen örneklerin gözlem yolundan geçtikten sonra işaret işleme biriminde birebir hizalanması bir alıcı problemdir ve bu konuda işaret işleme yöntemiyle uygulanabilecek çözümler mevcuttur [25]. Bu yöntemlerden biri basit korelasyon yöntemidir [22].

Örnek hizalaması kadar dikkat edilmesi gereken bir diğer konu da güç seviyelerinin hizalanmasıdır. Verici ve gözlem yolu boyunca ilerleyen işaret; yol kayıpları, RF donanım elemanlarından kaynaklanan kayıplar, iletim hattı kayıpları ve işaret çeviricilerin niceleme (quantization) kayıpları gibi etkilere maruz kalırlar. İdealde, hiç bir kayba maruz kalmayan işaret güç yükselteci çıkışında sadece kuplör ile güç seviyesinde değişime uğrar. Kuplör oranı güç yükseltecinin doğrusal kazancı ölçüsünde olduğunda seviye farkı olmadan sadece güç yükseltecinin

doğrusal olmayan etkileri uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme biriminde algılanır. Ancak pratik uygulamalarda yukarıda bahsedilen etkilerin hesaba katılması gerekmektedir. Kuplör oranı da güç yükseltecinin doğrusal kazancı oranından daha düşük bir oranda seçilip sayısal işaret işleme biriminde toplam zayıflatma oranı güç yükseltecinin doğrusal kazancı oranına getirilebilir. Zaman gecikmesi uyarlamasından farklı olarak verici ve gözlem yolu boyunca işaretin maruz kalacağı kayıplar deneysel olarak ölçülebilir. Ölçülen toplam yol kaybı işaret işleme biriminde güç yükseltecinin doğrusal kazancı oranına sayısal olarak getirildikten sonra uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme algoritmasında işaret işlenmelidir.

İşaret işleme birimi elemanları niceleme kayıplarından kaynaklanan SNR kayıplarının önüne geçmek için yüksek bit sayısı ile çalışabilecek elemanlardan seçilmelidir. Sistemin yüksek örnekleme çözünürlüğü ile çalışması hem donanım tasarımı açısından bir zorluk getirmektedir hem de kullanılacak işaret işleme biriminin çalışma hızı için bir kısıtlama getirebilir. Eğer sistemde DSP veya CPU gibi kayan noktalı elemanlarla çalışamayan alanda programlanabilir kapı dizileri veya uygulamaya özgül tüm devre kullanılıyor ise yüksek sayıda bit ile çalışılması işaret işleme kalitesini arttıracaktır.

Tabanbant işaret işleme birimi olarak yazılım tanımlı radyo elemanları da kullanılabilir. Yazılım tanımlı radyo, yazılımla kontrol edilebilen bir alıcı/verici elemanıdır. İçeriğinde sayısal işaret işleme birimi, işaret çeviriciler, yerel osilatör, RF sürücüler ve antenler gibi tüm alıcı ve verici elemanları yer alır. Bünyesindeki elemanların tamamı yazımla kontrol edilebildiği için tasarımcıya çok esnek bir çalışma ortamı sunar. Farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesi için tasarlandıklarından bu ürünlerin özel uygulamalar için performansı yetersiz kalmaktadır, ancak benzetim, algoritma ve testler için oldukça elverişlidirler. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yazılım tanımlı radyolardan biri de Evrensel Yazılımlı Radyo Çevrebirimi (USRP)'dir. USRP yazılımla kontrol edilebilen hem alıcı hem de verici RF donanım elemanları ile işaret çeviricileri içinde barındıran, üzerinde bulunan FPGA veya bağlı bulunduğu bilgisayarın işlemci birimini işaret işleme elemanı olarak kullanan esnek bir haberleşme platformudur [26].

5.2.2 İşaret Çeviriciler

Uyarlamalı sayısal ön bozucu olan bir sistemin tasarımında verici yolunda sayısaldan analoğa dönüştürücüler, gözlem yolunda ise analogdan sayısala dönüştürücü işaret çevirici elemanları kullanılır.

İşaret işleme birimi çıkışında ön bozulmaya uğrayan işaretin RF birimlerine aktarılmadan önce sayısaldan analoğa dönüştürücü biriminden geçmesi gerekir. Sayısaldan analoğa dönüştürücünün kullanılan uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli kaçıncı dereceden ise o oranda artmış verici bant genişliğindeki işareti analoğa çevirmesi gerekmektedir. Sayısaldan analoğa çeviriciler ön bozucu çıkışında bant genişliği artmış olan işareti yeterince yüksek örnekleme oranıyla örnekleyemezse bu durum frekans spektrumunda genişleyen yan kanalların örtüşmesine sebep olur [27].

Gözlem hattında kullanılan analogdan sayısala dönüştürücü elemanı da verici bant genişliğindeki işareti örnekleyebileceği hızda değil güç yükselteci çıkışında oluşan ara kiplenim ürünlerini örnekleyebileceği örnekleme hızında çalışmalıdır [28]. Başka bir deyişle analogdan sayısala dönüştürücü saat frekansı, güç yükselteci çıkışında görülen spektral büyümeye bağlı seçilmelidir.

İşaret çevirici seçiminde dikkat edilmesi gereken bir nokta da güç yükseltecinden çıkan ana ton işaretler ve ara kiplenim ürünlerinin güç seviyelerini algılayabilecek özelliklerde elemanların seçilmesidir. Ana ton işaretler ve ara kiplenim ürünleri arasındaki güç seviyesi farkı ara kiplenim ürünlerinin derecesi arttıkça artar. Bu işaretlerin beraber alınabileceği kadar geniş seviye farkını algılamayan işaret çeviriciler bazı ara kiplenim ürünlerini algılayamadığı için sistem performansını düşürür.

İşaret işleme birimlerinde olduğu gibi işaret çeviricileri ilgilendiren bir konu da analogdan sayısala ve sayısaldan analoğa dönüştürücülerin niceleme seviyelerinin SNR kaybına yol açmayacak seviyede olmalarıdır. Geniş seviye ölçeğinde çalışması gereken işaret çeviricilerin niceleme seviyelerinin en düşük seviyede olması gerekmektedir, bunu da yüksek sayıda bit ile çalışarak sağlayabilirler.

İdealde güç yükselteci çıkışında oluşan ara kiplenim ürünlerinin tamamının işlenebileceği işaret işleme birimlerinin ve işaret çeviricilerin tercih edilmesi

uygundur. Ancak güç yükselteci çıkışında oluşan ara kiplenim ürünlerinin bir kısmı kullanılarak da uyarlamalı sayısal ön bozucu gerçeklenmesi yapılabilir. Oluşan ara kiplenim ürünlerinin tamamını işleyebilecek elemanların sisteme getireceği maliyet, tasarım zorluğu, istenen eleman tasarımlarının henüz teknolojik olarak gerçeklenememesi gibi nedenlerle güç yükselteci çıkışındaki oluşan ara kiplenim ürünlerinin bir veya birkaçının sistemde kullanılmasından feragat edilebilir. Bu karar yapılan hesaplama ve benzetimlerde ara kiplenim ürünlerinin bir veya birkaçının kullanılmamasının sistem performansını çok etkilemediği görülerek de alınabilir.

6. ÖN BOZUCU BENZETİMLERİ VE GERÇEKLEME ÇALIŞMALARI

Temel olarak ön bozucu yönteminin incelendiği benzetim çalışmaları MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları uyarlamalı olmayan ve uyarlamalı ön bozucu benzetimlerini içeren iki başlık altında toplanmıştır. Bu benzetimler için ihtiyaç duyulan güç yükselteçlerinin AM/AM dönüşüm karakteristiğinin çıkarılması ve literatürdeki güç yükselteci modellerinin incelenmesi çalışmaları yapılmıştır. Gerçekleme çalışması olarak da USRP üzerinde taramalı tablo yöntemiyle sayısal ön bozucu gerçeklenmiştir.

Benzetim çalışmalarının esas amacı ise bant genişliği sınırlı olan gözlem yoluna sahip uyarlamalı sayısal ön bozucunun ve düşük örnekleme hızları ile çalışan analog/sayısal dönüştürücünün sisteme etkilerinin incelenmesi ve olumsuz etkileri ortadan kaldıracak yöntemlerin denenmesidir.

6.1 Uyarlamalı Olmayan Sayısal Ön Bozucu

Uyarlamalı olmayan sayısal ön bozucu çalışmaları, model bağımlı ön bozucu benzetimleri ve USRP kullanılarak taramalı tablo yöntemi ile yapılan sayısal ön bozucu tasarımı çalışmalarını kapsamaktadır.

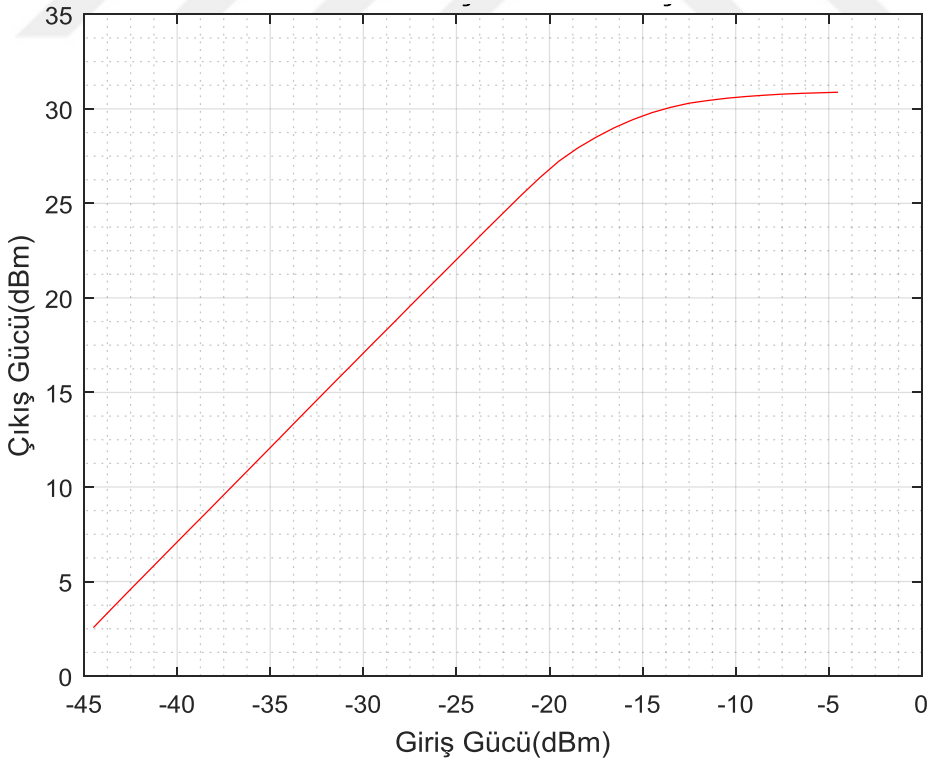
6.1.1 Model Bağımlı Ön Bozucu

Benzetim çalışmalarının ilk adımı olarak X-Bant frekansında çalışan AML612P4401 kodlu güç yükseltecinin girişine -45 dBm güç seviyesinden -5 dBm güç seviyesine kadar 1 dB aralıklarla tek ton sinüssel işaretler uygulanarak güç yükseltecinin AM/AM dönüşüm grafiği elde edilmiştir. Bu işlemler yapılırken işaret üreteci ve spektrum analizör yardımıyla güç yükseltecinin girişinde ve çıkışında kullanılan koaksiyel kabloların güç yükseltecinin çalışacağı X-Bant frekansındaki kayıpları belirlenmiştir. Güç yükseltecinin girişine işaret üretecinden verilmek istenen güç seviyesinden güç yükseltecinin girişinde kullanılan kablo kaybı kadar daha fazla seviyede işaret uygulanmıştır. Spektrum analizörde ölçülen güç seviyesine ise güç yükseltecinin çıkışındaki kablo kaybı kadar güç seviyesi eklenerek güç yükseltecinin AM/AM dönüşüm grafiği elde edilmiştir. Şekil 6.1'de güç yükseltecinin AM/AM dönüşüm grafiği görülmektedir.

Güç yükselteci için elde edilen AM/AM dönüşüm verileri işaretlerin güç seviyeleri ile elde edilmiştir. Güç yükseltecinin çalıştığı frekanslardaki giriş ve çıkış empedansları Vektör Ağ Çözümleyici (VNA) ile ölçülmüştür. Giriş ve çıkış empedans bilgileri ile güç seviyeleri genlik seviyelerine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm işlemi güç yükselteci davranışını bir güç yükselteci modeline oturtmak için gereklidir.

$$V = \sqrt{P.Z} \qquad (6.1)$$

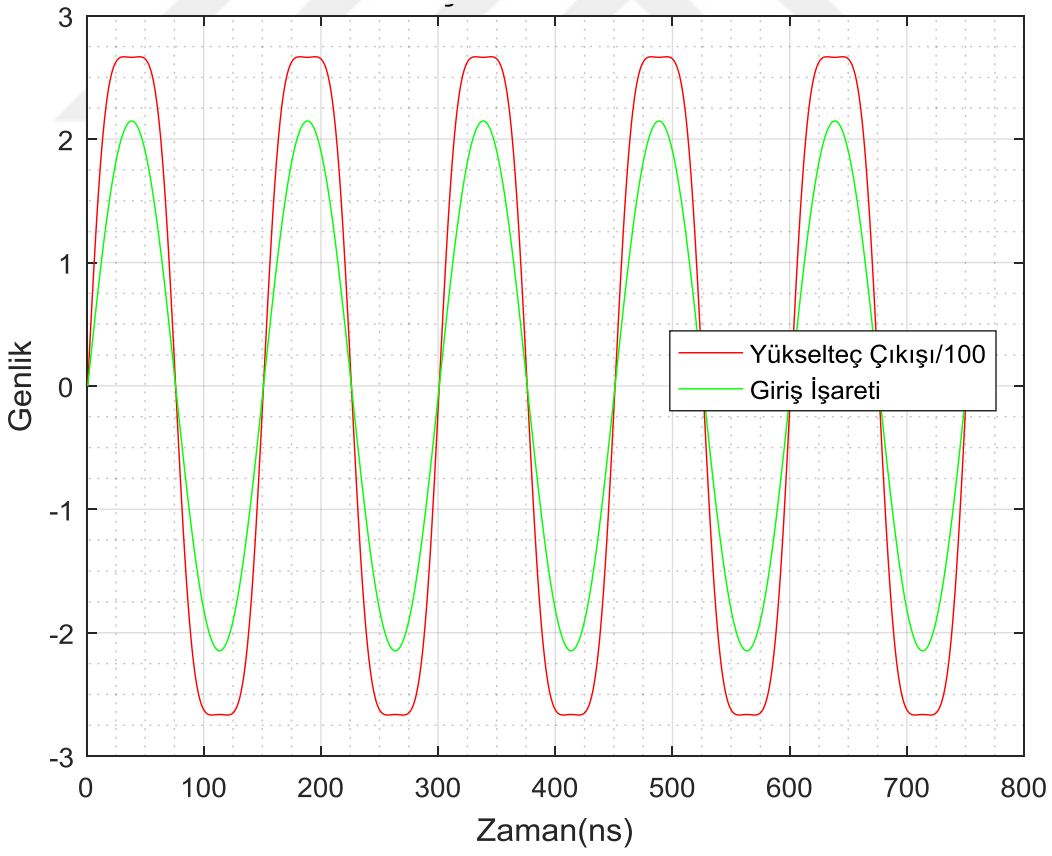
Güç yükseltecinin girişine uygulanan işaret genlik seviyelerine göre çıkışındaki işaret genlik seviyelerinden yararlanarak giriş genlik seviyesi işaret vektörü ve çıkış genlik seviyesi işaret vektörü en küçük kareler yöntemiyle 5. dereceden bir polinoma oturtulmuştur. Güç yükseltecinin AM/PM dönüşümü çıkarılmadığından güç yükselteç polinomu karmaşık değerli bir polinom değildir, güç yükseltecinin faz üzerinde oluşturduğu doğrusal ve doğrusal olmayan etkileri göstermez.



Şekil 6.1. AML612P4401 yükselteç AM/AM dönüşümü grafiği

Güç yükseltecinin doğrusal kazancı küçük işaret ile çalıştığı bölgede çıkış gücü seviyesi ile giriş gücü seviyesi arasındaki farktan elde edilmiştir.

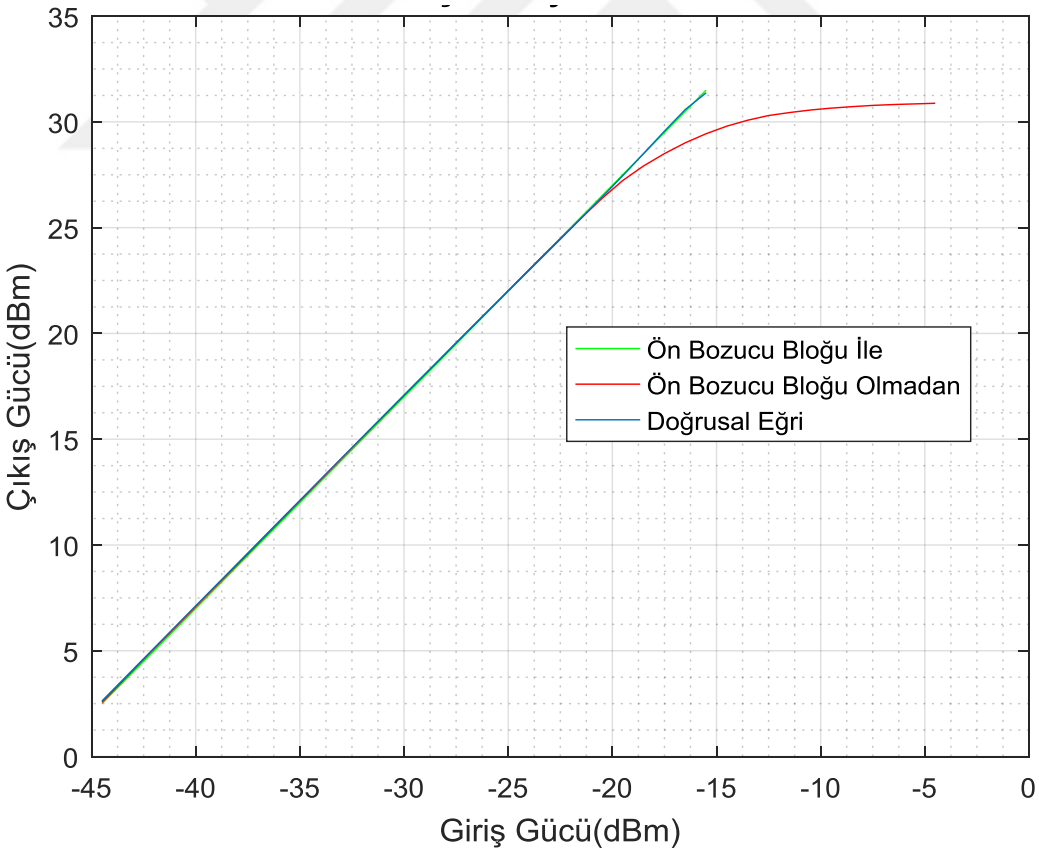
Güç yükselteçlerinin işaret üzerindeki etkisi zaman bölgesinde de incelenmelidir. Kısılma veya doyum bölgesinde çalıştırılan güç yükseltecinin girişine uygulanan işaretin sınırlı toplam gücün çıkışa aktarılırken ara kiplenim ürünlerine dağıtıldığından bahsedilmişti. Bu etki zaman bölgesinde kendini belirli bir seviyeden sonra kuvvetlendirilmiş işaretin kesilmesi şeklinde gösterir. Benzetim ortamında güç yükseltecinin girişine güç yükseltecinin kısılma bölgesinde çalışacağı seviyede bir sinüssel işaret uygulanmıştır. Güç yükselteci fonksiyonunun çıkışında giriş seviyesine göre yükseltilmiş ancak kesilmiş bir işaret elde edilmiştir. Şekil 6.2'de girişe uygulanan işaret ve çıkışta oluşan iki işaret arasındaki seviye farkı yüksek olduğu için çıkış işaretinin genlik seviyesi bir katsayı ile küçültülerek güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkisi zaman bölgesinde görülmüştür.



