T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK HASSASİYETLİ ULTRA DÜŞÜK GÜÇ TÜKETEN UYANDIRMA ALICISI TASARIMI

Ömer Faruk AYDIN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Mayıs, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer Faruk AYDIN tarafından, **Prof. Dr. Fırat KAÇAR** danışmanlığında hazırlanan **" Yüksek Hassasiyetli Ultra Düşük Güç Tüketen Uyandırma Alıcısı Tasarımı"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **03/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Fırat KAÇAR İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Abdullah Yeşil Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Sevgili karım Sevnur Koral Aydın ve canım kızım Masal Vera Aydın’a ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

YÜKSEK HASSASİYETLİ ULTRA DÜŞÜK GÜÇ TÜKETEN UYANDIRMA ALICISI TASARIMI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Fırat Kaçar'a ve çalışma hayatımda bana anlayışını eksik etmeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Eylem Gülce Çoker'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2022 Ömer Faruk AYDIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
ABSTRACT ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI 3
2.2. VERİ İLETİMİ 4
2.2.1. Paralel Veri İletimi 5
2.2.2. Seri Veri İletimi 5
2.3. UYANDIRMA ALICISI 7
2.4. DÜŞÜK GÜRÜLTÜLÜ KUVVETLENDİRİCİ 8
3. LİTERATÜR TARAMASI **10**
4. YÖNTEM **11**
5. BULGULAR **12**
5.1. DÜŞÜK GÜRÜLTÜLÜ KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI 12
5.1.1. Hedef Parametreleri 12
5.1.2. Aktif Cihaz Seçimi 13
5.1.3. DC Çalışma Noktasının Belirlenmesi 15
5.1.4. DC Kutuplama Devresinin Kurulması 16
5.1.5. Empedans Uyumlaştırma Ağı Tasarımı 17
5.1.6. Kararlılık 31

5.1.7. Doğrusallık 32
5.1.8. Maksimum Kullanılabilir Kazanç 36
5.1.9. Gürültü Figürü 37
5.1.10. Düşük Gürültülü Kuvvetlendiricinin Bant Genişliği 40
5.2. UYANDIRMA ALICISI TASARIMI 41
5.2.1. OOK Modülasyon Tekniği 42
5.2.2. Zarf Dedektörü 43
5.2.3. Karşılaştırıcı 46
5.2.4. Giriş Dedektörü 49
5.2.5. Tamamlanmış Uyandırma Alıcısı Devresi 49
5.2.6. Güç Tüketimi 51
5.2.7. Hassasiyet 52
6. TARTIŞMA 54
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 57
KAYNAKLAR 58
EKLER 62
ÖZGEÇMİŞ 64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kablosuz Sensör Ağı …….3

Şekil 2.2: Veri İletim Teknikleri ……5

Şekil 2.3: Paralel ve Seri Veri İletimi ……5

Şekil 2.4: Senkron ve Asenkron Veri İletimi ……6

Şekil 2.5: Uyandırma Alıcısı Çekirdek Devresi ……7

Şekil 2.6: Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici ……...9

Şekil 5.1: BFR280 Gürültü Figürü ve Güç Kazancı Parametreleri ……14

Şekil 5.2: Farklı VCE Değerleri İçin BFR280 Kazanç vs. Ic Grafiği…….14

Şekil 5.3: DC Çalışma Noktasının Belirlenmesi ……...15

Şekil 5.4: Kolektör-Baz Kutuplama Devreleri, (c) Seri Kutuplama, (d) Geri Besleme Kutuplama…….16

Şekil 5.5: İki Kapılı Ağ ve S Parametreleri ……..17

Şekil 5.6: Kaskat Sistemlerde S Parametreleri …….19

Şekil 5.7: Smith Chart Diyagramı ……20

Şekil 5.8: Kaskat Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (Eşleştirme Ağı Bileşenleri Olmadan) ...21

Şekil 5.9: Katmanlar Arası Bölge ve Kaynak ve Yük Empedansları ……22

Şekil 5.10: Kaynak ve Yük Empedanslarının Smith-Chart Diyagramında İşaretlenmesi ve Eşleştirme İşlemi ……..23

Şekil 5.11: Eşleştirme İşlemi Sonucu Kurulan Katmanlar Arası Eşleştirme Ağı ……..23

Şekil 5.12: Giriş Bölgesi Kaynak ve Yük Empedansları ……...24

Şekil 5.13: Giriş Bölgesi İçin Kaynak ve Yük Empedanslarının Smith-Chart Diyagramında İşaretlenmesi ve Eşleştirme İşleminin Gerçekleştirilmesi ……25

Şekil 5.14: Eşleştirme İşlemi Sonucu Kurulan Giriş Empedans Eşleştirme Ağı ……..25

Şekil 5.15: Çıkış Bölgesi Kaynak ve Yük Empedansları ……..26

Şekil 5.16: Çıkış Bölgesi İçin Kaynak ve Yük Empedanslarının Smith-Chart Diyagramına İşaretlenmesi ve Eşleştirme İşleminin Gerçekleştirilmesi ……26

Şekil 5.17: Eşleştirme İşlemi Sonucu Kurulan Çıkış Empedans Eşleştirme Ağı ……..27

Şekil 5.18: Eşleştirme Ağları Kurulmadan Önce S11 ve S22 Parametreleri ……27

Şekil 5.19: Eşleştirme Ağları Kurulmadan Önce S21 ve S12 Parametreleri ……28

Şekil 5.20: Eşleştirme Ağları Kurulumundan Sonra S11 ve S22 Parametreleri ……28

Şekil 5.21: Eşleştirme Ağları Kurulumundan Sonra S21 ve S12 Parametreleri ……29

Şekil 5.22: S Parametrelerinin Kutupsal Gösterimi ……..30

Şekil 5.23: Rollet Kararlılık Faktörü ……31

Şekil 5.24: 1dB Sıkıştırma Noktası ve 3. Derece Kesişme Noktası ……32

Şekil 5.25: Temel Kazanç Eğrisi (Mor), İkinci Harmonik (Mavi), Üçüncü Harmonik (Kırmızı)……33

Şekil 5.26: Tasarlanan Düşük Gürültülü Kuvvetlendiricinin 1dB Sıkıştırma Noktası …….34

Şekil 5.27: Üçüncü Derece Harmonikler ……..35

Şekil 5.28: Üçüncü Derece Kesişme Noktası ……...……36

Şekil 5.29: Kaskat Sistemlerde Gürültü Faktörü ……...37

Şekil 5.30: Tasarlanan Düşük Gürültülü Kuvvetlendiricinin Gürültü Figürü ……...39

Şekil 5.31: Frekans Aralığının Belirlenmesi ……40

Şekil 5.32: Uyandırma Alıcısı Tasarımı ……...……41

Şekil 5.33: OOK Modülasyonu Gerçekleştirilmesi İçin Gerilim Kaynaklarının Kullanılması (LTSPICE XVII) ……..42

Şekil 5.34: Giriş Sinyali ve OOK Modüle Edilmiş Kaynak Sinyali ……43

Şekil 5.35: Zarf Dedektörü Devresi ……44

Şekil 5.36: Zarf Dedektörünün Girişi ve Çıkışı (Giriş: Yeşil, Çıkış: Mavi) ……44

Şekil 5.37: Referans Üreteci ve Karşılaştırıcı ……...45

Şekil 5.38: Referans Üretecinin Çıkışı ……45

Şekil 5.39: Karşılaştırıcı ve Giriş Dedektörü Çıkışı ……49

Şekil 5.40: Giriş Dedektörü ……..49

Şekil 5.41: LTSPICE Programında Tasarlanan Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici ……..50

Şekil 5.42: Tamamlanmış Uyandırma Alıcısı Tasarımı ……51

Şekil 5.43: Alıcı Girişi (Mavi), Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici Çıkışı (Kırmızı), Alıcı Çıkışı (Yeşil) ……...51

Şekil 5.44: Hassasiyet Analizi ……..54

Şekil 6.1: Uyandırma Alıcılarının Güç Tüketimi Açısından Karşılaştırılmaları ……..56

Şekil 6.2: Uyandırma Alıcılarının Hassasiyet Açısından Karşılaştırılmaları ……..56

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Literatür Taramasındaki Çalışmaların Özeti ……...……10

Tablo 5.1: Hedef Parametreleri ……...…….13

Tablo 5.2: Hedef Parametreleri ve Simülasyon Değerleri ……39

Tablo 5.3: Farklı Karşılaştırıcılarla Tasarlanan Uyandırma Alıcıları ……...……46

Tablo 6.1: Çalışmanın Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırılması ……55

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
K	: Rollet’s Stability Factor
uF	: Microfarad
pF	: Picofarad
nH	: Nanohenry
mW	: Miliwatt
uW	: Microwatt
nW	: Nanowatt
C	: Capacitance
L	: Inductance
R	: Resistance
Ω	: Ohm
kΩ	: Kiloohm
mA	: Miliampere
uA	: Microampere
A	: Ampere
V	: Voltage
uF	: Microfarad
Ic	: Colector Current
VCE	: Colector-Emitter Voltage
IBB	: Base Current
dB	: Decibel
dBm	: Decibel Miliwatt
us	: Microsecond
MHz	: Megahertz
GHz	: Gigahertz
Zs	: Source Impedence
Zl	: Load Impedence
Zo	: Normalized Impedence

G	: Gain
f	: Frequency
Pin	: Input Power
Pout	: Output Power
F	: Noise Factor
NF	: Noise Figure
S11	: Forward Reflection Coefficient
S12	: Reverse Transmission Coefficient
S21	: Forward Transmission Coefficient
S22	: Reverse Reflection Coefficient

Kısaltmalar	**Açıklama**
IoT	: Internet of Things
WSN	: Wireless Sensor Network
RF	: Radio Frequency
LNA	: Low Noise Amplifier
DC	: Direct Current
AC	: Alternative Current
BJT	: Bipolar Junction Transistor
P1dB	: 1dB Compression Point
IP3	: 3rd Order Intersection Point
IIP3	: Input 3rd Order Intersection Point
OIP3	: Output 3rd Order Intersection Point
MAG	: Maximum Available Gain
OOK	: On-Off Keying
ASK	: Amplitude Shift Keying
PSK	: Phase Shift Keying
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
VRMS	: Root Mean Square Voltage

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK HASSASİYETLİ ULTRA DÜŞÜK GÜÇ TÜKETEN UYANDIRMA ALICISI TASARIMI

Ömer Faruk AYDIN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Kablosuz sensör ağları, son yıllarda üzerinde oldukça fazla çalışma yapılan önemli bir konu haline gelmiştir. Binlerce hatta on binlerce sensör düğümünden oluşan bu ağlar çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar.

