

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN 2 – 18 GHz RF ÖN
ALICI TASARIMI

BEKİR ŞENTÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN
2 – 18 GHz RF ÖN ALICI TASARIMI

BEKİR ŞENTÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
YRD. DOÇ. DR. ENVER ÇAVUŞ

GEBZE

2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/06/2014 tarih ve 2014/35 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11/06/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Bekir ŞENTÜRK'ün tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Enver ÇAVUŞ

ÜYE

: Prof. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Hakan DOĞAN

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada Elektronik Destek Sistemleri için 2 – 18 GHz RF Ön Alıcı tasarımı konusunda yeni bir yaklaşım sergilenmiş, tasarım gerçekleştirilmiş ve performansı tartışılmıştır. Sistemin önemli performans parametreleri ve bu parametreleri etkileyen kritik elemanlar belirtilmiştir. Tasarlanan ön alıcı mimarisinde, girişte yer alan LNA'nın arkasında bulunan filtre bloğunda ayarlanabilir filtreler kullanılmıştır, sonrasında ise iki aşamalı bir frekans alt çevrim işlemi uygulanmıştır. AWR isimli benzetim aracı kullanılarak tasarlanan sistemin benzetim çalışması yapılmış ve performansı mevcut sistemlerde kullanılan mimari ile karşılaştırılmıştır. Son olarak gerçekleştirilen sistem üzerinde testler gerçekleştirilmiş ve performans değerleri sunulmuştur. Ölçüm sonuçları, ayarlanabilir filtreli tasarımın seçicilik performansının sabit filtreli tasarıma göre daha fazla olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ön Alıcı, Ayarlanabilir Filtre, Frekans Alt Çevrim, Seçicilik.

SUMMARY

In this study, a new approach for a 2 - 18 GHz RF Front-End design for Electronic Warfare Systems was implemented and its performance is discussed. Critical specifications of the system and key components are presented. The designed downconverter architecture consists of an adjustable filter bank after the LNA followed by a two stage down-conversion process. Using AWR, the performance of the designed system was estimated and simulation results are compared to existing solutions. Finally, the measurement results of the implemented downconverter system are illustrated. Measurement results show that the designed adjustable filter bank provides higher selectivity performance than an architecture with a fixed filter.

Key Words: RF Front-End, Adjustable Filter, Frequency Down-Conversion, Selectivity.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Enver ÇAVUŞ'a ve hocalarım Prof. Dr. Oğuz KUCUR, Yrd. Doç. Dr. Hakan DOĞAN ve Doç. Dr. Ali KARA'ya,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli iş arkadaşlarıma,

Ve bugüne kadar bana her konuda destek olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Alıcı Sistemlerin Karakteristik Özellikleri	3
2.1.1. RF Frekans Aralığı	3
2.1.2. Analiz Band Genişliği	3
2.1.3. Dinamik Aralık	4
2.1.4. Duyarlılık	5
2.1.5. Seçicilik	7
2.2. Alıcı Yapıları	7
2.2.1. Superheterodyne Alıcılar	7
2.2.2. Kanallı Alıcılar	10
2.2.3. IFM Alıcılar	12
2.3. Literatür Araştırması	14
3. TASARIM ve GERÇEKLEME	18
3.1. Ön Çalışma ve Kavramsal Tasarım Faaliyetleri	19
3.1.1. Sistem İsterlerinin Belirlenmesi ve Sistem Tasarımı	20
3.2. Benzetim Çalışmaları	22
3.2.1. IF Filtre Tasarım ve Benzetimi	23
3.2.2. Sistem Benzetim Çalışmaları	25
3.3. Tasarımın Gerçeklenmesi	29
3.3.1. IF Kartı	29

3.3.2. RF Filtre Kartı	33
3.3.3. Ön Alıcı Sisteminin Oluşturulması	36
4. ÖLÇÜMLER ve TESTLER	39
4.1. IF Kartı Testleri	39
4.2. RF Filtre Ölçümleri	44
4.3. Sistem Testleri	46
4.3.1. NF ve Kazanç Ölçümleri	46
4.3.2. OP1dB Ölçümleri	50
4.3.3. Karıştırıcı İşaret Testi	56
5. SONUÇLAR ve YORUMLAR	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Acıklamalar</u>
<u>Kisaltmalar</u>	
N_{in}	: Girişteki Gürültü Seviyesi
S_{in}	: Girişteki İşaret Seviyesi
AGC	: Automatic Gain Control
BGF	: Band Geçiren Filtre
BG	: Band Genişliği
dB	: Decibel
DC	: Direct Current
F	: Gürültü Faktörü (Lineer)
GHz	: Gigahertz
IF	: Ara Frekans (Intermediate Frequency)
IFM	: Instantaneous Frequency Measures
IM	: İntermodülasyon
LNA	: Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (Low Noise Amplifier)
LO	: Lokal Osilatör
MHz	: Megahertz
NF	: Gürültü Faktörü (dB)
OIP3	: Output Third Order Intercept Point
OP1dB	: Output Power at 1 dB Compression
P1dB	: Power at 1 dB Compression
P_{out}	: Çıkış Gücü
RF	: Radyo Frekansı
SIGINT	: Signals Intelligence
SMA	: Sub Multi Assembly

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: 1 dB bastırma noktası (compression point).	4
2.2: Tipik bir alıcı yapısı temel elemanları.	6
2.3: Temel superheterodyne alıcı yapısı.	8
2.4: Ön seçici filtreli superheterodyne alıcı yapısı.	9
2.5: Kanallı superheterodyne alıcı yapısı.	10
2.6: Kanallı alıcı yapısı (0.5-18 GHz).	11
2.7: Tipik bir superheterodyne kanal yapısı.	11
2.8: Temel IFM alıcı yapısı.	13
2.9: Pandolfi'nin tasarımına ait sistem blok diyagramı.	15
2.10: Barraclough'un tasarımına ait sistem blok diyagramı.	16
2.11: Applied Radar Inc. tasarımına ait sistem blok diyagramı.	17
3.1: Tasarlanacak sistemin blok diyagramı.	19
3.2: Filtre-1 gerilim-frekans karakteristiği.	21
3.3: Filtre-2 gerilim-frekans karakteristiği.	21
3.4: Filtre-3 gerilim-frekans karakteristiği.	22
3.5: IF Filtre devre şeması.	23
3.6: IF Filtre S parametreleri.	23
3.7: Gerçeklenen IF filtre devre şeması.	24
3.8: Ölçüm sonucu çıkan S21 parametresi.	24
3.9: a) Ölçüm sonucu çıkan S22 parametresi, b) Ölçüm sonucu çıkan S11 parametresi.	25
3.10: VSS Sistem blok diyagramı.	26
3.11: Sabit filtreli yapı benzetim sonucu çıkış spektrumu.	27
3.12: Ayarlanabilir filtreli yapı benzetim sonucu çıkış spektrumu.	28
3.13: IF Kart blok diyagramı.	30
3.14: IF Kart devre şeması.	31
3.15: IF Kart baskı devresi.	32
3.16: Gerçeklenen IF kart devresi.	33
3.17: RF Filtre devre şeması.	34

3.18:	RF Filtre baskı devresi.	35
3.19:	Kutulanmış RF filtre kartı.	36
3.20:	Kullanılan LNA modülü.	37
3.21:	Ön alıcı sistem blok diyagramı.	38
4.1:	IF Kartı test düzeneği.	39
4.2:	Maksimum kazanç -50 dBm giriş için çıkış spektrumu.	40
4.3:	Maksimum kazanç -52 dBm giriş için çıkış spektrumu.	40
4.4:	Maksimum kazanç -55 dBm giriş için çıkış spektrumu.	41
4.5:	Minimum kazanç -20 dBm giriş için çıkış spektrumu.	42
4.6:	Minimum kazanç -16 dBm giriş için çıkış spektrumu.	43
4.7:	Minimum kazanç -14 dBm giriş için çıkış spektrumu.	43
4.8:	Merkez frekans 7 GHz için filtre karakteristiği.	45
4.9:	Merkez frekans 7,3 GHz için filtre karakteristiği.	45
4.10:	Sistem test ortamı.	46
4.11:	NF ve kazanç ölçüm düzeneği.	47
4.12:	Ölçümlerde kullanılan gürültü kaynağı.	48
4.13:	6,2 GHz merkez frekansta kazanç grafiği.	48
4.14:	6,2 GHz merkez frekansta NF grafiği.	49
4.15:	7 GHz merkez frekansta kazanç grafiği.	49
4.16:	7 GHz merkez frekansta NF grafiği.	50
4.17:	OP1dB Ölçüm düzeneği.	51
4.18:	6,2 GHz, maksimum kazanç, -55 dBm giriş için çıkış spektrumu.	51
4.19:	6,2 GHz, maksimum kazanç, -51 dBm giriş için çıkış spektrumu.	52
4.20:	6,2 GHz, minimum kazanç, -21 dBm giriş için çıkış spektrumu.	53
4.21:	6,2 GHz, minimum kazanç, -27 dBm giriş için çıkış spektrumu.	53
4.22:	7 GHz, maksimum kazanç, -59 dBm giriş için çıkış spektrumu.	54
4.23:	7 GHz, maksimum kazanç, -55 dBm giriş için çıkış spektrumu.	54
4.24:	7 GHz, minimum kazanç, -28 dBm giriş için çıkış spektrumu.	55
4.25:	7 GHz, minimum kazanç, -32 dBm giriş için çıkış spektrumu.	55
4.26:	4 dBm karıştırıcı seviyesi için ayarlanabilir filtreli çıkış spektrumu.	57
4.27:	-25 dBm karıştırıcı seviyesi için filtresiz çıkış spektrumu.	58

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Örnek alıcı sistemi için değerler tablosu.	6
2.2: Alıcı tipleri avantaj-dezavantaj tablosu.	13
2.3: Alıcı tipleri karşılaştırma tablosu.	14
3.1: RF Ön alıcı performans kriterleri.	20
3.2: Kullanılan LNA modülüne ait özellikler.	36
3.3: Harici çarpıcı karakteristik özellikleri.	37

1. GİRİŞ

Elektronik Destek Sistemleri çevredeki radar işaretlerini tespit edip, bu işaretlerin ne tür bir radardan geldiğini kullanıcıya bildiren erken uyarı sistemleridir. Bu sistemler bir tesisin veya bir aracın savunmasında erken uyarı amaçlı kullanılmaktadır. Elektronik Destek sistemlerinde tehdit unsurları en yoğun olarak 2 GHz - 18 GHz bandında yer almaktadırlar. 2 GHz – 18 GHz frekans aralığında tespit edilen işaretler, RF ön alıcı sistemi yardımı ile IF frekansına indirilir. Ara frekansa indirilmiş işaret de işaret işleme birimlerinde incelenerek alınan işaretin radar işareti olup olmadığına, işaret radar işareti ise işaretin ne tür bir radardan geldiğine karar verilir ve kullanıcı uyarılır.

Ön alıcı sistemler, tehdit işaretlerinin ilk ulaştığı birimler olmalarından dolayı elektronik destek sistemleri için en kritik sistemlerdir. Ön alıcı sistemin tehdit işaretini algılayabilmesi durumunda işaret işleme birimi bu işareti değerlendirerek çıktı verecektir. Çevredeki tehdit işaretinin algılanamaması veya ön alıcı tarafından IF çıkışında harmonik işaret üretilmesi gibi sorunlar işaret işleme birimini yanıltacak ve yanlış alarm verilmesine sebep olacaktır. Elektronik destek sistemlerinde kullanılan ön alıcı sistemlerin güvenilir olmaları gerekir [Devlin et al., 2002]. Hatalı çalışma durumlarını en aza indirmek ve sistem güvenilirliğini arttırmak için ön alıcı tasarımı hassasiyetle yapılmalıdır. Alıcıdaki hatalı çalışma ihtimalini azaltmak için alıcı duyarlılığını ve seçiciliğini arttırmak gerekir [Pandolfi et al., 2009]. Alıcıdaki seçiciliği arttırmak amacıyla tasarımda kullanılacak RF filtreler dikkatle seçilmelidir. Ayrıca sistemdeki kuvvetlendirici ve çarpıcıların yerleşimi alıcı sistemin harmonik üretmesini de etkileyecektir. Bu bileşenler birbirlerini doyurmayacak şekilde yerleştirilmelidir.

Ön alıcı sistemlerin tasarımında kullanılan birkaç yapı vardır. Bu yapılardan superheterodyne yapısı en sık kullanılan alıcı yapısıdır [Karadede and Kara, 2012]. Bu yapılarda kullanılan RF filtreler merkez frekansları sabit olan filtrelerdir ve bu filtreler superheterodyne yapılarda paralel halde kullanılırlar. Böylece çok geniş olan RF bandı alt bandlara ayrılmış olur. Kullanılan filtre sayısı arttırıldıkça sistemin seçiciliği de artar, fakat bu durum maliyet artışını da beraberinde getirir. Ayrıca filtre sayısı arttıkça sistem üzerindeki alan gereksinimi de artacaktır ve bu da ön alıcı sistemin fiziksel büyüklüğünü ve karmaşıklığını arttırır.

Bu tez çalışmasında, 2 – 18 GHz bandında çalışan, seçiciliği, çevredeki bozucu işaretlere karşı mukavemeti ve hassasiyeti yüksek olan bir ön alıcı tasarımı hedeflenmiştir. Tez çalışması kapsamında merkez frekansları ayarlanabilen RF filtreler kullanılarak ön alıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımla fiziksel boyutta, maliyette ve karmaşıklıkta artış olmadan sistemin seçiciliği arttırılmıştır. Ön alıcı sistem tasarımında kuvvetlendirici ve çarpıcıların da yerleşimleri sistemi doyurmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin AWR yazılımı kullanılarak benzetimi yapılmış, PCB üretimi gerçekleştirilmiş ve tasarlanan sistemin ölçümleri yapılmıştır.

Tezin bundan sonraki kısımlarının organizasyonu şu şekildedir. 2. Bölümde teorik bilgilerden ve literatürde mevcut olan çalışmalardan bahsedilmiştir. 3. Bölümde sistem tasarım, benzetim ve gerçekleştirme faaliyetleri anlatılmıştır. 4. Bölümde ise sistem ve birim testleri anlatılmış, ölçüm sonuçları verilmiş ve bu sonuçlar yorumlanarak çalışma tamamlanmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

Bu kısımda ilk olarak erken uyarı sistemleri alıcı katlarının sahip olduğu RF frekans aralığı, analiz band genişliği, dinamik aralığı, duyarlılık ve seçicilik özellikleri açıklanacak ve bu özelliklerin sistem performansı üzerinde etkilerinden bahsedilecektir. Belirtilen alıcı karakteristiklerinin yüksek performanslı tutulması için tasarım sırasında nelere dikkat edilmesi gerektiği de ilgili bölümlerde anlatılacaktır. Son bölümde ise superheterodyne, kanallı ve IFM alıcı tiplerinden bahsedilecek ve son olarak da bu konuyla ilgili güncel çalışmalar ve tasarımlar kısaca tartışılacaktır.

2.1. Alıcı Sistemlerin Karakteristik Özellikleri

Alıcının performans karakteristiğini belirleyen temel özellikler ve bu özelliklerin bir alıcıyı nasıl etkilediği bu başlık altında incelenmiştir. Bu bölümde belirtilen özellikleri geliştirmek amacıyla tasarımda nelere dikkat edilmesi gerektiği de vurgulanmıştır.

2.1.1. RF Frekans Aralığı

RF frekans band aralığı alıcı sisteminin hangi frekans aralığındaki radarları tespit edebileceğinin ölçüsüdür. Tüm radar sistemleri tarafından kullanılan frekans aralığı çok geniştir. Bu band 30 MHz'ten başlar ve 100 GHz'e kadar uzanabilir. Tek bir alıcı sisteminin tüm radarları tespit etme yeteneğine sahip olması mümkün değildir. Geniş bir bandı kapsayabilmek için, kapsanmak istenen band alt bandlara bölünür ve isterlere bağlı olarak birkaç alıcı sistemi birleştirilerek tüm band kapsanmış olur.

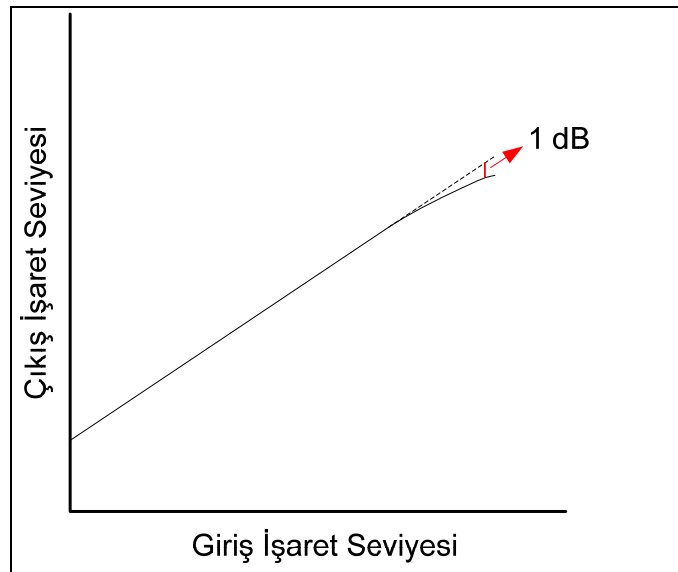
2.1.2. Analiz Band Genişliği

Analiz band genişliği, alıcının anlık olarak tek seferde ne kadarlık spektrumu inceleyip karar verdiğinin ölçüsüdür. Tek bir superheterodyne alıcı için bu değer

tipik olarak IF band genişliği değerine karşılık gelir. Erken uyarı sistemlerindeki IF band genişliği genellikle radarların kullandığı IF band genişliği değerinden daha yüksek olması gerekir. Çünkü erken uyarı sistemi tespit edeceği radarın IF bandını tek seferde inceleyip radar karakteristiğini ortaya çıkarabilmelidir. Tespit edilecek radarın IF band genişliği alıcının IF band genişliğinden daha fazla ise alıcı sistemi bu radarın karakteristiğini tespit edemez. Bu yüzden erken uyarı sisteminin IF band genişliğinin olabildiğince yüksek tutulması gerekir. Buna bir de farklı radarların aynı anda tespit edilebilme yeteneği eklendiğinde, oldukça karmaşık bir alıcı yapıcısı ortaya çıkmaktadır.

2.1.3. Dinamik Aralık

Dinamik aralık, alıcının tespit edebileceği en yüksek işaret seviyesi ile en düşük işaret seviyesi arasındaki farktır. Buradaki en yüksek işaret seviyesini tipik olarak alıcının “P1dB” performansı belirler. Normalde alıcıdaki giriş seviyesi ile çıkış seviyesi arasındaki değişim lineer olarak gitmelidir. Diğer bir ifade ile giriş seviyesi arttıkça, çıkış seviyesi de aynı miktarda artmalıdır. Fakat alıcıdaki giriş işaret seviyesinin belli bir değeri geçmesinden sonra, alıcıdaki kuvvetlendiriciler doymaya başlar. Çıkıştaki işaret seviyesi aynı miktarda yükselmez ve bu durum giriş-çıkış işaret gücü grafiğinde görülebilir (Şekil 2.1) [Tsui, 1986].



Şekil 2.1: 1 dB bastırma noktası (compression point).

Tespit edilebilecek en düşük işaret seviyesini ise alıcının gürültü performansı belirler. Alıcı girişindeki işaret seviyesi belirli bir değerin altına düştüğü zaman, IF kısmındaki işaret seviyesi alıcının gürültü seviyesine çok yaklaşır ve tespit edilemez duruma gelir. Bu durumda ortamda var olan bir radar işareti tespit edilememiş olur ve erken uyarı sistemi kullanıcıyı ortamdaki radar tehditi konusunda uyaramaz. Dinamik aralığı genişletebilmek amacıyla alıcı kısmında kazanç değerlerinin ayarlanabilir olmasını sağlamak bir yöntemdir ve bu amaçla tüm alıcı yapılarında kuvvetlendirici/zayıflatıcı devreleri kullanılır. Bu şekilde, alıcıya gelen işaret seviyesinin yüksek olması durumunda kazanç değeri düşük olarak ayarlanır ve intermodülasyon işaretlerinin oluşması engellenebilir. Alıcıya gelen işaret seviyesinin düşük olması durumunda ise kazanç ayarı yüksek bir değere getirilir ve işaret tespit edilebilecek bir seviyeye getirilir.

2.1.4. Duyarlılık

Bir alıcı için duyarlılık alıcı girişinde gerekli olan minimum işaret seviyesini ifade eder. Duyarlılığı belirleyen faktör ise alıcının gürültü performansıdır. Alıcının gürültü performansını alıcıda kullanılan elektronik elemanların gürültü faktörleri (Noise Figure, NF) belirler. Eşitlik 2.1’de bir eleman için gürültü faktörü tanımlanmıştır:

$$F \text{ (NF in dB)} = (S_{in}/N_{in}) / (S_{out}/N_{out}) \quad (2.1)$$

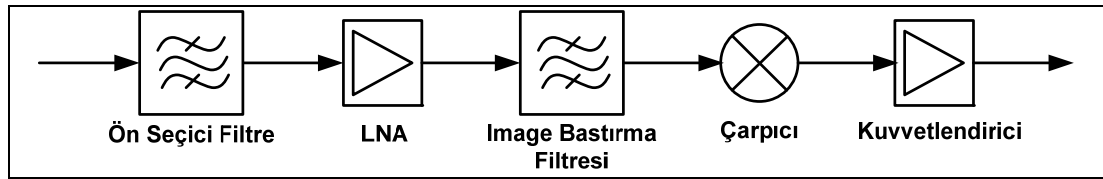
Alıcı katında farklı oranlarda gürültü üreten elemanlar olduğu dikkate alındığında toplam gürültü faktörü, bu elemanların gürültü faktörleri ile kazanç/kayıp değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Eşitlik 2.2’de 4 elemanlı bir alıcı katı için gürültü faktörü hesabı verilmiştir.

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2’de F_1 , F_2 , F_3 ve F_4 ifadeleri sırasıyla alıcı girişindeki birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü elemanların gürültü faktörü değerlerini ifade ederler. G_1 , G_2 ,

G3 ve G4 ifadeleri ise sırasıyla alıcı girişindeki birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü elemanların kazanç değerlerini ifade ederler.

Alicının NF (veya F) değerini büyük oranda etkileyen eleman girişte kullanılacak olan düşük gürültülü kuvvetlendiricidir (Low Noise Amplifier, LNA). Kullanılacak LNA mümkün olan en düşük NF değerine sahip olmalıdır. Şekil 2.2’de verilen alıcı bloğu için bu blokta kullanılan elemanların NF ve kazanç değerleri ve bu değerler kullanılarak yapılan hesaplar sonucunda elde edilen kaskad yapının NF ve kazanç değerleri Tablo 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Tipik bir alıcı yapısı temel elemanları.

Tablo 2.1: Örnek alıcı sistemi için değerler tablosu.

	Önseçici Filtre	LNA	Image Bastırma Filtresi	Çarpıcı	Kuvvetlendirici
Kazanç [dB]	-0,5	20	-1	-6	30
NF [dB]	0,5	3	1	6	5
Kazanç (lineer)	0,891250938	100	0,7943282	0,25119	1000
F (lineer)	1,122018454	1,99526	1,2589254	3,98107	3,16227766
Kaskad Kazanç (Lineer)	0,891250938	89,1251	70,794578	17,7828	17782,7941
Kaskad F (Lineer)	1,122018454	2,23872	2,2416263	2,28374	2,405328895
Kaskad Kazanç [dB]	-0,5	19,5	18,5	12,5	42,5
Kaskad NF [dB]	0,5	3,5	3,5056322	3,58646	3,811744685

Tablo 2.1’de sistemin toplam gürültü faktörü 3.81 dB olarak hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplardan da görülmektedir ki LNA’dan sonraki kısmın, gürültü faktörü üzerindeki etkisi %7 kadardır. Sistem gürültü faktörü ne kadar düşük tutulursa,

sistemin işaret gürültü seviyesine etkisi o oranda az olacaktır ve alıcının girişte gerek duyduğu işaret seviyesi daha da azalacak, duyarlılık yükselecektir. Dolayısıyla, çok düşük gürültülü bir LNA, sistemin toplam gürültü performansı açısından kritiktir [Web 1, 2012].