Şekil 6.2. Doğrusal olmayan etkilerin işaret genliğinde meydana getirdiği kesilme

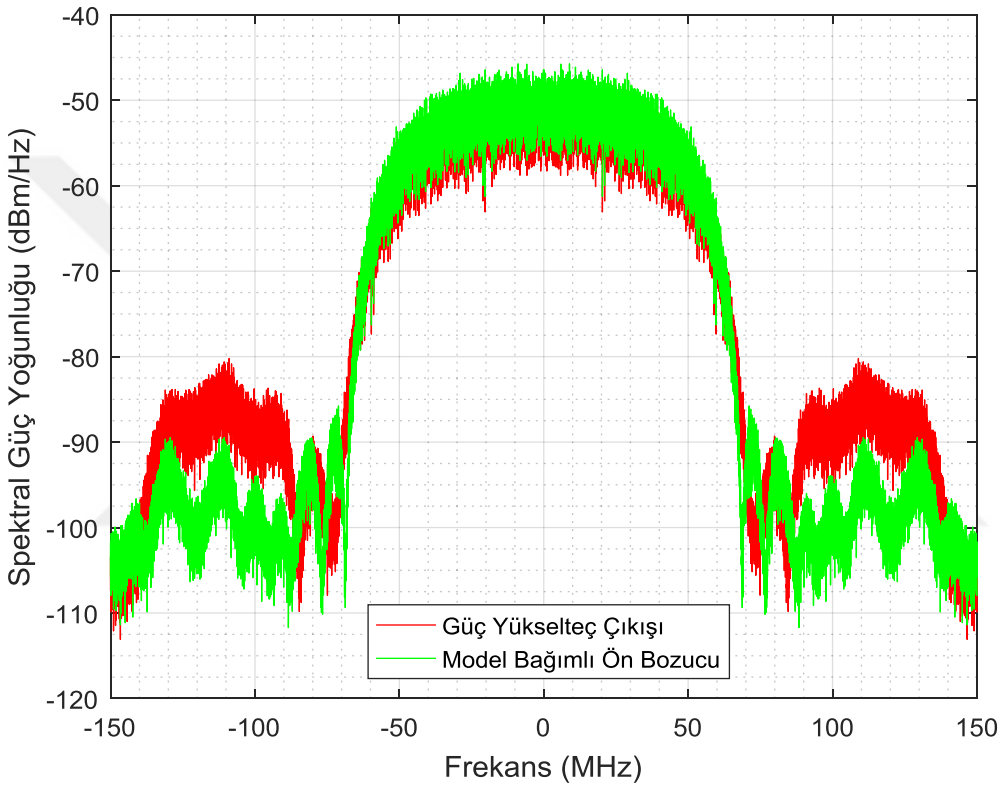
Ön bozucu fonksiyonu da güç yükselteci fonksiyonu ile aynı dereceden bir polinom olarak seçilmiştir. Güç yükselteci AM/AM dönüşüm fonksiyonunu güç yükseltecinin doğrusal kazanç eğrisine dönüştürecek olan polinom katsayıları da en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmıştır.

Benzetim ortamında, güç yükseltecinin AM/AM dönüşümünü elde ederken uygulanan giriş seviyeleri ön bozucu girişine, ön bozucu çıkışındaki işaret de güç yükselteci girişine verilmiştir. Bu işlemler ile benzetim ortamında model bağımlı bir ön bozucu tasarımı ve ön bozucunun AM/AM bozulmasına getirdiği iyileşmeyle doğrusallaştırma yapılmıştır. Şekil 6.3'te model bağımlı ön bozucunun sistemin AM/AM dönüşümüne etkisi görülmektedir. Model bağımlı ön bozucu ile güç yükseltecinin kısılma bölgesinde doğrusal eğriden uzaklaşan güç yükselteci AM/AM dönüşüm eğrisi yaklaşık 1.5 dB yükseltilerek doğrusallaştırma sağlanmıştır.

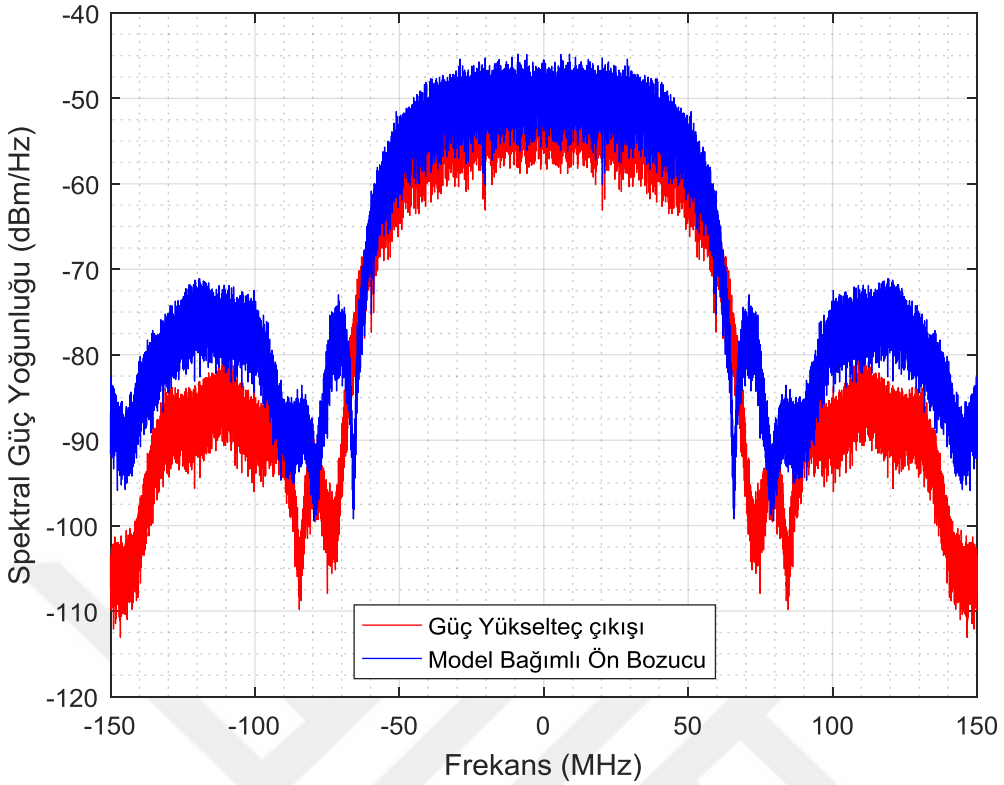


Şekil 6.3. Model bağımlı sayısal ön bozucunun AM/AM bozulmasına etkisi

Ön bozucunun sistem performansına etkisi Şekil 6.4'te görülmektedir. Benzetim QPSK kiplenimli giriş işaretiyle yapılmıştır. Ön bozucular ile güç yükselteci çıkışında 10 dB yan kanal bastırmasının mümkün olduğu bilinmektedir [5]. Ön bozucu olmadan, güç yükselteç çıkışındaki işaretin bant genişliğinin dışında kalan yan kanallarında meydana gelen yükselme model bağımlı sayısal ön bozucu ile yaklaşık 10 dB bastırılarak haberleşme sisteminin ACLP kalite ölçüsü iyileştirilmiştir.



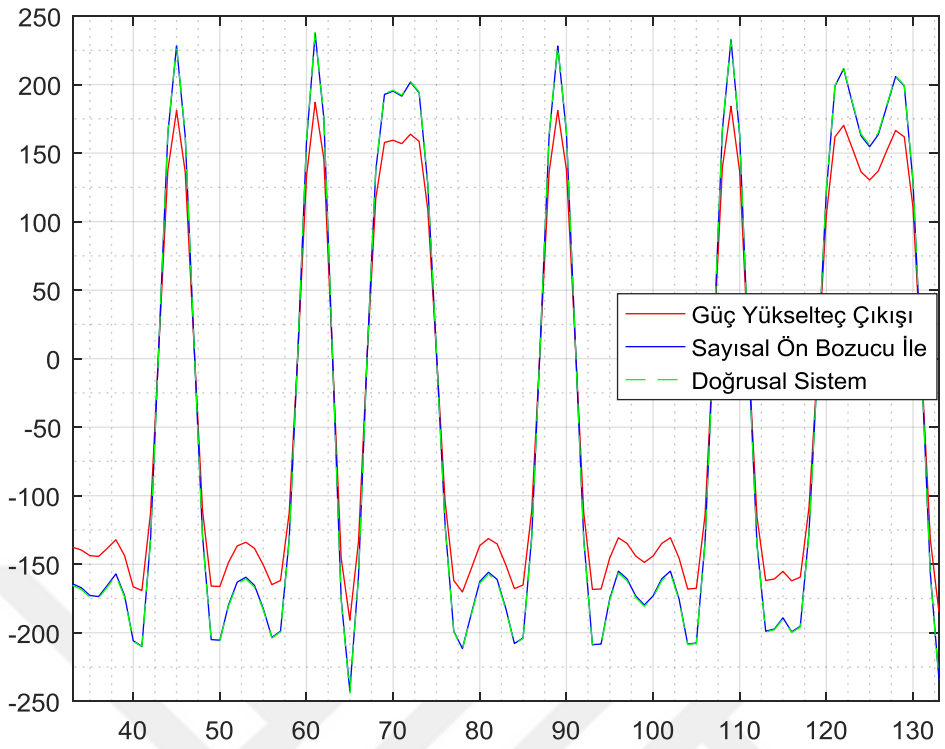
Şekil 6.4. Model bağımlı sayısal ön bozucu etkisinin frekans spektrumunda incelenmesi (QPSK, 80 Msps, α =0.65)



Şekil 6.5. Normalize edilmiş sayısal ön bozucu ve güç yükselteci çıkışlarının frekans spektrumundaki görüntüsü (QPSK, 80 Msps, α =0.65)

Sayısal ön bozucular, güç yükseltecinin işaret bandı dışındaki frekanslarda oluşturduğu bileşenleri sönümleyebilmek için aynı frekanslarda ters fazlı işaretler oluşturur. Başka bir deyişle güç yükselteci çıkışında meydana gelen değişimler ters fazlı olarak ön bozucu çıkışında da Şekil 6.5'teki gibi görülür. Grafik üzerinde güç yükseltecinin spektrumu çizdirilirken, güç yükseltecinin doğrusal kazancı ile normalize edilmiştir.

Şekil 6.4'te frekans spektrumunda sağladığı iyileşme görülen model bağımlı sayısal ön bozucunun zaman ortamında etkisi Şekil 6.6'da görülmektedir. Kısılma bölgesinde çalışan güç yükselteci girişindeki işarete doğrusal kazancından daha düşük seviyede bir kazanç uygulamaktadır. Model bağımlı sayısal ön bozuculu sistemin ise doğrusal sistem ile aynı performansa sahip olduğu görülmektedir.

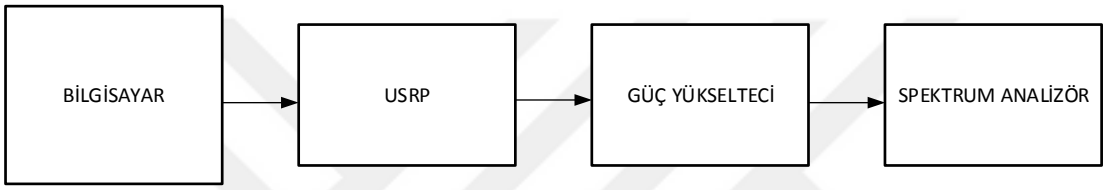


Şekil 6.6. Model bağımlı sayısal ön bozucu etkisinin zaman bölgesinde incelenmesi

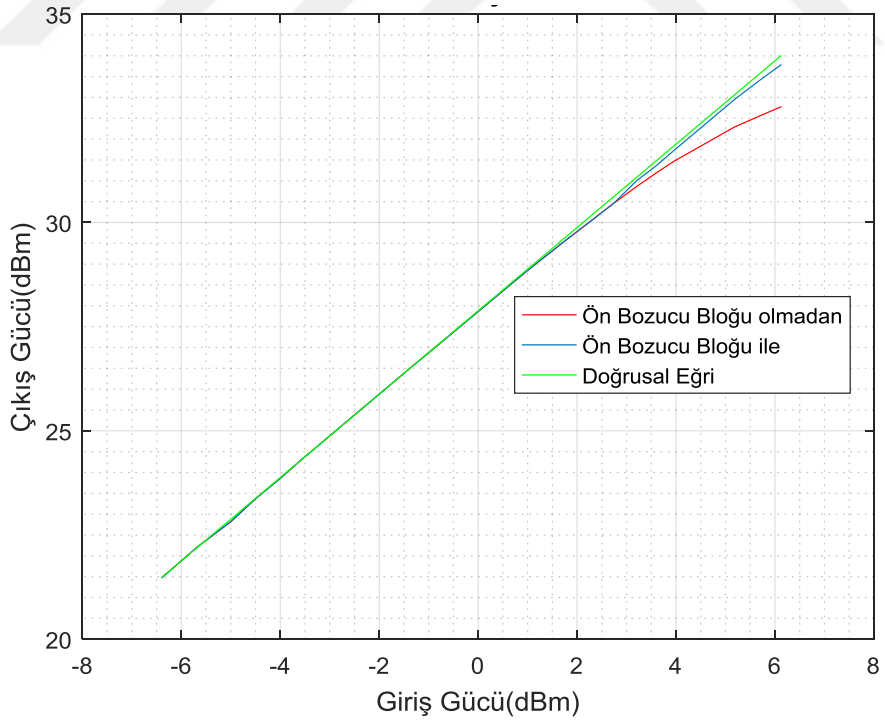
6.1.2 USRP Kullanılarak Taramalı Tablo Yöntemi İle Sayısal Ön Bozucu Gerçeklemesi

Yazılım tanımlı radyo olarak kullanılan USRP ile S-Bant frekansında çalışan TriQuint firmasının AH323 model güç yükseltecinin AM/AM dönüşüm eğrisine ulaşmak istenmiştir. Bu sebeple USRP içerisindeki işaret işleme birimi içinde, verici çıkışındaki tek ton sinüssel işaretin seviyesi sayısal skaladaki çarpanlarına göre tekrar elde edilmiştir. İlk olarak verici tarafındaki sinüssel işaretin katsayıları değiştirilerek USRP çıkışındaki işaretin güç seviyesi ölçülmüştür. Böylece USRP çıkışında görülecek işaret seviyeleri için işaret işleme biriminde sinüssel işaretin hangi katsayılarla çarpılması gerektiği bilgisine ulaşılmıştır. USRP çıkışı güç yükseltecine bağlandığında güç yükselteci girişi yazılımla 1 dB aralıklarla değiştirilerek güç yükseltecinin AM/AM dönüşüm grafiği elde edilmiştir. Ön bozucu tasarımı için, güç yükseltecinin kısılma bölgesi giriş seviyesi ve çıkış seviyesi vektörleri kullanılmıştır. Ön bozucu fonksiyonu, kısılma bölgesindeki giriş seviyesi

vektörü güç yükseltecinin doğrusal kazancı kadar artacak şekilde en küçük kareler yöntemiyle 5. dereceden bir polinoma oturtulmuştur. İşaret işleme biriminde konumlandırılan bu fonksiyon güç yükseltecinin kısılma bölgesinde devreye girerek 1 dB aralıklarla arttırılan sinüssel işaret çarpanını istenen çıkış gücüne göre değiştirerek güç yükseltecinin AM/AM bozulmasını ortadan kaldırmıştır. Böylece Şekil 6.7'de blok şeması verilen yapı ile USRP ile taramalı tablo yöntemi kullanılarak ön bozucu tasarımı gerçeklenmiştir. Güç yükselteci doğrusallaşması Şekil 6.8'de görülmüştür. Kısılma bölgesinin sonunda sistem çıkışı güç seviyesi yaklaşık 1 dB arttırılmıştır.



Şekil 6.7. USRP kullanılarak doğrusallaştırıcı tasarımı blok şeması



Şekil 6.8. USRP üzerinde taramalı tablo yöntemi ile gerçeklenen sayısal ön bozucunun AM/AM bozulmasına etkisi

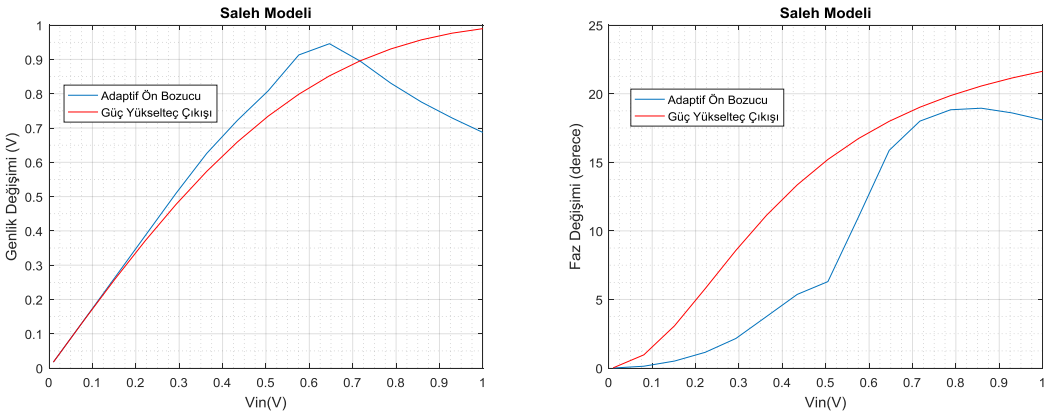
6.2 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu

Uyarlamalı ön bozucu benzetimlerinde, ön bozucu modeli olarak kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli kullanılmıştır. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli hem AM/AM hem de AM/PM bozulmalarını düzeltebilen bir yapıda çalışır. Güç yükselteci modeli olarak polinom modeli, Saleh modeli, Rapp modeli ve Arctangent modelleri kullanılmıştır. Verici işareti olarak ise evre kaydırmalı kiplenimleri (PSK) ve dördün genlik kiplenimleri (QAM) farklı derecelerde kullanılarak ön bozucu performansları kiplenim türleri ve derecelerine göre incelenmiştir. Ayrıca uyarlamalı ön bozucu performansı iterasyon sayısı, verici ve gözlem yolu sonunda geri beslenen işaretlerin karşılaştırıldığı vektörlerinin büyüklüklerine göre incelenmiştir.

6.2.1 Yükselteç Modellerinin Genlik ve Faz Dönüşümlerinin İncelenmesi

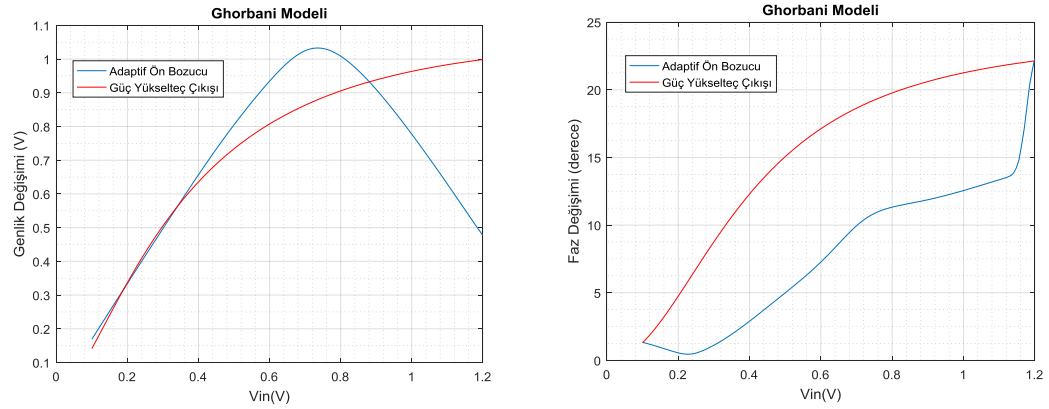
PSK ve QAM gibi hem faz hem de genlik bileşeni içeren kiplenimlerin haberleşme kalitesi AM/AM ve AM/PM bozulmasının her ikisinden de etkilenirler. AM/AM ve AM/PM bozulmalarının en aza indirilmesi, bu tip kiplenimleri kullanan haberleşme sistemlerinde EVM, BER, SNR gibi kalite ölçütlerinin iyileşmesini sağlayacaktır. Bu bakış açısıyla benzetim ortamında Ghorbani, Actangent ve Saleh modellerinin girişine uygulanan genlik seviyelerine göre polinom modelini kullanan kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu ile çalıştıklarında genlik ve faz bozulmalarındaki iyileşme incelendi.

Şekil 6.9'da Saleh modeli ile modellenen güç yükseltecinin girişine uygulanan genlik seviyesine göre genlik ve faz bozulmaları görülmektedir. Meydana gelen bu bozulmalara kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucunun etkisi de görülmektedir. Genlik seviyesinde meydana gelen kısılmanın ön bozucu ile daha yüksek seviyelerde başladığı, faz değişiminden ise işaretin daha az etkilendiği görülmüştür.