Sensör düğümlerinin birbirleri ile olan haberleşmesi sırasında öne çıkan en önemli sorun güç tüketimidir. Pille çalışan bu sistemler haberleşme esnasında oldukça fazla güç tüketmektedirler. Haberleşmenin olmadığı zamanlarda bu tüketimin optimize edilmesi gereklidir. Bu sorunun çözümü için öne çıkan uygulamalardan bir tanesi ise sensör düğümlerinin içerisine yerleştirilecek uyandırma alıcıları tasarlamaktır.

Bu çalışmada düşük güç tüketen aynı zamanda iyi seviyede haberleşme menziline sahip bir uyandırma alıcısı tasarlanmıştır. Haberleşme menzilini arttırmak için uyandırma alıcısının ön ucu için bir düşük gürültülü kuvvetlendirici kullanılmıştır. Tasarım yapılırken Keysight ADS ve LTSPICE XVII programlarından yararlanılmıştır.

Mayıs 2022 , 80 sayfa.

Anahtar kelimeler: Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici, Uyandırma Alıcısı, Kablosuz Sensör Ağı

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

HIGH SENSITIVITY ULTRA LOW POWER CONSUMPTION WAKE-UP RECEIVER DESIGN

Ömer Faruk AYDIN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Wireless sensor networks have become an important topic that has been studied extensively in recent years. These networks, consisting of thousands or even tens of thousands of sensor nodes, are used in a wide variety of application areas. During the communication of the sensor nodes with each other, the most important problem that comes to the fore is power consumption. These battery-operated systems consume a lot of power during communication. It is necessary to optimize this consumption when there is no communication. One of the prominent applications for solving this problem is to design wake-up receivers to be placed inside the sensor nodes. In this study, a wake-up receiver with low power consumption and good communication range is designed. A low noise amplifier is used for the front end of the wake up receiver to increase the communication range. Keysight ADS and LTSPICE XVII programs were used while designing.

May 2022, 80 pages.

Keywords: Low Noise Amplifier, Wake-up Receiver, Wireless Sensor Network

1. GİRİŞ

Kablosuz sensör ağları son zamanlarda üzerinde oldukça fazla çalışma yapılmaya başlanan önemli bir gelişmedir. Binlerce hatta on binlerce sensörün bir araya gelmesiyle oluşturulan bu ağlar vasıtasıyla bir alanda çok rahat bir şekilde gerçek zamanlı gözlem işlemi yapılması mümkün olmaktadır. Kablosuz sensör ağlarının tarım, taşıma, akıllı evler, akıllı şehirler, sağlık, askeri vs. çok çeşitli bir kullanım alanı bulunmaktadır. Özellikle son yıllarda ciddi artış gösteren nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Sensörler birbirleri ile iletişimi radyo alıcı-vericileri vasıtasıyla kablosuz bir şekilde sağlamaktadır. Fakat burada önemli bir problem ortaya çıkmaktadır. Kablosuz sensör ağlarının sahip olduğu sensör düğümleri pille çalışan sistemlerdir. Bu nedenle haberleşme esnasında ve haberleşmenin olmadığı durumlarda yüksek seviyede gerçekleşen güç tüketimi kablosuz sensör ağları için aşılmayı gerektiren önemli bir problem olarak göz önüne gelmektedir. Bu durumun önüne geçmek için geliştirilen önemli çözümlerden bir tanesi de uyandırma alıcılarıdır.

Uyandırma alıcıları, kablosuz sensör ağlarında veri alışverişinin gerçekleşmediği durumlarda gereksiz güç harcanmasının önüne geçmek için ortaya atılmış bir çözümdür. Radyo alıcı-vericileri veri alışverişi gerçekleşmediği esnada haberleşme kanalını dinlemeye devam ederler. Bu durumda yüksek güç tüketimi ile karmaşık veri alış-verişlerinde kullanılan alıcı-vericilerin haberleşme gerçekleşmediği esnada haberleşme kanalını dinlemesine gerek yoktur. Bu durumda daha basit yapıya sahip belirli bir adres dizini aldığında ana radyoyu uyandıracak bir uyandırma alıcısı tasarımı yapıp kablosuz sensör ağı düğümlerinde kullanmak oldukça zekicedir. Bu alıcılar normal radyo alıcı-vericilerine göre çok düşük güç tüketmekte ve bundan dolayı düğümlerin kullanım ömürlerini oldukça uzatmaktadırlar.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda gerçekleştirilen uyandırma alıcıları çok düşük güç tüketimi seviyelerinde çalışmaktadırlar. Fakat burada önemli ikinci bir sıkıntı ortaya çıkmaktadır. Cihazlar her ne kadar çok düşük seviyelerde güç tüketseler de bu alıcılar düşük hassasiyet değerlerine sahiptirler. Bundan dolayı haberleşme mesafeleri oldukça kısadır. Bu da birçok uygulama için bu cihazları kullanışsız kılmaktadır.

Alıcı hassasiyeti ve güç tüketimi arasında çok ince bir denge mevcuttur. Cihazın güç tüketimi arttıkça hassasiyette de artış gözlenmektedir. Bu durumda yüksek haberleşme menzilleri için tasarlanacak cihazlarda bu durum göz önünde bulundurularak dengeli bir yaklaşım izlenmelidir. Uyandırma alıcıları radyo frekanslarında çalışma gösteren haberleşme elemanları olduklarından hassasiyeti arttırmak için geliştirilecek çözüm önerilerinin haberleşme kalitesini etkilememesi gerekir. Bu durumda alıcı hassasiyetini arttırmak için geliştirilen önemli çözümlerden bir tanesi olarak düşük gürültülü kuvvetlendiriciler öne çıkmaktadır.

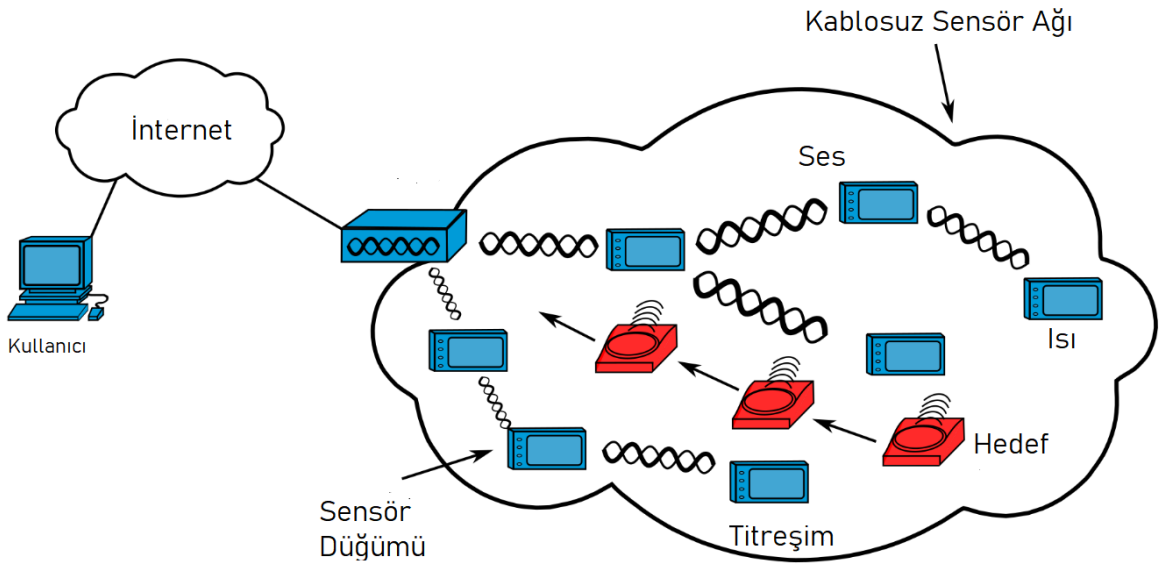
Düşük gürültülü kuvvetlendiriciler, radyo frekanslarında çalışan sistemlerde antenden sonra kullanılan ilk bileşenlerdir. Düşük bir gürültü figürü değerine sahip olan bu kuvvetlendiricilerin kullanılması ile antenden alınan zayıf sinyaller kuvvetlendirilerek alıcı devrelerine iletilmektedirler. Bu sayede hem zayıf sinyallerin tespiti kolaylaşır hem de kuvvetlendirici fazla parazite neden olmadan, veri alışverişinin kalitesini etkilemeden alıcının hassasiyetini yükseltmiş olur.