2.1.5. Seçicilik

Alıcı yapılarında seçicilik, algılanmak istenen hedef işaretin ortamdaki diğer işaretlerden ayrılmasının ifadesidir. Elektronik harp alanında alıcı sistemleri yanıltmak amacıyla karıştırıcı cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar ortama yüksek genlikli RF işaretler yayarak etraftaki elektronik algılama sistemlerini yanıltmaya çalışırlar. Bir alıcının seçiciliği ne kadar yüksekse bu tür karıştırıcı cihazlara karşı mukavemeti de o derece fazladır.

Alıcı bir sistemin seçiciliğini arttırma konusunda RF filtreleme işlemi büyük önem taşımaktadır. RF filtre band genişlikleri daraltıldıkça alıcı seçiciliği artacaktır. Merkez frekansı sabit filtrelerin kullanıldığı yapılarda filtre band genişliklerinin daraltılması filtre sayısının artmasına sebep olur. Bu durum da sistem maliyetini, karmaşıklığını ve fiziksel alan gereksinimini arttırır. Alıcı yapılarda ayarlanabilir filtrelerin kullanılmasıyla bu bedelleri ödemededen alıcı seçiciliği arttırılabilir.

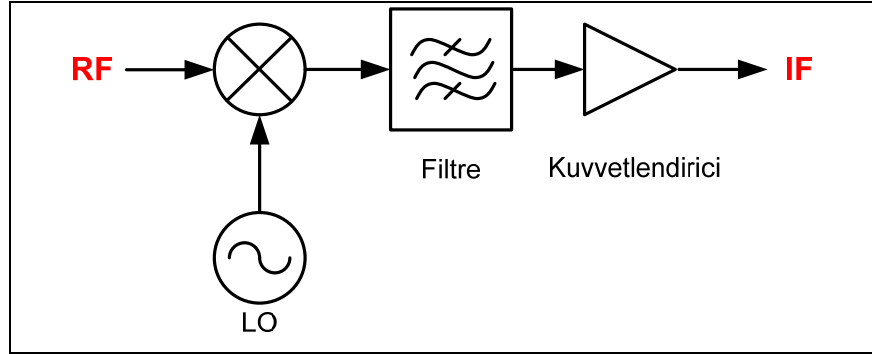
2.2. Alıcı Yapıları

Literatürdeki geniş band alıcı yapılarında kullanılan mimari tipleri incelendiğinde üç mimari tipinin sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Bunlar superheterodyne, kanallı ve IFM alıcılarıdır. Bu bölümde mevcut alıcı yapıları sırasıyla özetlenmektedir.

2.2.1. Superheterodyne Alıcılar

Superheterodyne alıcılar yüksek duyarlılık ve seçicilik özelliklerinden dolayı haberleşme alanında en sık kullanılan alıcı tipleridir. Bu tip alıcılarda detektör kısmından önce kuvvetlendirici kullanılarak bu özellik sağlanmıştır. Kuvvetlendirici kazancı artırılarak veya gürültü faktörü azaltılarak alıcının duyarlılığı daha da

arttırılabilir. Superheterodyne alıcılarda giriş işaretinin frekansı, frekans çevrimi yapılarak ara frekansa (IF) getirilir. Bu işlemin yapılabilmesi için yerel osilatör (LO) ve çarpıcı olmak üzere iki ana eleman gerekmektedir. Temel superheterodyne alıcı yapısı Şekil 2.3'te verilmiştir.



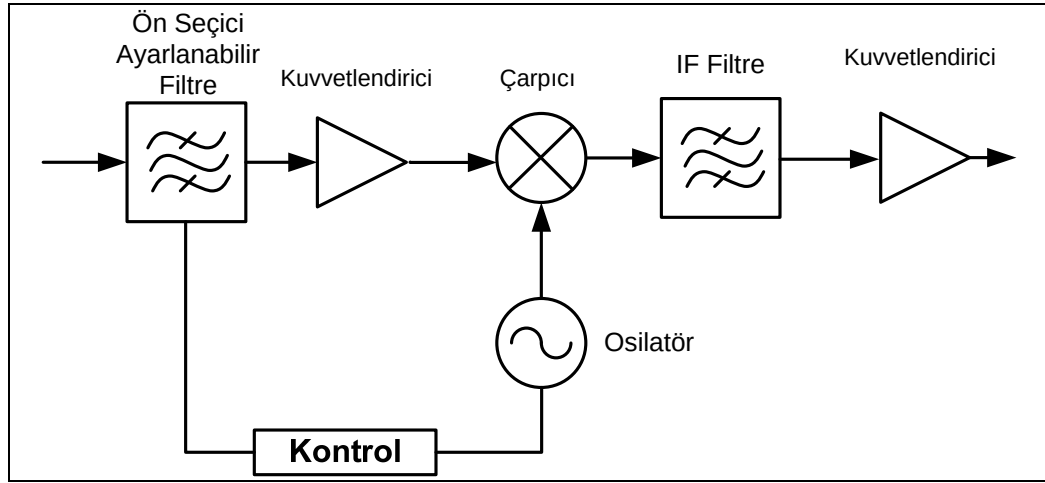
Şekil 2.3: Temel superheterodyne alıcı yapısı.

Superheterodyne alıcılarda giriş işareti ilk olarak çarpıcıya gelir. Burada yerel osilatörün ürettiği işaretle çarpılarak istenilen ara frekans değerine düşürülür. Çarpım işlemi sırasında ara frekanstaki işaret ile birlikte diğer harmonik işaretler de oluşacaktır. Bu durumu engellemek için çarpıcı çıkışına geçirme frekansı hedeflenen IF bandında olan bir filtre konur. Bu sayede harmonik işaretlerin çıkışa ulaşması engellenir. Filtre çıkışına bir kuvvetlendirici konularak sistemin duyarlılığı da artırılmış olur.

Harmonik problemini engellemek amacıyla frekans çevrimi sırasında kullanılacak LO frekansını iyi belirlemek gerekir. Bu frekansı belirlemek amacıyla tipik olarak “frekans aşağı çevirici spur grafiği” (mixer spur chart) kullanılabilir. Ancak bu yöntem geniş bantlı alıcı tasarımlarında çalışmayacaktır.

Superheterodyne alıcılardaki harmonik problemini engellemenin en etkili yolu kullanılacak çarpıcının harmonik üretme derecesinin düşük olmasıdır. Sistemde kullanılacak olan çarpıcı seçilirken bu özelliğe dikkat edilmelidir. Bir diğer etkili yol ise çarpıcı girişlerinde ön seçici adı verilen ayarlanabilir filtre kullanmaktır. Ön seçici filtre merkez frekansı LO frekansı ile paralel bir şekilde değiştirilmektedir. Bu tip bir yapı Şekil 2.4'te verilmiştir. Eğer alıcıda kanal sayısı sabitse, sabit filtreler ve sabit yerel osilatörler kullanılmışsa bu durumda alıcı girişteki işaretin frekansına göre uygun olan kanala geçerek bu kanalda çalışır. Kanal band genişliklerinin geniş

olması durumunda bu band genişliğinde ayarlı filtre ve LO bulunamazsa bu yapı kullanılır. Bu yapıya kanallı alıcı yapısı denir.

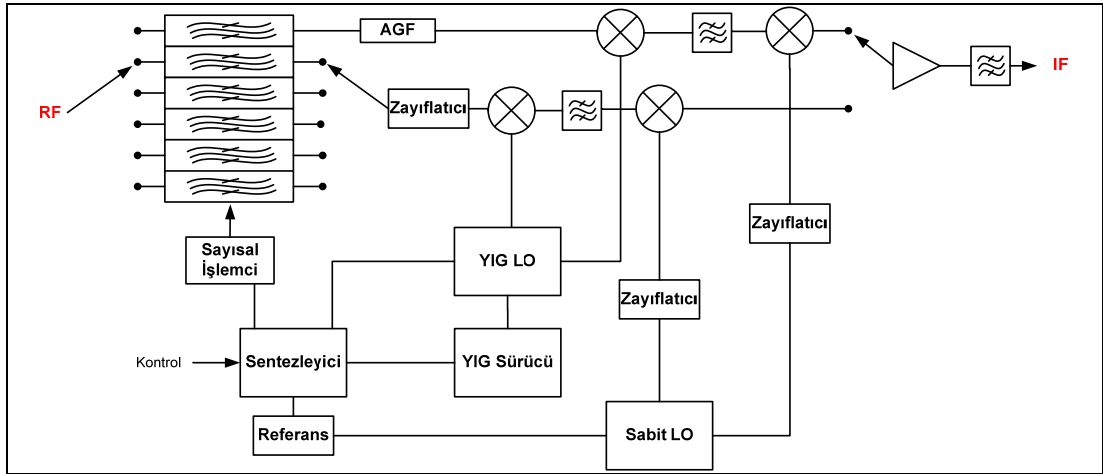


Şekil 2.4: Ön seçici filtreli superheterodyne alıcı yapısı.

Bir alıcıda olması gereken en önemli özelliklerden birisi düşük NF değeridir. NF değerinin düşük olması sistemin duyarlılığını arttıracaktır. Şekil 2.3'teki temel yapıya bakılırsa girişte ilk olarak çarpıcı yer almaktadır. Bu durumda alıcının NF değeri çarpıcının geçiş kaybıyla sınırlanmaktadır. Örneğin geçiş kaybı -7 dB olan bir çarpıcı kullanılmışsa alıcının NF değeri en iyi ihtimalle 7 dB olacaktır. NF değerini düşürmenin en etkili yolu çarpıcıdan önce bir kuvvetlendirici koymaktır. Çarpıcının önünde düşük gürültülü bir kuvvetlendirici kullanılmasıyla NF değeri iyileştirilebilir. Tüm bu yöntemler temelde tipik dar band superheterodyne alıcı için geçerlidir ve superheterodyne alıcı yapısı, yukarıdaki önerilerin bir veya bir kaç ile birlikte, dar band uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılır.

Diğer taraftan, temel superheterodyne alıcı yapısı, giriş işaretinin ön seçici filtreler yardımıyla kanallara ayrılmasıyla geniş bantlı alıcılarda da kullanılabilir. Şekil 2.5'te böyle bir alıcıya ait blok şema verilmiştir. Bu yapıda 0.5 – 18 GHz frekans aralığındaki giriş işareti ön seçici filtreler yardımıyla 6 veya altı adet alt banda ayrılmıştır. 8,25 GHz frekansının altındaki kısım alçak geçiren filtreden geçirilerek ilk olarak frekans üst çevrim ardından da frekans alt çevrim işlemine tabi tutularak IF frekansına getirilir. 8,25 GHz frekansının üstündeki kısım ise 5 alt banda ayrılarak superheterodyne alıcı yapısından geçerek IF frekansına indirilmiştir. Burada ön seçici filtre bloğu ve LO bloğu paralel olarak kontrol edilerek seçilen

kanala göre LO frekans değeri istenilen yere getirilir. Bu yapının dezavantajları NF değerinin yüksek olması ve aynı anda tüm bandın incelenememesidir. Ön seçici filtrelerden önce geniş bandlı bir LNA konularak NF değeri iyileştirilebilir. Sistemin çalışma mantığında aynı anda tek frekans bandına bakıldığı için bir band incelenirken diğer bandlarda kısa süreli bir işaret girişi olması durumunda o işaret tespit edilemeyebilir. Yani erken uyarı sistemi için aynı anda tespit edilecek radar sayısı kısıtlanmış olur.



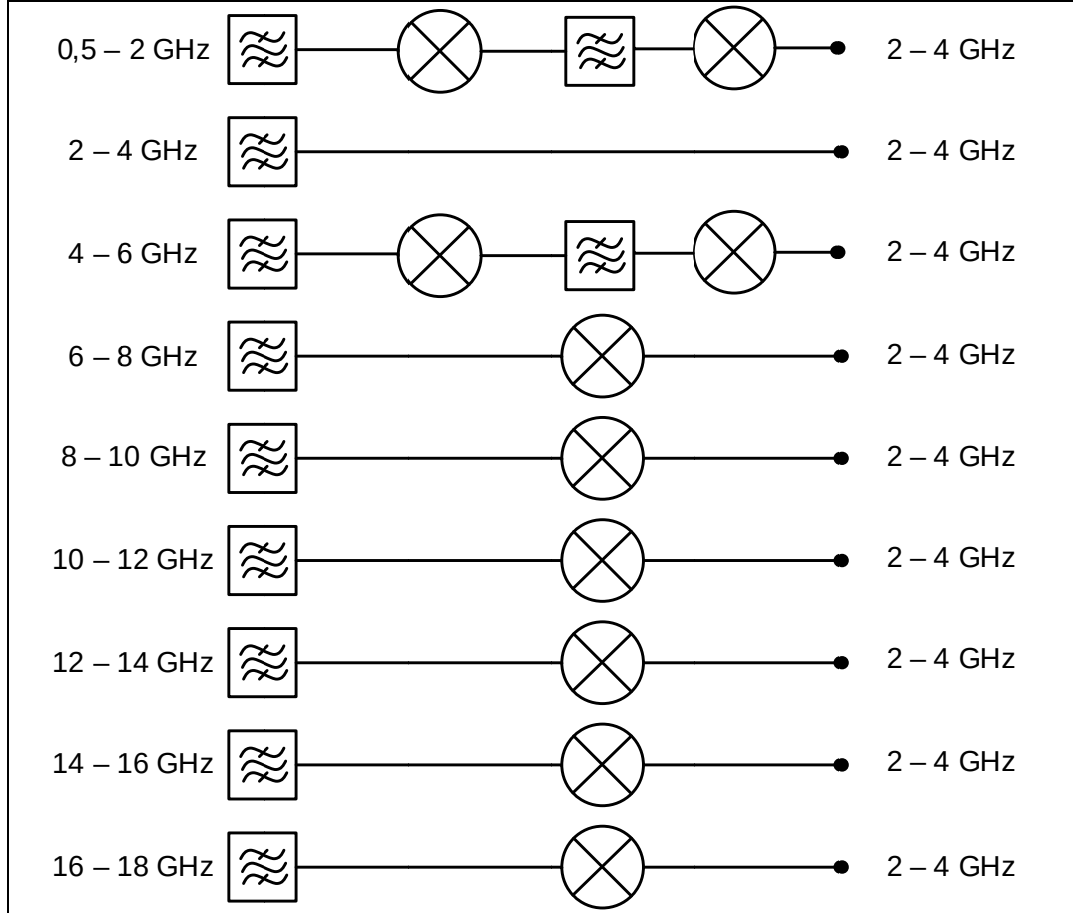
Şekil 2.5: Kanallı superheterodyne alıcı yapısı.

Özet olarak superheterodyne alıcı yapısı en çok kullanılan alıcı yapılarından birisidir. Duyarlılıkları, dinamik aralıkları ve seçicilikleri yüksektir. Maliyetleri düşüktür, fakat dar bandlıdırlar. Geniş bandlı bir yapıda kullanılmaları durumunda tüm bandı aynı anda tarayamazlar, anlık işaretleri tespit edemeyebilirler.

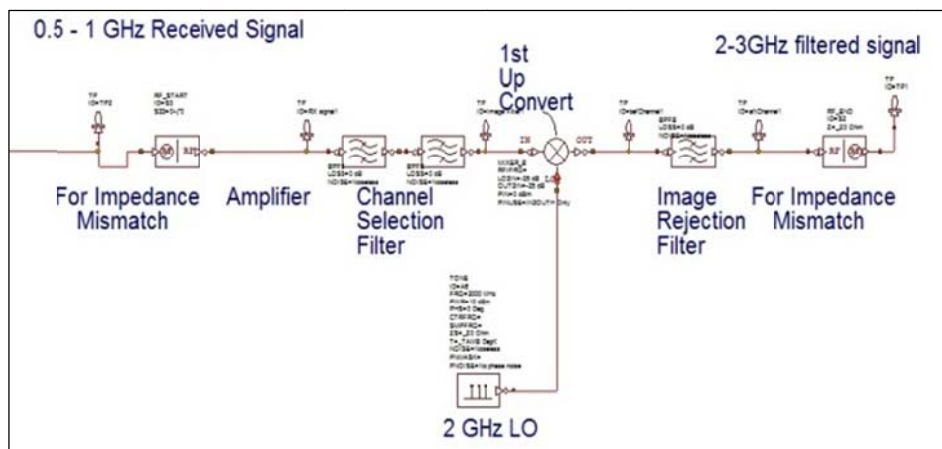
2.2.2. Kanallı Alıcılar

Alıcı yapılarında daha fazla band genişliğini kapsayabilmek için birden fazla dar bandlı alıcının paralel hale getirilmesiyle kanallı alıcı yapısı oluşturulmuştur. Bu yapılarda girişte birden fazla band geçiren filtre paralel olarak yerleştirilir. Giriş işareti frekansına göre uygun olan filtreden geçer ve filtre çıkışında işaretin frekans değeri tespit edilir. Bu yapılar çok fazla eleman içerdikleri için ebat olarak büyük ve maliyetlidirler. Yapılan çalışmalarda kanal filtreleme yönteminin elektronik destek sistemi ön alıcılarında spur işaretlerinin önlenmesi konusunda çok faydalı bir yöntem

olduğu görülmüştür [Karadede and Kara, 2012]. Yapılan benzetim çalışmalarında kanal filtreli ve kanal filtresi olmayan sistemler karşılaştırılarak spur işaretlerinin kanal filtreleme yöntemiyle bastırıldığı görülmüştür.



Şekil 2.6: Kanallı alıcı yapısı (0.5-18 GHz).



0.5 – 18 GHz Alıcı yapısı Şekil 2.6’da verilmiştir. Her kanal için bir filtre, çarpıcı ve LO gerekmektedir. Bu sistem 9 adet superheterodyne alıcı kanalı içermektedir ve tipik bir superheterodyne kanal yapısı ise Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Maliyet ve ebat olarak karşılaştırıldığında, kanallı alıcı yapısı, superheterodyne alıcı yapısının yaklaşık 9 katıdır. Bu yapıda giriş işareti 2 GHz band genişlikli filtrelerle 2 GHz’lik kanallara ayrılmıştır. Her kanal 2–4 GHz frekansına düşürülmüştür. İkinci kanal zaten o frekansta olduğu için direkt geçirilmiştir. İntermodülasyon problemi yaşamamak için 2–4 GHz bandının komşu bandları ara frekans değerine tek çarpma işlemiyle indirilmezler. 0.5–2 GHz ve 4–6 GHz frekans bandları ilk olarak frekans üst çevrim işlemiyle herhangi bir üst frekansa çıkarılır ve daha sonra 2–4 GHz bandına indirilirler. Her kanal çıkışındaki 2–4 GHz bandındaki işaret aynı anda incelenir ve giriş işaretinin hangi frekansta olduğu tespit edilir. Bu yapının kanallı superheterodyne alıcıdan farkı ve avantajı tüm bandın aynı anda incelenmesidir. Kanallı alıcı yapısında tüm yapılar sabit çalışmaktadır ve herhangi bir ayarlı filtre veya değişken bir osilatör bulunmamaktadır.

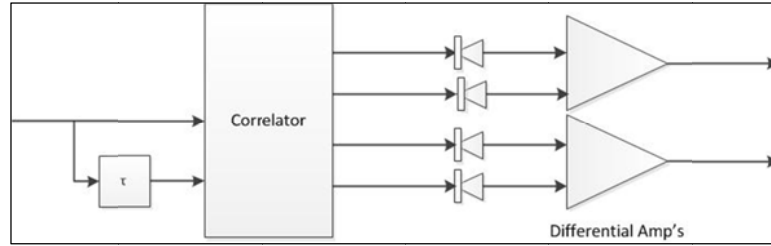
Kanallı alıcılar superheterodyne alıcılarda var olan yüksek duyarlılık, geniş dinamik aralık ve yüksek frekans çözünürlüğü gibi iyi özelliklerin tümünü içerir. Bunun yanında aynı anda tüm bandı inceleme kabiliyetine sahiptir. Fakat superheterodyne alıcılara göre daha büyük ebatlardadır ve daha maliyetlidir. İncelenen frekans bandının genişlemesi paralel kanalların artmasına sebep olur ve sisteme daha fazla donanım yükü getirerek maliyeti artırır.

2.2.3. IFM (Instantaneous Frequency Measures) Alıcılar

IFM alıcılar çok geniş RF band genişliğine sahip olmak ile birlikte dinamik aralıkları da yüksektir. Bu tip alıcıların dezavantajları düşük duyarlılığa sahip olmaları ve aynı anda tek işareti okuyabilmeleridir. Eğer alıcı girişine aynı anda birden fazla işaret gelmişse alıcı ya bu işaretlerden birisini tespit eder ya da o anda olmayan bir işareti giriş işaretiymiş gibi bildirir.

IFM alıcı giriş işaretinin frekansını belirlemek için geciktirici hat yardımıyla işareti bir kanalda geciktirir ve gecikmiş işaretle normal işaretin fazlarını karşılaştırarak frekans tespiti yapar. Temel IFM alıcı yapısı Şekil 2.8’de verilmiştir. Burada gelen ana işaret güç bölücüde ikiye bölünür. Kanallardan biri geciktiriciden

geçirilerek belirli bir gecikmeye tabi tutulur diğer kanal ise direkt geçer. İki kanal da korelasyon (correlator) bloğuna gelir ve burada işaretlere gerekli faz kaymaları uygulanır. Daha sonra detektöre gelen işaretler burada bazı matematiksel işlemlere tabi tutulurlar ve video işaretlerine dönüştürülürler. Son olarak farksal kuvvetlendiricilere gelen işaretlere burada da matematiksel bazı işlemler uygulanır [Tsui, 1986].



Şekil 2.8: Temel IFM alıcı yapısı.

IFM alıcılar çok geniş band genişliği sağlamaları sebebiyle elektronik harp sistemlerinde tercih edilirler. Bir diğer önemli özelliği ise basit bir yapıya sahip olmalarıdır. Aynı anda birden fazla işaret gelmesi durumunda tespit yapamamaları en büyük dezavantajlarıdır. Eşzamanlı işaretlerin tespiti konusunda çalışmaların yapılması ve bu probleme bir çözüm bulunması gerekmektedir.

Superheterodyne, Kanallı ve IFM alıcı yapılarının avantajları ve dezavantajları ile özellik karşılaştırma tabloları Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te özetlenmiştir [Web 2, 2011].

Tablo 2.2: Alıcı tipleri avantaj-dezavantaj tablosu.

Alıcı Tipi	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
IFM	Basit yapı, Yüksek frekans çözünürlüğü, anlık tespit yeteneği,	Eşzamanlı işaretleri ayıramıyor, duyarlılığı düşük	ESM, Jammer, SIGINT
Superheterodyne	Tepki süresi daha iyi	Eş zamanlı işaretleri algılayamıyor, dar bantlı	ESM, Hava ikaz sistemleri
Kanallı (Channelized)	Geniş band genişliği, anlık tespit yeteneğine yakın, orta seviye frekans çözünürlüğü	Karmaşık bir yapı, yüksek maliyet, güvenilirliği daha düşük, duyarlılığı sınırlı	SIGINT, Jammer

Tablo 2.3: Alıcı tipleri karşılaştırma tablosu.