Şekil 6.9. Saleh modelinin genlik ve faz dönüşüm grafikleri

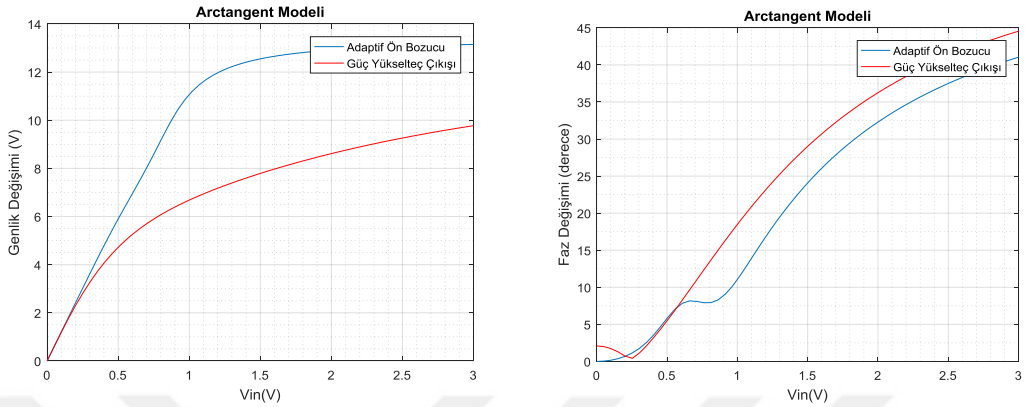
Şekil 6.10'da Ghorbani modeli ile modellenen güç yükseltecinin girişine uygulanan genlik seviyesine göre genlik ve faz bozulmaları ve bu bozulmalara kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucunun etkisi görülmüştür. Genlik seviyesinde meydana gelen kısılmanın ön bozucu ile daha yüksek seviyelerde başladığı, faz değişiminden ise işaretin daha az etkilendiği görülmüştür.



Şekil 6.10. Ghorbani modelinin genlik ve faz dönüşüm grafikleri

Şekil 6.11'de Arctangent modeli ile modellenen güç yükseltecinin girişine uygulanan genlik seviyesine göre genlik ve faz bozulmaları ve bu bozulmalara kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucunun etkisi görülmüştür. Genlik

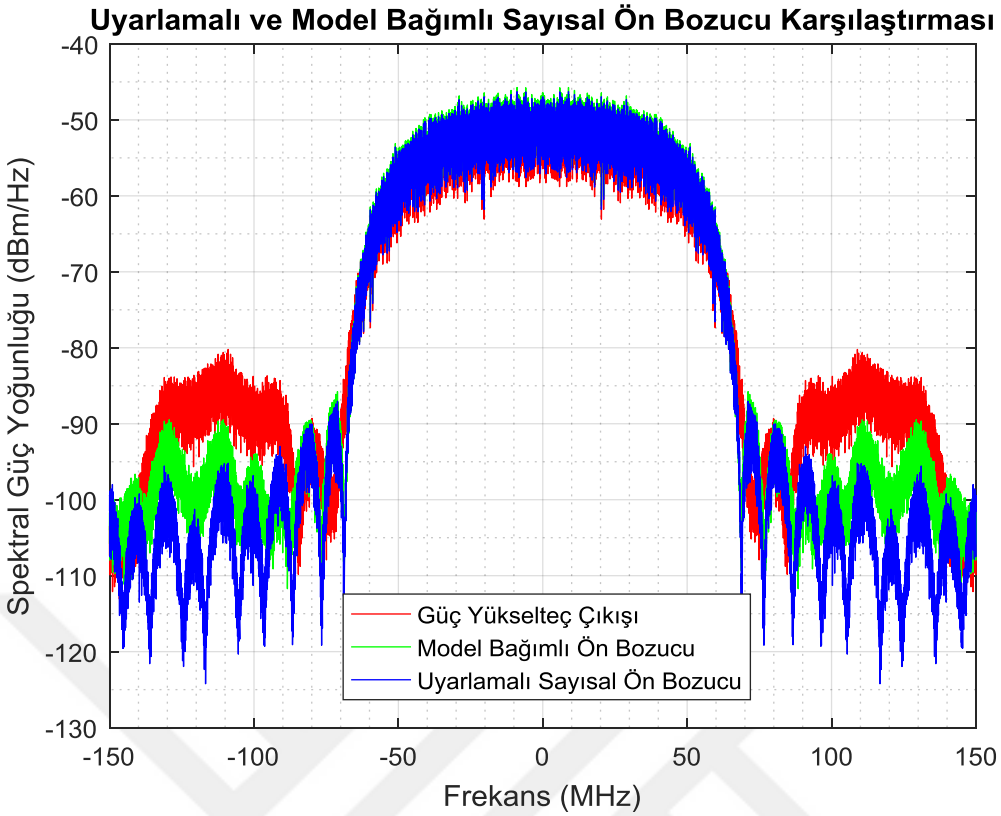
seviyesinde meydana gelen kısılmanın ön bozucu ile daha yüksek seviyelerde başladığı, faz değişiminden ise işaretin daha az etkilendiği görülmüştür.



Şekil 6.11. Arctangent modelinin genlik ve faz dönüşüm grafikleri

6.2.2 Uyarlamalı Olmayan Sayısal Ön Bozucu ve Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Karşılaştırması

Uyarlamalı sayısal ön bozucu sistemi uyarlamalı olmayan ön bozucu sistemiyle güç yükseltecinin kısılma bölgesinde çalıştığı durumda kıyaslanmıştır. Uyarlamalı sayısal ön bozucu doğrusal olmayan etkilerden kaynaklanan faz bozulmalarını da ortadan kaldırdığı için daha iyi performans sağlamıştır. Uyarlamalı sayısal ön bozucular ile 10 dB yan kanal bastırmasının mümkün olduğu bilinmektedir [20], . Uyarlamalı sayısal ön bozucunun frekans spektrumunda model bağımlı sayısal ön bozucudan işaretin bant genişliği dışında yan kanal tepe değerinde yaklaşık 5 dB daha fazla bastırma sağladığı Şekil 6.12'de görülmüştür.



Şekil 6.12. Uyarlamalı olmayan sayısal ön bozucu ile uyarlamalı sayısal ön bozucunun frekans spektrumundaki etkilerinin karşılaştırılması(QPSK, 80 Msps, α =0.65)

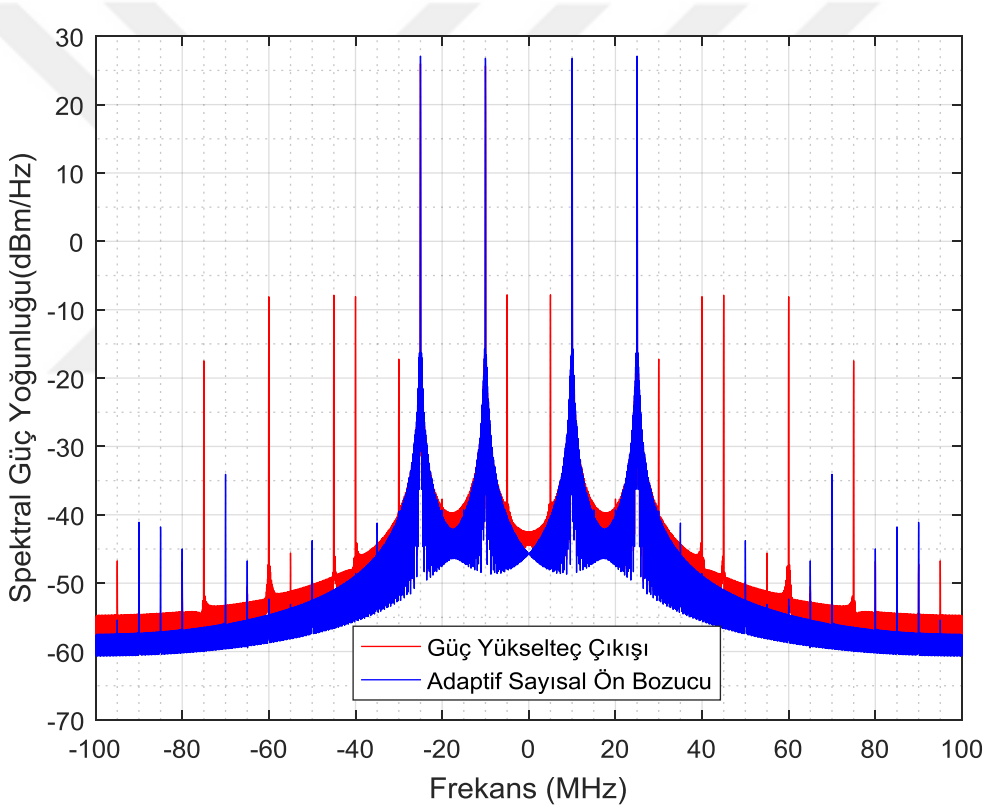
6.2.3 İki Ton İşaret ile Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Benzetimleri

Test edilmek istenen bant genişliği olan kiplenimli işaretler test ortamında eğer bant genişlikleri kullanılan işaret üreteçlerinin bant genişliğinden daha büyükse bu durum güç yükselteci girişine bant genişliğinin başında ve sonunda iki ton sinüssel işaret uygulanarak modellenir. İki ton işaret ile yapılan ölçümler harmonik ve ara kiplenim ürünlerinin ölçümlerini de kolaylaştırır. Benzetim ortamında kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu girişine 10 MHz ve 25 MHz frekanslarında iki ton sinüssel işaret güç yükseltecinin kısılma bölgesinde çalışacağı güç seviyesinde uygulanmıştır. İki ton işaretin hem güç yükselteci çıkışında uğradığı AM/AM bozulması görülmüştür hem de kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu olan sistemde iki ton işaretin uğradığı doğrusal olmayan etkilerin azaldığı görülmüştür.

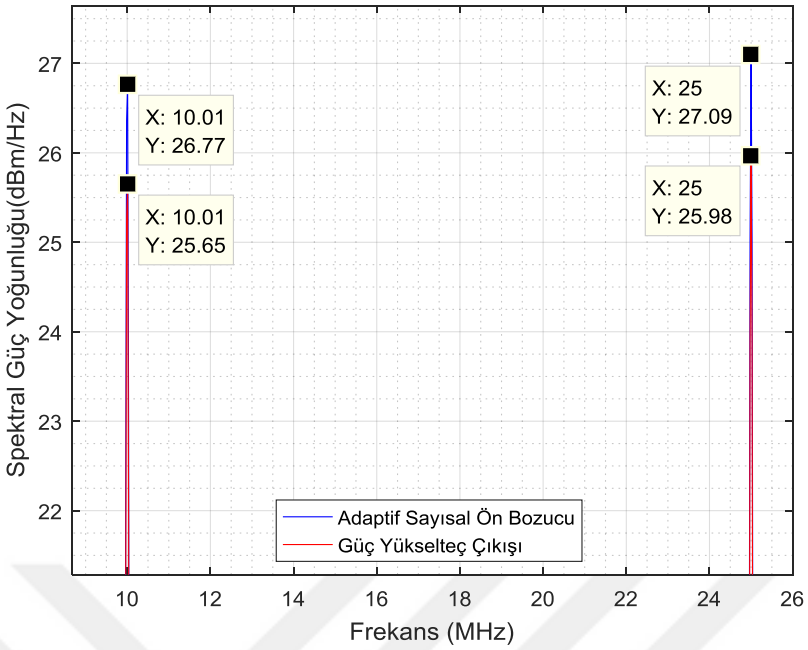
10 MHz ve 25 MHz frekanslarındaki iki ton işaretin 40 MHz frekansında 3. dereceden, 55 MHz frekansında ise 5. dereceden ara kiplenim ürünleri oluşur.

Yapılan benzetimlerde frekans spektrumunun uyarlamalı ön bozucunun etkisiyle ara kiplenim ürünlerinden ve harmoniklerden temizlendiği Şekil 6.13'te görülmüştür.

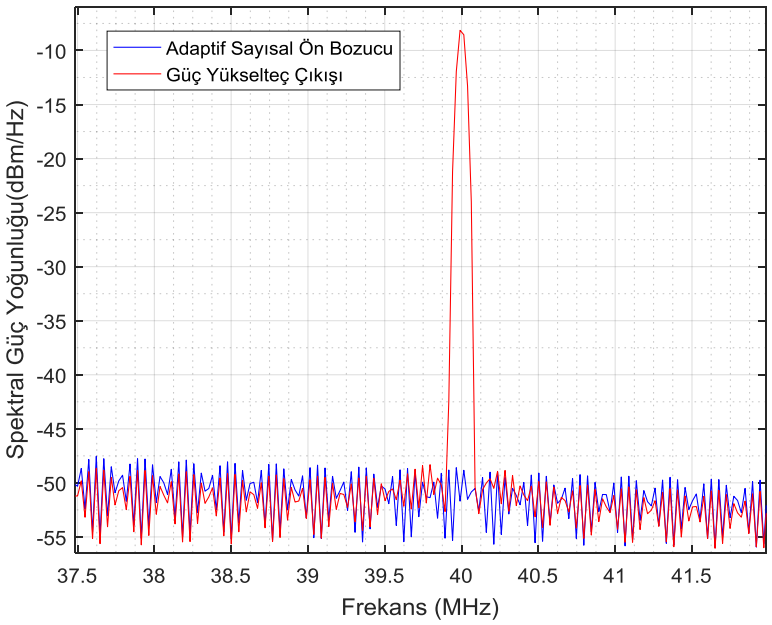
Ana ton İşaretlerin güç seviyesinde yaklaşık 1 dB artış Şekil 6.14'de, 3. derece ara kiplenim ürünü seviyesindeki yaklaşık 40 dB bastırma Şekil 6.15'te, 5. derece ara kiplenim ürünü seviyesindeki yaklaşık 4 dB bastırma ise Şekil 6.16'da görülmüştür.



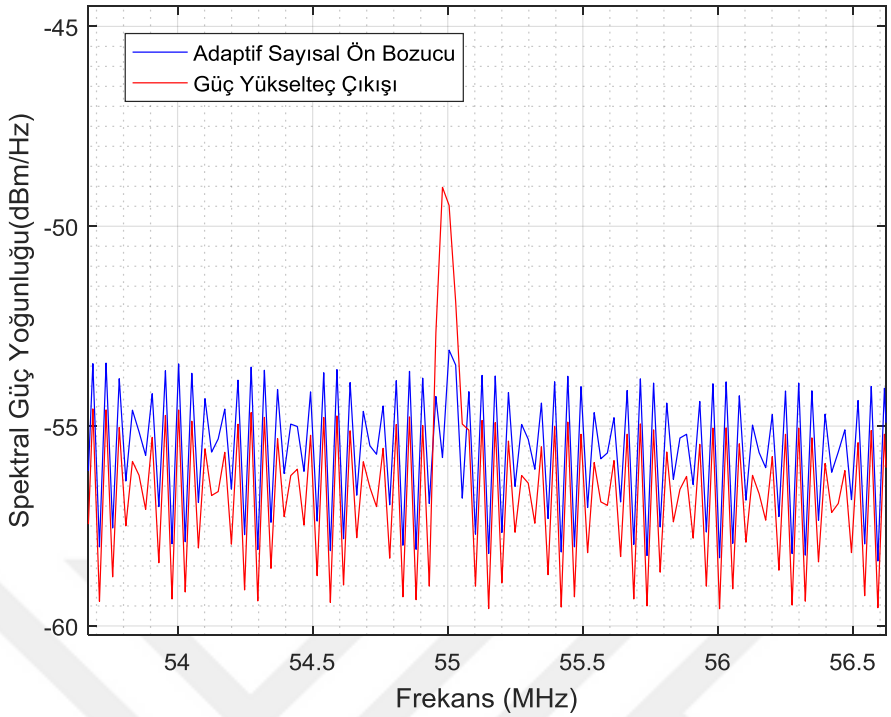
Şekil 6.13. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi



Şekil 6.14. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi (ana ton işaretler)



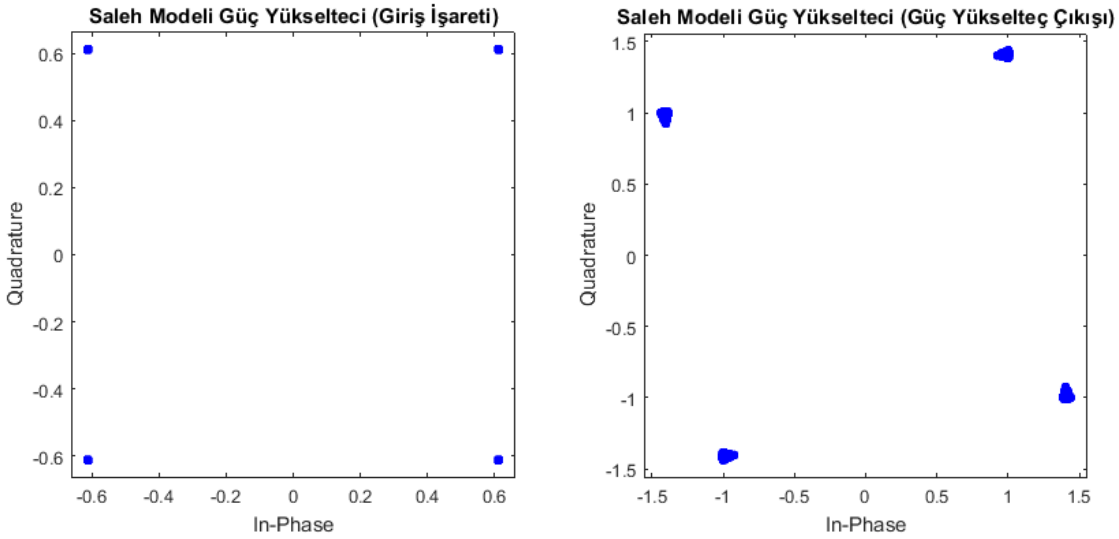
Şekil 6.15. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi (3. ara kiplenim ürünü)



Şekil 6.16. İki ton işaret ile uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisinin incelenmesi (5. ara kiplenim ürünü)

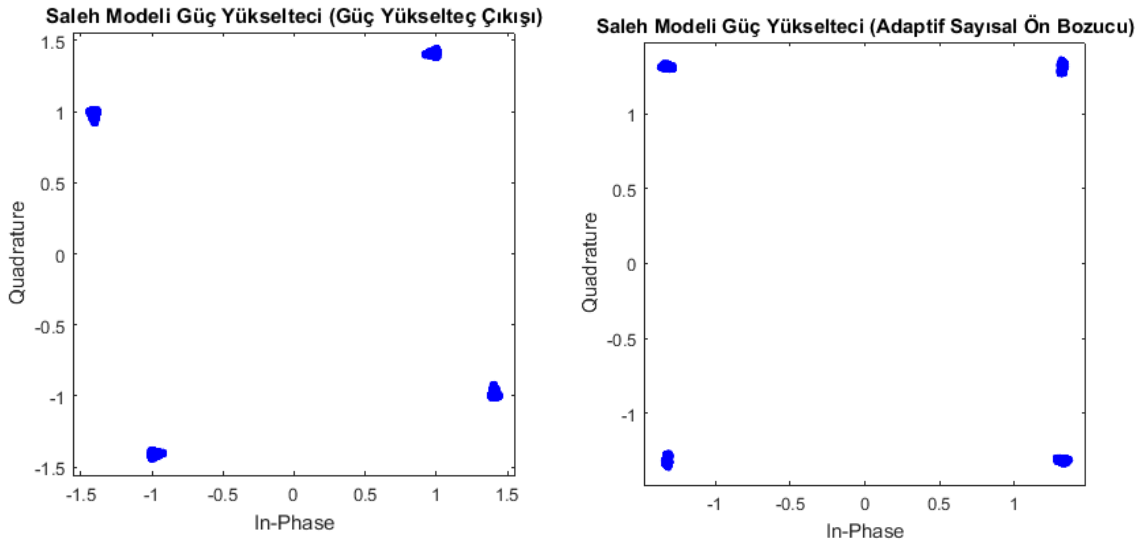
6.2.4 Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Performansının Yıldız Şemasında İncelenmesi

Güç Yükselteci modeli olarak Saleh modelinin kullanıldığı benzetimlerde, güç yükseltecinin doğrusal çalışmadığı giriş güç seviyeleri için hem AM/AM bozulmasının hem de AM/PM bozulmasının modellendiği görülmüştür. Kullanılan kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu modelinin de hem AM/AM bozulmasını hem de AM/PM bozulmasını düzeltebildiği görülmüştür. Saleh modeli kullanılarak modellenen güç yükselteci girişine güç yükseltecinin kısılma bölgesinde çalışacağı giriş güç seviyesinde QPSK kiplenimli bir işaret uygulanarak bu işaretin güç yükselteci çıkışında uğradığı değişim yıldız şemasında görülmüştür. Güç yükselteci girişine uygulanan işaretlerin hem genlik hem de faz bozulmasına uğradığı görülmüştür.