Bu çalışmada yüksek menzile sahip IoT uygulamaları için gerçekleştirilen düşük gürültülü kuvvetlendirici uygulanmış bir uyandırma alıcısı tasarımı yapılmaktadır. Yapılan çalışmada gerçekleştirilen uyandırma alıcısının güç tüketimi düşük seviyede (mW seviyesinde) tutulup alıcı hassasiyetinin wifi ve bluetooth modülleri için kullanışlı ve yüksek seviyelere çıkartılması hedeflenmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI

Ucuz kablosuz iletişim, hesaplama ve algılama, yeni nesil akıllı cihazlar yarattı. Kendi kendini organize eden ağlarda bu cihazlardan on binlercesinin kullanılması, kablosuz sensör ağları (WSN'ler) olarak adlandırılan yeni bir teknoloji yarattı. Bu sistemlerin potansiyeli devrim niteliğindedir. Bu teknoloji hayatımızın her alanını etkileyecek. Tarımda, endüstriyel otomasyonda, ulaşımda, enerjide, tıpta ve orduda önemli gelişmeler yaşanıyor ve yakın gelecekte hızlanacak [1]. Kablosuz sensör ağları isminden de anlaşılabileceği üzere birbirleri ile kablosuz bir şekilde haberleşebilen binlerce hatta on binlerce sensör düğümünden oluşan bir ağdır. Özellikle kullanıcıya kadar kablolama gerektiren geleneksel kablolu sensör uygulamalarına karşı gösterdiği performans ve avantajlar nedeniyle son yıllarda bu konuda araştırma ve geliştirme faaliyetleri hız kazanmaktadır. Her bir sensör düğümünün kablosuz haberleşmesini sağlayan alıcı-verici bileşenleri mevcuttur. Sensör düğümleri verileri toplayabilir, sinyalleri işleyebilir ve verileri yayarak koordineli bir şekilde birbiriyle haberleşen bir ağ yaratabilirler.



Şekil 2.1: Kablosuz Sensör Ağı [2].

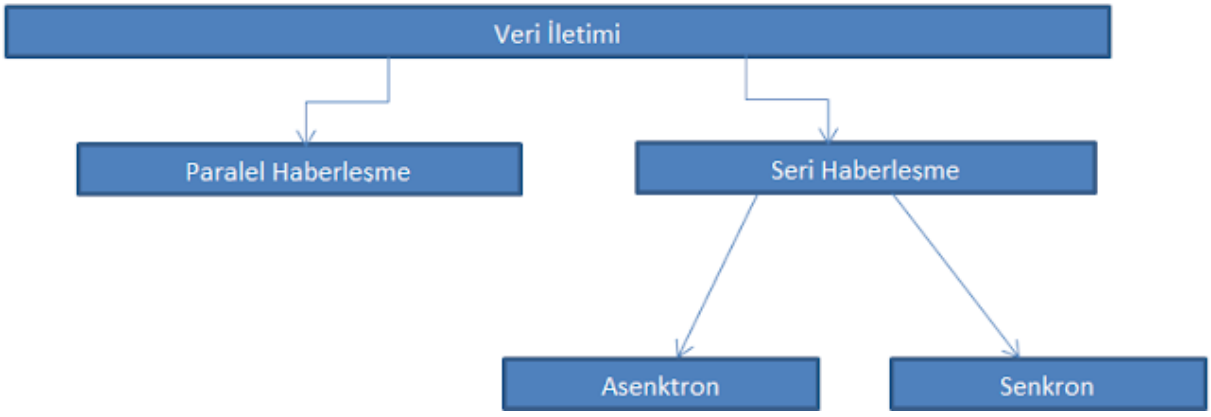
Şekil 2.1'de bir kablosuz sensör ağı gösterilmiştir. Kablosuz sensör ağında bulunan sensör düğümlerinden gelen veriler bir merkez istasyonda toplanır. Kullanıcı merkez istasyonuna internet vasıtasıyla bağlanarak buradaki verileri görüntüleyebilir ve yapmak istediği işlemi gerçekleştirebilir. Kablosuz sensör ağlarının geniş bir kullanım alanı vardır. Bunlara aşağıdaki gibi örnekler verilebilir ve çoğaltılabilir.

- Askeri Uygulamalar
- Çevre İzleme
- Doğal Felaketler
- Tıbbi Uygulamalar
- Akıllı Şehirler ve Evler

Kablosuz sensör ağındaki sensör düğümlerinde karşılaşılan en büyük sıkıntılardan birisi güç tüketimidir. Bu sistemler pille çalışan sistemler olduğundan, güç kısıtlamaları önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunun giderilmesi için yapılan birçok çalışma mevcuttur. Sensör düğümlerinin en çok güç tüketen bileşenlerinden birisi radyo alıcı-vericileridir [3]. Buna çözüm olarak, veri iletim tekniklerine bağlı farklı çözüm önerileri sunulmuştur.

2.2. VERİ İLETİMİ

Veri iletimi, verilerin bir noktadan başka bir noktaya bir haberleşme kanalı vasıtasıyla aktarılma işlemidir. Veri iletimi kendi içerisinde paralel ve seri veri iletimi olmak üzere ikiye ayrılır. Seri veri iletim tekniği de kendi içerisinde senkron, asenkron ve izosenkron olmak üzere üçe ayrılmaktadır.



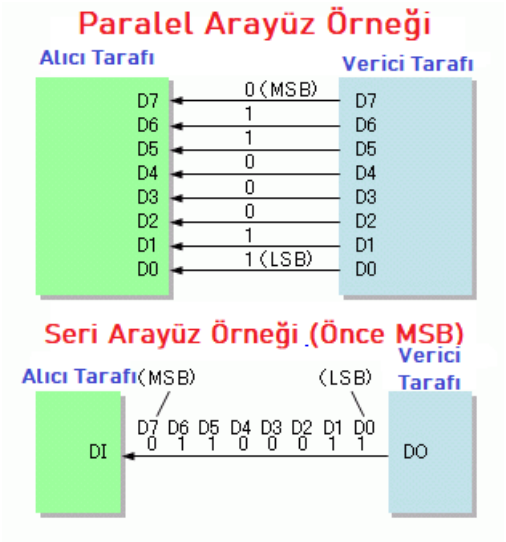
Şekil 2.2: Veri İletim Teknikleri [4].

2.2.1. Paralel Veri İletimi

Dijital ortamda veriler kodlanırken 1'ler ve 0'lar kullanılmaktadır. Her bir veri kodlanırken kullanılan bu 1 ve 0'lara bit adı verilir. Bu bitlerden sekiz tanesinin oluşturduğu gruba ise bayt denmektedir. Paralel veri iletimi yaparken gönderici, alıcıya sekiz adet biti aynı anda sekiz farklı yoldan gönderir.

2.2.2. Seri Veri İletimi

Seri veri iletiminde ise sekiz adet bit alıcıya, aynı yol üzerinden sırayla gönderilir. Bilgisayar ağlarında bu iletim tekniği kullanılmaktadır.



Şekil 2.3: Paralel ve Seri Veri İletimi [5].

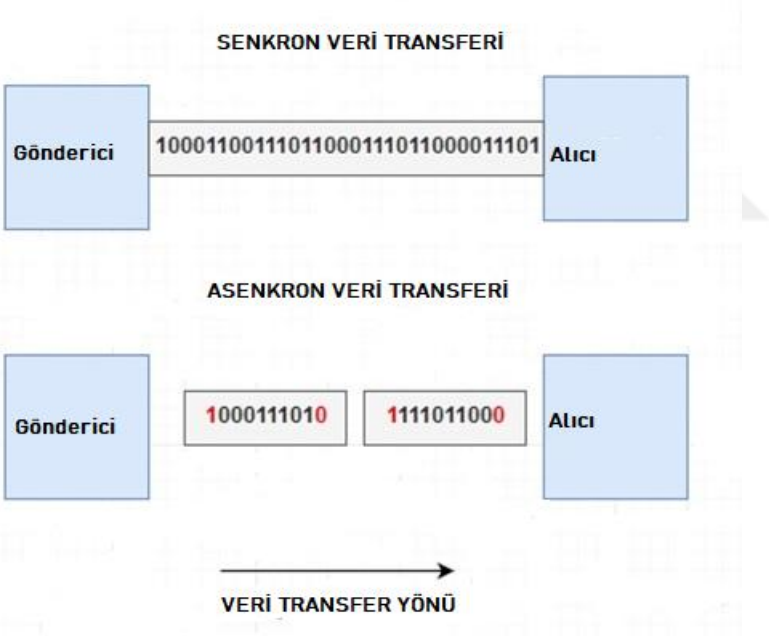
Seri veri iletimi kendi içerisinde senkron, asenkron ve izosenkron olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

2.2.2.1. Senkron İletişim

Senkron veri iletişiminde başlangıç ve bitiş bitleri bulunmaz. Bunun yerine bir clock (saat) sinyali kullanılmaktadır. Bu ortak saat sinyali sayesinde belli bir zaman aralığından sonra veri iletimi alıcı ve verici arasında başlar.

2.2.2.2. Asenkron İletişim

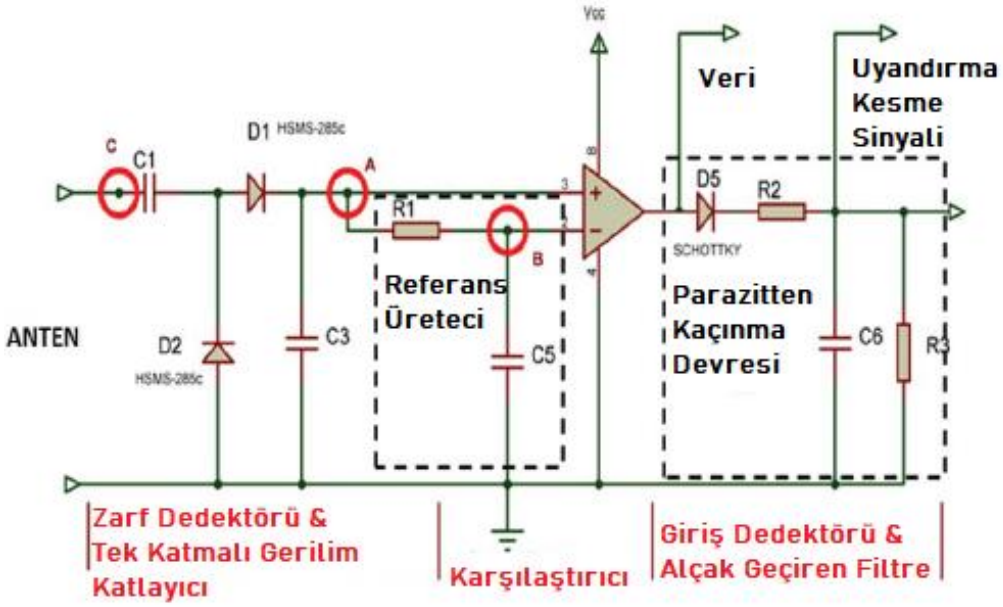
Asenkron iletişimde ise alıcı ve verici arasında harici bir saat sinyali bulunmamaktadır. Bu yüzden verici, alıcıya veri iletimini başlattığını bildirmek için bir başlangıç biti, bittiğini bildirmek için ise bir bitiş biti göndermektedir. Bu tezin konusu için önemli olan iletişim biçimi asenkron iletişimdir. Çünkü tasarlanan uyandırma alıcısı asenkron iletişim tekniği ile haberleşme sağlamaktadır.