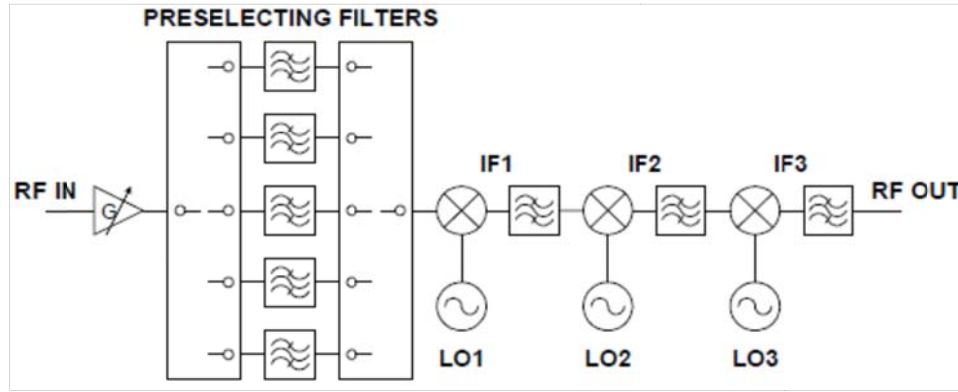
<i>Özellik</i>	<i>IFM</i>	<i>Superheterodyne</i>	<i>Kanallı (Channelized)</i>
<i>Anlık analiz edilen BG</i>	Multi-Octave	500MHz	2GHz
<i>Frekans çözünürlüğü</i>	1MHz	100-500MHz	10-125MHz
<i>Duyarlılık (dBm)</i>	-40(4GHzBG)	-80(500MHzBG)	-70(10-50MHzBG)
<i>Elde etme hızı</i>	Çok hızlı	Hızlı	Çok hızlı
<i>Karmaşıklık</i>	Makul	Makul	Mimariye bağlı olarak az veya çok
<i>Karıştırmaya karşı dayanıklılık</i>	Zayıf	Zayıf	İyi
<i>RF aralığı</i>	0,5-40GHz	0,5-18GHz	0,5-60GHz
<i>Frekans doğruluğu</i>	5-10MHz	0,5-3MHz	1MHz
<i>Darbe genişliği aralığı</i>	CW-20ns	CW-4ns	CW-30ns
<i>Dinamik aralık (dB)</i>	80	60	50-80
<i>Maliyet</i>	Makul	Makul	Yüksek

2.3. Literatür Araştırması

Literatürde bu konuyla ilgili yapılmış uygulamalar ve bu uygulamalarda kullanılan teknikler bu bölümde incelenmiştir. Konuyla ilgili yazılmış olan makalelerden üçünden sırayla bahsedilmiştir.

Pandolfi ve arkadaşlarının yaptığı uygulamada superheterodyne mimari kullanılmıştır (Şekil 2.9 [Pandolfi et al., 2009]). Bu mimaride giriş işareti ilk olarak AGC (Automatic Gain Control) katına girmekte, RF işaretinin genliği ilerleyen katlardaki kuvvetlendiricileri ve çarpıcıları doyuma sokmayacak şekilde ayarlanmaktadır. Belirtilen elemanların doyuma girmesi IF seviyesindeki işaretin gürültü seviyesini arttıracaktır. AGC katı bu durumun önüne geçmek için kullanılmış ve sistemin dinamik aralığı arttırılmıştır. Sistemde 2 - 18 GHz'lik çalışma bandı 5 alt banda bölünmüş ve bunu sağlamak için 5 adet BGF (band geçiren filtre) kullanılmıştır. Kullanılan BGF'lerin band genişlikleri 3.5 ile 4.5 GHz arasında değişmektedir. Ana işaret 5'li bir anahtarlama devresi ile 5 kanala bölünmüş daha sonra filtre çıkışları yine 5'li bir anahtarlama devresi ile teke indirilmiştir. Bu filtreleme uygulaması ile incelenen band dışındaki ve incelenen frekansın hayal frekansındaki (image frequency) işaretler süzölmüştür. Böylece sistemin spur performansı iyileştirilmiştir. Mimaride RF frekansındaki işareti IF frekansına düşürmek için bir kere frekans üst çevrim (upconversion), iki kere frekans alt çevrim

(downconversion) işlemi uygulanmıştır. RF işareti ilk çarpıcıda geniş bandlı gezen bir LO kullanılarak üst frekansa çıkarılmış, daha sonra çarpıcı çıkışındaki bu işaret BGF'den geçirilmiştir. Bu filtre yardımıyla çarpıcıda oluşan intermodulasyon ürünleri süzölmüştür. Bu işaret sırasıyla LO2 ve LO3 işaretleri ile de çarpılarak istenilen IF frekansına indirilmiştir. Burada LO2 ve LO3 osilatörleri sabit frekanslı osilatörler olarak görev yapmışlardır. IF işareti elde edilirken kullanılan bu frekans çevrim yöntemi IF'deki spur ve intermodulasyon işaretlerinin en aza indirilmesi açısından faydalı bir yöntemdir.

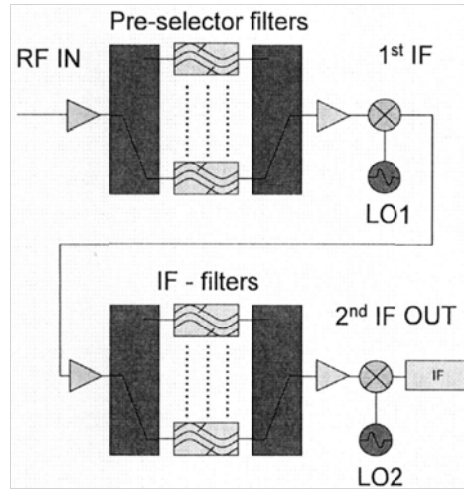


Şekil 2.9: Pandolfi'nin tasarımına ait sistem blok diyagramı.

Superheterodyne alıcı yapısının kullanıldığı bir başka çalışmada iki aşamalı frekans alt çevrim uygulanarak RF işareti IF frekansına düşürölmüştür. Şekil 2.10'da, bu çalışmada önerilen alıcı yapısı verilmiştir [Barraclough, 2008]. Önerilen mimaride, frekans alt çeviricide ilk olarak ön-seçici filtre yardımıyla RF bandı alt bandlara bölünmüş, daha sonra geniş bandlı çarpıcıya giren bu işaret LO1 işaretiyle çarpılıp IF1 işareti elde edilmiştir. Burada LO1 lokal osilatörü geniş bandlı gezen bir osilatördür. IF1 işareti de IF filtreleri yardımıyla alt bandlara bölünmüş ve filtre çıkışındaki işaret ikinci çarpıcıda LO2 işaretiyle çarpılarak IF işareti elde edilmiştir. Burada filtre bloklarındaki filtre sayısı, filtre band genişlikleri, IF band genişlikleri sistemden istenilen performansa göre değiştirilebilmektedir.

Sistemde kullanılan filtrelerin band genişlikleri 2.75 GHz ile 4.15 GHz arasında değişmektedir. Bu mimaride sadece frekans alt çevrim metodunun uygulanması sistemin spur ve intermodulasyon performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Böyle bir sistemde her çarpım işleminden sonra BGF kullanılarak intermodulasyon ürünlerinin ve LO işaretlerinin süzölmesi gerekmektedir. Buradaki

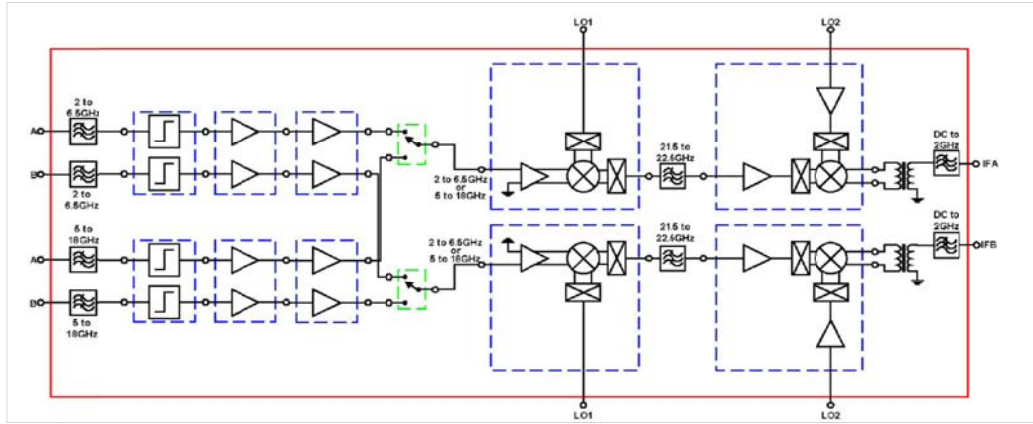
filtreler ise 2x1 ve 2x2 dereceden intermodülasyon ürünlerini süzememektedir [Barracough, 2008]. 2x1 ve 2x2 dereceden intermodülasyon ürünlerinin genlik seviyeleri sistemdeki kritik elemanların intermodülasyon performansları tarafından belirlenmektedir. Intermodülasyon probleminin iyi performanslı elemanlar seçerek en aza indirilmesi gerekmektedir [Barracough, 2008].



Şekil 2.10: Barracough'un tasarımına ait sistem blok diyagramı.

Applied Radar firmasının yaptığı çalışmada kullanılan mimaride frekans bandı 2 - 6,5 GHz ve 5 - 18 GHz olmak üzere iki alt banda bölünmüştür. Şekil 2.11'de gösterilen bu mimaride işaretler aynı zamanda çift kanallı (dual channel) olarak alıcıya gelmektedir. Sistemin çift kanallı olması her iki kanaldan gelen işaretlerin aynı fazda ve aynı genlikte IF frekansına düşürülmesini zorunlu kılmaktadır. RF işareti ilk olarak BGF'den, sonrasında ise sistemi yüksek seviyede gelebilecek işaretlerden korumak için yerleştirilmiş limitleyiciden geçmektedir. İlk çarpıcıya gelen işaret burada 23 - 41 GHz aralığında gezen bir LO ile çarpılarak 22 - 23 GHz frekans seviyesine yükseltilmekte, bu işaret 21,5 - 22,5 GHz bandında çalışan BGF'den geçerek ikinci çarpıcıya gelmektedir. İkinci çarpıcıda sabit bir LO kullanılarak frekans alt çevrim işlemi uygulanarak işaret istenilen IF frekansına düşürülmektedir. Tercih edilen mimari sistemin iyi bir intermodülasyon performansına sahip olmasını sağlarken, çift kanallı bir yapının ve geniş bandlı gezen bir osilatörün olması sistemin gerçekleşmesini zorlaştıran etkenlerdir. Tasarımda kullanılan çiplerin birçoğu özel tasarım olup piyasadan temin edilmemiş olan

ürünlerdir. Yapılan ölçümler sonucunda, gerçekleştirilen sistemin 10 dB kazanç ve 7 dB noise figure değerine sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.11: Applied Radar Inc. tasarımına ait sistem blok diyagramı.

3. TASARIM VE GERÇEKLEME

RF ön alıcı tasarımında farklı yöntemlerin olduğu önceki kısımda karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Uygulama sahası ve isterler dikkate alındığında, superheterodyne alıcı yapısının öne çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte, pratikte uygulamaya bağlı olarak birkaç farklı yapının beraberce kullanılması da tercih edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamındaki tasarımda, superheterodyne alıcı yapısı tercih edilmiştir.

Uygulama sahasının tabiatı gereği tasarlanması hedeflenen RF ön alıcı sistemin performansı çok önemlidir. Bunun nedeni, alınan radar işaretleri bu kısımda IF frekansına indirilip, kararın verileceği yer olan işaret işleme birine gönderilmesidir. Alınan işaretin IF frekansına indirilmesi sırasında meydana gelebilecek hatalar işaret işleme biriminde yanlış kararlar verilmesine sebep olmaktadır. Yanlış alarm verilmesi veya çevrede bir radar varken onun tespit edilememesi karşılaşılabilecek en önemli problemlerdir. Böyle bir durumda sistemin kullanıldığı tesisin güvenliği tehlikeye girmektedir. Tasarımdaki en önemli amaç bu tür problemleri en aza indirmektir.

Gerçekleştirilen tasarımda, girişteki filtrelerin band genişliklerinin sayısal olarak kontrol edilmesi suretiyle frekans seçiciliği arttırılmış, sistemin bozucu işaretlere karşı mukavemeti arttırılmıştır. Bu yapının diğer yapılardan farkı, diğer yapılarda 10 ve üzeri sayıda filtreyle sağlanabilecek performansın bu yapıda ayarlanabilir filtrelerin kullanılması sayesinde 3 adet filtreyle sağlanmasıdır. Böylece alt bandlara ayrılmış olan işaret, daha dar bandlı filtrelerle daha iyi süzölmektedir. Tasarlanan sistemin ayarlanabilir kazanç özelliği sayesinde dinamik aralık değerinin de geniş olması sağlanmıştır.

Tasarım süreci temelde 3 aşamadan oluşmaktadır:

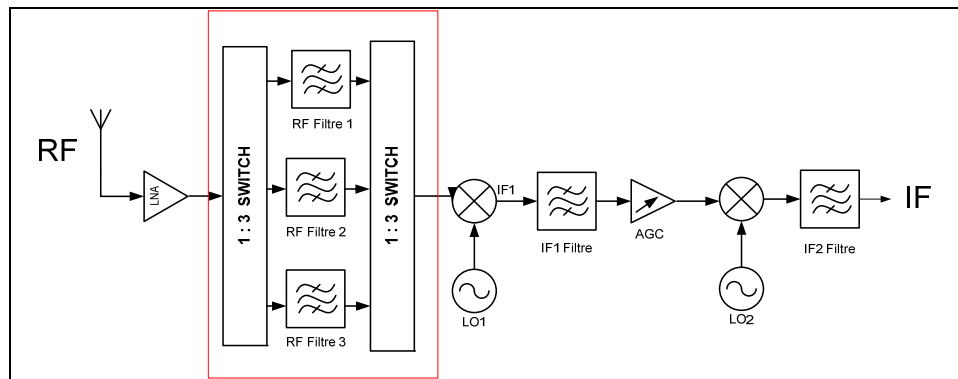
- Ön çalışma ve kavramsal tasarım faaliyetleri (alıcı mimarisi, sistem düzeyinde yapının tasarımı, bileşen seçimi)
- Benzetim Çalışmaları (benzetim ortamı seçimi, sistem düzeyinde benzetim çalışmaları, temel performans analizleri)
- Gerçekleme (Tasarımın gerçekleşmesi)

Aşağıdaki bölümlerde, bu aşamalar detaylı olarak sırası ile anlatılacaktır.

3.1. Ön Çalışma ve Kavramsal Tasarım Faaliyetleri

Tasarımda kullanılacak mimari belirlenirken ilk olarak hangi alıcı tipinin kullanılacağına karar verilmiştir. Önceki bölümlerde tartışıldığı üzere, bu tür uygulamalarda kullanılan alıcı tipleri incelendiğinde superheterodyne tip alıcı yapısının daha uygun olduğu görülmektedir. Bu alıcı yapısının seçicilik ve duyarlılık performansının yüksek olması ve yapısının basit ve ucuz maliyetli olması bu uygulamada tercih edilmesinin gerekçeleridir. Bu yapıda 2 – 18 GHz bandı alt bandlara ayrılarak incelenecektir. Alt bandların kullanılması sistemin intermodülasyon performansını iyileştirecek ve eşzamanlı gelen farklı frekanslardaki radar işaretlerinin birbirlerine karıştırılarak farklı yorumlar yapılmasının önüne geçecektir.

Şekil 3.1’de tasarlanacak sistem için jenerik bir blok diyagram verilmiştir. Yapılacak olan uygulamada frekans bandı 3 alt banda ayrılarak incelenecektir. Antenden alınan RF işareti LNA katından geçtikten sonra 1:3 switch elemanına gelecek ve üç farklı band geçiren filtre yardımıyla süzülecektir. Filtre çıkışındaki işaretler tekrar 1:3 switch’e gelerek tek kanala indirilecektir. Bu işaret iki kez çarpıcıdan geçerek iki aşamada IF frekansına düşürülecektir. Bu doğrultuda, tasarımda bir LNA, 2 adet anahtar grubu ile hedeflenen bandı kapsayan filtre bankası, iki çarpıcı ve IF filtreler temel bileşenler olacaktır. Sonraki aşamada bu bileşenlerin seçimi ve sistem bazında benzetimler yoluyla performans analizlerinin yapılmıştır.



Şekil 3.1: Tasarlanacak sistemin blok diyagramı.

3.1.1. Sistem İsterlerinin Belirlenmesi ve Sistem Tasarımı

Sistem tasarımına başlamadan önce sistem isterlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla piyasada hali hazırda bulunan ürünler incelenmiş ve bu ürünlerin özelliklerinden yola çıkılarak sistem isterleri belirlenmiştir. Tasarlanacak sisteme ait özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir.

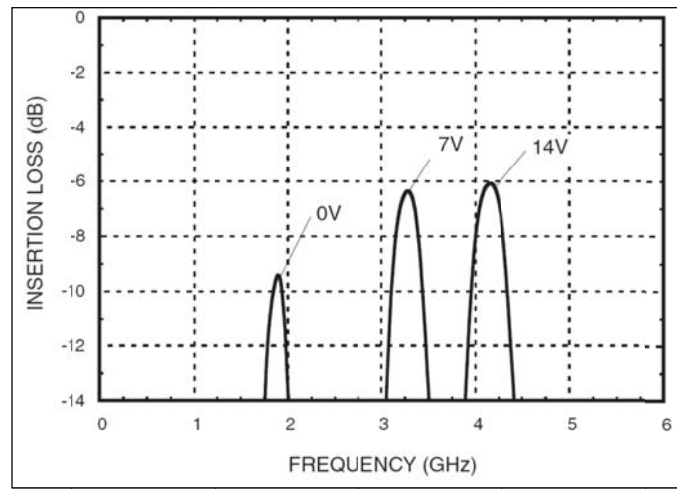
Tablo 3.1: RF Ön alıcı performans kriterleri.

Performans Kriterleri	
RF Frekans Aralığı	2 - 18 GHz
IF Çıkış Frekansı	70 MHz
IF Band Genişliği	30 MHz
Maksimum RF Giriş Seviyesi	-20 dBm
Minimum RF Giriş Seviyesi	-75 dBm
Dinamik Aralık	55 dB
Kazanç (maksimum)	55 dB
LO1 Giriş Seviyesi	13 dBm
LO2 Giriş Seviyesi	7 dBm
Noise Figure (maksimum)	5 dB

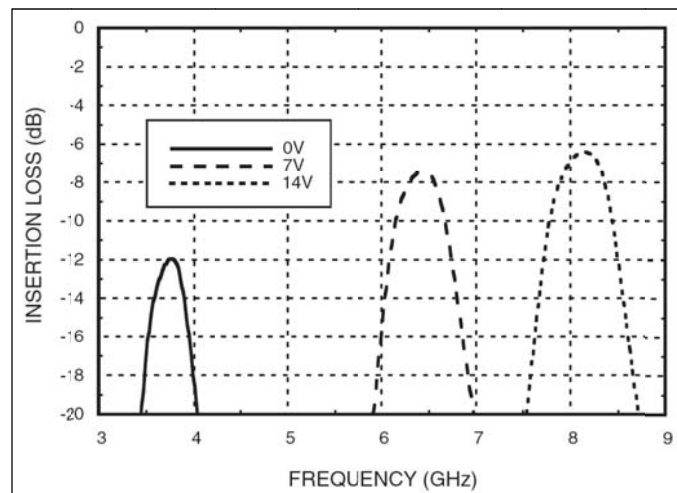
Performans kriterleri belirlendikten sonra ilk olarak sistemin frekans çevrim işlemini nasıl gerçekleştireceğine karar verilmiştir. Bu amaçla IF1 ara frekans değerinin ne olacağı belirlenmiştir. Bu işlem yapılırken 2 – 18 GHz bandının dışında kalacak bir frekans değeri ara frekans değeri olarak seçilecektir. Böylece ara frekans işaretinin istenmeyen işaretlerden arındırılması daha kolay olacak, çalışma bandındaki işaretlerin buraya sızması engellenecektir. IF1 değeri olarak 1645 MHz seçilmiş, tasarımda birinci çarpıcı çıkışına bu filtre yerleştirilmiş ve IF1 işaretinin süzülerek temiz bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. İncelenecek RF frekansına göre LO1 işaretinin frekansı değişecek ve RF işareti ilk çarpıcıda 1645 MHz değerine indirilecektir. IF1 işareti ikinci çarpıcıda LO2 işaretiyle çarpılacak ve 70 MHz frekanslı IF işareti elde edilecektir, bu işareti süzmek ve temiz bir şekilde elde etmek amacıyla ikinci çarpıcı çıkışına LC bir filtre tasarlanıp yerleştirilmiştir.

Frekans çevrim işleminin nasıl gerçekleştirileceğinin belirlenmesiyle sistemde ne tür filtrelerin ve LO frekanslarının kullanılacağı kesinlik kazanmıştır.

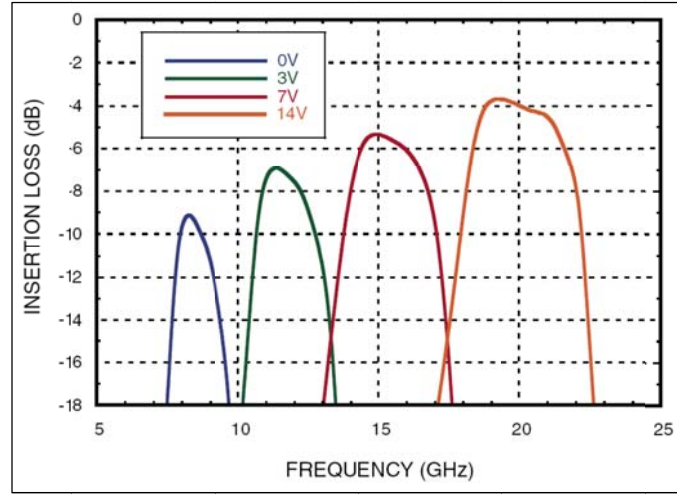
Sistemin RF işaret filtreleme yeteneği daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi merkez frekansı ayarlanabilir band geçiren filtrelerle sağlanacaktır. Bu tür filtrelerden 3 adet paralel şekilde kullanılarak 2-18 GHz bandı kapsanabilmektedir. Bu filtrelerden ilki 2 – 4 GHz, ikincisi 4 – 8 GHz ve sonuncusu ise 8 – 18 GHz frekans aralığında çalışacaktır. Filtrelerin kontrolü DC gerilim ile sağlanmaktadır. Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te, filtrelerin gerilim-frekans değişimini gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 3.2: Filtre-1 gerilim-frekans karakteristiği.



Şekil 3.3: Filtre-2 gerilim-frekans karakteristiği.



Şekil 3.4: Filtre-3 gerilim-frekans karakteristiği.

Sistemin istenilen dinamik aralıkta çalışabilmesini sağlamak için sistemde işlem yapılırken dinamik aralık içerisinde kuvvetlendiriciler doymayacak şekilde yerleşim planlanmıştır. Alıcı girişindeki işaret seviyesinin yükselmesi sistemde yer alan kuvvetlendiricilerin ve çarpıcıların doymasına ve harmonik üretmesine sebep olabilir. Bu durumu engelleyebilmek ve sistemi belirtilen dinamik aralık içerisinde doymaya girmeden çalıştırabilmek amacıyla, tasarıma kazanç değerinin ayarlanabilirliği yeteneği kazandırılmıştır. Bunu sağlayabilmek için zayıflatma değeri DC bir gerilim ile ayarlanabilen ayarlı zayıflatıcılar kullanılmıştır. Yüksek seviyeli işaretlerin gelmesi durumunda kazanç değeri düşürülerek sistemin doymaya girmesi engellenebilecektir.