Şekil 6.17. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi

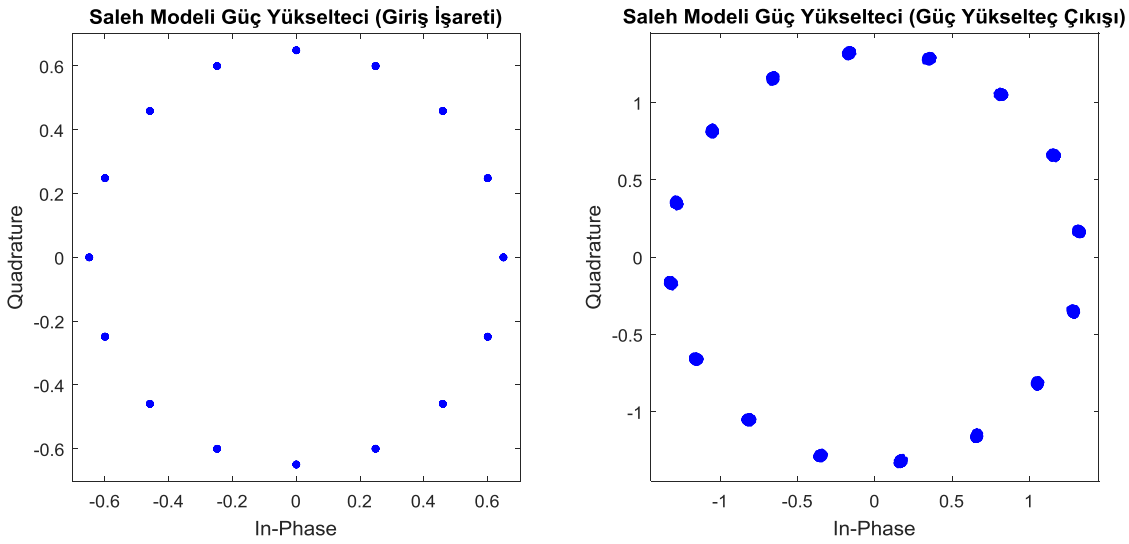
Saleh modeli ile modellenen güç yükseltecinin neden olduğu QPSK kiplenimli işaret bozulması Şekil 6.17'de görülmüştür. Normalize edilmiş güç yükselteç çıkışındaki QPSK kiplenimli işaretin EVM oranı % 1.3 seviyesindedir. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu güç yükselteci girişine geldiğinde, aynı güç seviyesine sahip QPSK kiplenimli işaretin güç yükselteci çıkışında hem AM/AM bozulmasının hem AM/PM bozulmasının toparlandığı Şekil 6.18'de görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde, güç yükselteç çıkışındaki QPSK kiplenimli işaretin EVM oranı % 1 seviyesinde elde edilmiştir.



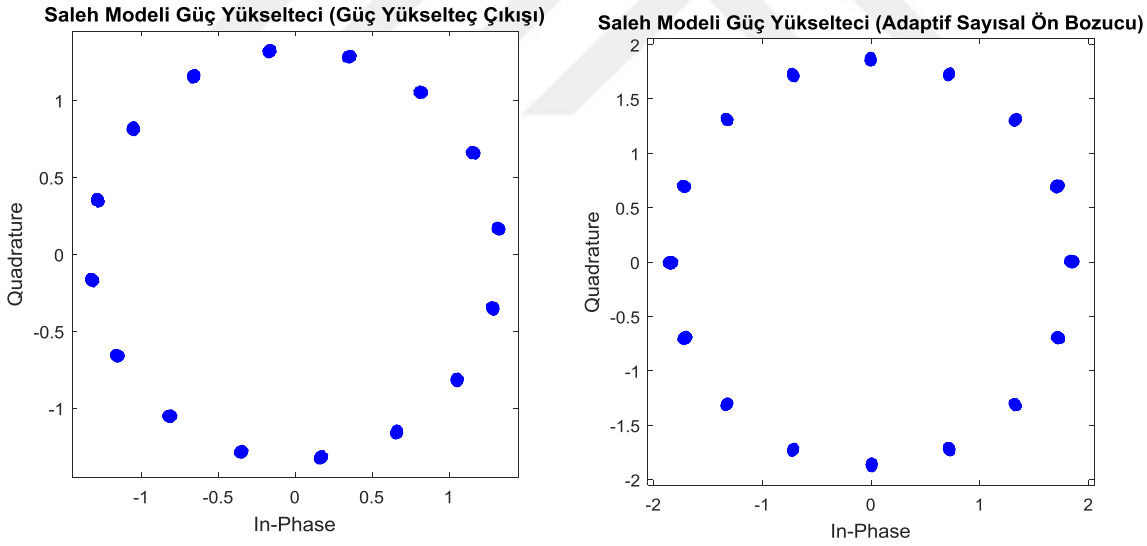
Şekil 6.18. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi

Saleh modeline uygun güç yükselteçleri kullanılarak faz kaydırmalı kiplenime sahip işaretler kuvvetlendirilmek istenilen uygulamalar için kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu sisteminin EVM seviyesini bir miktar aşağı çektiği görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu ve güç yükseltecine sahip sistemin girişine 16-PSK ve 16-QAM işaret güç yükseltecinin kısılma bölgesinde çalışacağı güç seviyesinde uygulanmıştır.

Saleh modeli ile modellenmiş güç yükseltecinin girişine 16-PSK işaret uygulandığı benzetimler Şekil 6.19'da, uyarlamalı ön bozucu kullanılan sistemin benzetim sonuçları Şekil 6.20'de görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılmayan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı ve kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 1 seviyesinde elde edilmiştir.



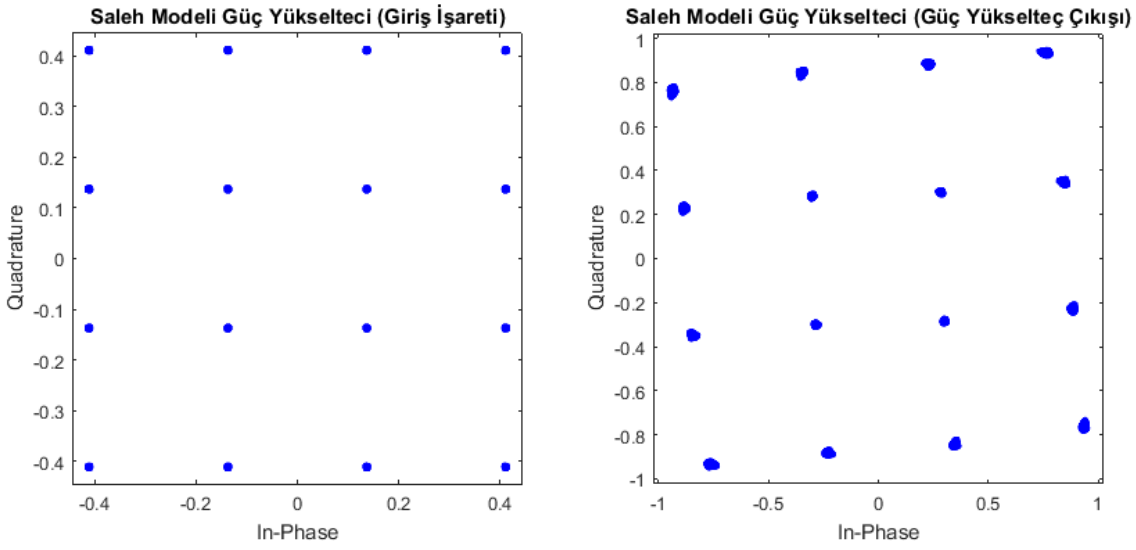
Şekil 6.19. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-PSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi



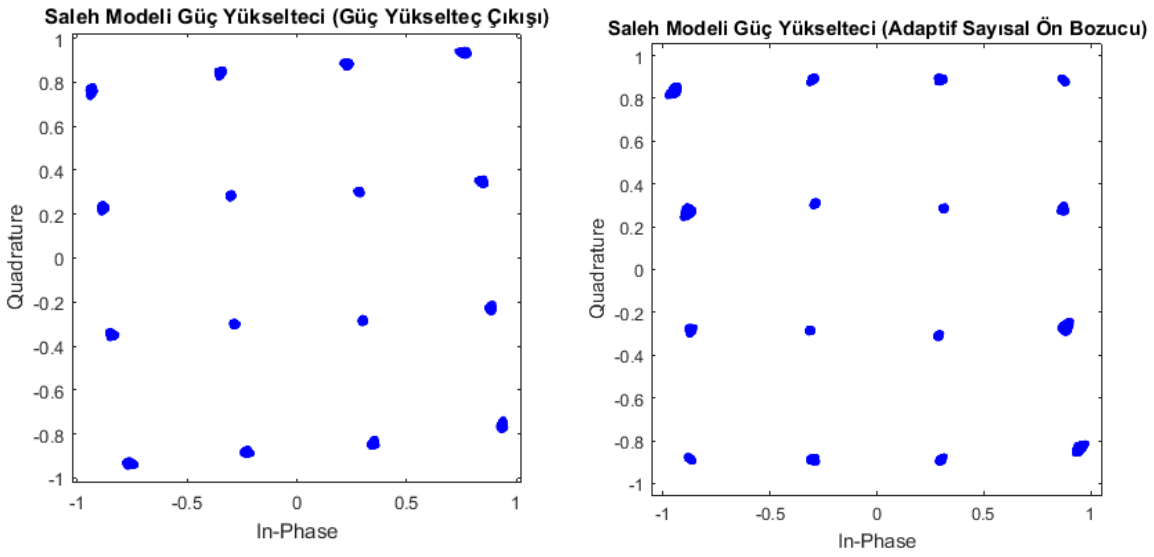
Şekil 6.20. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-PSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi

Saleh modeli ile modellenmiş güç yükseltecinin 16-QAM işaret bozulması Şekil 6.21'de, işaret bozulmasının Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu ile

iyileştirildiği Şekil 6.22'de görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılmayan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 8 iken, kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 3 seviyesine çekilmiştir. Yüksek mertebeli QAM işaret sembollerinin enerjileri birbirinden farklı oldukları için faz bozulmasından semboller farklı oranlarda etkilenirler. Uyarlamalı sayısal ön bozucuların faz toplamasıyla performans iyileştirmesi de yüksek mertebeli QAM kiplenim kullanan sistemlerde belirgin hale gelir.



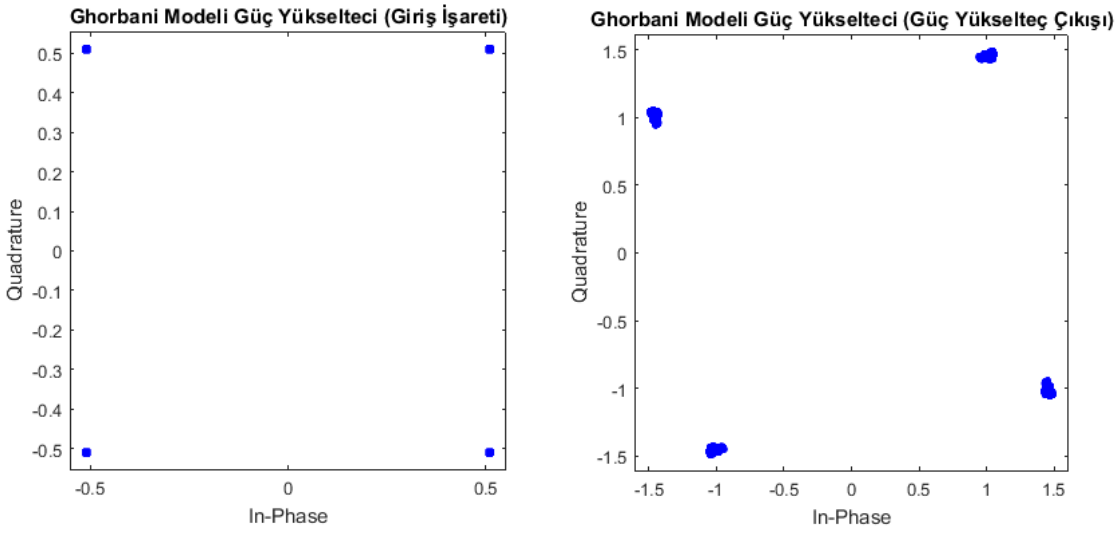
Şekil 6.21. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi



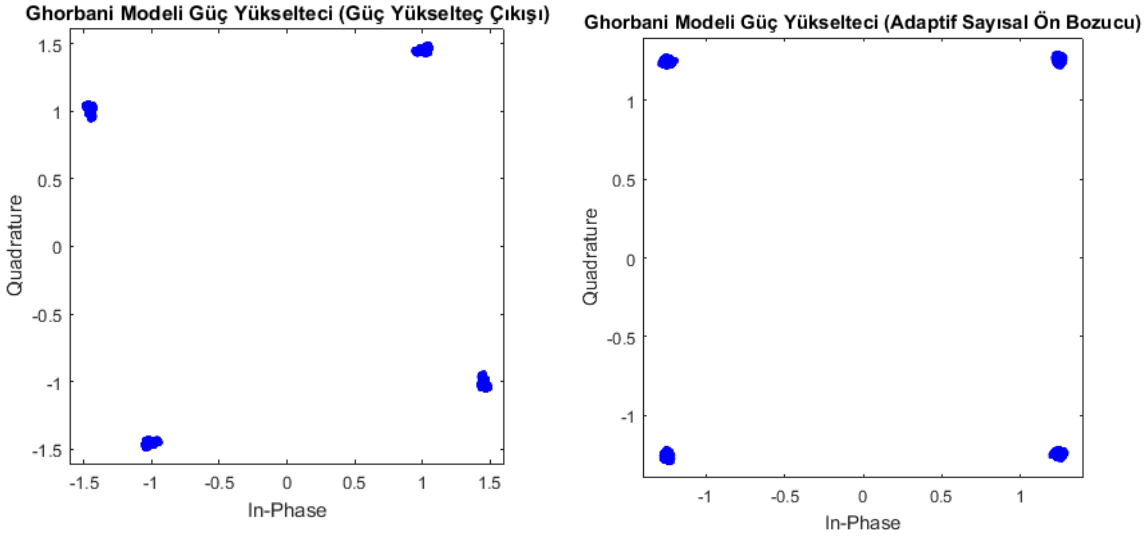
Şekil 6.22. Saleh modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi

Güç Yükselteci modeli olarak kullanılan Ghorbani modeli de doğrusal olmayan bölgede Saleh modeli gibi hem faz hem de genlik bozulmalarına yol açmaktadır. Saleh modeli için yapılan çalışmalar Ghorbani modeli için de tekrarlanmıştır. Kullanılan kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucunun faz ve genlik bozulması toplaması Ghorbani modeli için de gerçekleşmiştir. Ghorbani modeli için de kısılma bölgesinde çalışacağı giriş gücü seviyesinde QPSK, 16-PSK ve 16-QAM kiplenimli işaretler sistem girişine uygulanmıştır.

Ghorbani Modeli ile modellenmiş güç yükseltecinin QPSK işaret bozulması Şekil 6.23'te, AM/AM ve AM/PM bozulmasının kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu ile iyileştirildiği Şekil 6.24'te görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılmayan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 1.3 iken, kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 0.8 seviyesine çekilmiştir.



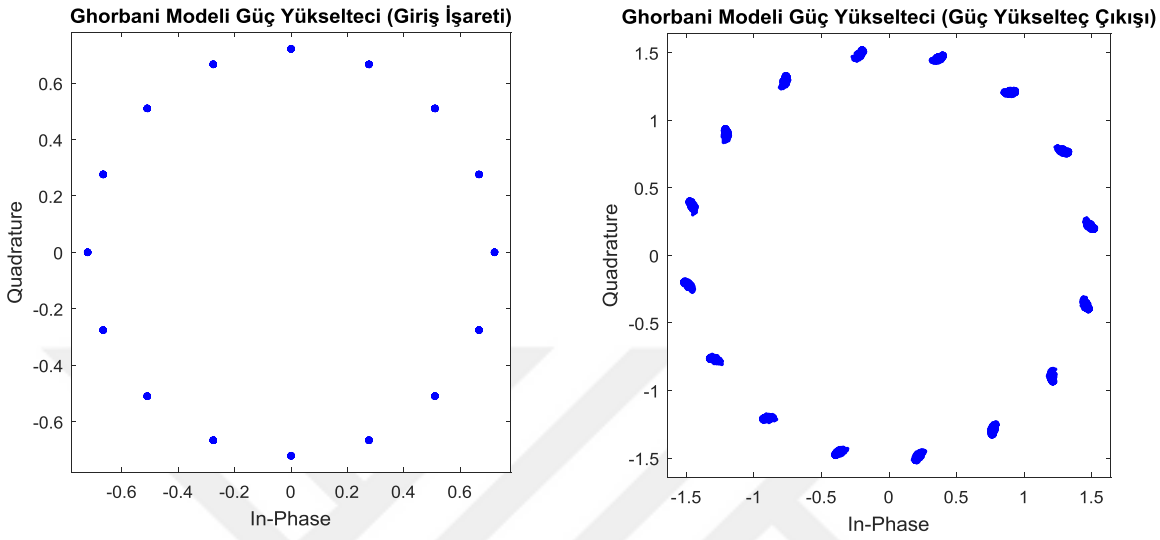
Şekil 6.23. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi



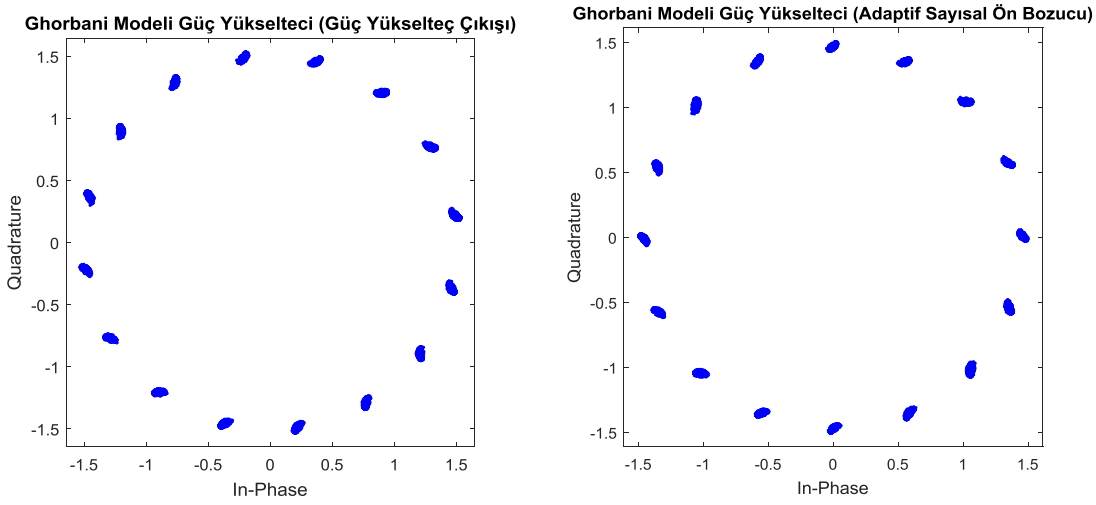
Şekil 6.24 Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi

Ghorbani modeli ile modellenmiş güç yükseltecinin 16-PSK işaret bozulması Şekil 6.25'te, AM/PM bozulmasının kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu ile

iyileştirildiği Şekil 6.26'da görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılmayan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı ve kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 1.8 seviyesinde elde edilmiştir.