Şekil 2.4: Senkron ve Asenkron Veri İletimi [6].

2.3. UYANDIRMA ALICISI

Kablosuz sensör ağlarında, sensör düğümlerinin güç tüketiminin optimize edilmesi için öne sürülen yaklaşımlardan bir tanesi uyandırma alıcısıdır. Sensör düğümleri günün her saati veri alış-verişi yapmamaktadır. Veri alış-verişi yapılması için belli zamanlar ve aralıklar vardır. Veri alış-verişi gerçekleştiği durumlarda alıcı dinleme durumundadır. Veri alış-verişi gerçekleşmediği durumlarda ise alıcı boşta dinleme durumundadır. Boşta dinleme durumunda harcanan enerji gereksiz ve çok fazladır. Bu durumu ortadan kaldırmak amacıyla ana radyodan önce, radyoyu sadece veri geleceği zaman uyandırması için bir uyandırma alıcısı tasarlanması oldukça mantıklıdır. Tasarlanan bu alıcı boşta dinleme sırasında oldukça az enerji tüketecek ve veriden önce gönderilen bir uyandırma sinyalini alıp, işleyip bir mikrodenetleyici vasıtasıyla ana radyoyu iletim işleminin gerçekleşmesi için açacaktır. Bu sayede önemli bir miktarda enerji tasarrufu sağlanacaktır.



Şekil 2.5: Uyandırma Alıcısı Çekirdek Devresi [3].

Şekil 2.5'de bir uyandırma alıcısının çekirdek devresi gösterilmektedir. Başlıca uyandırma alıcısı şu kısımlardan oluşmaktadır;

- Zarf Dedektörü
- Karşılaştırıcı

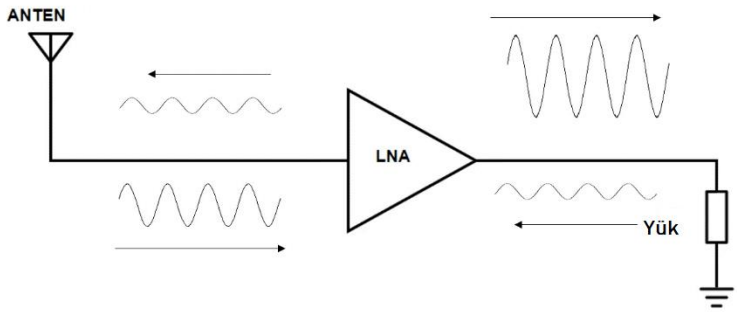
- Giriş Dedektörü

Bu kısımlar yöntem bölümünde daha detaylı olarak incelenecektir. Çekirdek devrede tek aktif bileşen karşılaştırıcıdır. Bu yüzden bu tarz devrelerde güç tüketimi oldukça azdır (nW seviyesinde). Fakat bu tarz devrelerde önemli bir denge ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar güç tüketimi çok az olsada, alıcı hassasiyeti de bu devrelerde düşmektedir.

Alıcı hassasiyeti, bir alıcının işleyebileceği en zayıf sinyal olarak tanımlanabilir. Yukarıda bahsedilen dengeden dolayı, haberleşme mesafesi bu devrelerde düşük kalmaktadır. Yapmak istenilen işleme göre alıcı hassasiyetinin bazı devrelerde yükseltilmesine ihtiyaç duyulabilir. Bu durumda çözüm önerisi RF ön ucu olarak bir düşük gürültülü kuvvetlendirici kullanmaktır.

2.4. DÜŞÜK GÜRÜLTÜLÜ KUVVETLENDİRİCİ

Uyandırma alıcısının hassasiyetini yükseltmek amacıyla kullanılan bu bileşen, isminden de anlaşılabileceği üzere, sinyallerin fazla gürültü eklenmeden kuvvetlendirilmesi gereken ortamlarda kullanılması gereken bir bileşendir. Düşük güçlü kuvvetlendirici (LNA'ler) radyo alıcılarında çok sık kullanılan bileşenlerdendir. LNA, bir alıcının sinyali alan ilk bileşenidir. Sinyali alır kuvvetlendirir ve alıcıya üzerine eklenen parazitten dolayı minimum kayba neden olacak şekilde iletir.



Şekil 2.6: Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici [7].

Şekil 2.6’da bir düşük gürültülü kuvvetlendirici gösterilmiştir. Düşük gürültülü kuvvetlendirici sayesinde hem alıcının hassasiyeti önemli ölçüde yükseltilebilir hem de hedef özelliklerine bağlı olarak alıcı düşük güç tüketimi sınırları içerisinde tutulabilir. Düşük gürültülü kuvvetlendiriciye ait teknik detaylar yöntem kısmında daha detaylı olarak incelenecektir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

[3]'te farklı karşılaştırıcı bileşenlerinin kullanılmasıyla farklı güç tüketim değerlerine sahip ve farklı hassasiyet seviyelerine ulaşabilen, çalışma frekansı 868 MHz olan bir uyandırma alıcı devre tasarımı yapılmıştır. Bu devrede karşılaştırıcı olarak TLV3691 kullanılmasıyla 152 nW seviyesinde bir güç tüketimi ile -32 dBm seviyesinde bir hassasiyet değerine ulaşılmaktadır. Karşılaştırıcı olarak AS1976 kullanılmasıyla 365 nW güç tüketimi ile -42 dBm seviyesinde bir hassasiyet değerine ulaşılmaktadır. Karşılaştırıcı olarak LPV7215 kullanılması ile 1.2 uW seviyesinde bir güç tüketimi ile -55 dBm seviyesinde bir hassasiyet değerine ulaşılmaktadır. Buradaki güç tüketim değerlerinin herhangi bir veri girişi yokken yani boşta dinleme durumunda elde edildiğine dikkat edilmelidir.

[8]'de uyandırma alıcı devresi olarak [3]'te ki devre yapısı kullanılmış ve bu devrenin önüne bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlanarak 6mW güç tüketim değeri ile -80 dBm seviyesinde bir hassasiyet değerine ulaşılmıştır. Burada karşılaştırıcı bileşen olarak LPV7215 kullanılmıştır. Çalışma frekansı aynı şekilde 868 MHz olarak belirlenmiştir.

[9]'da çalışma frekansı 315 MHz olarak belirlenmiş ve farklı iki varyasyon kullanımı ile 7.4 uW güç tüketim seviyesiyle -52 ve -63 dBm seviyelerinde hassasiyet değerlerine ulaşılmıştır.

[10]'da [9]'da ki çalışma değiştirilerek çalışma frekansı 433 MHz olarak belirlenmiştir. Burada da 8.7 uW seviyesinde bir güç tüketim değeri ile -63.4 dBm seviyesinde bir hassasiyet değerine ulaşılmıştır.

[11]'de bir düşük gürültülü kuvvetlendirici ve alıcı kombinasyonu ile 30 mW seviyesinde bir güç tüketim değeri ile -90 dBm seviyesine çıkan bir hassasiyet değerine ulaşılmıştır.

[12]'de 868 MHz çalışma frekansında 7.5 uW güç tüketimi değeri ile -90 dBm hassasiyet seviyesine ulaşabilen bir alıcı tasarımı yapılmıştır.

[13]'te 27.3 mW güç tüketimi ile -122 dBm seviyesinde hassasiyete ulaşabilen bir uyandırma alıcısı önerilmiştir.

Tablo 3.1: Literatür Taramasındaki Çalışmaların Özeti

Kaynak	Güç Tüketimi	Hassasiyet
Magno, [3]	152 nW	-32 dBm
Frøytlog, [8]	6 mW	-80 dBm
Woias, [9]	7.4 uW	-52 dBm
Koeble, [10]	8.7 uW	-63.4 dBm
Yomo, [11]	30 mW	-90 dBm
Bdiri, [12]	7.5 uW	-90 dBm
Shih, [13]	27.3 mW	-122 dBm

4. YÖNTEM

Bu çalışmada [3]'te verilen uyandırma alıcısı devresi, [8]'de ki şekilde bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tarafından desteklenerek hassasiyet artışı sağlanması hedeflenmektedir. İlk olarak düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı yapılacak ve simülasyonları tamamlanacaktır. Düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı ve simülasyonlarının yapılması için Keysight-Advanced Design System platformu kullanılmıştır. Bu platformun kullanılmasının sebebi içinde bulunan RF transistörleri kütüphanesi sayesinde işlem için gerekli görülen transistör modellerine erişimin kolay olması, düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı için anahtar özellikler olan S parametreleri, gürültü figürü, güç kazancı, doğrusallık ve kararlılık gibi analizlerin kolay bir şekilde yapılabilmesi ve Smith Chart işlevi sayesinde empedans uyumlaştırma ağının kolaylıkla tasarlanabilmesi gibi çok önemli avantajlarının bulunmasıdır.