Sistemin tasarımı tamamlandıktan sonra bu sistemi oluşturabilmek için kullanılacak elektronik malzemelerin araştırılmasına geçilmiştir. Kullanılacak elektronik malzemeler seçilirken bunların istenilen elektronik karakteristiklere sahip olmasının yanında temin edilebilirliklerinin de kolay olması gerekmektedir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak tasarlanacak devrelerde kullanılacak elektronik malzemeler belirlenmiştir.

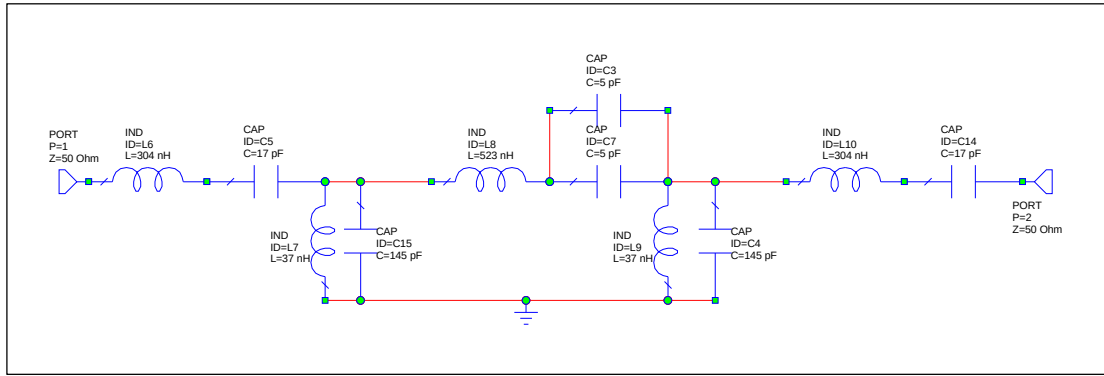
3.2. Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmalarında AWR isimli benzetim programı kullanılmıştır. Bu programın VSS (Virtual System Simulator) isimli aracı kullanılarak sistem

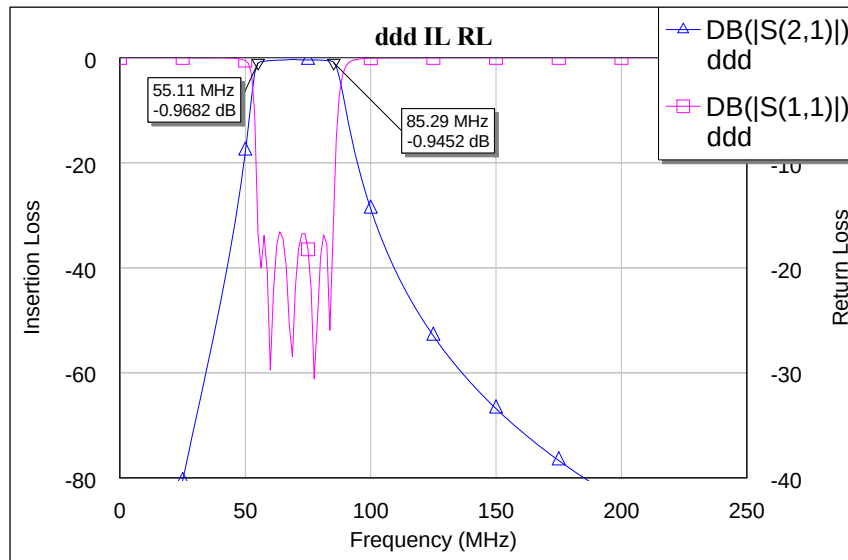
benzetimleri, Microwave Office aracı kullanılarak da IF kısmı için tasarlanacak LC filtrenin tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. IF Filtre Tasarım ve Benzetimi

Filtre tasarımı için Microwave Office tasarım ve benzetim aracından faydalanılmıştır. Bu programda merkez frekansı 70 MHz, band genişliği 30 MHz olan 5. dereceden band geçiren filtre tasarlanmıştır. Tasarlanan filtre devresi ve benzetim sonucu elde edilen S parametreleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da verilmiştir.

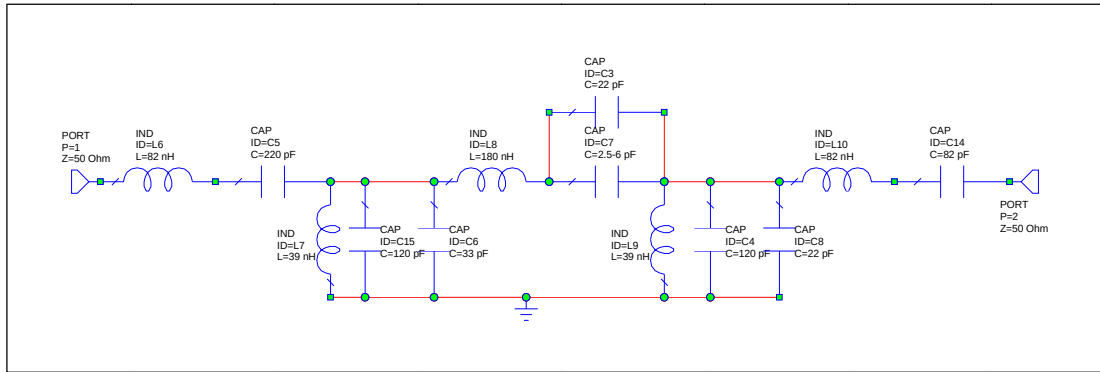


Şekil 3.5: IF Filtre devre şeması.

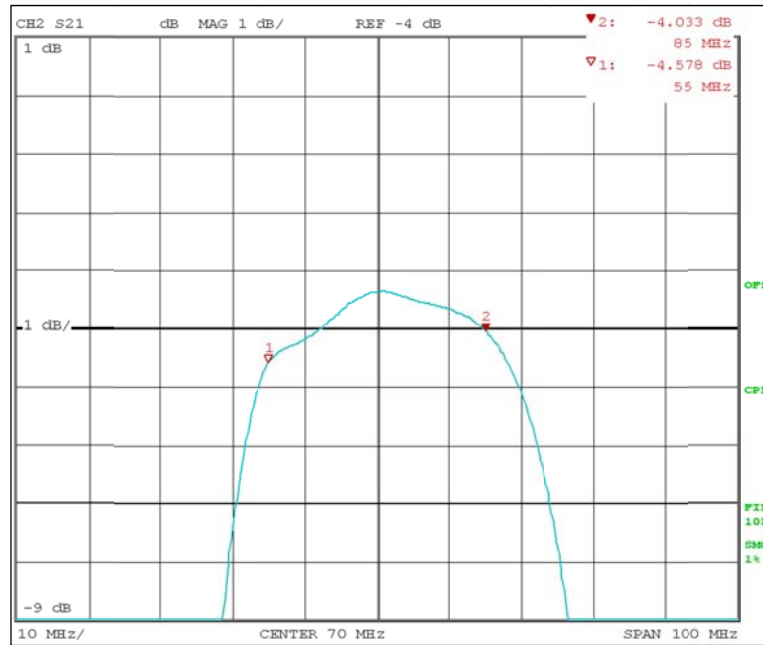


Şekil 3.6: IF Filtre S parametreleri.

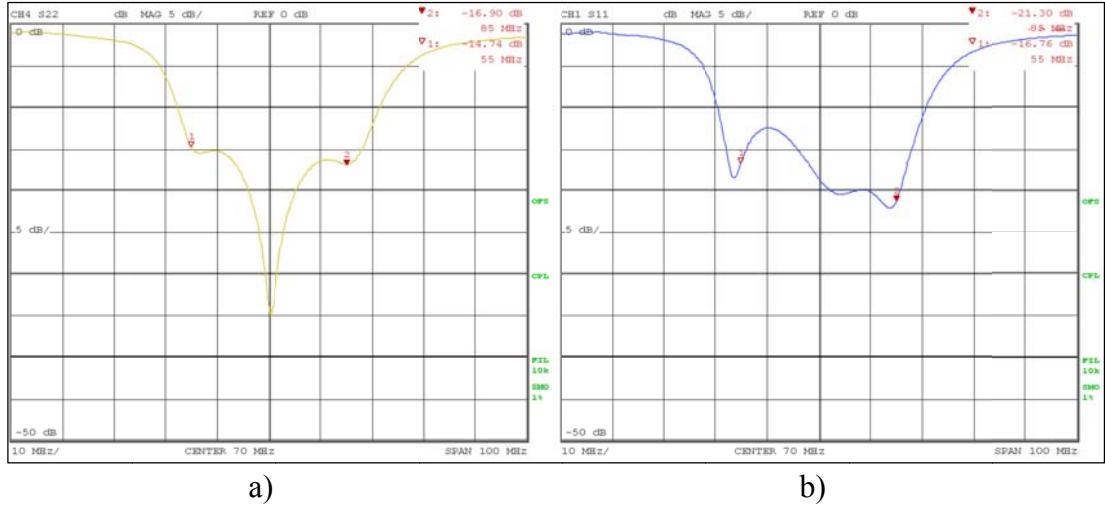
Tasarım programından elde edilen kondansatör ve endüktans değerleri pratik hayatta bulunmayan standart dışı değerlerdir. Gerçeklenen filtrede bu değerlere en yakın standart değerler kullanılmıştır. Bu nedenle, filtrenin S parametreleri istenilen performansta olmamıştır. Filtre network analizör cihazı kullanılarak ölçülmüş ve ölçümler neticesinde tasarım üzerinde gerekli değişiklikler yapılarak filtre istenilen performansa getirilmiştir. Filtreye ait devre şemasının son hali ve ölçüm sonuçları Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9.a) ve Şekil 3.9.b)’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Gerçeklenen IF filtre devre şeması.



Şekil 3.8: Ölçüm sonucu çıkan S21 parametresi.

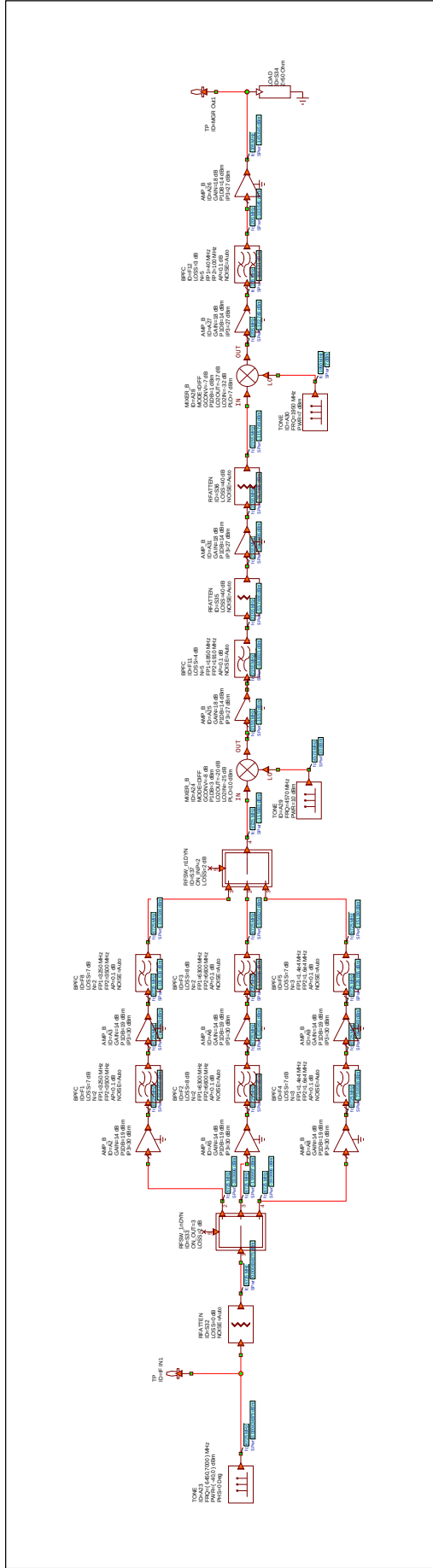


Şekil 3.9: a) Ölçüm sonucu çıkan S22 parametresi, b) Ölçüm sonucu çıkan S11 parametresi.

Ölçüm sonucu elde edilen S parametreleri gerçekleştirilen filtrenin performansının yeterli düzeyde olduğunu göstermektedir. S21 grafiğinden filtrenin geçirme bandının istenildiği gibi 30 MHz olduğu ve bu band içerisinde genlikte dalgalanmanın 1 dB değerini geçmediği görülmüştür. Ayrıca S11 ve S22 parametrelerinin de geçirme bandında -15 dB değerinin altında olduğu yani filtre giriş ve çıkışlarının empedans değerlerinin 50 ohm değerine uyduğu görülmektedir. Bu ölçüm sonuçları sistem benzetim çalışmaları sırasında sistem bileşenleri tanımlanırken kullanılmıştır.

3.2.2. Sistem Benzetim Çalışmaları

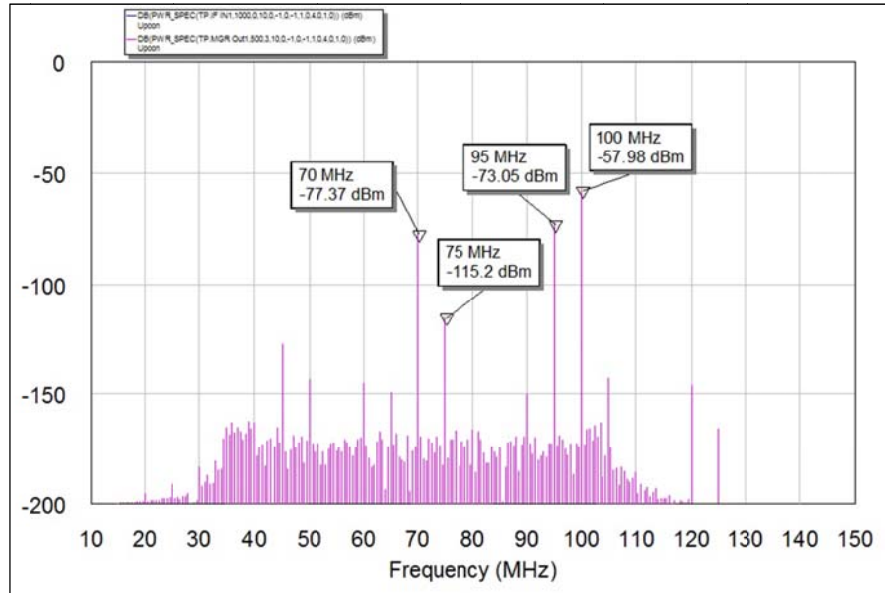
Sistem benzetim çalışmaları için ön alıcı sistem için seçilen elektronik malzemeler ve bu malzemelerin üretici tarafından belirtilen benzetim değerleri VSS isimli program içerisinde tanımlanmıştır. Bu işlem yapıldıktan sonra belirlenen malzemeler tasarıma uygun şekilde proje dosyasında yerleştirilmiş ve bağlantıları yapılmıştır. VSS programında tasarlanan ön alıcı sistem bloğu Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10: VSS Sistem blok diyagramı.

Benzetim çalışmaları sırasında ayarlanabilir filtreli sistem yapısının sabit filtreli sisteme göre avantajını göstermek amacıyla her iki sistem üzerinde benzetim çalışmaları yapılmıştır.

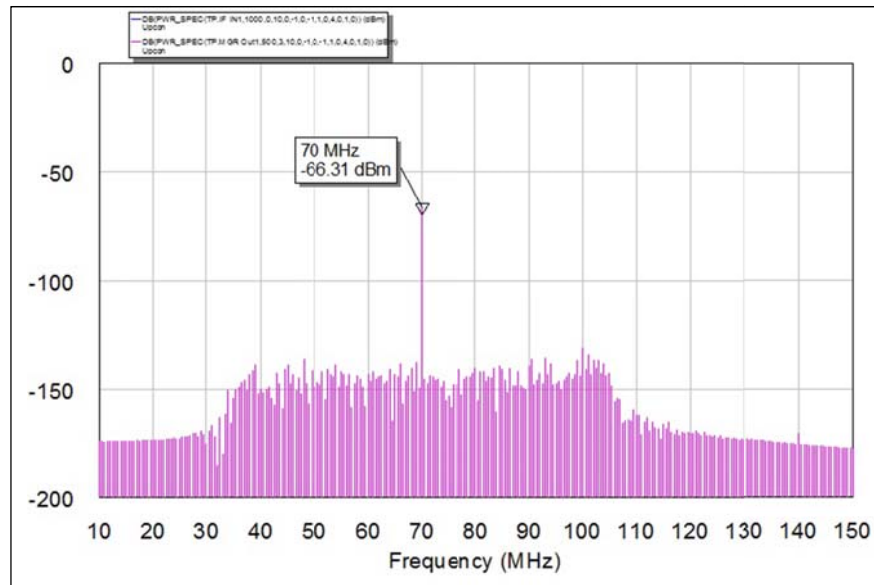
Benzetim uygulamasının ilki sabit filtreli yapı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yapıda RF bandı, kullanılan band geçiren filtrelerle 4 alt banda ayrılmıştır. Filtrelerin geçirme bandları 2 – 6 GHz, 6 – 10 GHz, 10 – 14 GHz ve 14 – 18 GHz olarak girilmiştir. Bu sisteme aynı anda iki adet işaret uygulanmıştır, bu işaretlerden birisi sistemi yanıltmak amacıyla jammer cihazları tarafından gönderilen karıştırıcı işaret, diğeri ise tespit edilmek istenen hedeften gelen hedef işarettir. Karıştırıcı işaretin frekansı 7000 MHz, genliği ise 0 dBm; hedef işaretinin frekans değeri 6450 MHz ve genliği -40 dBm'dir. Sistemin belirtilen hedef işaretini algılayabilmesi için filtre seçici anahtarın 6 – 10 GHz bandını geçiren filtreyi seçmesi gerekmektedir; fakat bu durumda bozucu işaret olan karıştırıcı işareti de filtreden geçerek çarpıcı ve kuvvetlendirici kısmına ulaşacaktır. Bozucu işaretin genliği çok büyük olduğu için sistemdeki çarpıcı ve kuvvetlendiricilerin doymaya gitmesine ve istenmeyen işaretler üretmesine sebep olacaktır. Bu durumun benzetimi yapılmış ve çıkış spektrumu Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11: Sabit filtreli yapı benzetim sonucu çıkış spektrumu.

Şekil 3.11’de verilen spektrumda görüldüğü gibi, elemanların doymaya ulaşmasıyla beklenildiği gibi istenmeyen işaretler oluşmuştur. Böyle bir durumda sistem, çıkış spektrumunda ortaya çıkan işaretleri hedefmiş gibi değerlendirecek ve yanlış alarmlar vererek kullanıcıyı yanıltacaktır. Yapılan benzetimde ortamda aslında bir adet hedef işareti olmasına rağmen çıkış spektrumunda bir taneden fazla işaret görülmektedir. Sistem bu işaretlerin her birini ayrı birer tehdit olarak algılayacak ve kullanıcıya yanlış alarmlar gönderecektir. Eğer girişteki filtreler daha dar bandlı filtreler olsaydı, sistemin seçiciliği artacak ve karıştırıcı işaret bu filtrelerde süzülerek işaretin diğer kısımlara ulaşması engellenecekti. Böylece çıkış spektrumunda istenmeyen işaretler oluşmayacaktı. Tasarlanan ayarlanabilir filtreli yapı daha dar bandlı filtrelemenin yapılarak sistemin seçiciliğinin artmasını sağlayacaktır.

Benzetim çalışmalarının ikinci kısmında ayarlanabilir filtreli yapı üzerinde aynı giriş işaretleri uygulanarak benzetim çalışması yapılmıştır. Bu durumda elde edilen çıkış spektrumu Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12: Ayarlanabilir filtreli yapı benzetim sonucu çıkış spektrumu.

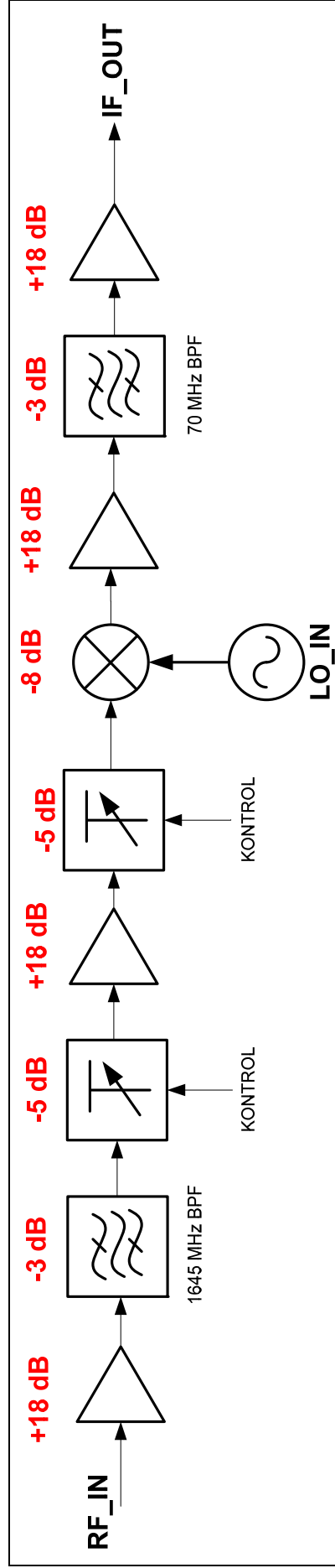
Ayarlanabilir filtrelerin kullanımının sistemin seçiciliğini arttırdığı Şekil 3.12’de verilen çıkış spektrumu incelendiğinde görülmektedir. Bu filtrenin geçirme bandı sabit filtreye göre daha dar olduğu için karıştırıcı işaret filtrelerden geçememiş ve sistemi doyuramamıştır. Girişte ayarlanabilir filtrelerin kullanılması fikrinin seçiciliği arttırdığı benzetim çalışmalarıyla ispatlanmıştır.