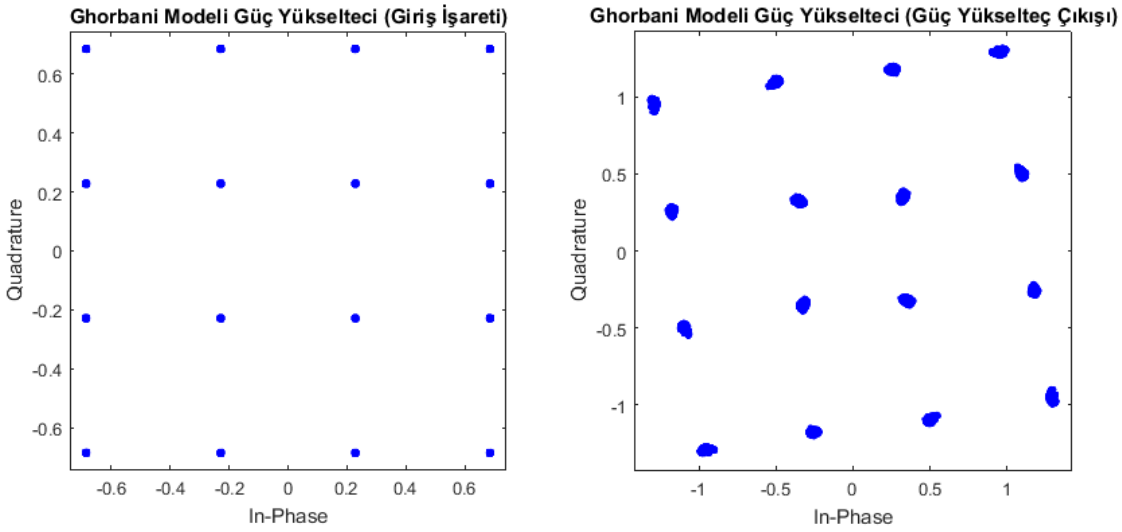


Şekil 6.25. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-PSK kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında İncelenmesi

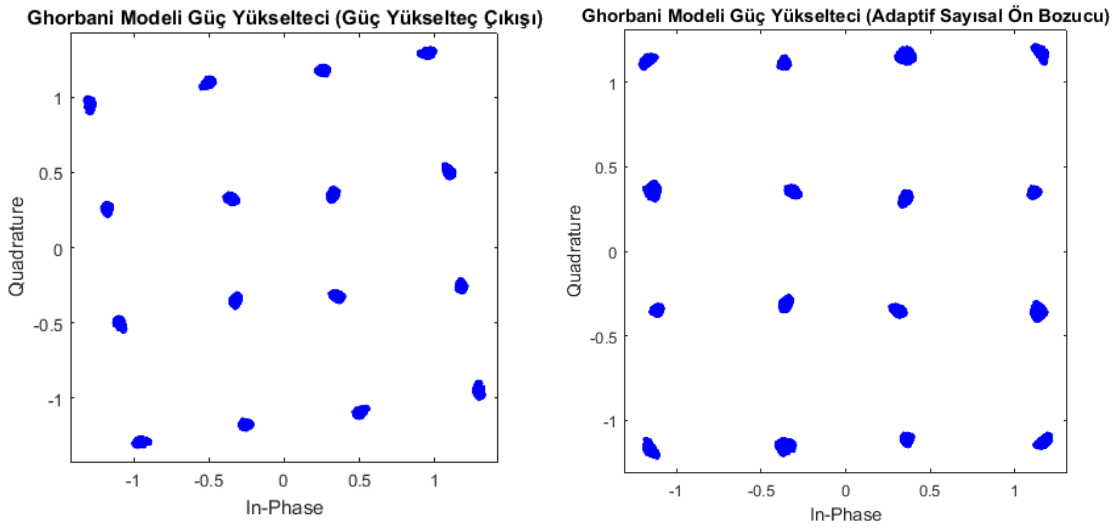


Şekil 6.26. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin QPSK kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi

Ghorbani modeli ile modellenmiş güç yükseltecinin 16-QAM işaret bozulması Şekil 6.27'de, işaret bozulmasının kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu ile iyileştirildiği Şekil 6.28'de görülmüştür. Kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılmayan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 8 iken, kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükselteci çıkışındaki işaretin EVM oranı % 4 seviyesine çekilmiştir.



Şekil 6.27. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının yıldız şemasında incelenmesi



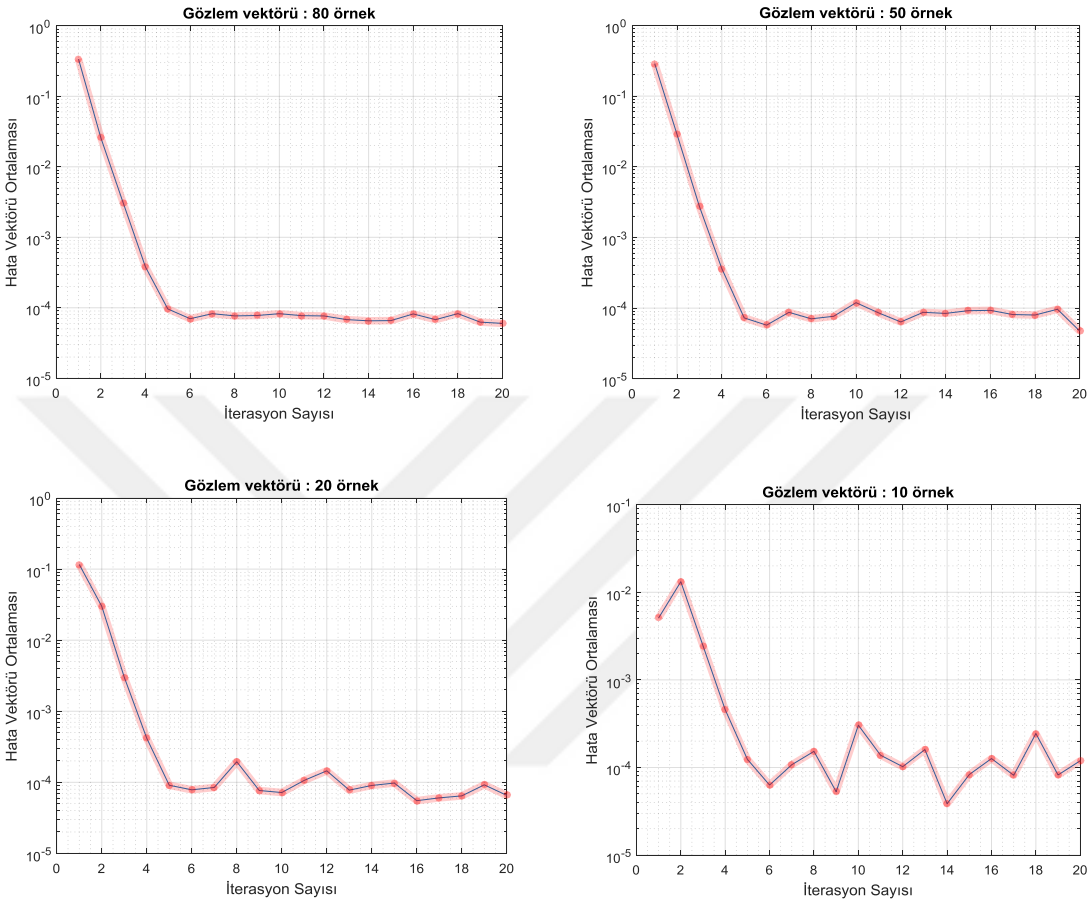
Şekil 6.28. Ghorbani modeli doğrusal olmayan güç yükseltecinin 16-QAM kiplenimli işaret bozmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu ile düzeltilmesinin yıldız şemasında incelenmesi

6.2.5 Gözlem Yolu Vektör Boyutunun ve Yineleme Sayısının Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Performansına Etkisi

Uyarlamalı sayısal ön bozucu, hata vektörü oluşturmak için eleman sayıları aynı olan verici vektörünü ve gözlem yolundan aldığı vektörü kullanır. Hata vektörü kullanılarak ön bozucu katsayıları uyarlanır. Oluşturulan hata vektörüne göre uyarlanan ön bozucu katsayıları her bir iterasyonda tekrar uyarlanarak hata vektörü elemanları en küçük seviyeye getirilmeye çalışılır. Benzetim ortamında hata vektörü elemanlarının yakınsadığı değerlere kaç iterasyonda ulaşılabildiği ve bu duruma verici ve gözlem yolu vektörü eleman sayılarının etkileri incelenmiştir. Benzetim sonuçlarına göre vektör büyüklüğü arttıkça hata vektörünün en düşük seviyeye yakınsamasının daha kararlı hale geldiği Şekil 6.29'da görülmüştür.

İterasyon sayısının ise yakınsamaya belli bir sayıdan sonra etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu inceleme, donanımsal olarak gerçeklenen uyarlamalı sayısal ön bozucular için eğer sabit güç seviyesinde çalışıyorlar ise sürekli olarak gözlem yolu RF elemanlarının, işaret çeviricilerin ve uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme bloklarının çalışıyor olmalarının gerekli olmadığı bilgisini verir. Aktif

elemanların sürekli çalışmıyor olmaları sisteme güç tüketimi ve ön bozuculu verici sisteminin verimliliği için bir avantaj getirir.

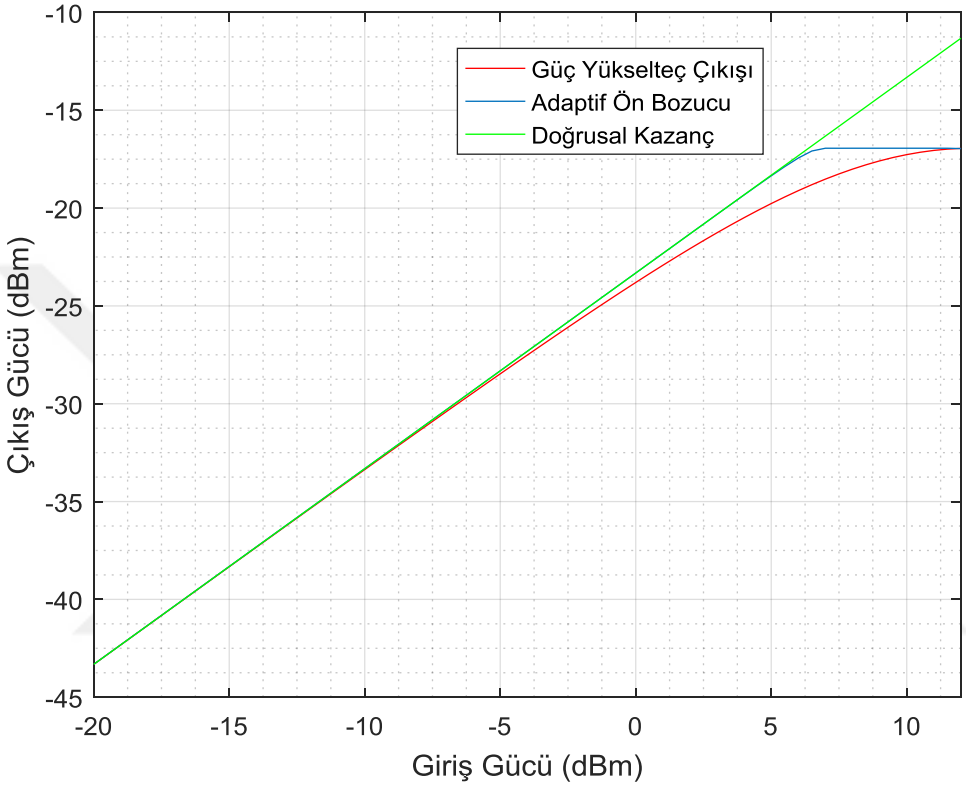


Şekil 6.29. Gözlem vektörü ve iterasyon sayısının uyarlamalı sayısal ön bozucu performansına etkisinin hata vektörü elemanlarının ortalamasıyla incelenmesi

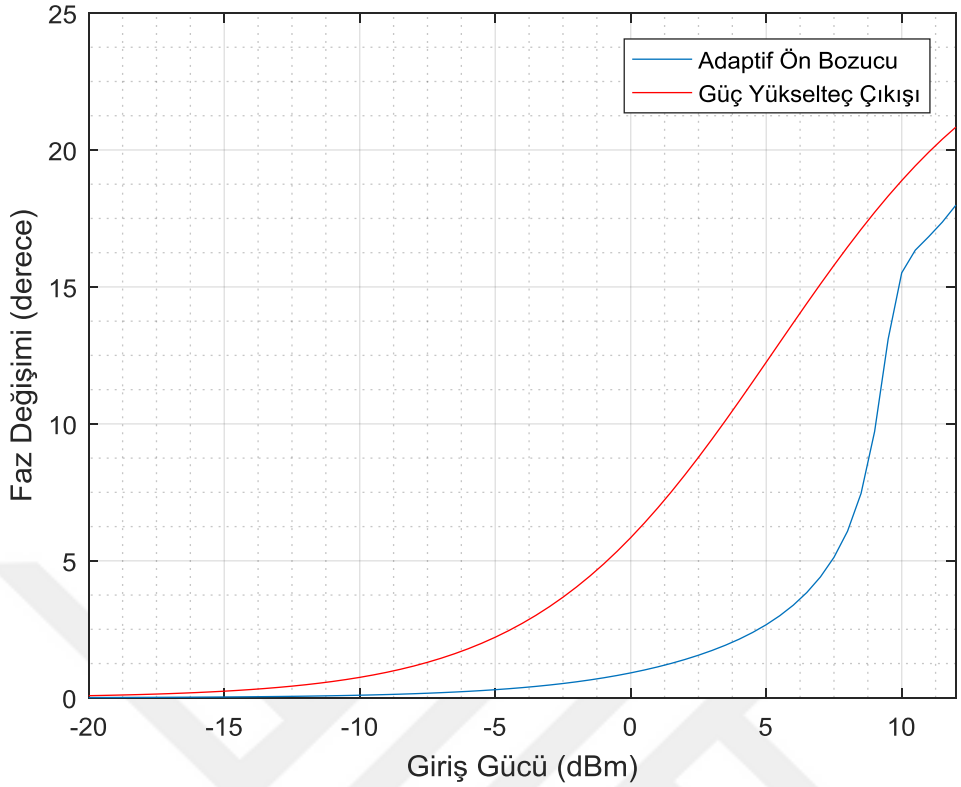
6.2.6 Uyarlamalı Ön Bozucuların SER Oranına Etkisi

Haberleşme sistemlerinin en önemli kalite ölçütlerinden birisi Sembol Hata Oranı (SER)'dır. Uyarlamalı ön bozucu sistemlerinin haberleşme sistemlerinin SER oranına etkisini incelemek için benzetimler yapılmıştır. SER oranı incelenirken ideal şartlarda alınan işaretin bir gürültüye maruz kaldığı kabul edilir. Sembollerin maruz kaldığı gürültü sembollere eklenerek alıcı tarafında alınan sembollerin olduğundan başka bir sembol olarak algılanmasına yol açar. Güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan etkileri de verici çıkışında sembollerin genliklerinde ve

fazlarında bozulmaya yol açar. Benzetimlerde güç yükselteci modeli olarak kullanılan Saleh modelinin sistemin giriş işaret seviyesine göre AM/AM dönüşümü ve uyarlamalı ön bozucu ile AM/AM dönüşümünün doğrusallaştırılması Şekil 6.30'da, AM/PM dönüşümü ve AM/PM dönüşümüne kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucunun getirdiği iyileşme Şekil 6.31'de görülmektedir.

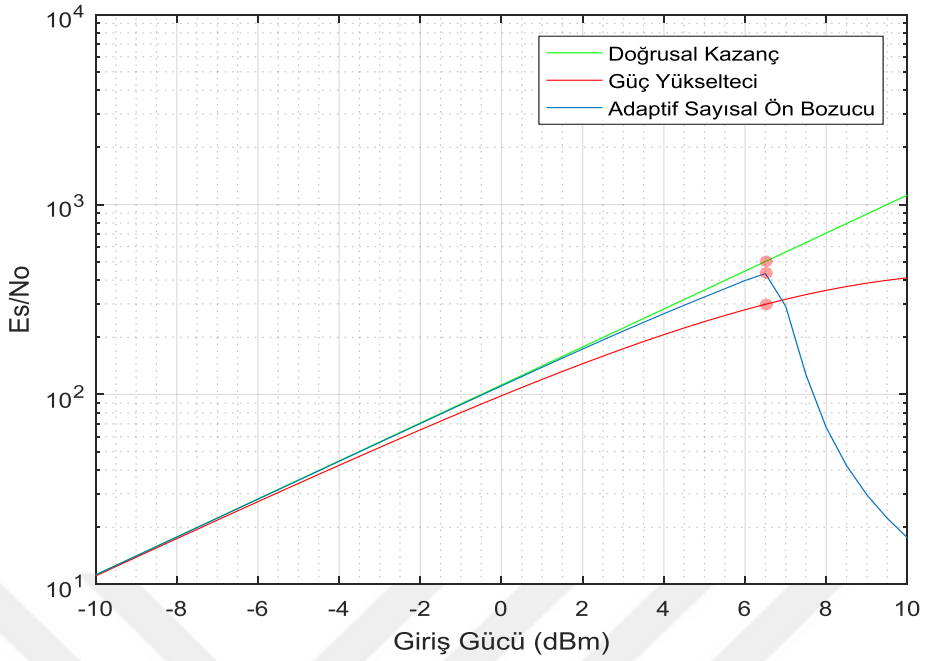


Şekil 6.30. Saleh modeli güç yükseltecinin AM/AM dönüşümü ve uyarlamalı ön bozucunun sağladığı doğrusallaştırma

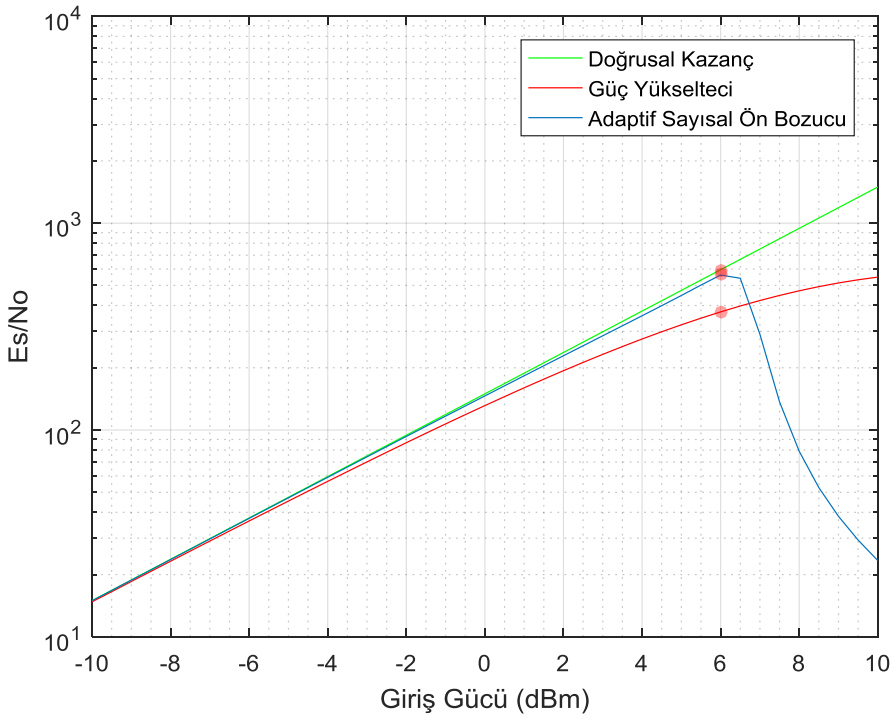


Şekil 6.31. Saleh modeli güç yükseltecinin AM/PM dönüşümü ve uyarlamalı ön bozucunun faz değişimine etkisi

SER oranı sembol enerjisinin sembol başına düşen gürültü enerjine oranının artışına göre sembol hata oranı grafikleriyle incelenebilir. Benzetimlerde güç yükselteçlerinin de SER üzerine olan etkisi incelenmek istenmiştir. Güç yükselteci girişine uygulanan 8-PSK ve 16-PSK kiplenimli işaretlerin güç seviyesinin artışına göre sembol enerjisinin (Es) sembol başına düşen gürültü enerjisine (No) oranı değişimi incelenmiştir. Güç yükselteçlerinin kısılma bölgesine girdiği giriş gücü seviyelerinde verici bant genişliğindeki işaret enerjisinin yan kanallara dağılması sebebiyle sembol enerjisinin sembol başına düşen gürültü enerjine oranı doğrusal kazanç veren sistemden daha düşük seviyededir. Uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan bir sistemde güç yükselteçlerinin doğrusal çalıştığı bölgede bit enerjisinin bit başına düşen gürültü enerjisine oranının doğrusal kazanç veren bir sistemle aynı olduğu görülmüştür. Kısılma bölgesinde ise uyarlamalı ön bozucunun güç yükseltecine göre daha iyi performans sağladığı 8-PSK kiplenimli işaret için Şekil 6.32'de, 16-PSK kiplenimli işaret için Şekil 6.33'te görülmüştür.