Uyandırma alıcısının çekirdek devresinin tasarlanmasında LTSPICE XVII simülatörü kullanılmaktadır. Bu simülatör alıcının aktif bileşeni olan karşılaştırıcının harici olarak tasarlanmasının kolaylaştırılması, alıcının herhangi bir noktasında herhangi bir zamanda geçen dalga şekillerinin izlenebilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu sayede hem alıcı tasarımı kolaylaşmakta hem de alıcının düzgün bir şekilde tasarlanıp tasarlanmadığı kontrol edilebilmektedir. Uyandırma alıcısının yanında tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendiricinin bu alıcının ön ucunu entegre edilerek düşük gürültülü kuvvetlendirici uygulanmış alıcı tasarımının performansı ve işlevselliği test edilebilmektedir.

5. BULGULAR

5.1. DÜŞÜK GÜRÜLTÜLÜ KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI

Düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı yapılırken çok önemli bazı parametreler vardır. Tasarım yapılırken çalışma frekansında bu parametrelerin uygun değerlerde olması hayati bir rol oynamaktadır. Parametreler istenilen seviyelere ulaştırılamazsa kuvvetlendirici düzgün bir şekilde çalışmayacak ve veri iletimi mümkün olmayacaktır. Bu parametreler kısaca şu şekilde sıralanabilir.

- Kararlılık Faktörü
- S-Parametreleri
- Gürültü Figürü
- Doğrusallık

5.1.1. Hedef Parametreleri

Bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarım stratejisi belirlemeden önce ilk yapılması gereken hedef parametreleri belirlemektir. Bu çalışmada hedef parametreleri olarak Tablo 5.1'deki parametreler belirlenmiştir.

Tablo 5.1: Hedef Parametreleri [14]

Parametreler	**Değerler**
DC Gerilim Kaynağı	1V-2V
Besleme Akımı	700uA-1.5mA
Frekans	868MHz
Gürültü Figürü	<2dB
Güç Kazancı	>20dB
Giriş Geri-Dönüş Kaybı	<-10dB
Çıkış Geri-Dönüş Kaybı	<-10dB
Doğrusallık	>-60dBm

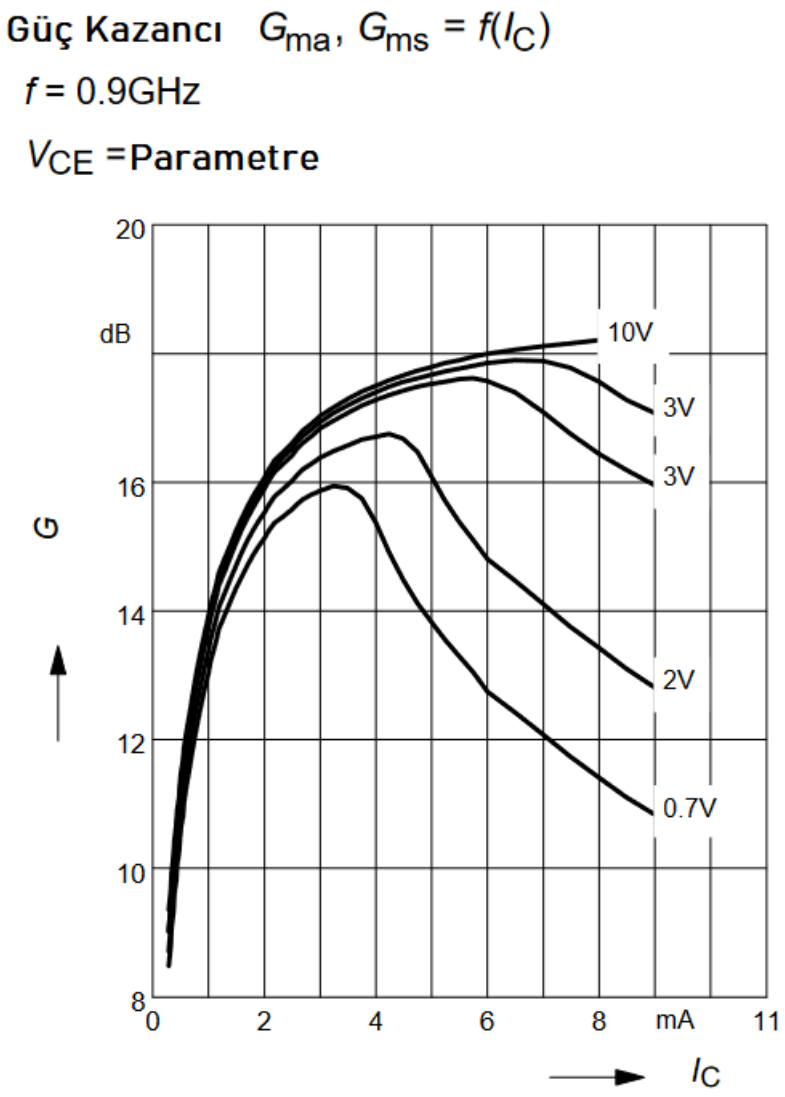
Tablo 5.1'de verilen hedef parametrelerine ulaşmak için iyi bir strateji belirlenmesi gerekmektedir. Bunun da ilk adımı uygun bir aktif cihaz seçimi yapmaktan geçmektedir.

5.1.2. Aktif Cihaz Seçimi

Hedef parametreleri doğrultusunda uygun bir aktif cihaz seçimi yapmak bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlamanın ilk adımıdır. Bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımında, dikkate alınması gereken ana parametreler, MAG (maksimum mevcut kazanç) olarak adlandırılan aktif cihaz tarafından sağlanan maksimum kazanç ve cihazın S parametrelerine bağlı olan NFmin (minimum gürültü figürü) şeklindedir [15]. Bu çalışmada aktif RF transistörü olarak BFR280 BJT NPN RF Transistör kullanılmıştır. Cihaz seçimi için ilgili transistörün veri sayfasından yararlanılmıştır.

Gürültü Figürü I_C = 1.5 mA, V_{CE} = 5 V, Z_S = Z_{Sopt} , f = 900 MHz f = 1.8 GHz	F	 - -	 1.5 2	 - -	dB
Güç Kazancı, Maksimum 1) **Kararlılık** I_C = 3 mA, V_{CE} = 5 V, Z_S = Z_{Sopt}, Z_L = Z_{Lopt} , f = 900 MHz f = 1.8 GHz	G_{ms}	 - -	 17 11.5	 - -	

Şekil 5.1: BFR280 Gürültü Figürü ve Güç Kazancı Parametreleri [16]

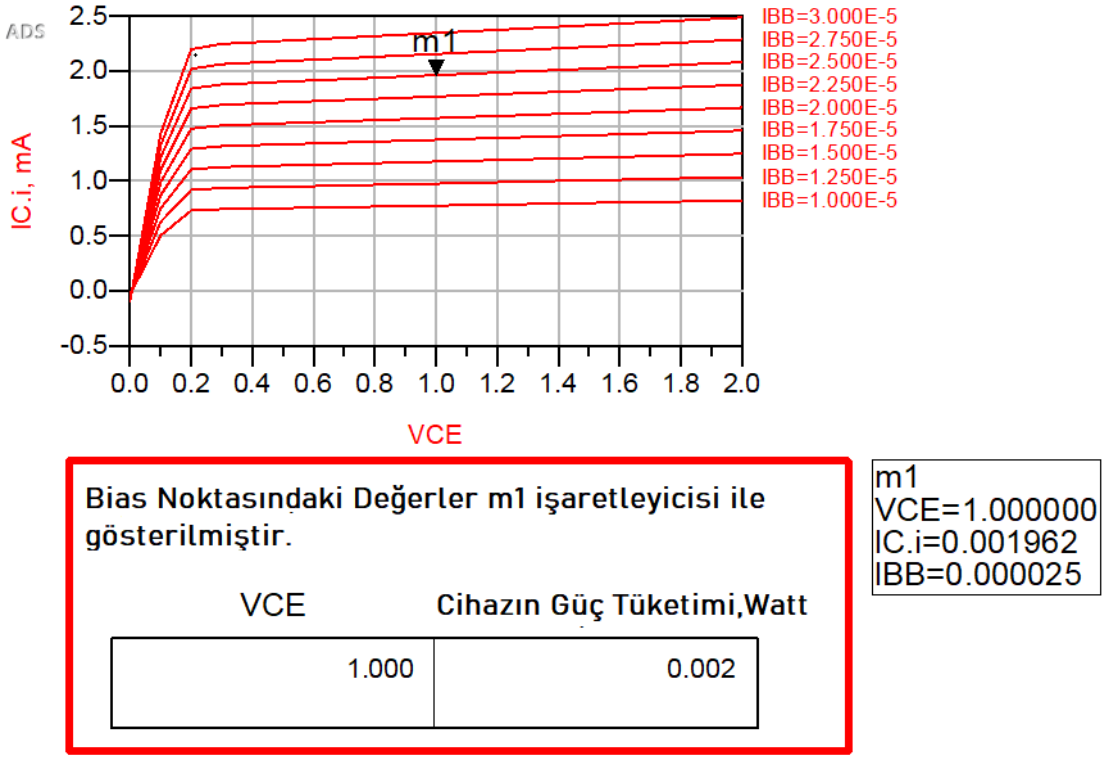


Şekil 5.2: Farklı VCE değerleri için BFR280 Kazanç vs. Ic grafiği [16]

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilen parametre değerlerinden yola çıkarak BFR280 transistörünün çalışma için uygun bir gürültü figürüne ve uygun bir güç kazancı değerine sahip olduğu rahatlıkla görülebilmektedir. Güç kazancının arzu edilen seviyeye çıkarılması için tasarladığımız düşük güçlü kuvvetlendiricinin iki aşamalı kaskat düşük güçlü kuvvetlendirici olması uygun görülmüştür.