3.3. Tasarımların Gerçeklenmesi

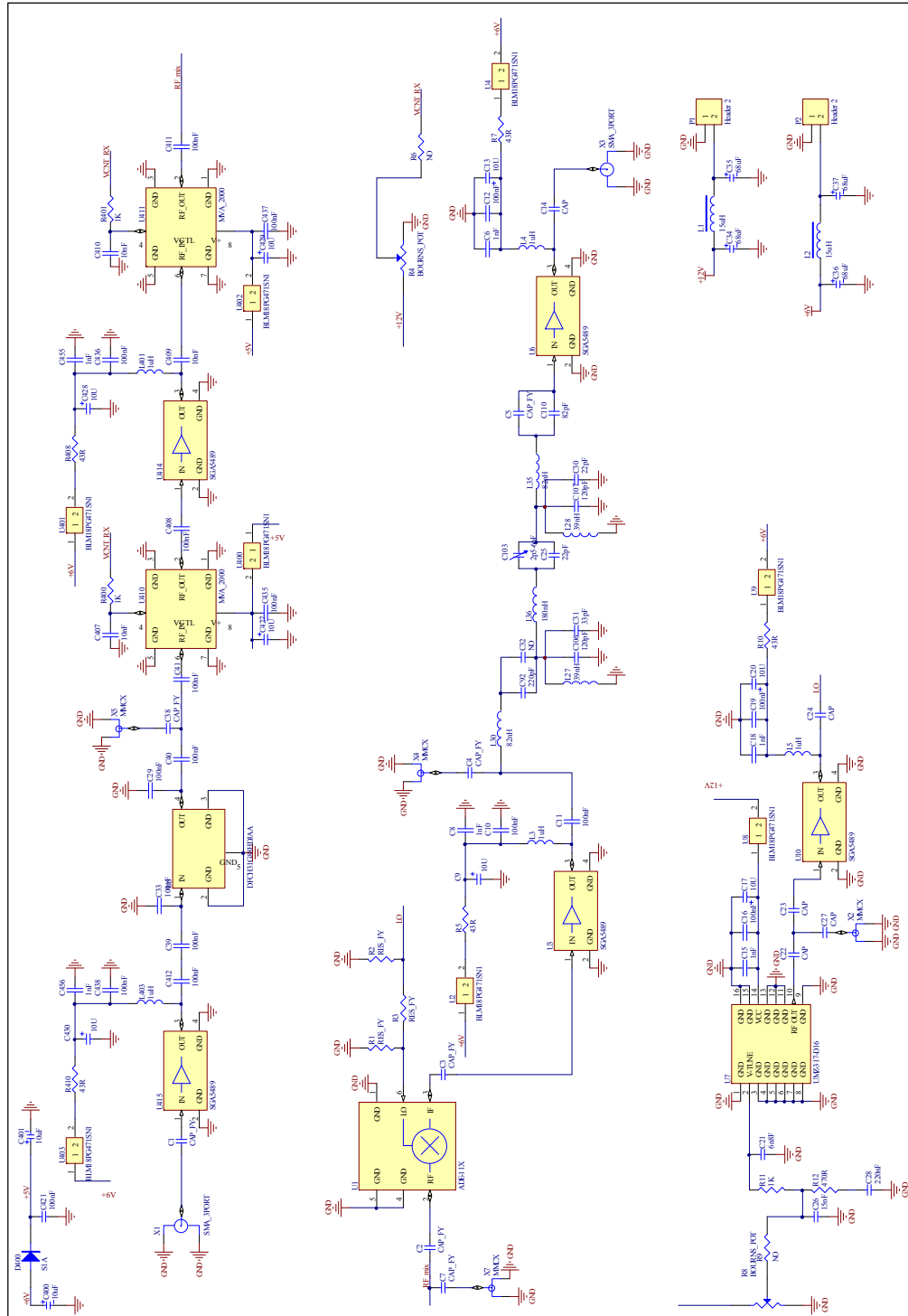
Bu bölümde tasarımların detaylarından ve gerçekleşmesinden bahsedilmiştir. Gerçeklenen sistem için iki adet elektronik devre tasarlanmış ve bunların baskı devreleri üretilmiştir. Kartlardan birisi 1645 MHz frekanslı IF1 işaretinin filtrelediği, kazanç kontrol devreleriyle kazanç ayarının yapıldığı ve IF işaretinin üretilip filtrelediği IF kartıdır. Gerçeklenen diğer kart ise ayarlı filtrelerin ve bu filtre kayıplarını telafi etmek amacıyla eklenen kuvvetlendiricilerin bulunduğu filtre kartıdır. Bu kartların dışında sistemde RF işaretini IF1 frekansına düşüren bir adet SMA konektörlü harici çarpıcı ve bir adet SMA konektörlü LNA kullanılmıştır.

3.3.1. IF Kartı

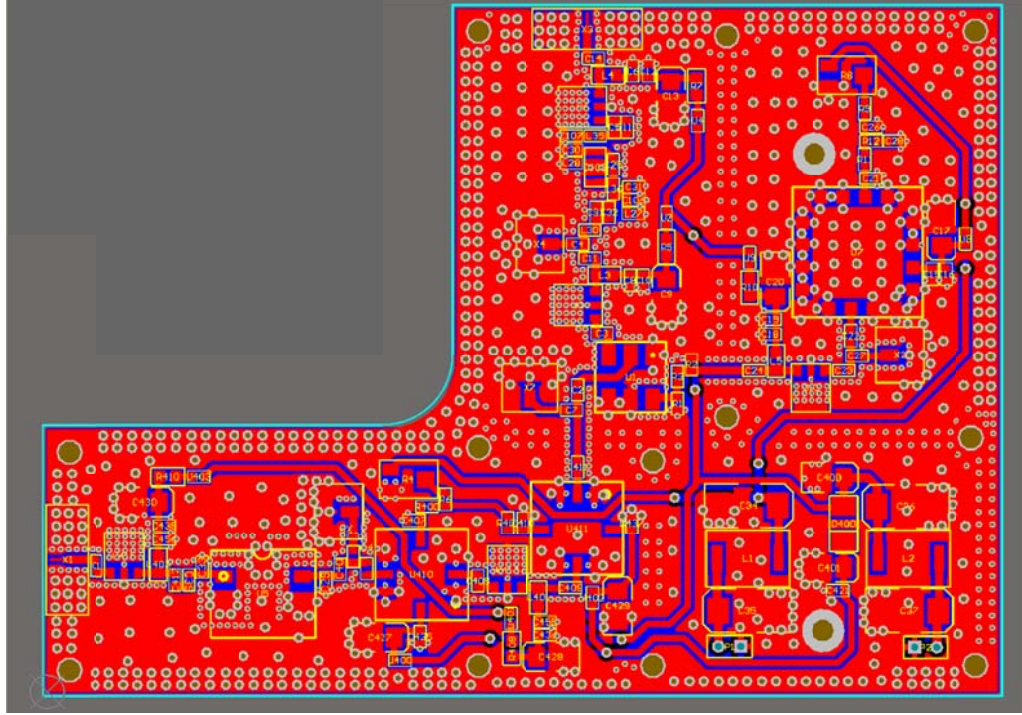
IF kartı 1645 MHz frekansındaki IF1 işaretinin IF frekansına düşürüldüğü karttır. IF1 işareti SMA konektör vasıtasıyla IF kartına girer ve girişteki 1645 MHz merkez frekanslı dielektrik filtre yardımıyla süzülür. Bu sayede, LO1 işareti ile RF işaretinin çarpımı sonucu oluşan harmonikler süzölmüş olur. Bu filtreden sonra kart üzerinde ayarlı zayıflatıcılar ve kuvvetlendiriciler bulunmaktadır. Ayarlı zayıflatıcıların zayıflatma değerleri DC gerilim ile kontrol edilerek kazanç kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Gerekli gerilimi sağlamak amacıyla kart üzerine ayarlı bir direnç yerleştirilmiştir. Bu direnç ayar tornavidası yardımıyla ayarlanarak kartın kazanç değeri 5 ile 49 dB arasında değiştirilmektedir. Ayarlanabilir kazanç özelliği sayesinde, sisteme yüksek seviyeli işaretler gelmesi durumunda, kazanç değerleri düşürülerek kuvvetlendiricilerin doymasının ve intermodülasyon işaretlerinin oluşmasının önüne geçilmektedir. Kart üzerinde ayarlanabilir kuvvetlendirici kısmından sonra IF1 işareti LO2 işaretiyle çarpılarak IF frekansına düşürülmektedir. IF işareti tekrar kuvvetlendiricilerden ve IF filtresinden geçerek harmoniklerden arındırılmış bir şekilde SMA konektör vasıtasıyla çıkışa verilmektedir. Tasarlanan devre blok diyagramı ve devre şeması Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir:



Şekil 3.13: IF Kart blok diyagramı.

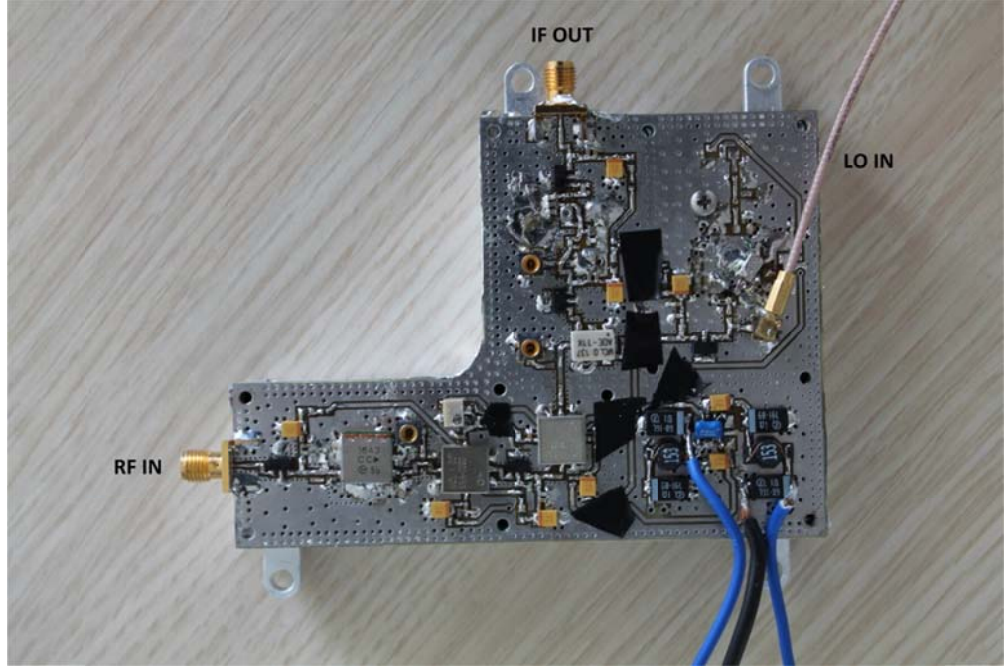


Devre şeması Altium programında çizilmiş ve yine bu program kullanılarak baskı devre çizimi gerçekleştirilmiştir. Karta ait baskı devre görüntüsü Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15: IF Kart baskı devresi.

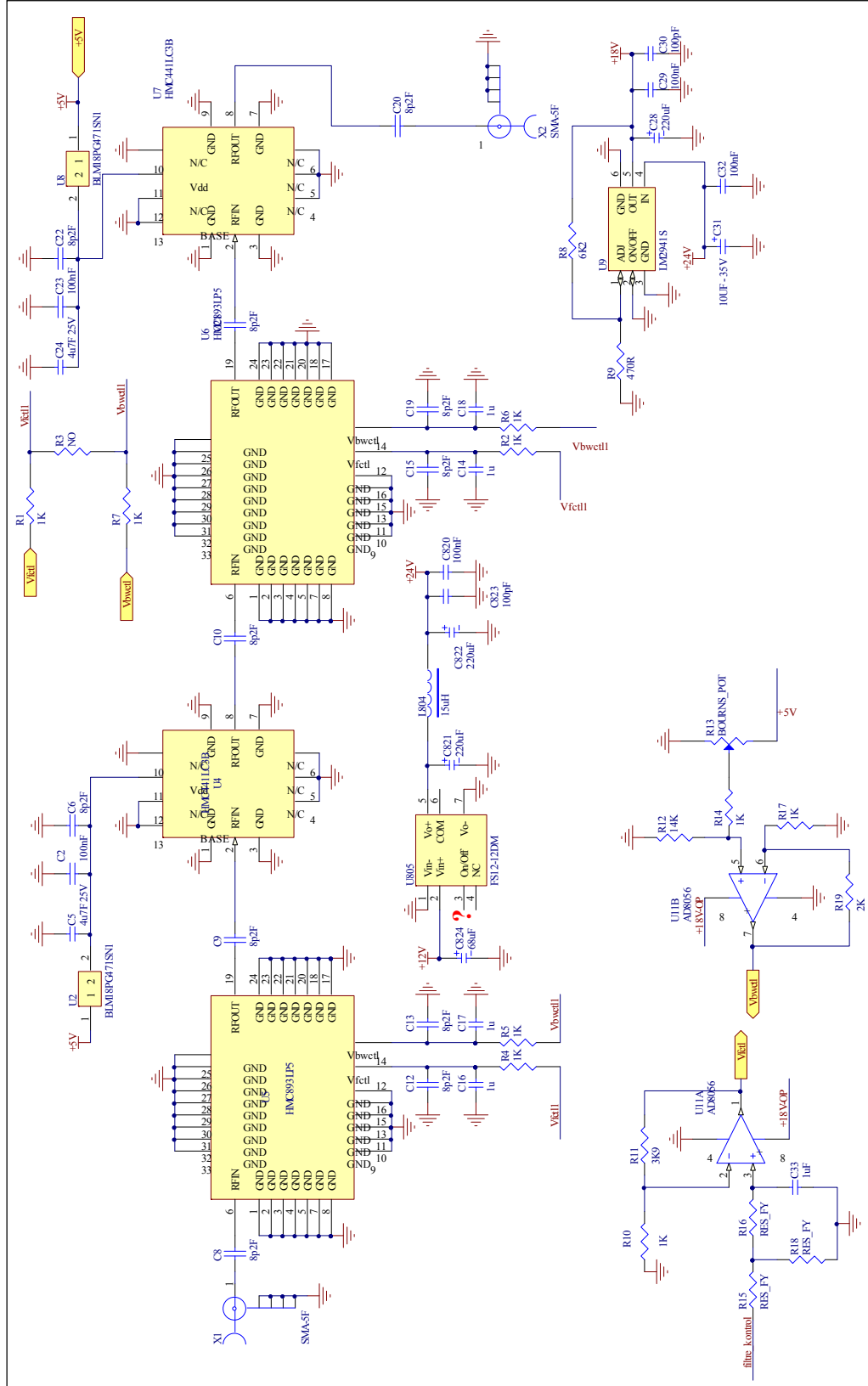
Baskı devre çizimi tamamlandıktan sonra kartın üretimine geçilmiştir. Kart üretimi iki katlı baskı devre olarak gerçekleştirilmiş ve baskı devre plakası olarak FR4 malzeme kullanılmıştır. Baskı devre üretildikten sonra dizgisi yapılmış ve alüminyum mekanik bir kutuya yerleştirilmiştir. Mekanik kutu, devreye dışarıdan gelebilecek olan RF işaretleri engelleyecek ve kartın daha sağlıklı çalışmasını sağlayacaktır. Gerçeklenen devreye ait fotoğraf Şekil 3.16'da yer almaktadır.



Şekil 3.16: Gerçeklenen IF kart devresi.

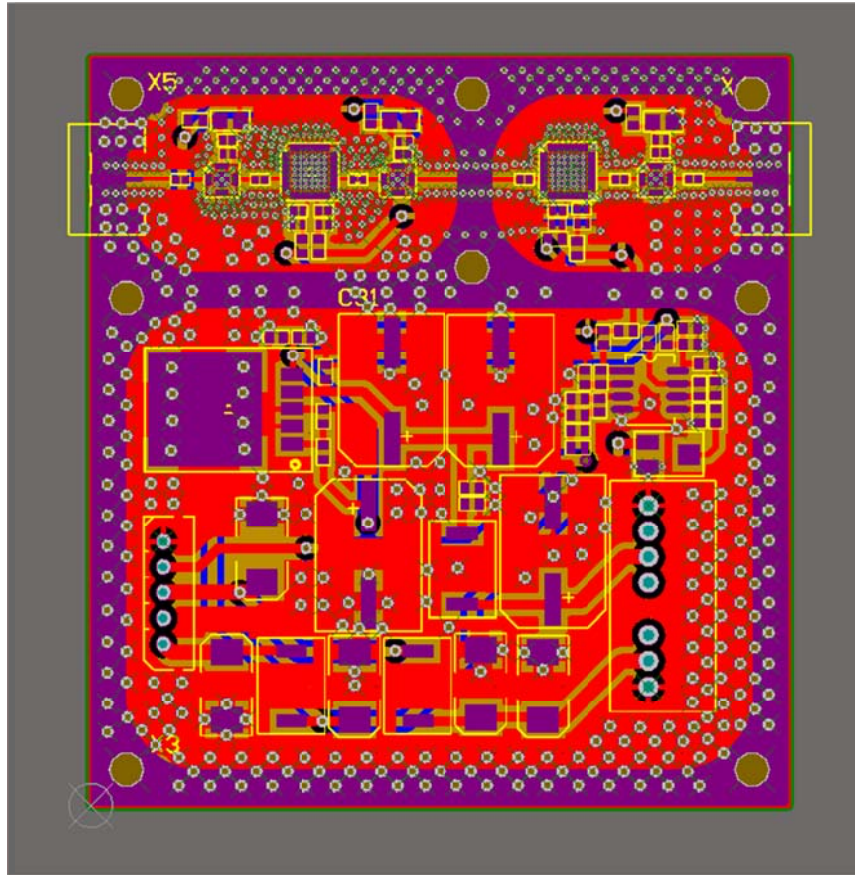
3.3.2. RF Filtre Kartı

RF filtre kartı 2 – 18 GHz RF bandının alt bandlara ayrılmasını ve RF işaretinin frekans çevrim işleminden önce süzülmesi işlemini yerine getirmektedir. Bu kart, sistemde 3'lü anahtarlama bloğundan sonra kullanılacaktır. Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi sistemde 2 – 4 GHz, 4 – 8 GHz ve 8 – 18 GHz olmak üzere 3 farklı aralıkta çalışan 3 adet ayarlanabilir filtre paralel olarak kullanılacaktır. Gerçekleme aşamasında bu filtrelerden 4 – 8 GHz bandındaki filtre elimizde mevcut olduğu için bu filtre gerçekleştirilmiş ve sistem testleri bu filtre kullanılarak yapılmıştır. Filtre elemanı Hittite firmasının HMC893LP5 kodlu ürünüdür. Kart üzerinde iki adet ayarlanabilir filtre elemanı ve bu filtrelerden kaynaklanacak kayıpları gidermek için iki adet kuvvetlendirici elemanı kullanılmıştır. Filtrelerin merkez frekansı DC gerilim ile kontrol edilmektedir ve bu gerilim değeri kart üzerinde yer alan ayarlı direnç ile ayarlanmaktadır. Tasarlanan karta ait devre şeması Şekil 3.17'de verilmiştir.



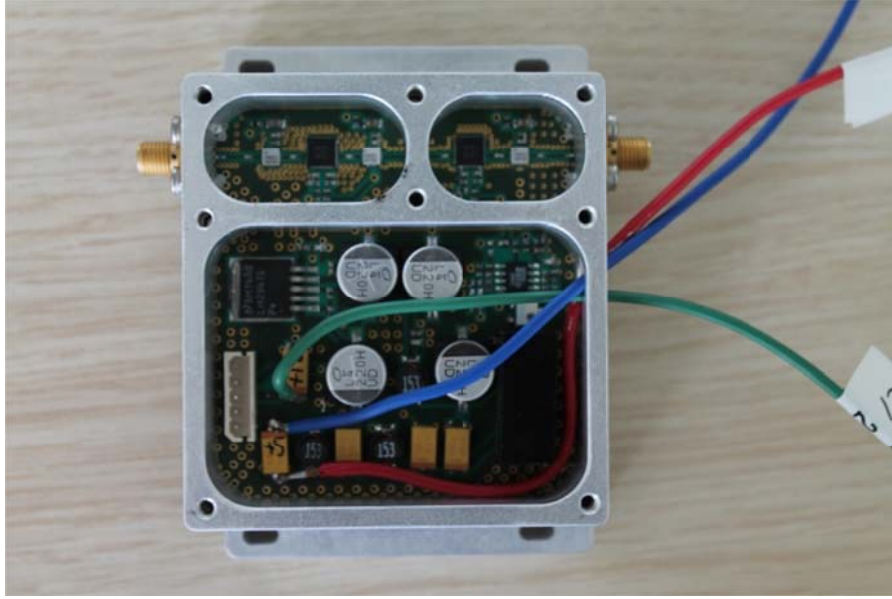
Şekil 3.17: RF Filtre devre şeması.

RF filtre baskı devresi 4 katlı malzeme olarak gerçekleştirilmiş, plaka olarak RO4003 kullanılmıştır. Kart yüksek frekanslarda çalışacağı için hatların üzeri altınla kaplanmış ve yurtdışındaki baskı devre üreticileri tarafından üretimi gerçekleştirilmiştir. Kart yüksek frekanslarda çalışacağı için hat kalınlıklarında meydana gelebilecek değişimlere çok hassastır. Bu yüzden yurtdışındaki ileri teknoloji kullanarak baskı devre üreten üreticilerden faydalanılmıştır. Çizilen baskı devreye ait bilgisayar görüntüsü şekil 3.18’de verilmiştir:



şekil 3.18: RF Filtre baskı devresi.

Dış ortamdaki etkilenmeyi en aza indirmek için kart için mekanik bir kutu da tasarlanıp ürettirilmiştir. Kartın dizgisi gerçekleştirildikten sonra bu kutunun içerisine yerleştirilmiş ve ölçüm aşamasına hazır hale getirilmiştir. Kutulanmış devreye ait fotoğraf şekil 3.19’da yer almaktadır.



Şekil 3.19: Kutulanmış RF filtre kartı.

3.3.3. Ön Alıcı Sisteminin Oluşturulması

Tasarlanan ön alıcı sistemi oluşturmak için dört adet temel bileşen gerekmektedir, bunların ikisi önceki bölümlerde anlatılan IF kartı ve RF filtresidir. Diğer iki bileşen ise piyasadan hazır olarak temin edilen SMA konektörlü LNA ve çarpıcı modüldür.

LNA modülü sistem girişinde yer alacaktır ve düşük NF değerine sahip olduğu için sistem NF değerinin düşük tutulmasını sağlayacaktır. Böylece sistemin duyarlılığı artmış olacaktır. Tasarımda kullanılan LNA modülüne ait bilgiler Tablo 3.2’de, LNA modülü Şekil 3.20’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Kullanılan LNA modülüne ait özellikler.

En Düşük Frekans	6000 MHz
En Yüksek Frekans	18000 MHz
En Düşük Kazanç	18 dB
Ortalama Kazanç	20 dB
Kazanç Dalgallığı	±1 dB
Ortalama NF	1.4 dB
En Yüksek NF	1.6 dB
En Düşük P1dB	8 dBm
Ortalama P1dB	10 dBm



Şekil 3.20: Kullanılan LNA modülü.

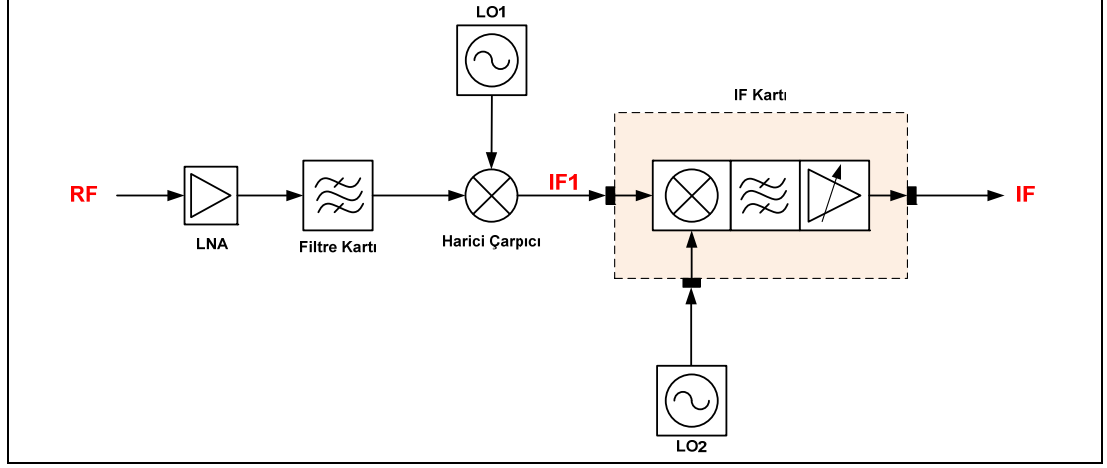
Filtrelenmiş RF işaretin LO1 işaretiyle çarpılıp IF1 işaretinin elde edilmesini sağlayan çarpıcı, RF filtre kartıyla IF kartı arasında yer almaktadır. Bu çarpıcıdan elde edilen IF1 işareti IF kartına girip bu kartta filtrelenerek diğer kısımlara geçmektedir. Sistemde kullanılan çarpıcıya ait karakteristik özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3: Harici çarpıcı karakteristik özellikleri.