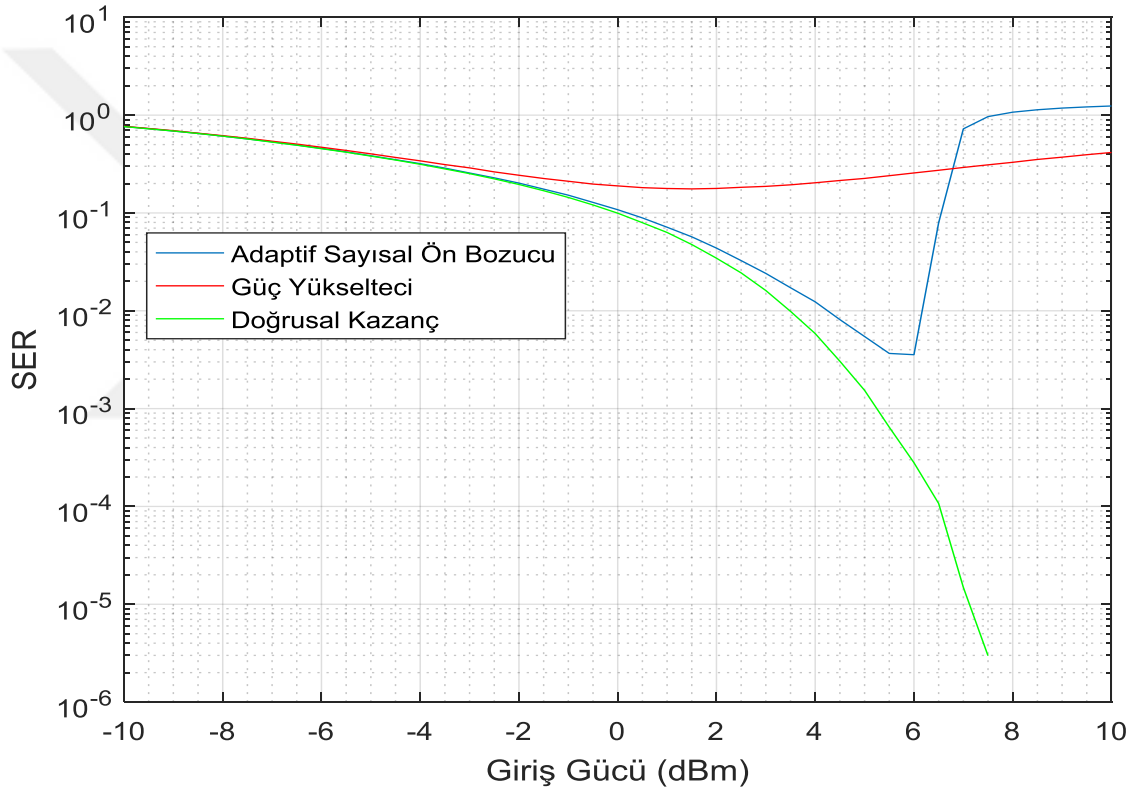


Şekil 6.32. Uyarlamalı sayısal ön bozucunun 8-PSK kiplenimli işaret ile giriş gücüne karşılık sembol enerjisinin gürültü enerjisine oranının etkisi

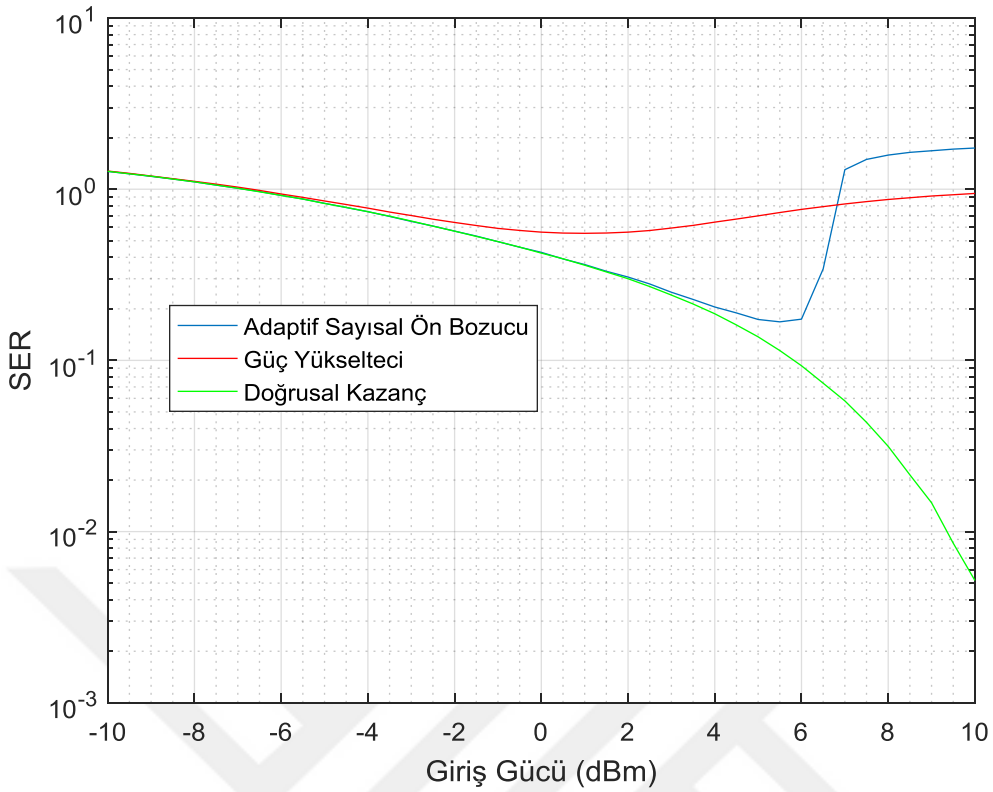


Şekil 6.33. Uyarlamalı sayısal ön bozucunun 16-PSK kiplenimli işaret ile giriş gücüne karşılık sembol enerjisinin gürültü enerjisine oranının etkisi

Benzetimlerde doğrusal kazanç veren bir sisteme göre güç yükselteci ve uyarlamalı sayısal ön bozucunun sistemin SER oranına etkisi karşılaştırılmıştır. Güç yükseltecinin doğrusal olmayan AM/AM bozulması ve AM/PM bozulmasından dolayı güç yükselteci çıkışındaki işaretin doğrusal kazanç veren sistemin çıkışındaki işaretten daha kötü SER performansına sahip olduğu görülmüştür. Uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemin ise doğrusal kazanç veren sistemin SER eğrisini doğrusal olmayan sisteme göre daha fazla takip ettiği 8-PSK kiplenimli işaret için Şekil 6.34'te, 16-PSK kiplenimli işaret için Şekil 6.35'te görülmüştür.

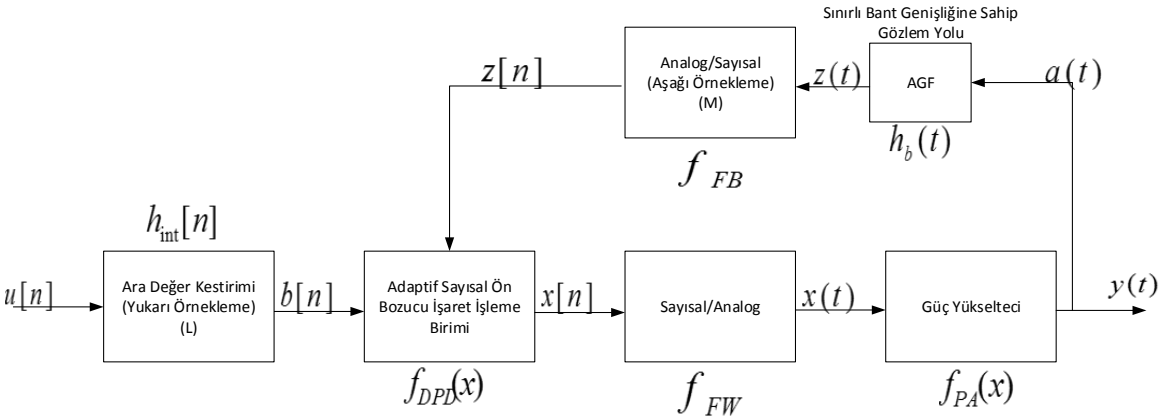


Şekil 6.34. 8-PSK kiplenimli işaretin doğrusal olmayan güç yükseltecinin giriş gücü seviyesine göre SER değişimine uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisi



Şekil 6.35. 16-PSK kiplenimli işaretin doğrusal olmayan güç yükseltecinin giriş gücü seviyesine göre SER değişimine uyarlamalı sayısal ön bozucu etkisi

6.2.7 Gözlem Yolu Bant Genişliğinin ve Örnekleme Oranlarının Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucu Performansına Etkileri



Şekil 6.36. Yukarı ve aşağı örnekleme bloklarının yer aldığı uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısı

Ön bozucular, güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan etkilerinden kaynaklı oluşan ara kiplenim ürünlerini yok ederek sistemin doğrusallaşmasını amaçlarlar. Uyarlamalı yapıdaki ön bozucular da gözlem yollarından aldıkları ara kiplenim ürünlerinden yararlanarak doğrusallaştırma yaparlar. Doğrusal olmayan etkilerden dolayı oluşan bu ara kiplenim ürünleri sayısal ön bozucu işaret işleme bloğuna geri beslenemezse, sistem performansı istenen seviyelere ulaşamaz [29]. Şu ana kadar gözlem hattının sınırsız bant genişliğine sahip olduğunu düşünerek benzetimler yapıldı. Ancak pratikte hat boyunca kullanılan RF elemanların, işaret çeviricilerin ve iletim hatlarının sınırsız bant genişliği koşulunu sağlaması mümkün olmayacaktır.

Vericiden çıkan işaret de yukarı örneklenerek meydana gelen ara kiplenim ürünlerini üzerinde taşıyıp gözlem yolunun sonunda geri beslenmesine imkan vermelidir. Ayrıca yükselteç çıkışı bant genişliği ara kiplenim ürünlerinin derecesi katınca arttığı için eğer verici bant genişliği de yüksek ise gözlem hattında toplam bant genişliğinin en az iki katında örnekleme hızı olan bir analogdan sayısala dönüştürücü elemanı bulunamayabilir. İşaret işleme birimi elemanı da bu kadar yüksek hızlarda çalışamayabilir. Bu sebeple doğrusal olmayan güç yükselteci çıkışından alınan işaret olması gerekenden daha düşük örnekleme oranıyla örneklendiğinde uyarlamalı sayısal ön bozucu performansında düşüşlere neden olacaktır [30].

Bu sebeplerle Şekil 6.36'da verilen yapıya göre benzetim ortamında verici işaretinin yukarı örneklenmesi, gözlem hattının ara kiplenim ürünlerini geçiremeyecek bant genişliğine sahip olması, gözlem hattında kullanılan analogdan sayısala çevirici elemanının ara kiplenim ürünlerini örnekleyemeyecek örnekleme hızlarına sahip olduğu durumlar incelenmiştir [31]. Şekil 6.36'da blok şeması verilen yapıda $\mathrm{u[n]}$ verici çıkışı vektörü, $\mathrm{h_{int}[n]}$ yukarı örneklemeyi gerçekleştiren ara değer kestirim filtresinin transfer fonksiyonudur. Blok şema üzerindeki işaretlerin tabanbant eşlenik modelleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$b[n] = u[n] * h_{int}[n] \qquad (6.2)$$

Ara değer kestirim filtresinin çıkışı olan $\mathrm{b}[\mathrm{n}]$ vektörü uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme biriminin girişidir.

$$x[n] = f_{DPD}(b[n]) \quad (6.3)$$

Uyarlamalı sayısal ön bozucu işaret işleme biriminin $\mathrm{f_{DPD}}$ fonksiyonuna giren $\mathrm{b}[\mathrm{n}]$ işareti fonksiyon çıkışında $\mathrm{x}[\mathrm{n}]$ işaretine dönüşür.

$$x(nT_{FW}) = x[n] \quad (6.4)$$

Sayısal/analog dönüştürücüye giren $\mathrm{x}[\mathrm{n}]$ işareti $\mathrm{f_{FW}}$ örnekleme frekansıyla analoglaştırılarak $\mathrm{x}(\mathrm{t})$ işaretine dönüşür.

$$y(t) = f_{PA}(x(t)) \quad (6.5)$$

Güç yükseltecinin $\mathrm{f_{PA}}$ fonksiyonuna giren $\mathrm{x}(\mathrm{t})$ işaretinden $\mathrm{y}(\mathrm{t})$ işareti meydana gelir.

$$a(t) = y(t)/G \quad (6.6)$$

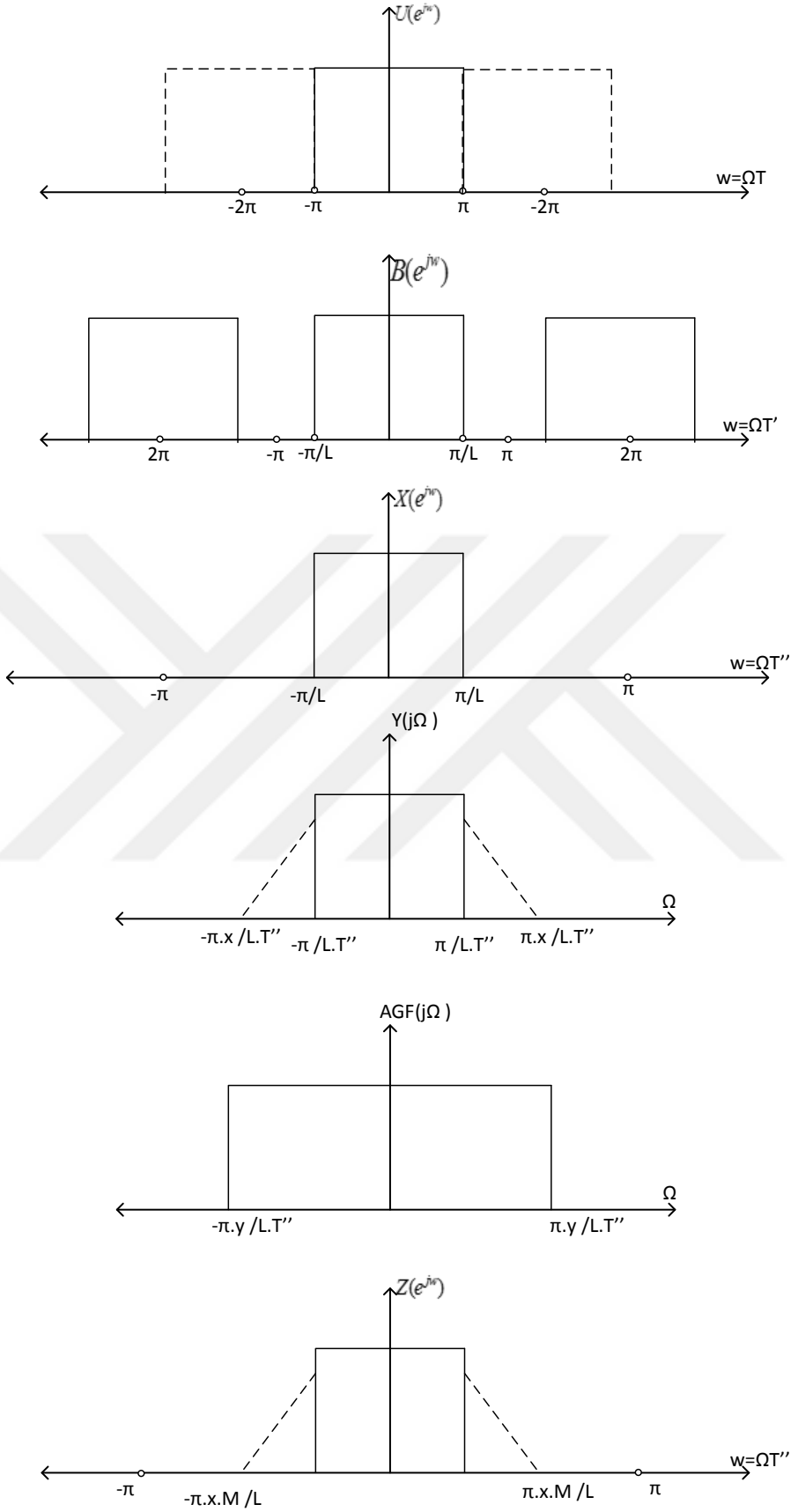
Güç yükselteci çıkışından alınan $\mathrm{y}(\mathrm{t})$ işareti, güç yükseltecinin doğrusal kazancı oranında zayıflatılarak $\mathrm{a}(\mathrm{t})$ işareti elde edilir.

$$z(t) = h_b(t) * a(t) \quad (6.7)$$

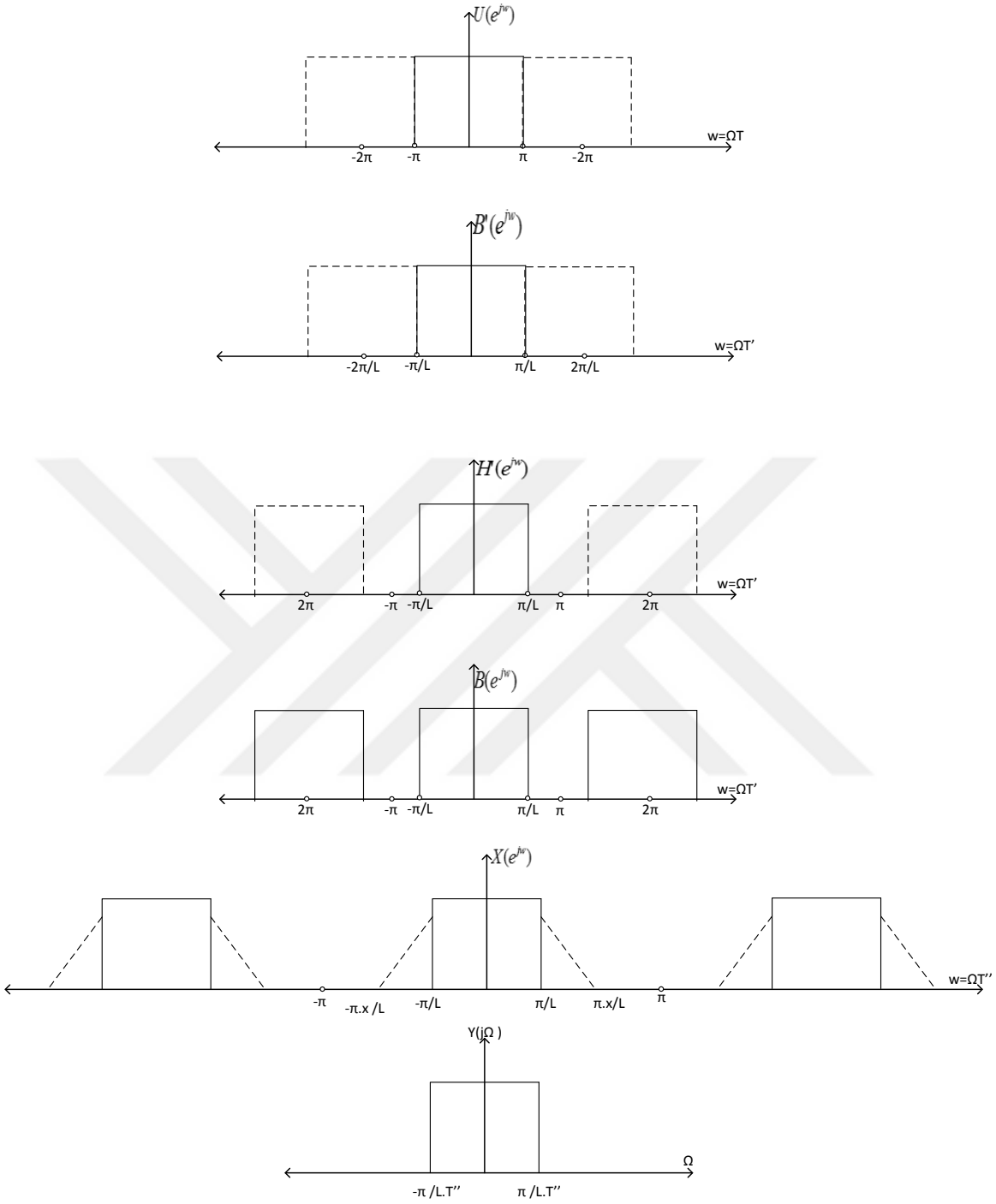
Gözlem yolunun sınırlı bant genişliğine sahip olmasını temsil eden alçak geçirgen filtre transfer fonksiyonu olan $\mathrm{h_b}(\mathrm{t})$ fonksiyonuna giren $\mathrm{a}(\mathrm{t})$ işareti fonksiyon

çıkışında $\mathrm{z(t)}$ işaretine dönüşür. $\mathrm{f_{FB}}$ örnekleme hızına sahip olan analog/sayısal dönüştürücüye giren $\mathrm{z(t)}$ işaretinden sayısal $\mathrm{z[n]}$ işareti elde edilir.

$$z[n] = z(nT_{FB}) \qquad (6.8)$$



Şekil 6.37. Katsayı uyarlama sırasında blok şema üzerindeki frekans görüntüleri



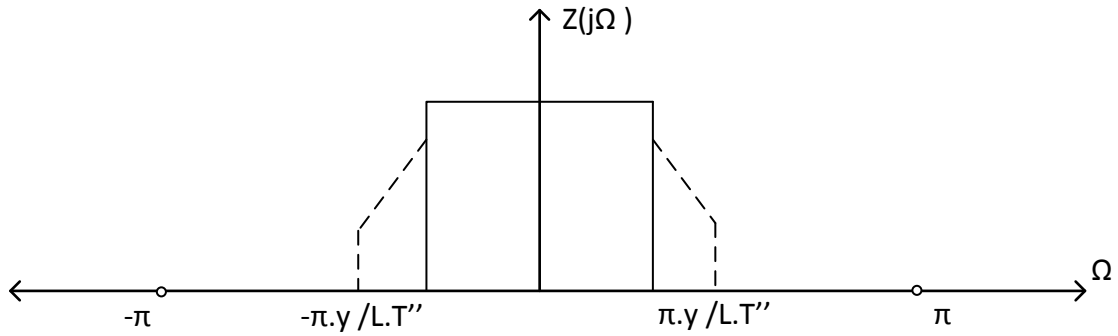
Şekil 6.38. Katsayı uyarlaması gerçekleştikten sonra blok şema üzerindeki frekans görüntüleri

Şekil 6.37'de uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli katsayıları henüz uyarlanmamışken blok şema üzerindeki işaretlerin frekans görüntüleri mevcuttur.