5.1.3. DC Çalışma Noktasının Belirlenmesi

Aktif cihaz seçimi yapıldıktan sonra bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı yapılması için ilk önemli nokta, DC çalışma noktasının belirlenmesidir. Bu doğrultuda seçili transistörün ilgili özelliklerinin belirlenmesi için ADS programında BJT CURVE TRACER isimli araçtan faydalanılmıştır.



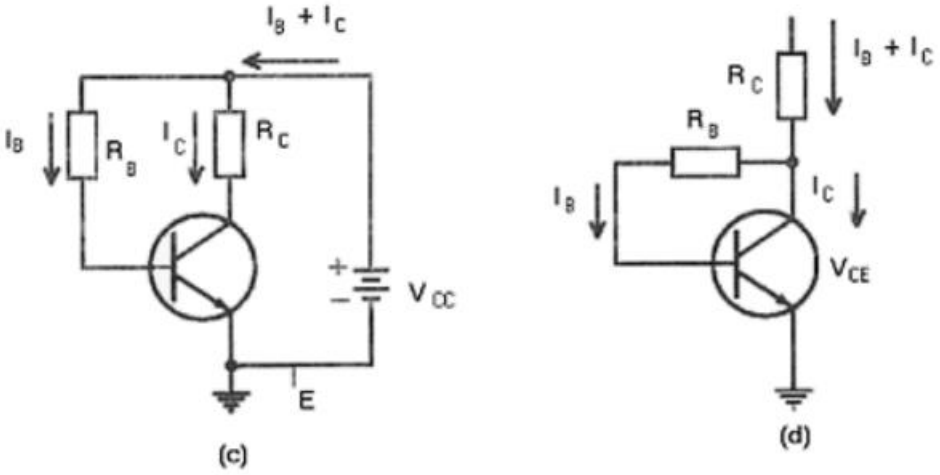
Şekil 5.3: DC Çalışma Noktasının Belirlenmesi

DC çalışma noktasının belirlenmesi daha sonra yapılacak DC kutuplama devresi tasarımı için oldukça mühimdir. DC çalışma noktası belirlenirken hedef parametrelerden, kolektör akımı parametresinde küçük bir sapma yaşanmıştır. Bu sapmanın asıl sebebi diğer parametrelerde sorun yaşanmamak istenmesidir.

Şekil 5.3'te gösterilen DC yük hattından kritik bilgiler elde etmek mümkündür. Burada elde edilen simülasyon sonuçlarına göre DC kutuplama devresi kurulurken, Vcc (Besleme gerilimi) = 2V, Vce (Kolektör-Emiter Gerilimi) = 1V, Ic (Kolektör Akımı)= 1.96mA, Ibb (Beyz Akımı) = 25uA olarak elde edilecektir. Vcc'nin 2V ve Vce'nin 1V olarak seçilmesi önemlidir. Grafikte seçilen bu noktaya Q çalışma noktası denmektedir. Q çalışma noktasının grafiğin tam ortasında seçilmesi çıkışta elde edilecek olan sinyalin mümkün olduğu kadar büyük genlikli ve bozulma yaşamamasına neden olacaktır. Bu yüzden Vce gerilimi, Vcc geriliminin yarısı olacak şekilde seçilmektedir.

5.1.4. DC Kutuplama Devresinin Kurulması

DC kutuplama devresi tasarlanırken öncelikle hangi yaklaşımın kullanılacağı belirlenmelidir. Bu çalışmada DC kutuplama devresinde yaklaşım olarak kolektör geri beslemeli kutuplama devresi kullanılacaktır.



Şekil 5.4: Kolektör-Baz Kutuplama Devreleri, (c) Seri kutuplama, (d) Geri besleme kutuplama [17]

Şekil 5.4(d)'de gösterilen kutuplama devresini BFR280 transistörleri ile kurmak için bazı hesaplamalar yapmak gerekmektedir. Daha önceden belirlemiş olduğumuz Q çalışma noktası değerlerini kullanarak bu kutuplama devresini kurmak oldukça kolaydır. Kutuplama devresinin kurulması için önce devredeki direnç değerleri hesaplanmalıdır. Hesaplamalar aşağıda verilen denklemlerle yapılabilir.

$$Rc = \frac{Vcc - Vce}{Ic} \quad \textbf{(5. 1)}$$

$$Rb = \frac{Vce - Vbe}{Ibb} \quad \textbf{(5. 2)}$$

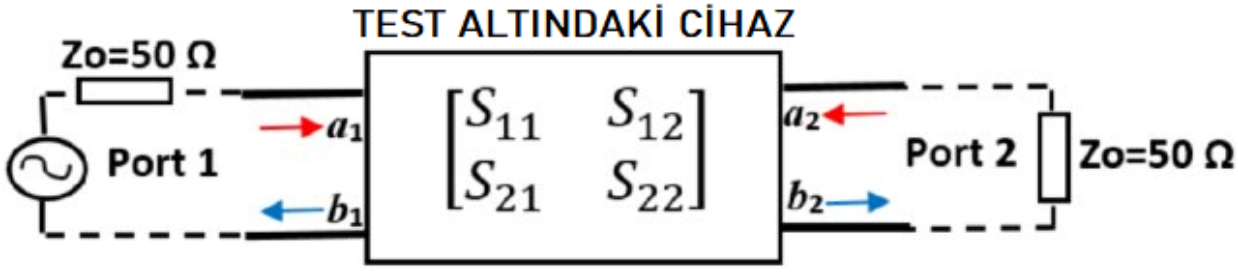
(5.1) ve (5.2)'de verilen denklemler neticesiyle bu direnç değerleri kolaylıkla hesaplanabilir. Vcc = 2V, Vce = 1v, Ic=1.96mA ve Ib=25uA değerleri ilgili denklemlerde yerlerine konulursa Rc=509Ω ve Rb=12kΩ olarak bulunacaktır. Bu şekilde devre doğru bir şekilde polarlanabilecektir.

5.1.5. Empedans Uyumlaştırma Ağı Tasarımı

Empedans uyumlaştırma ağına geçmeden önce birkaç RF (Radyo Frekansı) prensibine değinmek gerekmektedir. Bunlardan ilki iki kapılı ağ ve S parametreleridir.

5.1.5.1. İki Kapılı Ağ ve S Parametreleri

İki kapılı ağlar isminden de anlaşılacağı üzere giriş ve çıkış terminalleri bulunan ağlardır. Bu ağlar başka devrelere bu iki terminal vasıtasıyla bağlanmaktadır. Transistörler de genel olarak üreticiler tarafından belirlenen bazı parametreler ile birlikte bir iki kapılı ağ olarak kabul edilmektedir. Bu parametrelerden bir tanesi de S parametreleri olarak bilinen saçılma parametreleridir. S parametreleri gelen ve yansıyan dalgalar cinsinden değerlendirilen parametrelerdir.



Şekil 5.5: İki kapılı ağ ve S parametreleri [18]

Şekil 5.5'te bir iki kapılı ağ ve S parametreleri matrisi gösterilmektedir. Her bir parametre ağda farklı bir özelliği temsil etmektedir. Bunlar;

- S_{11}: Giriş yansıma katsayısı
- S_{12}: Geri yönde gerilim kazancı
- S_{21}: İleri yönde gerilim kazancı
- S_{22}: Çıkış yansıma katsayısı

olarak bilinmektedir. S parametreleri hem frekansla hem de sistem giriş çıkış empedanslarıyla değişiklik gösterebilmektedir. S parametrelerinin her birinin gelen ve yansıyan dalgalarla matematiksel olarak bir bağlantısı vardır. Şekil 5.5'te a_1 ve a_2 gelen dalgalar, b_1 ve b_2 yansıyan dalgaları temsil etmektedir. S parametrelerini hesaplarken aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}\Big|\ a_2 = 0 \qquad \textbf{(5. 3)}$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}\Big|\ a_1 = 0 \qquad \textbf{(5. 4)}$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}\Big|\ a_2 = 0 \qquad \textbf{(5. 5)}$$

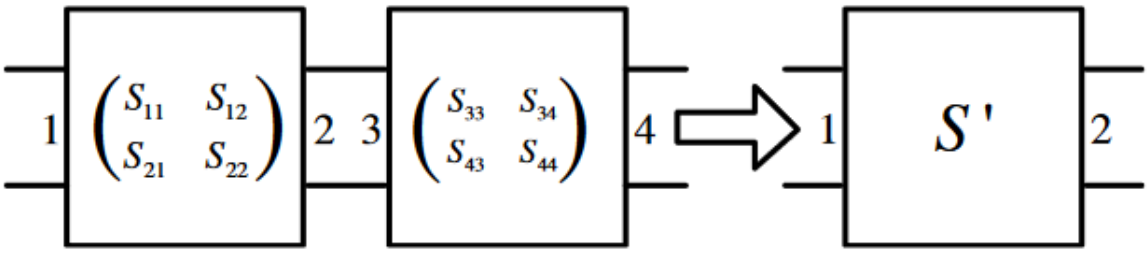
$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}\Big|\ a_1 = 0 \qquad \textbf{(5. 6)}$$

Yansıyan ve gelen dalgalar arasındaki ilişki yukarıdaki eşitliklerden yola çıkılarak şu şekilde ifade edilebilir;

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \tag{5. 7}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \tag{5. 8}$$

Bu formüller tek katmanlı sistemlerde geçerlidir. Fakat tasarlanmak istenen sistem kaskat olduğundan ötürü işler değişmektedir. Bu nedenle her bir katmanın sistemi nasıl etkilediğini analiz etmek için her şeyden önce, katmanlı S parametre formüllerine ihtiyaç vardır [19].