Giriş Parametreleri	Durum	Birim	En Düşük	Ortalama	En Yüksek
RF Frekans Aralığı		GHz	2		18
RF VSWR (RF=-10 dBm, LO=+10 dBm)	2 - 18 GHz	Oran		2.5:1	
LO Frekans Aralığı		GHz	2		18
LO Genlik Aralığı		dBm	10	13	15
LO VSWR (LO=+10 dBm)	2 - 18 GHz	Oran		2.5:1	
Geçiş Karakteristiği	Durum	Birim	En Düşük	Ortalama	En Yüksek
Geçiş Kaybı (IF=1 GHz, LO=+10 dBm)	2 - 18 GHz	dB		7.5	9.5
NF	2 - 18 GHz	dB			10
LO-RF İzolasyonu	2 - 18 GHz	dB	20	25	
LO-IF İzolasyonu	2 - 18 GHz	dB		20	
IF-RF İzolasyonu	2 - 18 GHz	dB		20	
P1dB'de Giriş Gücü	LO=+10 dBm	dBm	3		
IIP3	LO=+10 dBm	dBm	13	15	
Çıkış Parametreleri	Durum	Birim	En Düşük	Ortalama	En Yüksek
IF Frekans Aralığı		GHz	0.5		8
IF VSWR (IF=-10 dBm, LO=+10 dBm)		Oran		2:1	

Belirtilen 4 ana bileşen arasındaki bağlantılar yapılarak ön alıcı sistem oluşturulmuştur. Sistemin çalışabilmesi için bu birimlere besleme gerilimlerinin

verilmesinin yanında frekans çevrimi için gerekli olan LO1 ve LO2 lokal osilatör işaretlerinin de sağlanması gerekmektedir. Sisteme ait blok diyagram Şekil 3.21’de verilmiştir:



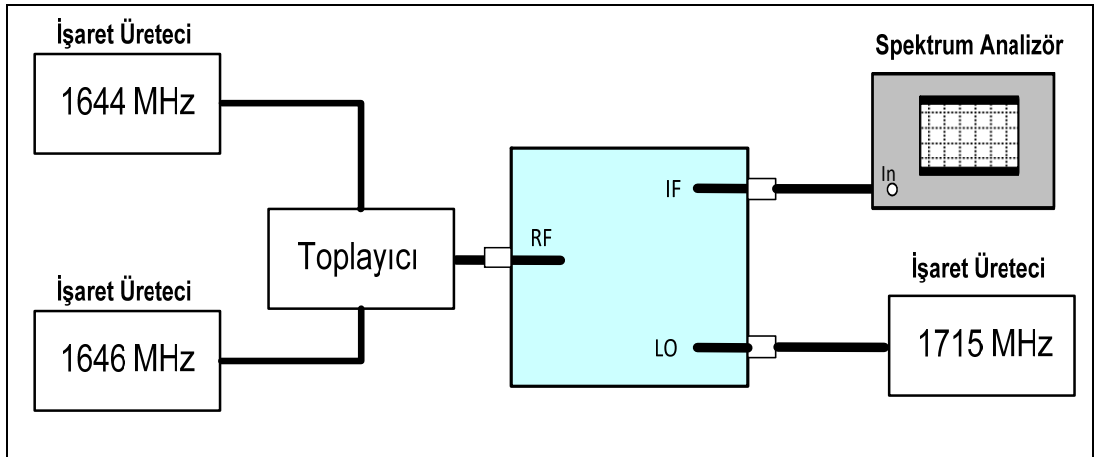
Şekil 3.21: Ön alıcı sistem blok diyagramı.

4. ÖLÇÜMLER VE TESTLER

Bu kısımda tasarlanan kartlarda ve sistem bileşenlerinin bir araya getirilmesiyle oluşan sistem üzerinde yapılan testlerden ve ölçümlerden bahsedilmiştir. Konu IF kartı testleri, RF filtre ölçümleri ve sistem testleri olmak üzere 3 alt başlık altında anlatılmıştır.

4.1. IF Kartı Testleri

IF Kartı testleri IF kartının P1dB değerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu testler sırasında kartın çalışırılığı ve frekans çevrim işlemini yapıp yapmadığı da test edilmiş olacaktır. Testler için Şekil 4.1'deki test düzeneği oluşturulmuştur.



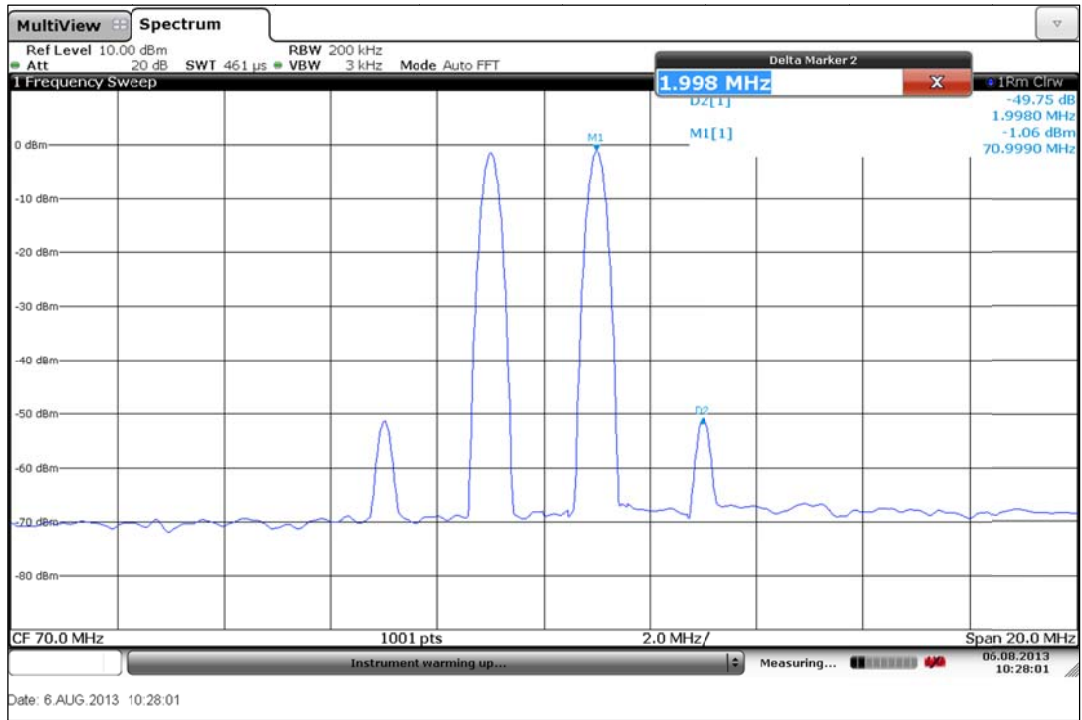
Şekil 4.1: IF Kartı test düzeneği.

İki işaret üreticiden üretilen işaretler toplanarak kartın RF girişine uygulanmıştır. İşaret üreticilerinden birisinin merkez frekansı 1644 MHz değerine, diğerinin merkez frekansı ise 1646 MHz değerine ayarlanmıştır. Karta ait OIP3 değeri kazancın maksimum ve minimum olduğu durumlar için test edilmiş ve hesaplanmıştır.

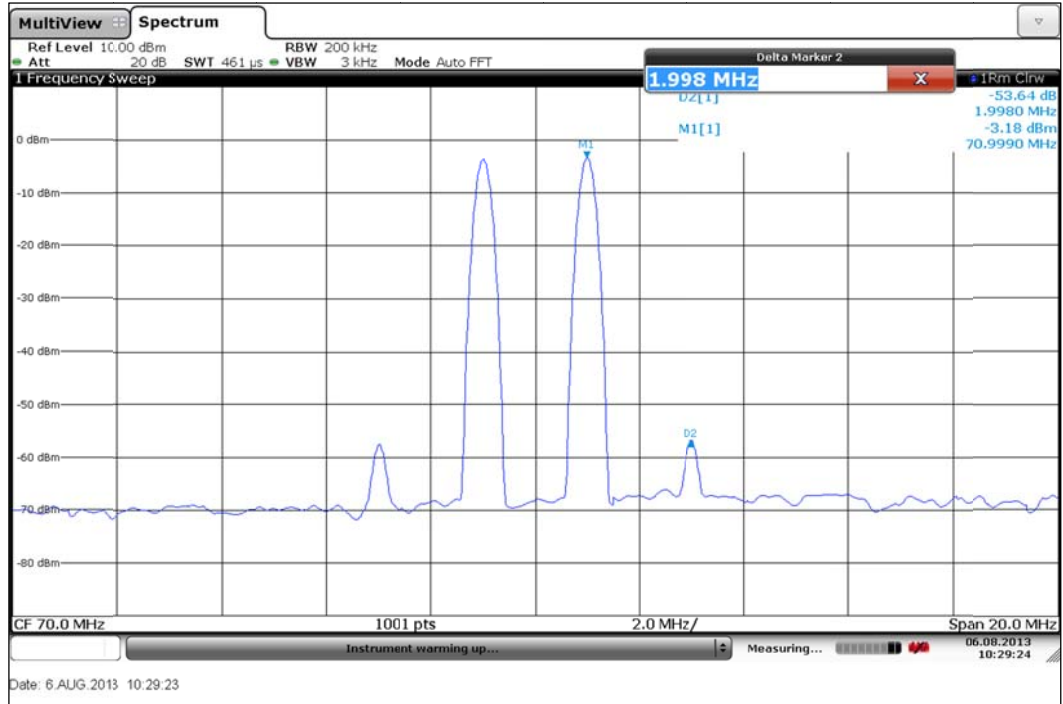
Kazancın Maksimum olduğu durum:

Kazanç maksimum olacak şekilde ayarlı direnç vasıtasıyla kart kazancı ayarlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir. Giriş işaret seviyesi -50 dBm, -52 dBm ve

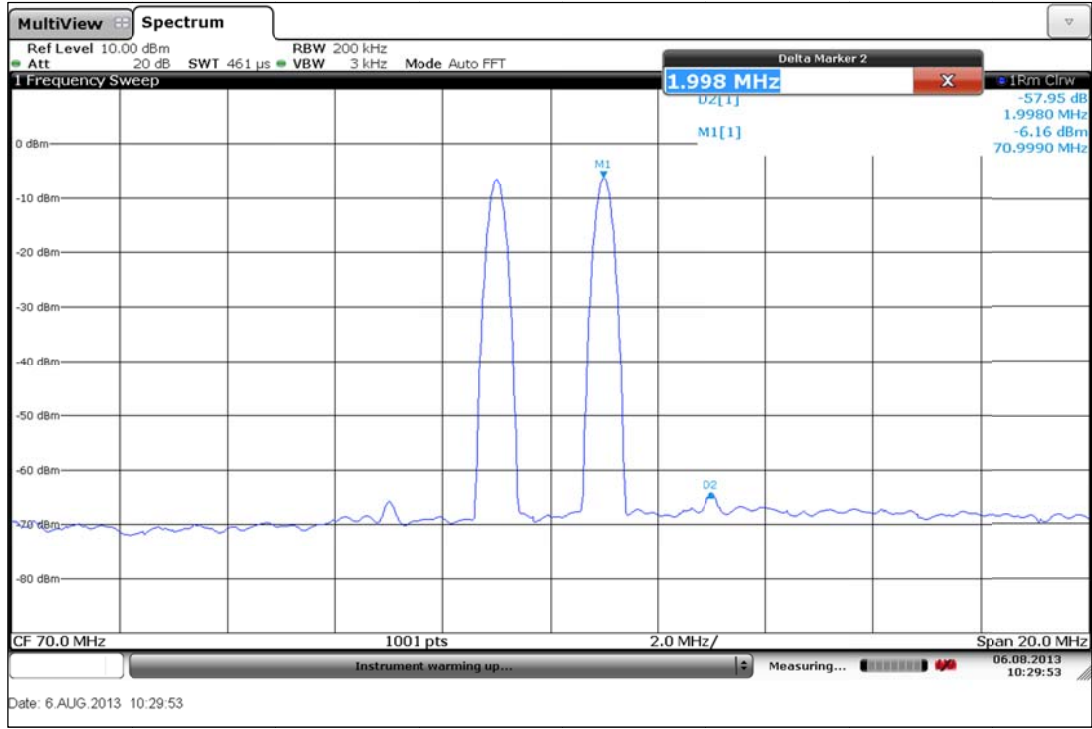
-55 dBm olarak ayarlanmış ve çıkış spektrumları incelenmiştir. Bu üç durumda elde edilen spektrumlar Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.2: Maksimum kazanç -50 dBm giriş için çıkış spektrumu.



Şekil 4.3: Maksimum kazanç -52 dBm giriş için çıkış spektrumu.



Şekil 4.4: Maksimum kazanç -55 dBm giriş için çıkış spektrumu.

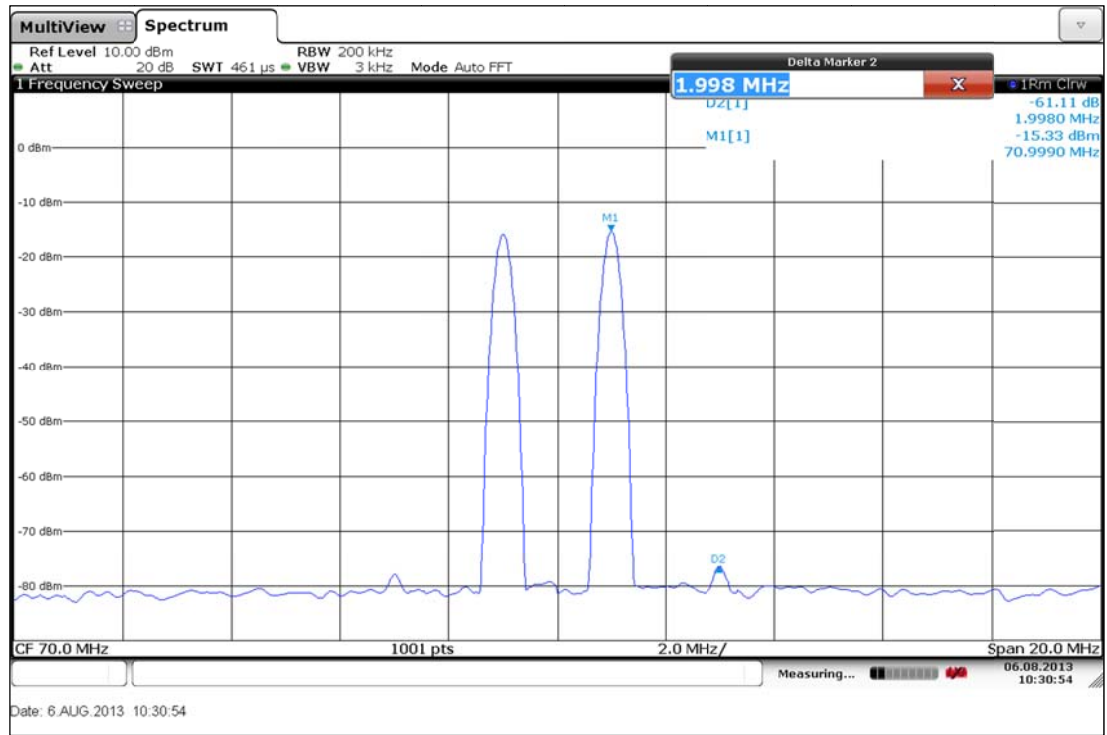
Testlerden elde edilen sonuçlara bakarak ve aşağıda verilen denklem kullanılarak maksimum kazanç durumu için OIP3 değeri hesaplanmıştır. Denklemden yer alan P_{out} (dBm) ifadesi ana işaretin çıkış seviyesini, A (dB) ifadesi ise ana işaret ile 3. dereceden intermodülasyon ürünü arasındaki seviye farkını göstermektedir.

- $OIP3 \text{ (dBm)} = P_{out} \text{ (dBm)} + A \text{ (dB)} / 2$
- -50 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -1 \text{ dBm} + 49,75 / 2 = 23,8 \text{ dBm}$
- -52 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -3 \text{ dBm} + 53,6 / 2 = 23,8 \text{ dBm}$
- -55 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -6 \text{ dBm} + 58 / 2 = 23 \text{ dBm}$

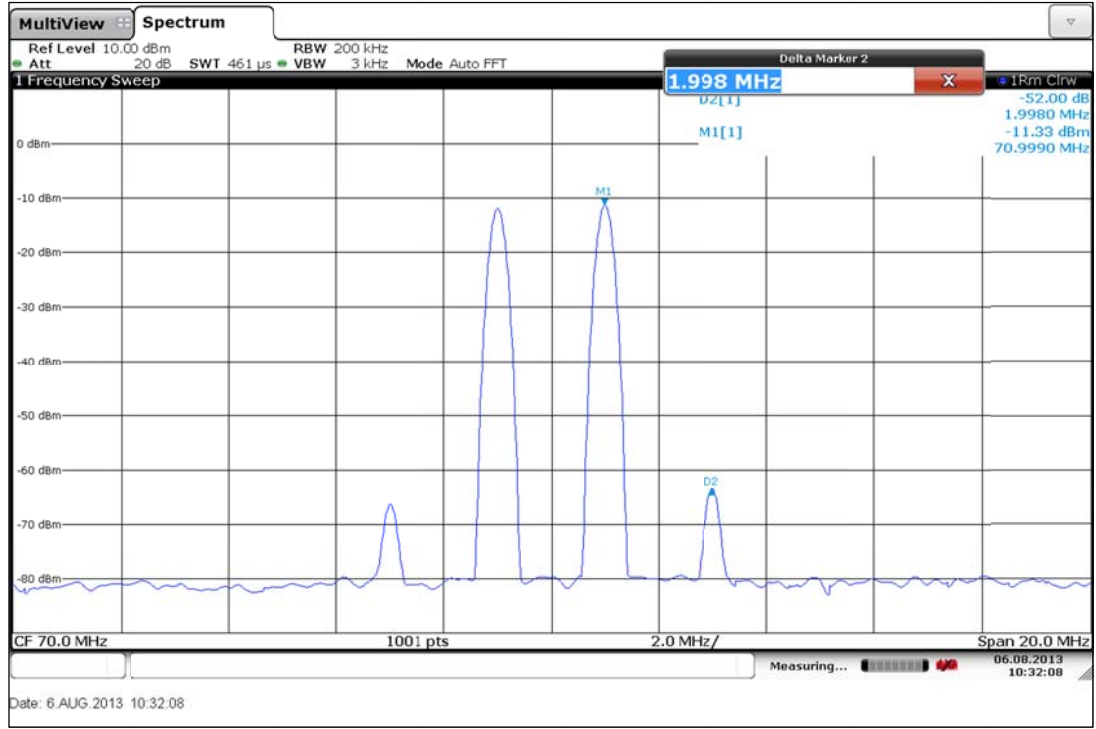
Yapılan hesaplardan çıkan sonuca göre maksimum kazanç durumunda sistem OIP3 değeri yaklaşık 23 dBm'dir. Teorik olarak OP1dB değeri OIP3 değerinden 10 dB daha düşüktür ve bu kurala göre OP1dB değeri 13 dBm'dir. Yani maksimum kazanç durumunda IF kartına -36 dBm değerinden daha yüksek seviyeli işaretler geldiğinde IF kartında yer alan bileşenler doymaya başlayacaktır.

Kazancın Minimum olduğu durum:

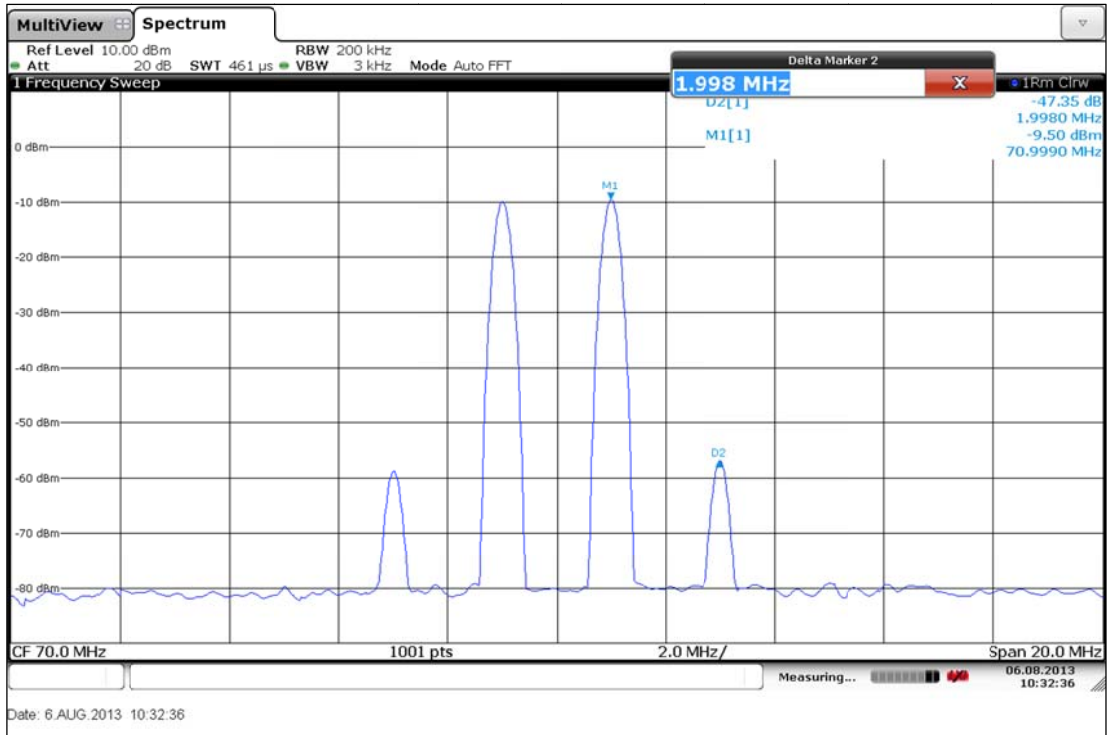
Kazanç minimum olacak şekilde ayarlı direnç vasıtasıyla kart kazancı ayarlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir. Giriş işaret seviyesi -20 dBm, -16 dBm ve -14 dBm olarak ayarlanmış ve çıkış spektrumları incelenmiştir. Bu üç durumda elde edilen spektrumlar Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.5: Minimum kazanç -20 dBm giriş için çıkış spektrumu.



Şekil 4.6: Minimum kazanç -16 dBm giriş için çıkış spektrumu.



Şekil 4.7: Minimum kazanç -14 dBm giriş için çıkış spektrumu.