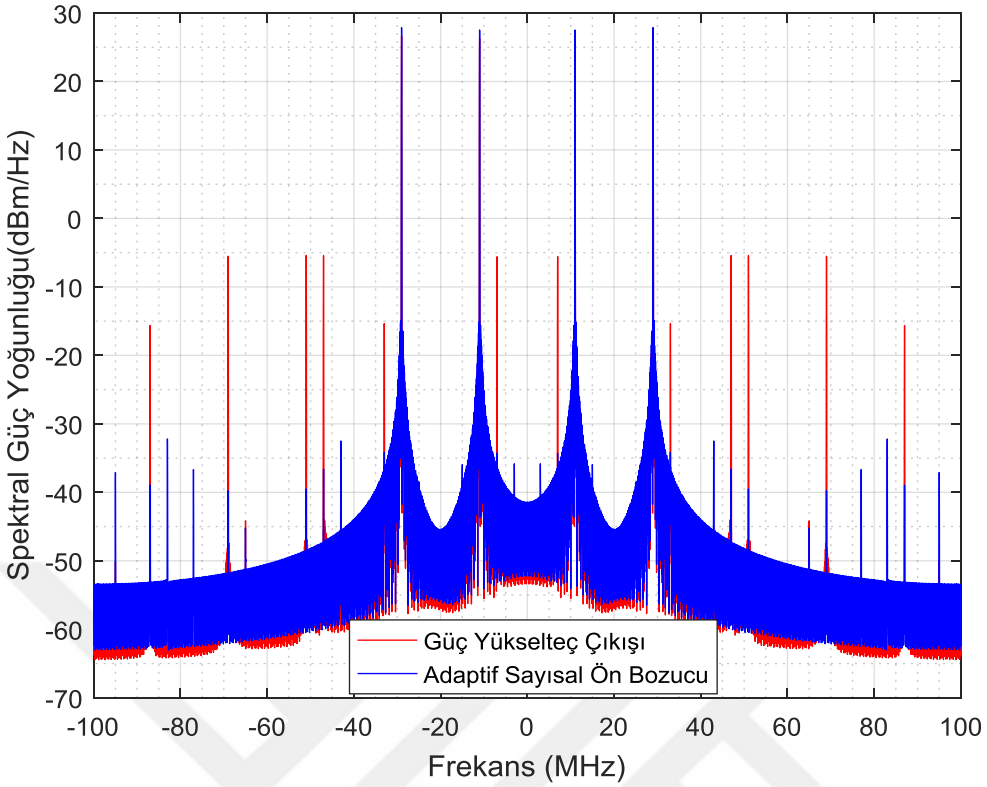
Güç yükselteci, sistem girişinde yukarı örneklenmiş olan u[n] işaretini kullandığı için frekans spektrumu yukarı örnekleme faktörü olan L oranı ile daralmıştır. Ayrıca güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkilerinden dolayı bant genişliği giriş işaretine göre x faktörüyle genişlemiştir. Güç yükselteci çıkışındaki işaret kesim frekansı π.y/L.T'' olan alçak geçirgen filtre ile süzülüp M faktörü ile aşağı örneklenerek sayısallaştırılan y(t) işaretinden z[n] işareti elde edilmiştir. Aşağı örnekleme faktörü olan M faktörü ile z[n] işaretinin bant genişliği artmıştır. Alçak geçirgen filtre kesim frekansının güç yükselteci çıkışında bant genişliği artmış olan işaretin bant genişliğinden dar olduğu durumda z(t) işaretinin frekans spektrumu Şekil 6.39'da görülmektedir.

Şekil 6.38'de uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli katsayıları uyarlandıktan sonraki işaretlerin görüntüleri mevcuttur. Sistem girişinde Nyquist oranı ile örneklenen u[n] işareti ara değer kestirim filtresi ile L oranında yukarı örneklenmiştir. u[n] işareti ara değer kestirim filtresi içinde yüksek frekanslı bileşenlerinden süzülerek b[n] işareti elde edilmiştir. b[n] işareti yukarı örnekleme faktörü olan L oranında daralmıştır. Uyarlamalı sayısal ön bozucu bloğuna giren b[n] işaretinin bant genişliği ön bozucu tarafından doğrusal olmama derecesine göre değişen x oranı ile genişletilmiştir.

Yukarı örnekleme ile işaret bandının daralması sistem üzerinde yer alan RF elemanların tasarımını kolaylaştırmaktadır. Aşağı örnekleme ise yüksek hızlı analog/sayısal dönüştürücü elemanı kullanılmadığı durumda gerçekleşen durumun sayısal eşleniği olarak benzetimlerde yer almıştır.

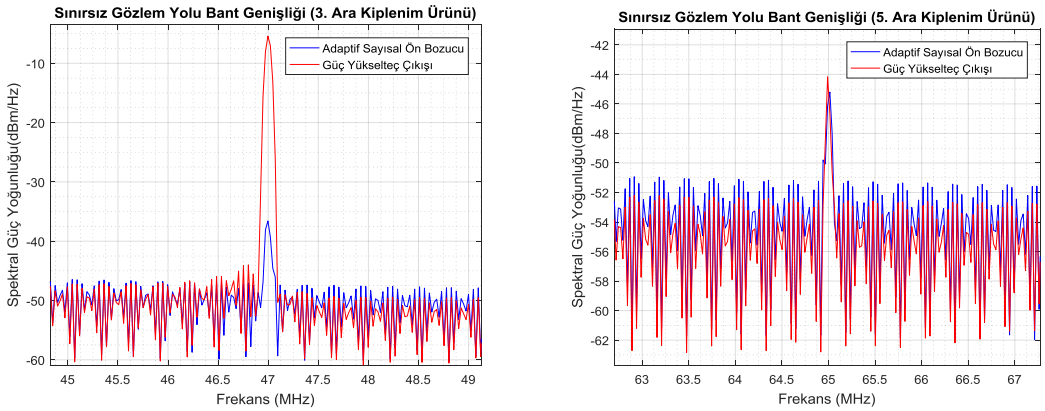


Şekil 6.39. Filtre kesim frekansı işaret bandından dar olduğu durumda filtre çıkışının frekans spektrumu



Şekil 6.40. Sınırlı olmayan gözlem yoluna sahip uyarlamalı sayısal ön bozucunun etkisinin iki ton işaret ile incelenmesi

Şekil 6.40'ta bant genişliği sınırlı olmayan uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemin girişine 11 MHz ve 29 MHz frekanslarında iki sinüssel işaret uygulanmıştır. Güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkileri ile oluşan 47 MHz ve 65 MHz frekanslarındaki 3. ve 5. ara kiplenim ürünleri oluşmuştur. Uyarlamalı sayısal ön bozucu ile frekans spektrumunun daha temiz olduğu görülmüştür.



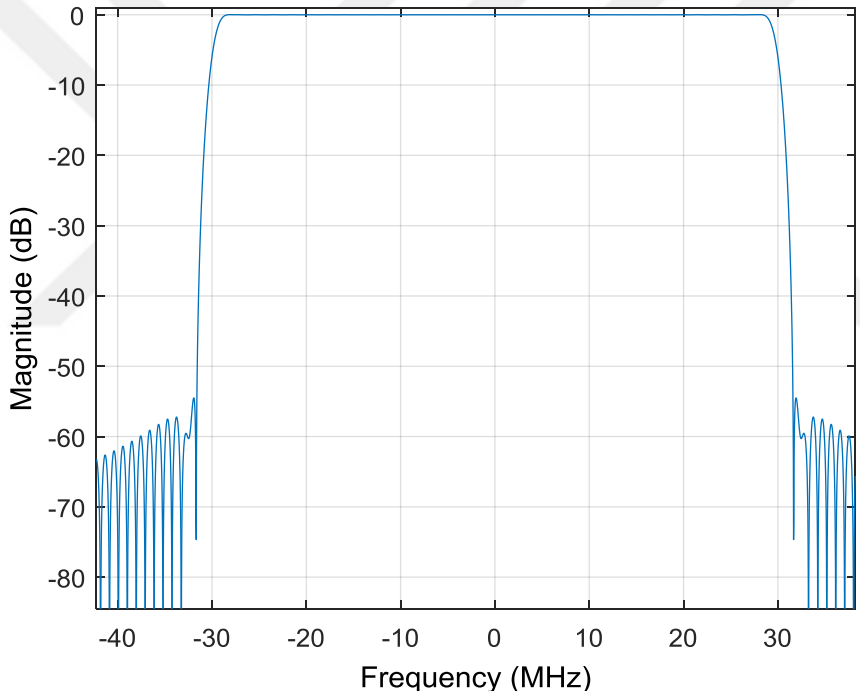
Şekil 6.41. Uyarlamalı sayısal ön bozucu sınırsız gözlem yolu bant genişliğinin 3. ara kiplenim ürünü ve 5. ara kiplenim ürünlerinin bastırmasına etkisi

Şekil 6.41'de bant genişliği sınırlı olmayan uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükseltecinin doğrusal olmayan etkileri ile oluşan 47 MHz ve 65 MHz frekanslarındaki 3. ve 5. ara kiplenim ürünlerinin seviyesindeki değişim görülmektedir. 3. ara kiplenim ürünü 30 dB bastırılmıştır, 5. ara kiplenim ürünü seviyesinde ise 2 dB bastırılma gerçekleşmiştir.

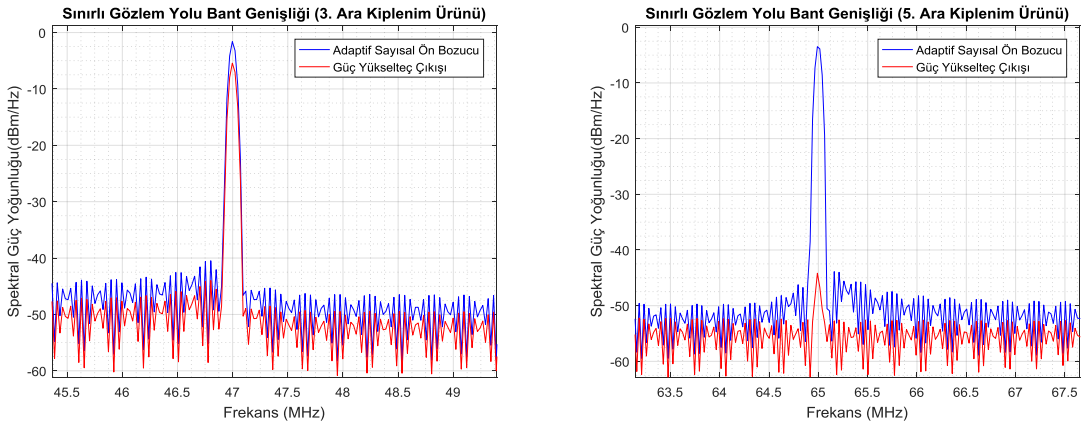
Bant genişliği sınırlı olmayan uyarlamalı sayısal ön bozucunun girişinde yer alan ara değer kestirim filtresi ile yukarı örnekleme yapıldığı durumda ve gözlem yolunda kullanılan analog/sayısal çeviricinin farklı örnekleme frekanslarında çalıştığı durumda uyarlamalı sayısal ön bozucu performansı incelenmek istenmiştir. Sistem girişinde yer alan f frekansıyla örneklenmesi gereken u[n] işareti için yukarı örnekleme yapıldığı durumda sayısal/analog dönüştürücü tarafından u[n] işaretinin örneklenmesi gereken oran artar. Sayısal/analog dönüştürücü örnekleme frekansı yukarı örnekleme faktörü ile arttırılmıştır. Çizelge. 6.1'de yukarı ve aşağı örnekleme oranlarına bağlı olarak sistem performansının değişimi ara kiplenim ürünlerinin seviyesi ile incelenmiştir. Çizelge. 6.1'de yukarı örnekleme ile 3. ara kiplenim ürünü seviyesinin bastırılabileceği görülmüştür. Gözlem yolunda kullanılan analog/sayısal dönüştürücünün örnekleme frekansının belirli bir oranın altına indiğinde sistem performansının düştüğü de görülmüştür. Sistem tasarımı için en uygun durumun 2 faktörü ile yukarı örnekleme yapılıp, analog/sayısal dönüştürücü ve sayısal analog dönüştürücülerin çalışma frekanslarının 2 katına çıkarıldığı durum olduğu söylenebilir.

Yukarı Örnekleme Oranı	Sayısal/analog dönüştürücü örnekleme frekansı	Analog/sayısal dönüştürücü örnekleme frekansı	3. Ara Kiplenim Ürünü Seviyesi (dBm)	5. Ara Kiplenim Ürünü Seviyesi (dBm)
1	f	f	-36.5	-44
2	2f	2f	-50	-45
2	2f	f	-36.5	-45
3	3f	3f	-50	-45
4	4f	4f	-50	-45
4	4f	2f	-50	-45
5	5f	5f	-50	-45

Çizelge. 6.1. Yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının ara kiplenim ürünleri seviyesine etkisi



Şekil 6.42. 3. ve 5. derece ara kiplenim ürünlerinin geçemeyeceği gözlem yolunun frekans cevabı



Şekil 6.43. Uyarlamalı sayısal ön bozucu sınırlı gözlem yolu bant genişliğinin 3. ve 5. ara kiplenim ürünlerinin bastırmasına etkisi

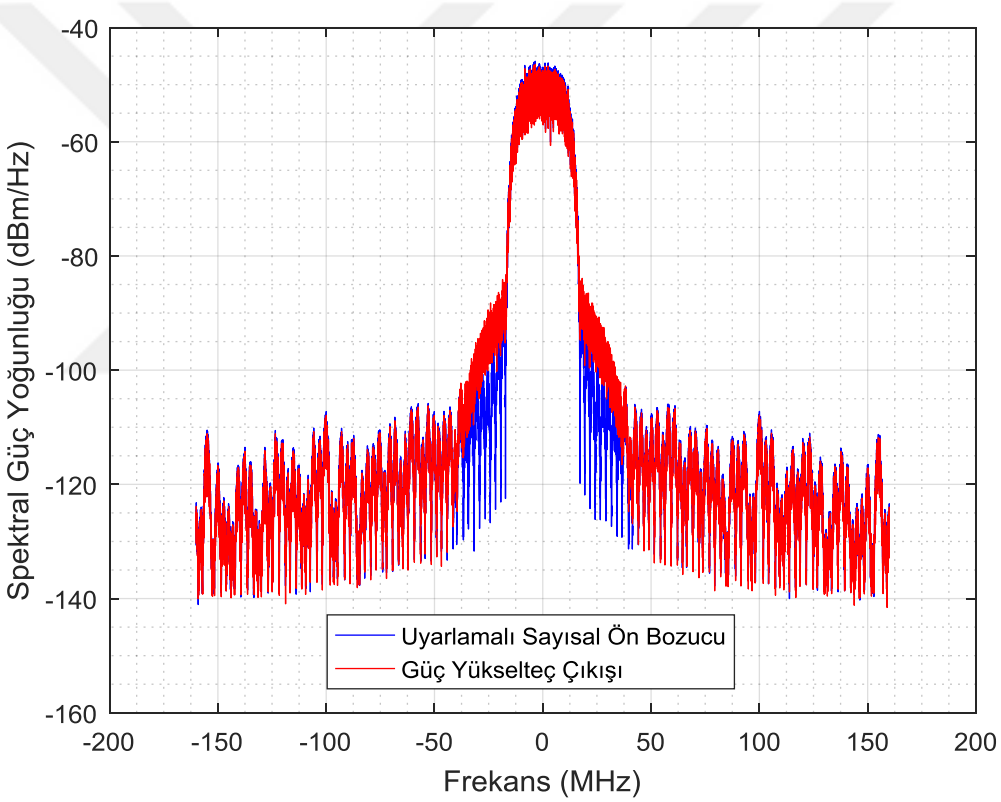
Yukarı Örnekleme Oranı	Sayısal/analog dönüştürücü örnekleme frekansı	Analog/sayısal dönüştürücü örnekleme frekansı	3. Ara Kiplenim Ürünü Seviyesi (dBm)	5. Ara Kiplenim Ürünü Seviyesi (dBm)
1	f	f	-1.5	-3.8
2	2f	2f	-8.5	0
2	2f	f	-2	-4
3	3f	3f	-10	0
4	4f	4f	-10.5	0
4	4f	2f	-9	0
5	5f	5f	-11	0

Çizelge. 6.2. Sınırlı bant genişliğinde yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının ara kiplenim ürünleri seviyesine etkisi

Şekil 6.42'de frekans cevabı görülen hem 3. dereceden hem de 5. dereceden ara kiplenim ürünlerinin geçemediği gözlem hattı için 3. ara kiplenim ürünü yaklaşık 4 dB, 5. ara kiplenim ürünü ise 40 dB kuvvetlendirildiği Şekil 6.43'de görülmüştür. Gözlem yolu bant genişliği 3. ve 5. ara kiplenim ürünlerini geçiremeyecek genişlikte iken Çizelge. 6.2'de yukarı ve aşağı örnekleme oranlarına bağlı olarak sistem performansının değişimi ara kiplenim ürünlerinin seviyesi ile incelenmiştir.

Benzetimler bant genişliği 20 MHz olan QPSK kiplenimli işaret ile tekrarlanmıştır. İlk olarak sınırsız bant genişliğine sahip gözlem yolu ile benzetimler yapılmıştır.