Şekil 5.6: Kaskat Sistemde S Parametreleri [19]

Şekil 5.6'dan yola çıkarak kaskat sistemlerde S parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$S'_{11} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}S_{33}}{1 - S_{22}S_{33}} \tag{5. 9}$$

$$S'_{12} = \frac{S_{12}S_{34}}{1 - S_{22}S_{33}} \tag{5. 10}$$

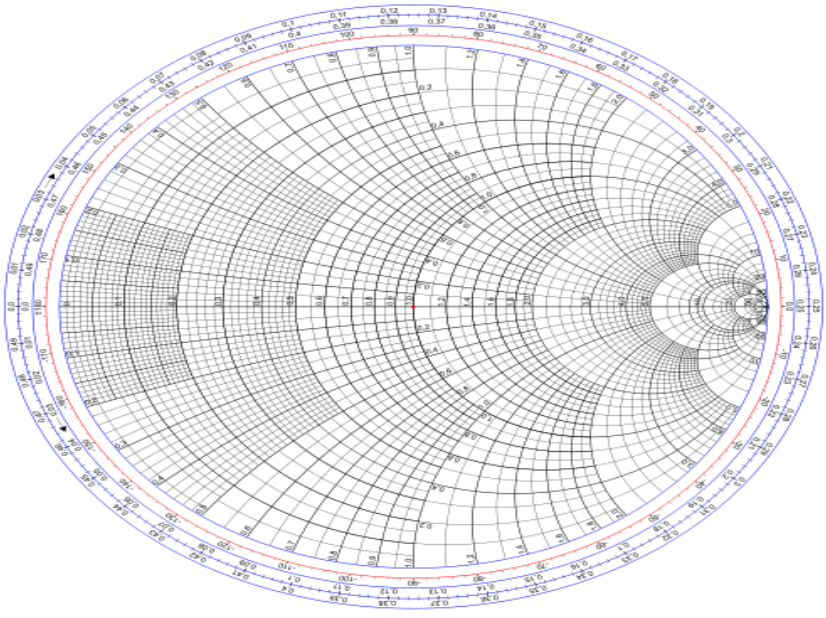
$$S'_{21} = \frac{S_{21}S_{43}}{1 - S_{22}S_{33}} \quad \textbf{(5. 11)}$$

$$S'_{22} = S_{44} + \frac{S_{34}S_{43}S_{22}}{1 - S_{22}S_{33}} \quad \textbf{(5. 12)}$$

Yukarıdaki denklemlerden yola çıkarak sistemdeki S parametrelerinin sisteme etkisi belirlenir. Daha sonra ise Smith Chart kullanılarak empedans uyumlaştırma işlemi gerçekleştirilir.

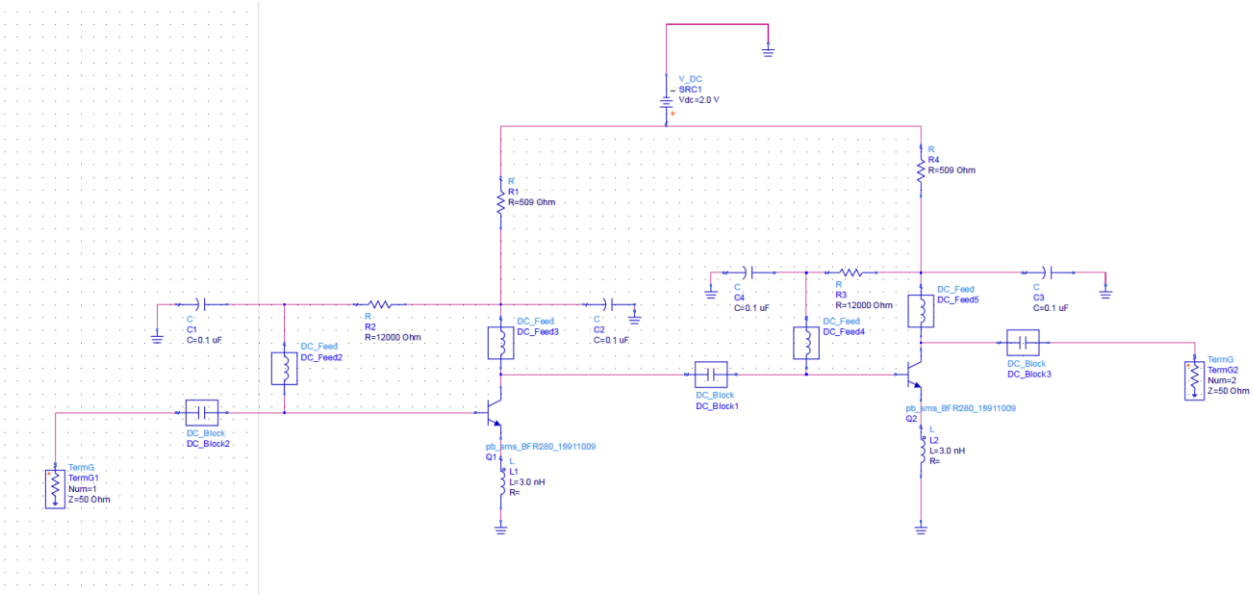
5.1.5.2. Smith Chart

Smith Chart, RF mühendislerinin işini oldukça kolaylaştıran bir diyagramdır. Bu diyagram sayesinde onlarca karmaşık denklemle çözülecek bir problem, grafik üzerinde çok basit bir şekilde halledilebilir. Bu diyagram sayesinde iletim hatlarının, anten ile arasındaki empedansın eşleştirilmesi ya da iletim hatlarının birisinin girişinin diğerinin çıkışı ile eşleştirilmesi mümkündür.



Şekil 5.7: Smith Chart Diyagramı [20]

Şekil 5.7'de bir Smith Chart diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagram kullanılmadan önce eşleştirme yapılmak istenen empedans çifti belirlenmelidir. Diyagramın üst yarım dairesi indüktif bölge, alt yarım dairesi ise kapasitif bölge olarak bilinmektedir. Eşleştirilmek istenen empedanslar belirlendikten sonra Zo=50Ω değeriyle normaliz edilip diyagramda işaretlenir. İşaretlenen noktadan, eşleştirme yapılmak istenen noktaya, kullanılmak istenen eşleştirme ağı biçimine göre seri kapasitör veya indüktar ya da shunt kapasitör veya indüktörler vasıtasıyla ulaşılır. Böylelikle eşleştirme işlemi yapılmış olur. Çalışmada kaskat bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlanmak istenmektedir.



Şekil 5.8: Kaskat Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (Eşleştirme Ağı Bileşenleri Olmadan)

Şekil 5.8'de tasarlanmak istenen düşük gürültülü kuvvetlendirici gösterilmektedir. Burada R_1, R_2, R_3, R_4, DC kutuplama devresine ait dirençlerdir. Daha önceden hesaplandığı üzere bu dirençlerin değerleri $R_1 = R_4 = 509\Omega$, $R_2 = R_3 = 12k\Omega$ olarak seçilmiştir. C_1,C_2,C_3,C_4 ise bypass kapasitörleridir. Bu kapasitörler vasıtasıyla DC gerilim kaynağından gelen gürültü değerinin azaltılması amaçlanmıştır. Tüm bypass kapasitör değerleri 0.1uF olarak belirlenmiştir. Transistörlerin emiter kısımlarına yerleştirilen indüktörler vasıtasıyla da doğrusallık değerinin yükseltilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla L_1 ve L_2 değerleri 3nH olarak belirlenmiştir. Sistem kaskat olduğundan üç adet eşleştirme ağı tasarlanması gerekmektedir. Bunlar;

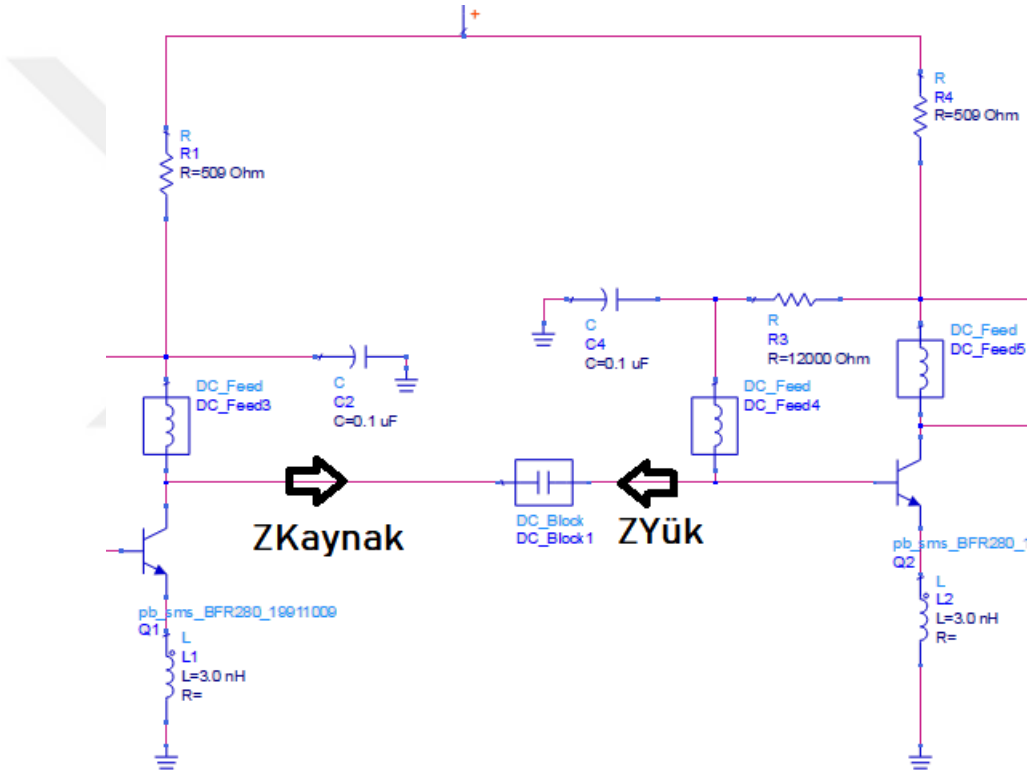
- Katmanlar arası eşleştirme ağı
- Giriş eşleştirme ağı

- Çıkış eşleştirme ağı

Olarak gösterilebilir. Bunlardan hangisinin önce yapılması gerektiğine dair herhangi bir kural yoktur. Çalışmada önce katmanlar arası eşleştirme ağı sonra çıkış eşleştirme ağı en son ise giriş eşleştirme ağı tasarımı yapılması yolu izlenmiştir.