Elde edilen spektrumlara bakılarak hesaplamalar yapıldığında elde edilen sonuçlar şu şekilde olmuştur:

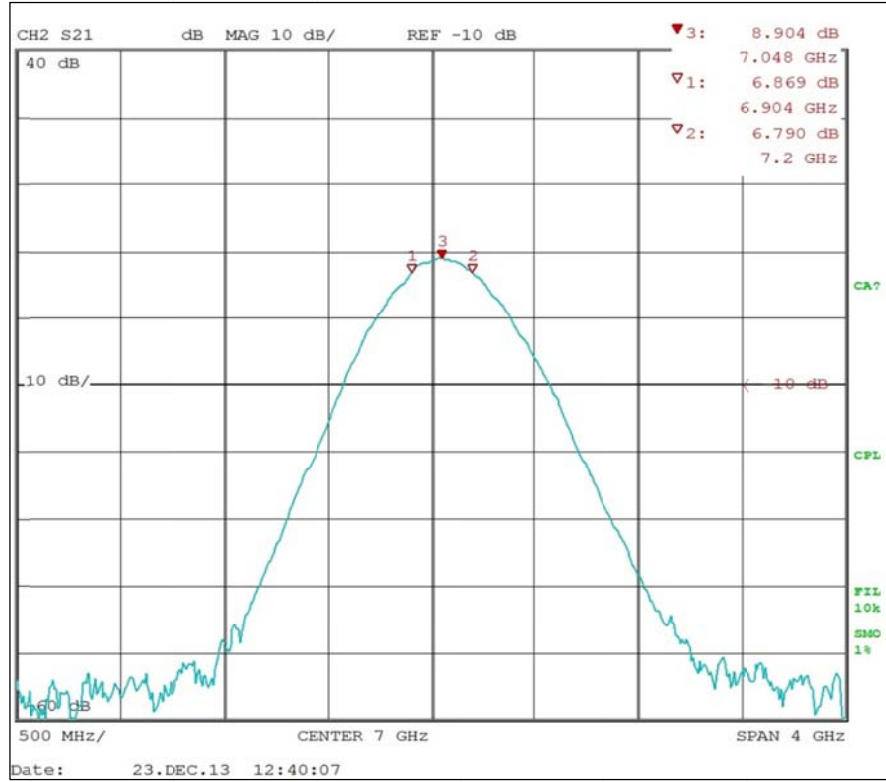
- -20 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -15\text{dBm} + 61/2 = 15,5\text{dBm}$
- -16 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -11\text{dBm} + 52/2 = 15\text{dBm}$
- -12 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -7\text{dBm} + 41,5/2 = 13,75\text{dBm}$

Yapılan hesaplardan çıkan sonuca göre minimum kazanç durumunda sistem $OIP3$ değeri yaklaşık 14 dBm'dir. Minimum kazanç için $OP1\text{dB}$ değeri ise 4 dBm olarak bulunur. Bu sonuca göre kart girişine -1 dBm ve üzeri seviyede işaret geldiğinde kart doymaya başlayacak ve intermodülasyon ürünleri oluşacaktır. Kazanç değerinin ayarlanabilir olma özelliği sayesinde IF kartı -1 dBm giriş seviyesine kadar doymadan çalışabilecektir. Eğer kazanç ayarlama yeteneği sayesinde kartın -36 dBm giriş seviyesinde doyması engellenmiş ve bu özellik sayesinde dinamik aralık arttırılmıştır.

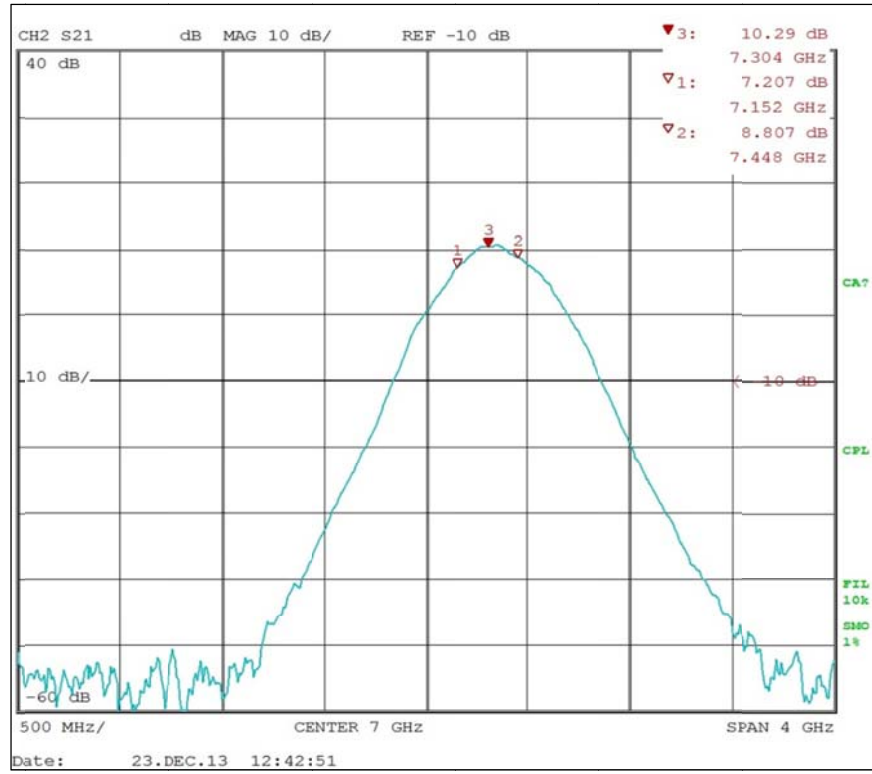
Testler sonucunda IF kartının $OP1\text{dB}$ değeri tespit edilmiş ve kartın fonksiyonel olarak sorunsuz bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir. Kart frekans çevrim işlemini başarılı bir şekilde yerine getirmektedir, dış ortamdan karta sızıp çıkış spektrumunu etkileyen herhangi bir işaret görülmemiştir.

4.2. RF Filtre Ölçümleri

RF filtrenin filtre karakteristiği yapılan ölçümlerle saptanmıştır. Testler sırasında filtre merkez frekansı ayarlı direnç kullanılarak değiştirilmiş ve iki farklı merkez frekans için ölçümler yapılmıştır. Bu işlem yapılırken sistemde kullanılan LNA modülü de ölçümlere dahil edilmiş ve testler sırasında filtre bloğunun önüne bağlanmıştır. Filtre kartının testlerinde ayarlı direnç yardımıyla filtre merkez frekansının değiştirilebildiği görülmüştür ve filtre merkez frekansları 7 GHz ve 7,3 GHz değerlerine ayarlanarak ölçüm sonuçları alınmıştır. LNA ve filtre bloğu birlikte $9 \pm 2 \text{ dB}$ kazanç değerine sahiptir. Filtre karakteristikleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



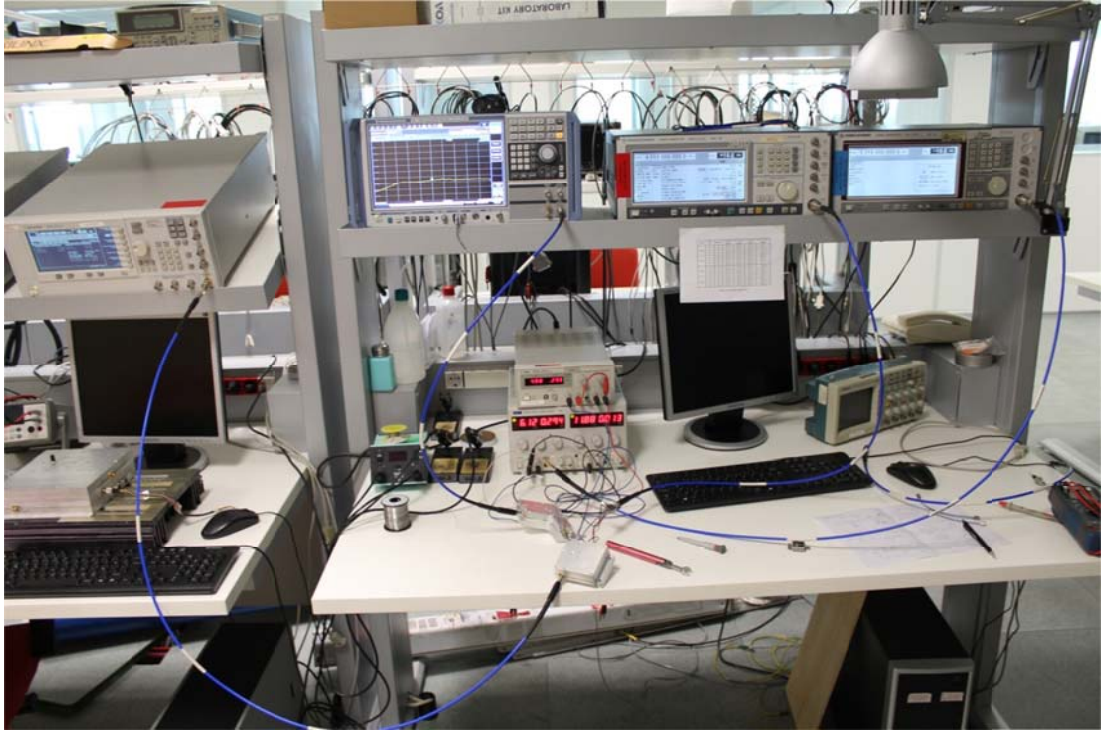
Şekil 4.8: Merkez frekans 7 GHz için filtre karakteristiği.



Şekil 4.9: Merkez frekans 7,3 GHz için filtre karakteristiği.

4.3. Sistem Testleri

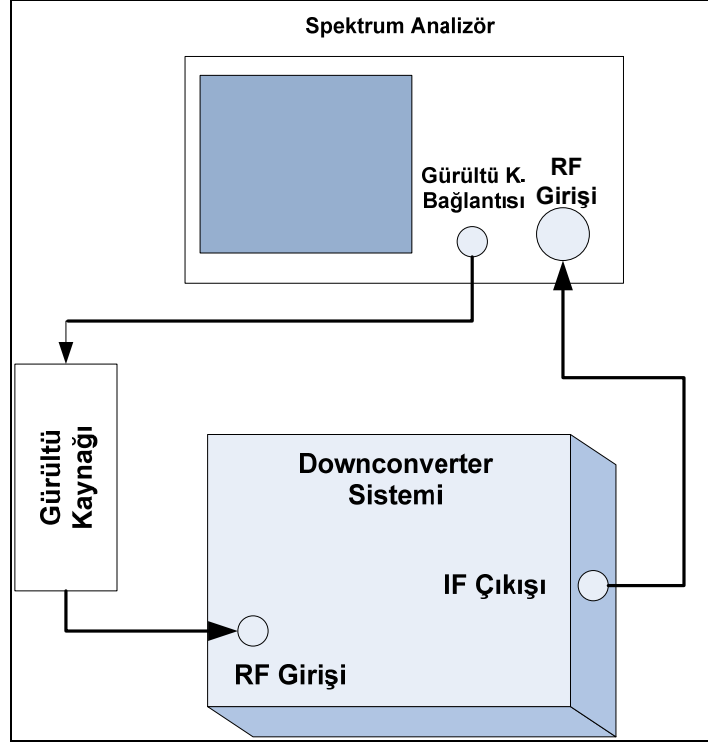
Sistem testleri kapsamında sistemin NF değeri, kazanç değeri ve OP1dB değeri ölçülmüş ve ayrıca benzetim çalışması gerçekleştirilen karıştırıcı işaret senaryosu gerçekleştirilen sistem üzerinde uygulanmıştır. Testler sırasında 4 adet işaret üretici, 1 adet spektrum analizör ve 2 adet DC güç kaynağı kullanılmıştır. Sistem test ortamı Şekil 4.10’da görülmektedir.



Şekil 4.10: Sistem test ortamı.

4.3.1. NF ve Kazanç Ölçümleri

Testlere ilk olarak NF ve kazanç ölçümleriyle başlanmıştır. Bu ölçümleri yapmak amacıyla spektrum analizör cihazından faydalanılmıştır. Ölçüm için Şekil 4.11’deki test düzeneği oluşturulmuştur. RF filtresinin merkez frekansı sırasıyla 6,2 GHz ve 7 GHz değerlerine ayarlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11: NF ve kazanç ölçüm düzeneği.

Ölçüm düzeneğinde gürültü üretmesi için gürültü kaynağı kullanılmıştır. Gürültü kaynağı, sabit değerde gürültü üreten kalibrasyonlu bir cihazdır. Ölçümlerde kullanılan gürültü kaynağına ait resim Şekil 4.12’de verilmiştir. Spektrum analizör gürültü kaynağını kontrol ederek gürültü üretmesini sağlar ve test edilen sisteme kontrollü bir gürültü uygular, IF çıkış işaretini gürültü kaynağında üretilen işaretle karşılaştırarak sistem NF değerinin ölçümünü gerçekleştirir. Bu işlemi yaparken aynı zamanda sistem kazancının ölçümünü de yapabilmektedir.



Şekil 4.12: Ölçümlerde kullanılan gürültü kaynağı.

Filtre merkez frekans değerleri 6,2 GHz ve 7 GHz için ölçümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir. Ölçümlerde IF kartının kazanç değeri 36 dB olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.13: 6,2 GHz merkez frekansta kazanç grafiği.



Şekil 4.14: 6,2 GHz merkez frekansta NF grafiği.



Şekil 4.15: 7 GHz merkez frekansta kazanç grafiği.



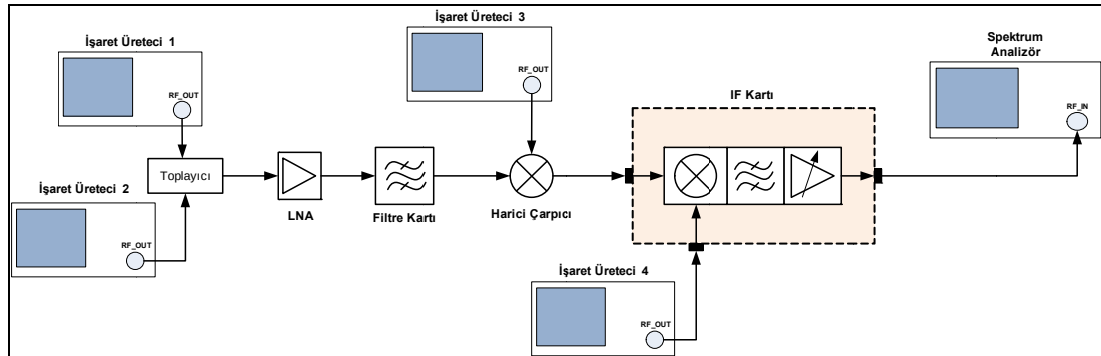
Şekil 4.16: 7 GHz merkez frekansta NF grafiği.

Ölçüm sonuçlarına bakıldığında sistem NF değerinin 2 dB değerinin altında olduğu görülmüştür. Bu değer alıcı sistemin duyarlılığının yüksek olmasını sağlayan bir değerdir. Sistemin giriş işaretine eklediği gürültü miktarı oldukça düşük seviyededir. Beklenildiği gibi girişte kullanılan LNA NF değerinin düşük olmasını sağlamıştır. Kazanç grafikleri incelendiğinde ise 7 GHz ile 6,2 GHz merkez frekans ölçümleri arasında 4 dB fark olduğu görülmüştür. Bu farkın sebebi filtre bloğunun bu frekans değerlerinde geçiş kayıplarının farklı olmasıdır. Bu sisteme mikroişlemcili bir kontrol mekanizması eklenip, IF kart kazancının mikroişlemciyle kontrolü sağlanabilir. Mikroişlemciye frekans değişimlerindeki kazanç farklarını ortadan kaldıracak şekilde bir kalibrasyon bilgisi yüklenerek frekans değişimlerinden kaynaklanacak kazanç farkları ortadan kaldırılabilir.

4.3.2. OP1dB Ölçümleri

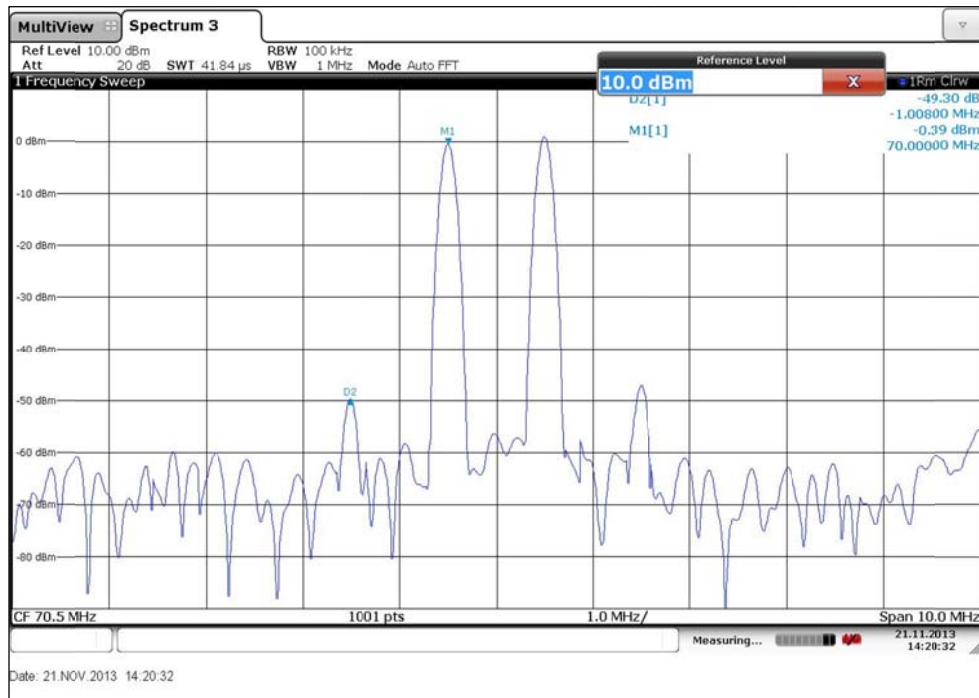
OP1dB ölçümleri için IF kartının OP1dB ölçümlerinde olduğu gibi sistem girişinde iki adet işaret üreticiden uygulanan işaretler toplanarak sisteme uygulanmış ve çıkış işareti spektrum analizör ekranından gözlenmiştir. Ölçümler sırasında IF kartının kazancı maksimum ve minimum değerlerine ayarlanarak bu durumlar için OP1dB değerleri hesaplanmıştır. Test düzeneğinde 2 adet giriş

işaretleri için, 2 adet de LO işaretleri için olmak üzere toplam 4 adet işaret üretici kullanılmıştır. Oluşturulan ölçüm düzeneği Şekil 4.17’de verilmiştir.

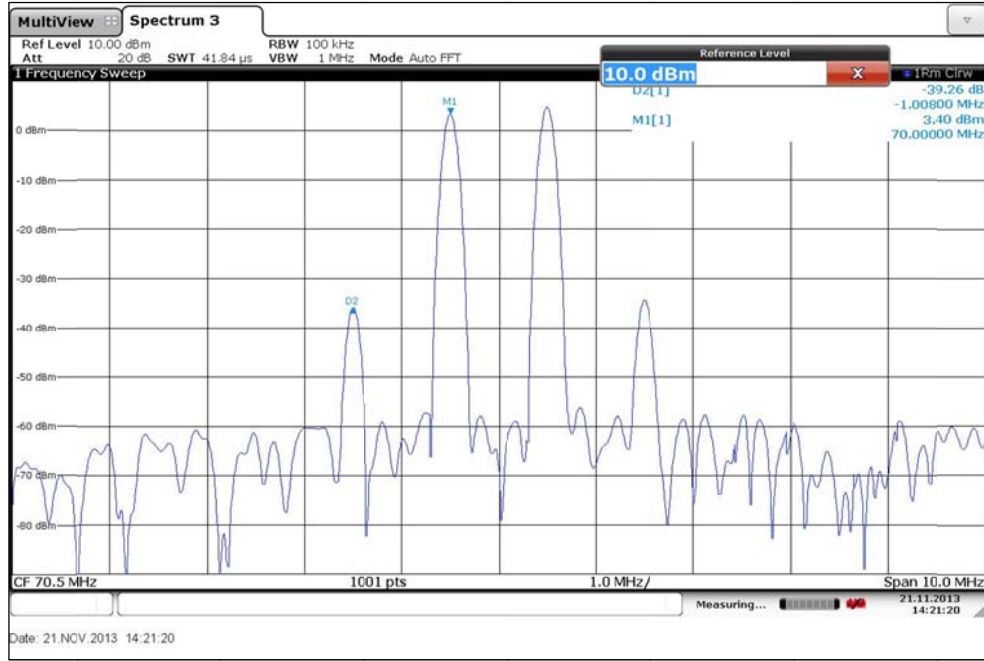


Şekil 4.17: OP1dB Ölçüm düzeneği.

Öncelikle filtre merkez frekansı 6,2 GHz değerine ayarlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu durum için işaret üreticilerinden 6201 MHz ve 6199 MHz frekanslarında işaretler uygulanıp, bu işaretler toplanarak girişe verilmiştir. IF kart kazancının maksimum olduğu durum için çıkış spektrumlarına (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19) göre OIP3 değeri hesaplanmıştır.



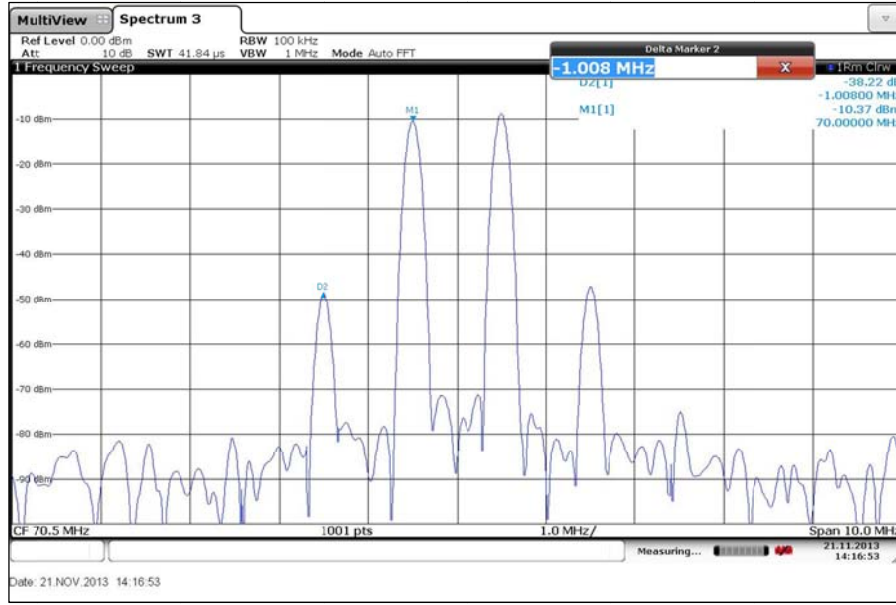
Şekil 4.18: 6,2 GHz, maksimum kazanç, -55 dBm giriş için çıkış spektrumu.



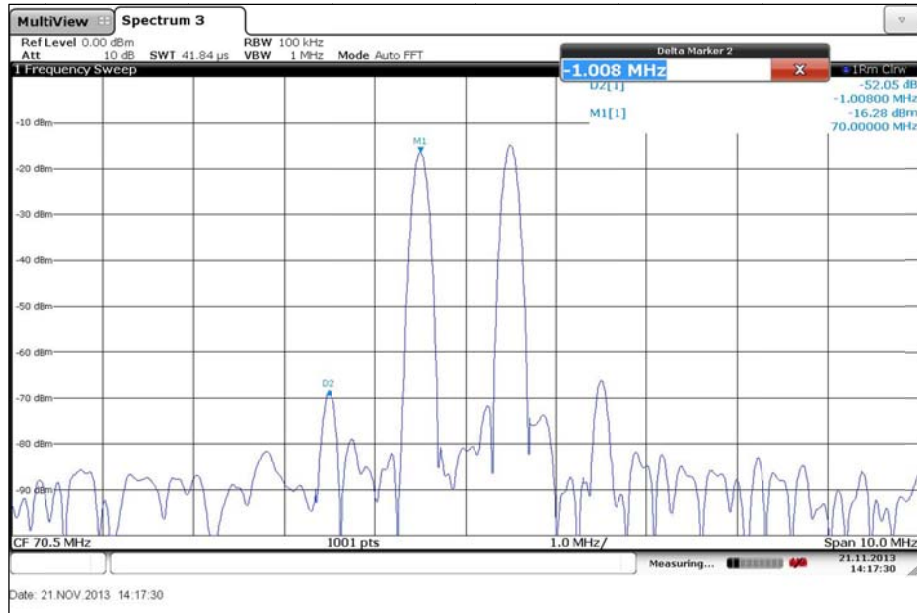
Şekil 4.19: 6,2 GHz, maksimum kazanç, -51 dBm giriş için çıkış spektrumu.