Şekil 6.44'te kapalı döngü uyarlamalı sayısal ön bozucunun yan kanal tepe değer bastırmasının 5 dB olduğu görülmüştür. Uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılmayan sistemde güç yükselteci çıkışında % 1 seviyesinde olan EVM oranı uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde %0.15 seviyesine çekilmiştir. Gözlem yolu bant genişliği sınırlı değilken Çizelge. 6.3'te yukarı ve aşağı örnekleme oranlarına bağlı olarak sistem performansının değişimi EVM oranları ile incelenmiştir. Gözlem yolu bant genişliği yeterince geniş olduğu durumda yukarı örneklemenin sistem performansını iyileştirdiği görülmüştür. Gözlem yolunda kullanılan analog/sayısal çeviricinin de yüksek örnekleme frekanslarında çalışmasının gerekli olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

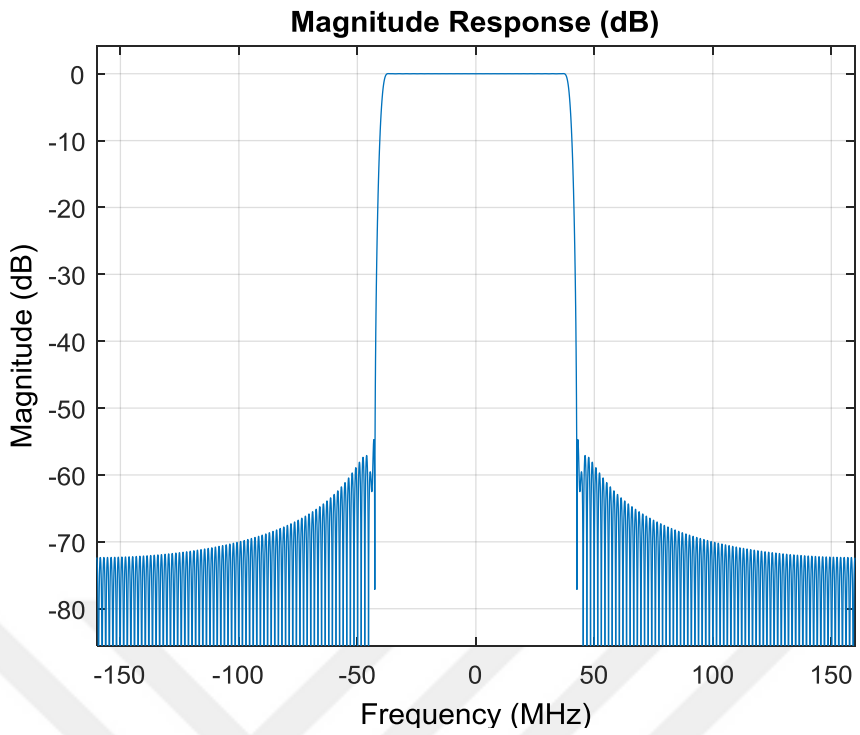


Şekil 6.44. 20 MHz bant genişliğine sahip QPSK kiplenimli işaretin uyarlamalı sayısal ön bozucu ile yan kanal bastırması (QPSK, 20 Msps, α =0.65)

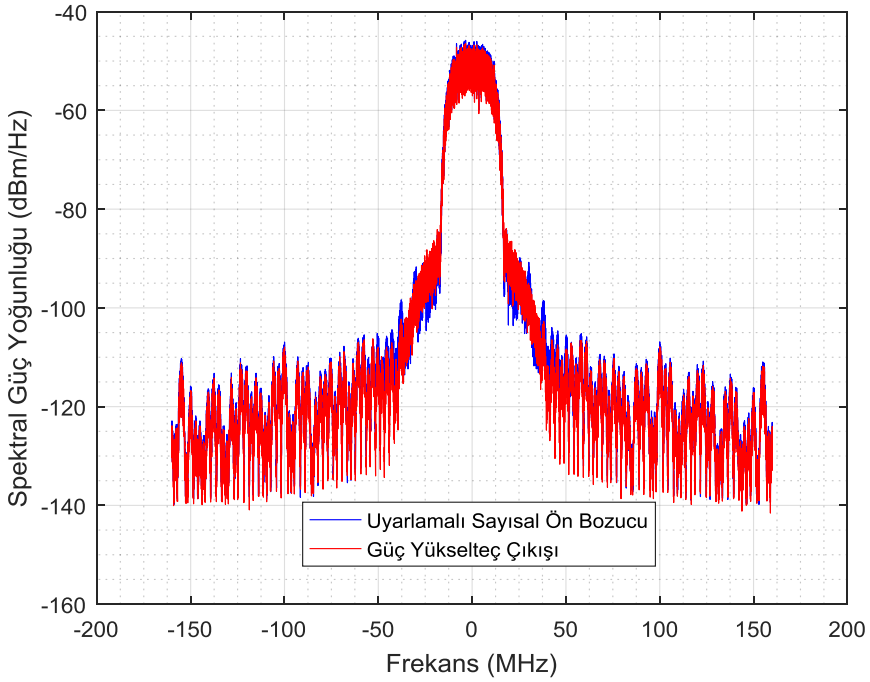
Yukarı Örnekleme Oranı	Sayısal/analog dönüştürücü örnekleme frekansı	Analog/sayısal dönüştürücü örnekleme frekansı	EVM (%)
1	f	f	0.15
2	2f	2f	0.012
2	2f	f	0.012
3	3f	3f	0.012
4	4f	4f	0.012
4	4f	2f	0.012
5	5f	5f	0.012

Çizelge. 6.3. Yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının EVM üzerine etkisi

Şekil 6.45'te frekans cevabı görülen gözlem yolunun bant genişliği sınırlı olduğu durumda sistemin yan kanal tepe değerini yaklaşık 2 dB kuvvetlendirdiği Şekil 6.46'da görülmüştür. Gözlem yolu bant genişliği sınırlı olmayan uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde güç yükselteci çıkışında % 0.15 seviyesinde olan EVM oranı, gözlem yolu bant genişliği sınırlı olan uyarlamalı sayısal ön bozucu kullanılan sistemde % 0.25 seviyesine çıkmıştır. Gözlem yolu bant genişliği sınırlı olduğunda Çizelge. 6.4'te yukarı ve aşağı örnekleme oranlarına bağlı olarak sistem performansının değişimi EVM oranları ile incelenmiştir. İki ton işaretlerle yapılan benzetimlerde görüldüğü gibi, gözlem yolu bant genişliği ara kiplenim ürünlerini geçiremeyecek kadar dar tutulduğunda yukarı ve aşağı örneklemenin performans iyileşmesine belirgin seviyede katkı sağlamadığı görülmüştür.



Şekil 6.45. QPSK kiplenimli işaret için 5. ara kiplenim ürününün geçemeyeceği gözlem yolu frekans cevabı



Şekil 6.46. 20 MHz bant genişliğine sahip QPSK kiplenimli işaretin sınırlı gözlem yolu olan uyarlamalı sayısal ön bozucu performansı (QPSK, 20 Msps, α =0.65)

Yukarı Örnekleme Oranı	Sayısal/analog dönüştürücü örnekleme frekansı	Analog/sayısal dönüştürücü örnekleme frekansı	EVM (%)
1	f	f	0.25
2	2f	2f	0.22
2	2f	f	0.22
3	3f	3f	0.22
4	4f	4f	0.21
4	4f	2f	0.21
5	5f	5f	0.21

Çizelge. 6.4. Sınırlı Bant genişliğine sahip gözlem yolu ile yukarı ve aşağı örnekleme oranlarının EVM üzerine etkisi

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında güç yükselteçlerinin doğrusal olmayan etkilerinden kaynaklanan haberleşme kalitesini düşüren durumlar incelenmiştir. Doğrusal olmayan bozucu güç yükselteci etkilerini haberleşme sistemleri üzerinde görmemek için kullanılan doğrusallaştırma teknikleri araştırılmıştır. Doğrusallaştırma tekniklerinden biri olan sayısal ön bozucu metodu üzerine yoğunlaşılmıştır.

Çalışmalarda kullanılan doğrusal olmayan güç yükselteci modelleri araştırılmış ve bu modeller benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

Sayısal ön bozucu tekniklerinden biri olan taramalı tablo yöntemiyle USRP üzerinde doğrusallaştırıcı tasarımı yapılmıştır, tasarımın kullanılan güç yükseltecinin AM/AM bozulmasını doğrusallaştırdığı görülmüştür.

Sayısal ön bozucu tekniklerinden olan uyarlamalı olmayan sayısal ön bozucu ve uyarlamalı sayısal ön bozucu benzetimleri yapılmıştır. Bu iki metodun birbiri ile karşılaştırılması haberleşme kalite ölçütlerinden olan ACLP parametresi üzerinden yapılıp, uyarlamalı yapının uyarlamalı olmayan yapıya olan üstünlüğü görülmüştür.

Uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısının güç yükselteci modellerinin doğrusal olmayan AM/AM dönüşümleri üzerinde doğrusallaştırma yapabildiği görülmüştür. Güç yükselteci modellerinin AM/PM bozulmalarını da daha aza indirdiği gözlemlenmiştir.

Yapılan benzetimlerde uyarlamalı sayısal ön bozucu devresinin sürekli çalışıyor olmasının gerekli olmadığı fark edilmiştir. Uyarlamalı sayısal ön bozucu yapısının belirli zaman aralıklarında kısa süre çalıştırılmasının uyarlamalı sayısal ön bozucu modeli katsayılarının uyarlanabilmesi için yeterli olduğu görülmüştür. Bu durum güç tüketimi ve sistemin verimliliği açısından önemli bir sonuçtur.

Uyarlamalı sayısal ön bozucu tasarım ve donanım parametreleri olan sınırlı gözlem yolu bant genişliği, verici yolunda yukarı örnekleme, alıcı yolunda aşağı örnekleme durumlarının doğrusallaştırıcı performansına etkileri incelenmiştir. Sınırlı gözlem yolu bant genişliğinin doğrusallaştırıcı performansını bozduğu görülmüştür. Gözlem yolu bant genişliği sınırlı olmadığında yukarı örneklemenin

sistem performansını iyileştirdiği de çıkarılan sonuçlardandır. Gözlem yolunda kullanılan analog/sayısal çeviricinin yüksek örnekleme frekanslarında çalışmasının sistem performansının iyileşmesine belirgin bir katkı sağlamadığı da görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] V. J. Thottuvelil, T. G. Wilson, and H. A. Owen, “High-Frequency Measurement Techniques for Magnetic Cores,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 41–53, **1990.**

[2] I. J. Bahl, *Fundamentals of RF Fundamentals of RF and Microwave*. 2009.

[3] F. Ghannouchi and O. Hammi, “Behavioral modeling and predistortion,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 10, no. 7, pp. 52–64, **2009.**

[4] W. Van Moer, Y. Rolain, and A. Geens, “Measurement-based nonlinear modeling of spectral regrowth,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 6, pp. 1711–1716, **2001.**

[5] J. Kim and K. Konstantinou, “Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory,” *Electronics Letters*, vol. 37, no. 23. pp. 1417–1418, **2001.**

[6] D. Falconer, T. Kolze, Y. Leiba, and J. Liebetreu, “Proposed System Impairment Models,” *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*. **2000.**

[7] J. Wood, *Behavioral Modeling and Linearization of RF Power Amplifiers*. Artech House. **2014.**

[8] A. A. M. Saleh, “Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 29, no. 11, pp. 1715–1720, **1981.**

[9] J. H. K. Vuolevi, T. Rahkonen, and J. P. A. Manninen, “Measurement technique for characterizing memory effects in RF power amplifiers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 8, pp. 1383–1389, **2001.**

[10] C. Rapp, “Effects of HPA-Nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM-Signal for a Digital Sound Broadcasting Signal,” *Second European Conference on Satellite Communications*. pp. 179–184, **1991.**

[11] Y. Ye, T. Liu, T. Xu, and F. M. Ghannouchi, “Analysis and decomposition of the nonlinearities in RF power amplifiers,” in *2010 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2010*, **2010.**

[12] J. K. Cavers, “Optimum indexing in predistorting amplifier linearizers,” *1997 IEEE 47th Veh. Technol. Conf. Technol. Motion*, vol. 2, pp. 676–680, **1997.**

[13] R. Marsalek, “Contributions to the power amplifier linearization using digital baseband adaptive predistortion,” *Docteur L’Universite Marne La Val.*, **2003.**

[14] R. N. Braithwaite, *General principles and design overview of digital predistortion*. **2011.**

[15] L. Ljung, *System Identification: Theory for User*, vol. 11, no. 3. **1987.**

[16] R. J. P. de Figueiredo, “The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems,” *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 3, pp. 316–317, **1982.**

[17] F. M. Ghannouchi, O. Hammi, and M. Helaoui, *Behavioral Modeling and Predistortion of Wideband Wireless Transmitters*. **2015.**

[18] D. Psaltis, A. Sideris, and A. A. Yamamura, “A multilayered neural network controller,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 17–21, **1988.**

[19] C. Eun and E. J. Powers, “A new volterra predistorter based on the indirect learning architecture,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, no. 1, pp. 223–227, **1997.**

[20] L. Ding, G. T. Zhou, D. R. Morgan, Z. Ma, J. S. Kenney, J. Kim, and C. R. Giardina, “A Robust Digital Baseband Predistorter Constructed Using Memory Polynomials,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 1, pp. 159–165, **2004**.

[21] L. D. L. Ding, G. T. Zhou, D. R. Morgan, Z. M. Z. Ma, J. S. Kenney, J. K. J. Kim, and C. R. Giardina, “Memory polynomial predistorter based on the indirect learning architecture,” *Glob. Telecommun. Conf. 2002. GLOBECOM ’02. IEEE*, vol. 1, pp. 967–971, **2002**.

[22] G. Erdogdu, “Linearization of RF Power Amplifıers By Using Memory Polynomial Digital Predistortion Technique,” M.S. Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, **2012**.

[23] B. Widrow and M. Hoff, “Adaptive switching circuits.,” *1960 IRE WESCON Convention Record*, no. 4. pp. 96–104, **1960**.

[24] J. K. Cavers, “The Effect of Quadrature Modulator and Demodulator Errors on Adaptive Digital Predistorters for Amplifier Linearization,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 456–466, **1997**.

[25] I. Teikari, J. Vankka, and K. Halonen, “Digitally controlled RF predistortion with digital predictor for feedforward delay compensation,” in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2005, vol., pp. 2043–2046, **2005**.

[26] R. Marsalek and M. Pospisil, “Evaluation of digital predistortion using the USRP N200 software defined radio transceiver,” *NORCHIP 2014 - 32nd NORCHIP Conf. Nord. Microelectron. Event*, no. 1, **2015**.

[27] A. Zhu, P. J. Draxler, J. J. Yan, T. J. Brazil, D. F. Kimball, and P. M. Asbeck, “Open-loop digital predistorter for RF power amplifiers using dynamic deviation reduction-based volterra series,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 7, pp. 1524–1534, **2008**.

[28] W. A. Frank, “Sampling requirements for volterra system identification,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 3, no. 9, pp. 266–268, **1996**.

[29] C. Yu, L. Guan, E. Zhu, and A. Zhu, “Band-limited volterra series-based digital predistortion for wideband RF power amplifiers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 12, pp. 4198–4208, **2012**.

[30] N. Hammler, Y. C. Eldar, and B. Murmann, “Low-rate identification of memory polynomials,” in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 1034–1037, **2014**.

[31] Y. M. Zhu, “Generalized Sampling Theorem,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Analog Digit. Signal Process.*, vol. 39, no. 8, pp. 587–588, **1992**.

EKLER

EK 1: Microsemi AML612P4401 Veri Föyü

Microsemi

5.0 - 12.0 GHz

Octave Band Amplifiers to 40.0 GHz

Model Number	Frequency Range (GHz)	Gain (dB min)	Flatness (± dB max)	Noise Figure (dB max)	P-1dB (dBm min)	Output IP3 (dBm typ.)	VSWR In/Out (nom)	DC Current (mA nom)	Outline
ALS0612-20-15	6.0 - 12.0	20	1	2.5	15	25	2.0:1	120	STC-2
ALS0612-29-15	6.0 - 12.0	29	1.5	2.5	15	25	2.0:1	160	STC-3
AML612L3402	6.0 - 12.0	30	1.5	2.3	15	25	1.8:1	170	K4
ALS0612-40-15	6.0 - 12.0	40	1.5	2.5	15	25	2.0:1	225	STC-2
AML612L4602	6.0 - 12.0	41	2	2.3	15	25	1.8:1	230	K5
AML612P4602	6.0 - 12.0	46	2	2.5	15	25	1.8:1	230	K5
AML612L1203	6.0 - 12.0	8	0.5	4	17	27	1.8:1	90	K2
AML612L2203	6.0 - 12.0	18	1	3	17	27	1.8:1	150	K3
AML612L3403	6.0 - 12.0	28	1.5	2.5	17	27	1.8:1	190	K4
AML612L4501	6.0 - 12.0	38.5	2	2.5	17	27	1.8:1	250	K5
AML612P1001	6.0 - 12.0	10	0.5	3.5	20	30	1.8:1	80	K2
AML612P2201	6.0 - 12.0	21	1	2.5	20	30	1.8:1	190	K3
AML612P2801	6.0 - 12.0	28	2	1.6	20	30	2.0:1	200	K4
AML612P3401	6.0 - 12.0	31	1.5	2.5	20	30	1.8:1	180	K4
AML612P4501	6.0 - 12.0	42	2	2.5	20	30	1.8:1	240	K5
AML612P2401	6.0 - 12.0	24-26	0.5	3	20	30	1.5:1	250	K4
ALT0612-24-23	6.0 - 12.0	24	1.5	4	23	30	2.0:1	400	STC-4
ALT0612-41-23	6.0 - 12.0	41	1.5	4	23	30	2.0:1	525	STC-5
AML612P1101	6.0 - 12.0	11	0.5	5	25	35	1.8:1	150	K2
AML612P2301	6.0 - 12.0	20	1	2.5	25	35	1.8:1	290	K3
AML613P2301	6.0 - 13.0	20	1	2.5	25	35	1.8:1	290	K3
AML612P3501	6.0 - 12.0	31	1.5	2.5	25	35	1.8:1	250	K4
AML612P4502	6.0 - 12.0	42	2	2.5	25	35	1.8:1	300	K5
AML612P1002	6.0 - 12.0	9	0.5	5	27	37	1.8:1	300	K2
AML612P2001	6.0 - 12.0	19	1	4.5	27	37	1.8:1	350	K3
AML612P3201	6.0 - 12.0	30	1.5	2.5	27	37	1.8:1	400	K4
AML612P4401	6.0 - 12.0	40	2	2.5	27	37	1.8:1	450	K5
AML612P1501	6.0 - 12.0	15	1	6	30	39	1.8:1	750	K3
AML612P2202	6.0 - 12.0	22	1.5	5	30	39	1.8:1	850	K4
APA0612-30-30	6.0 - 12.0	30	2	5	30	37	2.0:1	850	SLC-2
AML612P3202	6.0 - 12.0	35	2	3	30	39	1.8:1	900	K6
AML612P4201	6.0 - 12.0	42	2.2	3	30	39	1.8:1	940	K7
AML612P2002	6.0 - 12.0	20	2	5.5	33	41	2.0:1	1500	KP8
AML612P3001	6.0 - 12.0	30	2.5	4	33	41	2.0:1	1580	KP8
APA0612-30-33	6.0 - 12.0	30	1.5	5	33	43	2.0:1	1800	SPC
AML612P3502	6.0 - 12.0	35	2.5	4	33	41	2.0:1	1850	KP8

·Specifications are at +25°C
·Operating temperature range is -20 to +70°C
·Operational range of -54 to +85°C is available

·DC Voltage is +12 to +15 VDC unless stated otherwise
·Specifications are subject to change

† Gain specified as min to max
*Power specified as Psat

EK 2: TriQuint AH323 Veri Föyü

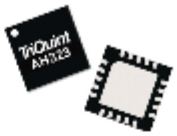
TriQuint

AH323

2W High Linearity 5V 2-Stage Amplifier

Applications

- Base stations / Repeaters
- High Power Amplifiers
- 2G / 3G / 4G Wireless Infrastructure
- Femtocells
- LTE / WCDMA / CDMA

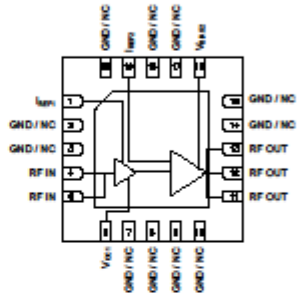


20 Pin 5x5 mm QFN Package

Product Features

- 700-2700 MHz
- 27.2 dB Gain at 2140 MHz
- +33 dBm P1dB
- High linearity: +50 dBm OIP3
- 24 dBm Output Power at -50 dBc WCDMA ACLR
- Integrated interstage matching
- Excellent return loss (>14 dB)
- +5V Supply Voltage
- MTTF > 1000 Years

Functional Block Diagram



General Description

The AH323 is a high dynamic range two-stage driver amplifier in a low-cost surface-mount package. The amplifier is able to achieve high performance across a broad range of frequencies with +50 dBm OIP3 and +33 dBm P1dB while only consuming 680 mA current. The InGaP/GaAs HBT integrates two high performance amplifier stages onto a MMIC to allow for a more compact system design. The integrated interstage match minimizes performance variation that would otherwise be attributed to external matching component value and placement tolerances. The AH323 is available in a standard lead-free /green/RoHS-compliant 20 pin 5x5mm QFN package. All devices are 100% RF and DC tested.

The AH323 is targeted for use as a driver amplifier in wireless infrastructure where high linearity, medium power, and high efficiency are required. This driver amplifier is able to deliver high power while maintaining superior ACLR performance. The integrated active bias circuitry in the devices enable excellent linearity performance over temperature with little variance.

The AH323 is footprint compatible with other TriQuint 2W devices such as the AH314 for 2.3-2.9GHz applications.

Pin Configuration

Pin No.	Label
1	I_{REF1}
4,5	RF In
6	V_{CC1}
11,12,13	RF Out / V_{CC2}
16	V_{BIAS2}
19	I_{REF2}
2,3,7,8,9,10,14,15, 17,18,20	N/C or GND
Backside Paddle	GND

Ordering Information

Part No.	Description
AH323-G	2W 5V 2-stage Amplifier
AH323-PCB2140	2140 MHz Evaluation Board

Standard T/R size = 1000 pieces on a 7" reel

© 2014 TriQuint

Disclaimer: Subject to change without notice
www.triquint.com

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: ARMAĞAN BALTACI

Doğum Yeri: Beypazarı

Medeni Hali: Bekar

E-posta: baltaciarmagan@gmail.com

Adresi: Bademlik Mahallesi Baruthane Sokak 138/8 Keçiören/ANKARA

Eğitim

Lise: Fethiye Kemal Mumcu Anadolu Lisesi, ANKARA

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: İyi

İş Deneyimi

Ağustos 2013-... : Uzman Araştırmacı, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara

Deneyim Alanları

Haberleşme Sistemleri, Karma İşaret Donanım Tasarımı, İşaret İşleme Teknikleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 02/03/2018

Tez Başlığı / Konusu: Uyarlamalı Sayısal Ön Bozucuların Donanım ve Tasarım Parametlerinin Sistem Performansı Üzerine Etkileri

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 86 sayfalık kısmına ilişkin, 22/02/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Kaynakça hariç
2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

02/03/2018

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı:	Armağan BALTACI
Öğrenci No:	N14120825
Anabilim Dalı:	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Programı:	Elektrik Elektronik Mühendisliği- Tezli Yüksek lisans
Statüsü:	☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

(Doç. Dr. Emre Aktaş)