- $OIP3 \text{ (dBm)} = P_{out} \text{ (dBm)} + A \text{ (dB)} / 2$
- -55 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = 0 \text{ dBm} + 49 / 2 = 24,5 \text{ dBm}$
- -51 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = 3 \text{ dBm} + 39 / 2 = 22,5 \text{ dBm}$

Bu durumda OIP3 değeri yaklaşık 23,5 dBm'dir, OP1dB değeri ise 13,5 dBm olarak bulunur. Bu ölçümlerden sonra IF kart kazancı minimum değerine ayarlanmıştır. Minimum kazançta elde edilen sonuçlar Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir ve bu çıktılara göre OIP3 değeri hesaplanmıştır.



Şekil 4.20: 6,2 GHz, minimum kazanç, -21 dBm giriş için çıkış spektrumu.

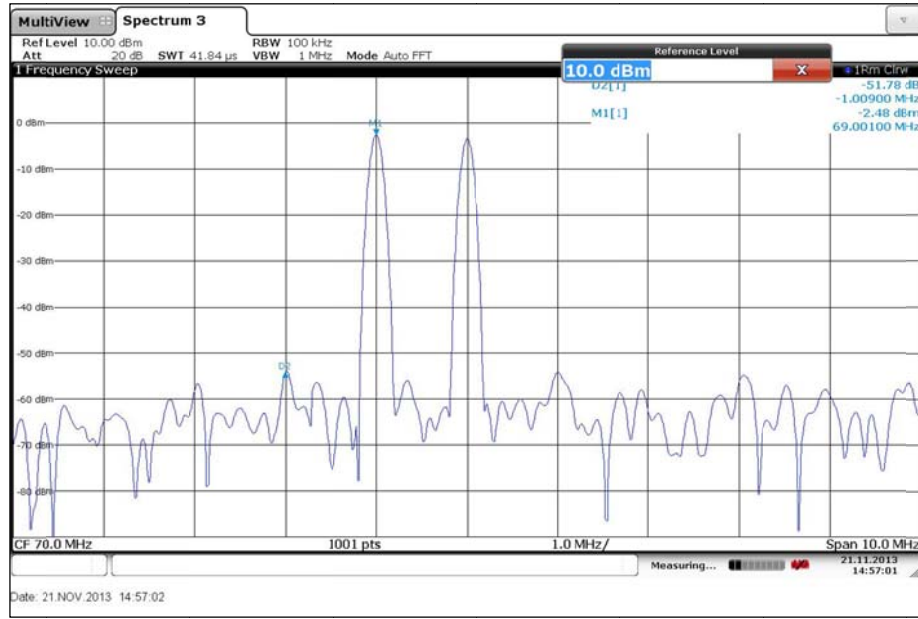


Şekil 4.21: 6,2 GHz, minimum kazanç, -27 dBm giriş için çıkış spektrumu.

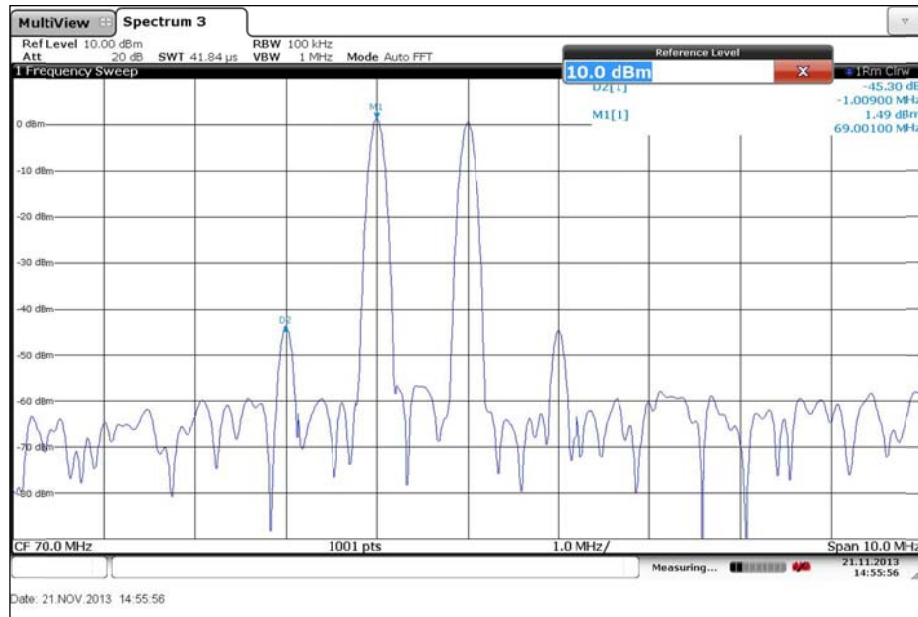
- -21 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -10 \text{ dBm} + 38/2 = 9 \text{ dBm}$
- -27 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -16 \text{ dBm} + 52/2 = 10 \text{ dBm}$

Bu durum için ise OIP3 değeri yaklaşık 9 dBm, OP1dB değeri ise -1 dBm olarak bulunmuştur.

6,2 Ghz frekansı için ölçümler tamamlandıktan sonra filtre merkez frekansı 7 GHz değerine ayarlanmış ve ilk olarak maksimum kazanç durumu için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu frekans için işaret üreteçlerinden 7001 MHz ve 6999 MHz frekanslı işaretler uygulanmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiş ve OIP3 değerleri hesaplanmıştır.



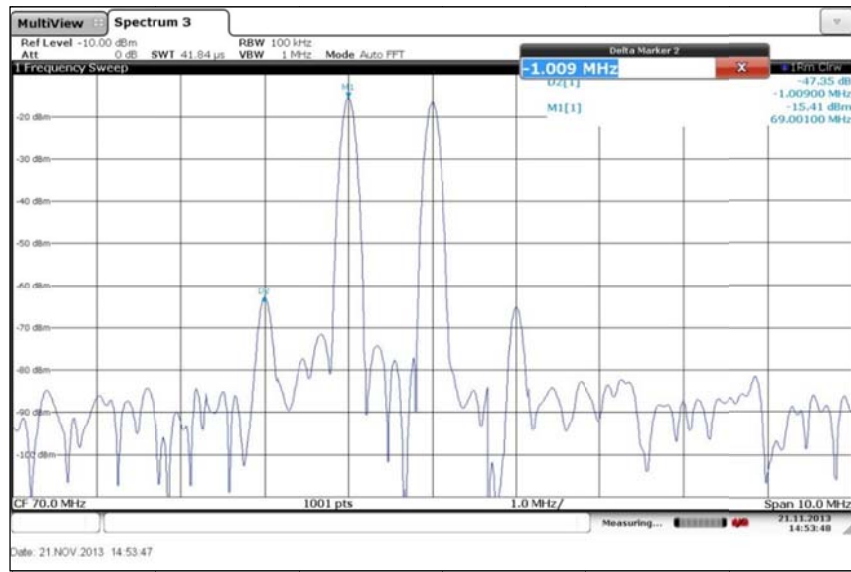
Şekil 4.22: 7 GHz, maksimum kazanç, -59 dBm giriş için çıkış spektrumu.



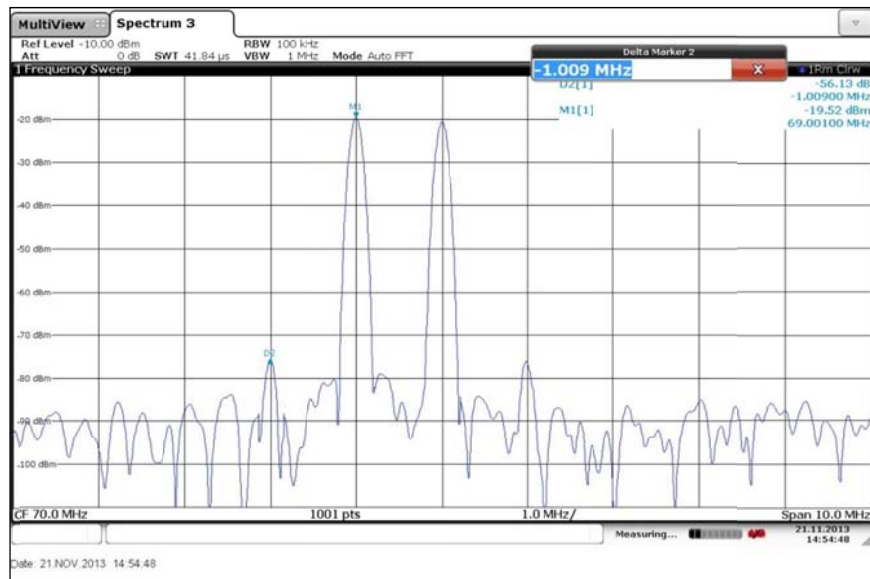
Şekil 4.23: 7 GHz, maksimum kazanç, -55 dBm giriş için çıkış spektrumu.

- -59 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -2,5 \text{ dBm} + 52/2 = 23,5 \text{ dBm}$
- -55 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = 1,5 \text{ dBm} + 45/2 = 24 \text{ dBm}$

Maksimum kazanç durumunda, sistemin 7 GHz frekansında da 6,2 GHz frekansında olduğu gibi yaklaşık 23,5 dBm OIP3 değerine sahip olduğu görülmüştür. Sistemin OP1dB değeri ise 13,5 dBm'dir. Minimum kazanç durumu için de ölçüm sonuçları Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiş ve OIP3 değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.24: 7 GHz, minimum kazanç, -28 dBm giriş için çıkış spektrumu.



Şekil 4.25: 7 GHz, minimum kazanç, -32 dBm giriş için çıkış spektrumu.

- -28 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -15 \text{ dBm} + 47/2 = 8,5 \text{ dBm}$
- -32 dBm giriş için: $OIP3 \text{ (dBm)} = -19 \text{ dBm} + 56/2 = 9 \text{ dBm}$

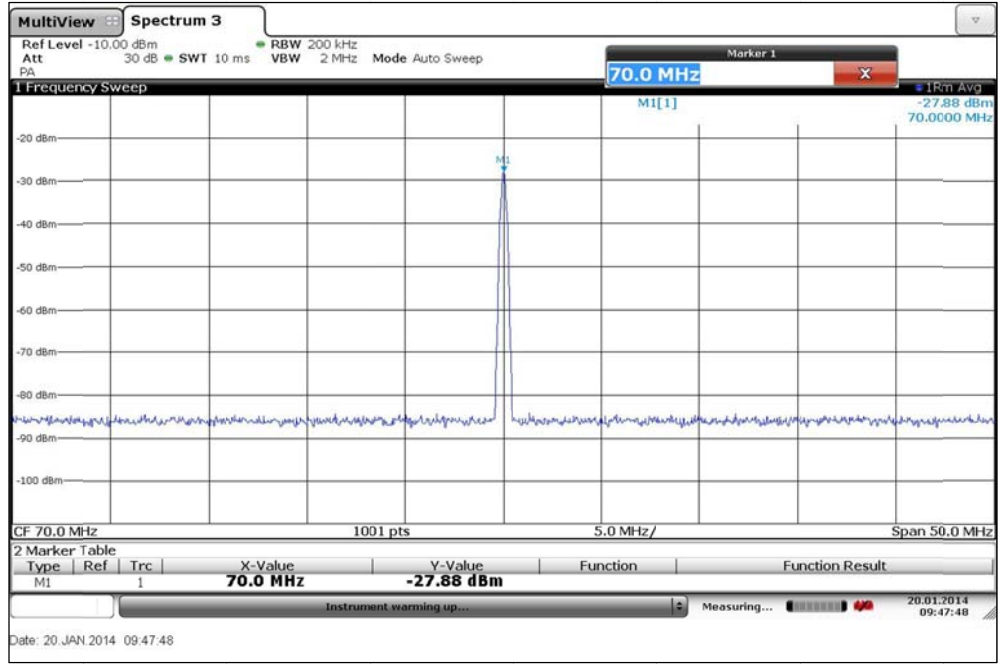
Minimum kazanç durumu için sistem $OIP3$ değerinin yaklaşık 9 dBm, $OP1dB$ değerinin de yaklaşık -1 dBm olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar da 6,2 GHz frekansında elde edilen değerlere eşittir. Yapılan testler sonucunda sistem $OP1dB$ ve $OIP3$ değerleri tespit edilmiş ve değerlerin frekans değişiminden neredeyse etkilenmediği görülmüştür.

Sistem $OP1dB$ değeri maksimum kazanç durumu için 13,5 dBm'dir. Maksimum kazançta sistem kazancı yaklaşık 56 dBm'dir. Buna göre, sistem girişine -42,5 dBm seviyesinden daha yüksek seviyelerde işaretler geldiğinde çıkış spektrumunda kuvvetlendirici ve çarpıcıların doymasından kaynaklı harmonikler oluşacaktır. Minimum kazanç durumunda ise $OP1dB$ değeri -1 dBm'dir. Minimum kazançta sistem kazancı yaklaşık 12 dB'dir. Bu şartlar altında sistem -13 dBm giriş seviyesine kadar lineer olarak çalışacaktır ama bu seviye üzerinde işaretler geldiğinde çıkış spektrumunda harmonikler oluşacaktır.

4.3.3. Karıştırıcı İşaret Testi

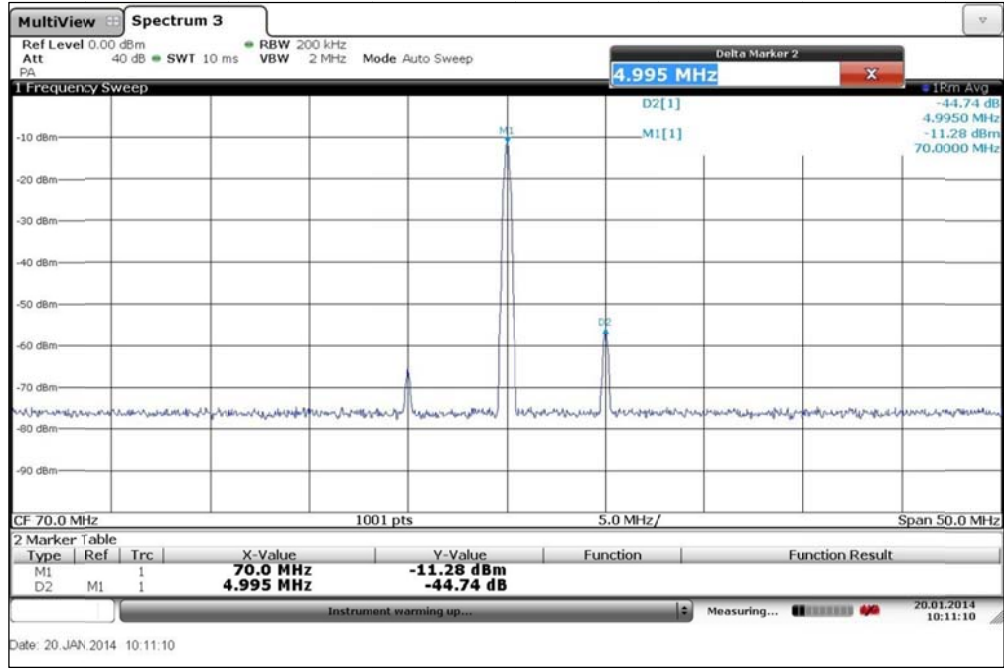
Bu test, daha önce ayarlanabilir filtreli yapının sabit filtreli yapıya göre avantajını göstermek amacıyla yapılan benzetimin gerçekleştirilen sistem üzerinde uygulanmasıdır. Bu test için $OP1dB$ ölçümlerinde kullanılan test düzeneği kullanılmıştır. Sistem girişine uygulanan iki işaretten birisi hedef işareti diğeri karıştırıcı işarettir.

İlk olarak filtre merkez frekansı 6,2 GHz değerine ayarlanmış ve sistem girişine hedef işareti olarak 6,2 GHz frekansında -30 dBm genlikli işaret uygulanmıştır. Karıştırıcı işaret olarak 7 GHz frekansında bir işaret uygulanmış ve bu işaretin genliği değiştirilerek sistemin hangi işaret seviyesinde doyduğu tespit edilmiştir. Test sırasında karıştırıcı işaret seviyesi 4 dBm değerine geldiğinde sistem kazancının 1 dB düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuca göre, 4 dBm karıştırıcı işaret seviyesiyle birlikte alıcı doymaya başlamıştır. Bu durumda elde edilen çıkış spektrumu Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26: 4 dBm karıştırıcı seviyesi için ayarlanabilir filtreli çıkış spektrumu.

Sabit filtreli yapıda oluşabilecek durumu gözlemlemek için sistem girişindeki filtre kartı kaldırılmış ve giriş işareti LNA sonrasında filtrelenmeden çarpıcıya girmiştir. Sabit filtreli yapı olması durumunda filtre band genişliği daha geniş olacak ve iki işaret de filtreden geçerek çarpıcıya ulaşacaktır. Bu yüzden filtresiz durumda oluşacak spektrum sabit filtreli yapıda da aynen oluşacaktır. İlk testte uygulanan iki işaret bu testte de aynı şekilde sistem girişine uygulanmış ve -25 dBm seviyesinde karıştırıcı işaret uygulanması durumunda sistem kazancının 1 dB düştüğü tespit edilmiştir. Bu durumda elde edilen çıkış spektrumu Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27: -25 dBm karıştırıcı seviyesi için filtresiz çıkış spektrumu.

Test sonuçlarından da görüldüğü gibi ayarlanabilir filtre kullanılması durumunda sistem 4 dBm karıştırıcı işaret seviyesine kadar doymazken, sabit filtreli durumda sistem -25 dBm seviyesi üzerinde bir karıştırıcı işaret gelmesi durumunda doymaya başlamaktadır. Bu durum karıştırıcı işaretin filtrelenmeden geçerek çarpıcı ve kuvvetlendirici bloklara ulaşması ve bu birimleri doyurmasıyla meydana gelmiştir. Karıştırıcı işaretler genlik olarak yüksek değerlere sahiptirler ve dolayısı ile etraftaki sistemleri doyurup sağlıklı çalışmasını engellerler. Alıcı girişlerindeki filtrelerin band genişlikleri ne kadar daraltılırsa karıştırıcı işaretlere karşı mukavemet o derece artırılmış olur. Ayarlanabilir filtreli yapının kullanılması sistemin karıştırıcı işaretlere karşı mukavemetinin yaklaşık 30 dB artmasını sağlamıştır.

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Sistem test ve ölçümlerinin sonuçlarına bakıldığında sistem için belirlenen performans kriterlerinin sağlandığı görülmüştür. Sistem girişinde kullanılan LNA modülünün sistem NF değerinin performans kriterlerinde belirtilen değeri geçmemesini sağlamıştır ve bu sayede duyarlılığı yüksek bir sistem elde edilmiştir. Sistemde ayarlanabilir kazanç yapısı kullanılması ve sistem bileşenlerinin yerleşiminin birbirlerini doyurmayacak şekilde yapılması, dinamik aralık kriterinin sağlanmasında etkili olmuştur. RF filtreleri olarak ayarlanabilir filtrelerin kullanılması ise alıcı seçiciliğini arttırmış ve sistemin karıştırıcı testinde karıştırıcı işaretten etkilenmeden çıkmasını sağlamıştır. Superheterodyne alıcı yapısında ayarlanabilir filtreler kullanılarak sistem seçiciliğinin arttırılabildiği benzetim çalışması ve gerçekleştirilen sistem testleriyle gösterilmiştir.

Bu sistem üzerine çalışmalar yapıp sistem performansı artırılıp daha iyi bir sistem gerçekleştirilebilir. Mevcut tasarım oluşturulurken 2 – 18 GHz’lik sistemin 4 – 8 GHz aralığında çalışan filtresi gerçekleştirilmiştir. Yapılacak çalışmalarla RF filtre kartı, IF kartı ve harici çarpıcı modülü tek bir kart üzerinde üretilebilir, ayarlanabilir filtrelerin diğer ikisi de temin edilerek 2 – 18 GHz bandında çalışan bir alıcı sistemi oluşturulabilir. Ayrıca sisteme mikroişlemci de eklenmesi gerekmektedir. Kazanç ayarı ve filtre ayarı işlemleri bu çipin kontrolüne bırakılmalıdır. Mikroişlemciye yüklenecek kalibrasyon bilgisi sayesinde frekans değişimleriyle sistem kazancında meydana gelen değişimler yok edilebilir.

Gerçekleştirilen tasarımda kullanılan 30 MHz analiz band genişliği, 2 – 18 GHz gibi geniş bir bandda çalışan elektronik destek alıcıları için küçük bir değerdir. Daha geniş bantlı bir filtre teminiyle analiz band genişliğinin de arttırılması mümkün olacaktır. Son olarak da sistem için gerekli olan LO işaretlerini üretmek için LO tasarımının yapılması ve gerçekleştirilmesi tasarıma büyük bir kullanım kolaylığı sağlayacaktır. Piyasada mevcut olan ürünlerde LO işaretini kendi üreten veya harici olarak işaret üreticinden temin eden sistemler mevcuttur. LO işaretinin sistem içerisinde üretilmesi durumunda başka bir işaret üreticine gerek kalmadan ön alıcı sistem kullanılabilir.

Gerçekleştirilen sistem birçok eksiği olmasına rağmen çalışmanın amacına ulaşmasını sağlamıştır. Çalışma sonunda ayarlı filtreli yapıların ön alıcı sistemlerde

kullanılmasıyla sistem seçiciliğinin ve karıştırıcı işaretlere karşı mukavemetin arttırılabileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Barracough T. L., (2008), “Wideband Downconver System Design and Simulation”, Wideband Receivers and Components IET Seminar, 1-4, London, England, 7 May.

Devlin L. M., Pearson G. A., Dearn A. W., Beasley P. D. L., Morgan G. D., (2002), “A 2-18 GHz ESM Receiver Front-End”, 32nd European Microwave Conference, 1-4, London, England, 23-26 September.

Karadede İ., Kara A., (2012), “Signal and System Level Simulations for Wideband Intercept Receivers: Eliminating Spur Signals”, 9th International Conference on Electronics, Computer and Computations, 215-219, Ankara, Türkiye, 1-3 Kasım.

Pandolfi C., Bartocci M., Gabrielli G., Longhi P. E., Megna A., Orobello B., (2009), “Compact Wideband Downconverter Module for Electronic Warfare Applications”, 6th European Radar Conference, 355-357, Rome, Italy, 30 September-2 October.

Tsui J. B. Y., (1986), “Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications”, 1st Edition, John Wiley&Sons.

Web 1, (2012), <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/noisefigure.cfm>, (Erişim Tarihi: 14/09/2013).

Web 2, (2011), <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/Navy%20handbook/5.3%20Receiver%20Types%20&%20Characteristics.pdf>, (Erişim Tarihi: 21/07/2013).

ÖZGEÇMİŞ

Bekir ŞENTÜRK 1984 yılında Antalya’da doğdu. 2003 yılında başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü 2007 yılında başarıyla tamamladı. 2008 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2007 yılından bu yana TÜBİTAK BİLGEM’de RF devre ve sistem tasarımı konularında araştırmacı olarak çalışmaktadır.