5.1.5.3. Katmanlar Arası Eşleştirme Ağı Tasarımı

Katmanlar arası eşleştirme ağı tasarımı yapılırken iki transistör arasında kalan bölge için eşleştirme yapılır. İlk transistörün çıkış kısmı kaynak empedansı olarak kabul edilirken, ikinci transistörün girişi ise yük empedansı olarak adlandırılır.

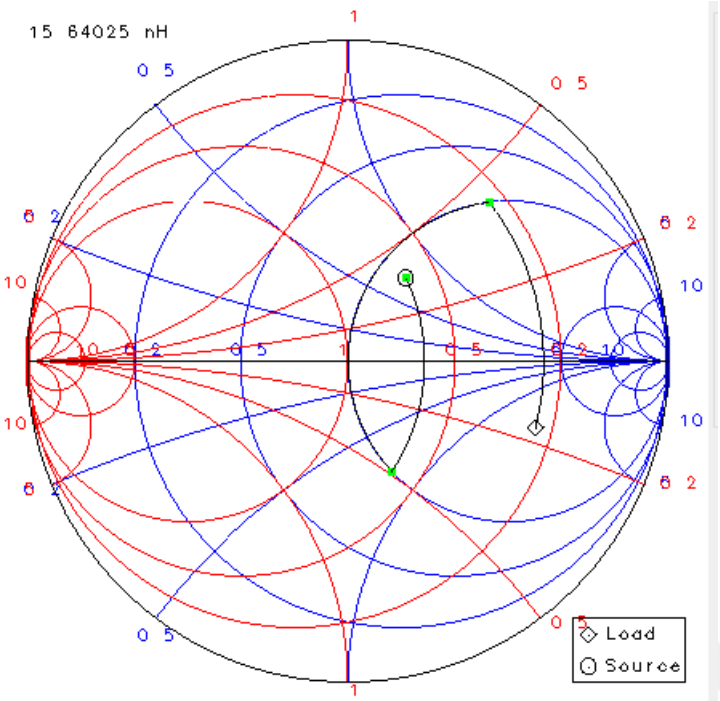


Şekil 5.9: Katmanlar Arası Bölge ve Kaynak ve Yük Empedansları

Burada kaynak ve yük empedansları hesaplanırken ADS simülasyon aracının SP_Probe isimli bileşeninden yararlanılmıştır. Buna göre katmanlar arası bölge için;

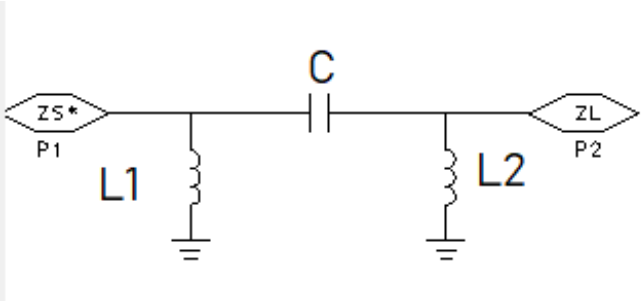
Z_{Kaynak} (Kaynak Empedansı) = 60.95-j*34.95

$Z_{Yük}$ (Yük Empedansı) = 144.6-j*95.5 olarak belirlenmiştir. Bundan sonra yapılması gereken ilgili empedansları Smith Chart diyagramı üzerinde işaretlemek ve eşleştirme işlemini yapmaktır. Burada gözden kaçırılmaması gereken nokta ise kaynak empedansı Smith Chart diyagramının üzerine işaretlenirken, karmaşık eşleniği alınmalıdır.



Şekil 5.10: Kaynak ve Yük Empedanslarının Smith Chart Diyagramında İşaretlenmesi ve Eşleştirme İşlemi

Şekil 5.10'da kaynak ve yük empedanslarının Smith Chart diyagramı üzerinde işaretlenmiş halleri ve yapılan eşleştirme işlemi gösterilmektedir.

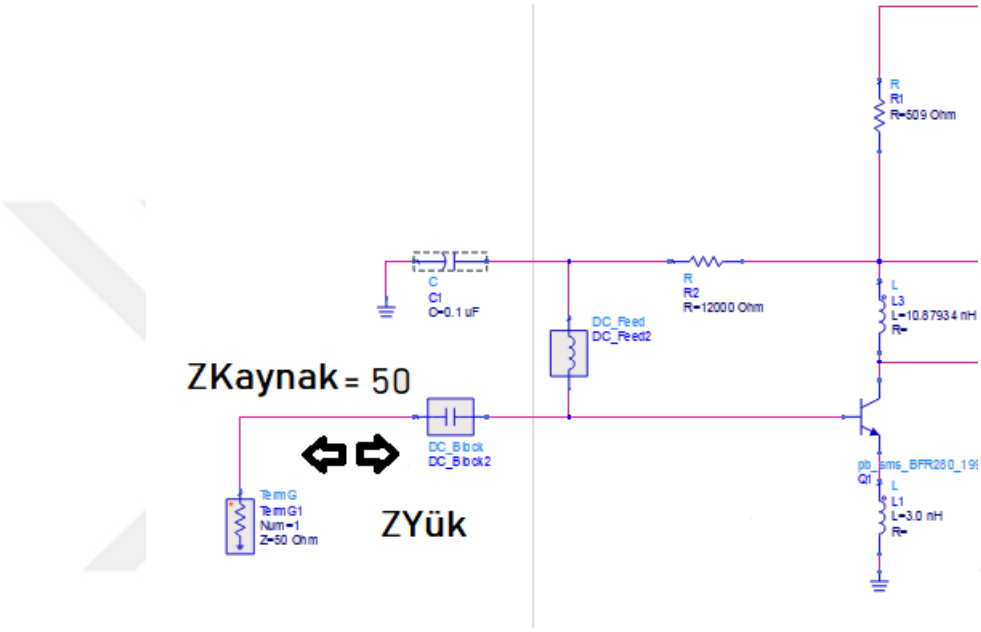


Şekil 5.11: Eşleştirme İşlemi Sonucu Kurulan Katmanlar Arası Eşleştirme Ağı

Şekil 5.11'de eşleştirme işlemi sonucunda kurulan devre yapısı gösterilmiştir. Bu işlem sonucunda L_1 = 10.87934nH, L_2 = 15.64025nH, C=1.42616pF olarak elde edilmiştir. Bundan sonra giriş eşleştirme ağı tasarımına geçilmiştir.

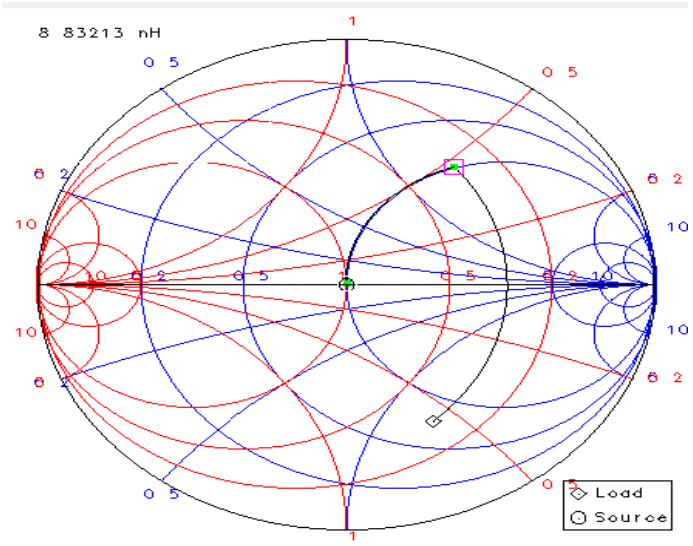
5.1.5.4. Giriş Eşleştirme Ağı Tasarımı

Giriş eşleştirme ağı tasarlanırken aynı prosedür izlenir. Giriş kısmı antene doğrudan bağlı olduğu için kaynak empedansının imajiner kısmı yoktur. Yani Z_{Kaynak} = 50Ω olarak alınır.



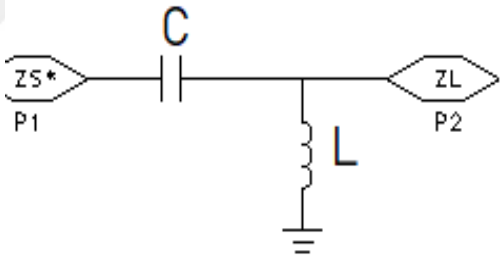
Şekil 5.12: Giriş Bölgesi Kaynak ve Yük Empedansları

Yük empedansı aynı şekilde simülatör vasıtasıyla hesaplanmıştır. Buna göre $Z_{Yük}$ = 37.35-j*66.85 olarak hesaplanmıştır. İlgili değerler Smith Chart diyagramında yerine konularak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5.13: Giriş Bölgesi İçin Kaynak ve Yük Empedanslarının Smith Chart Diyagramına İşaretlenmesi ve Eşleştirme İşleminin Gerçekleştirilmesi

Şekil 5.13'te kaynak ve yük empedanslarına bağlı Smith Chart diyagramı vasıtasıyla gerçekleştirilen eşleştirme işlemi gösterilmektedir.

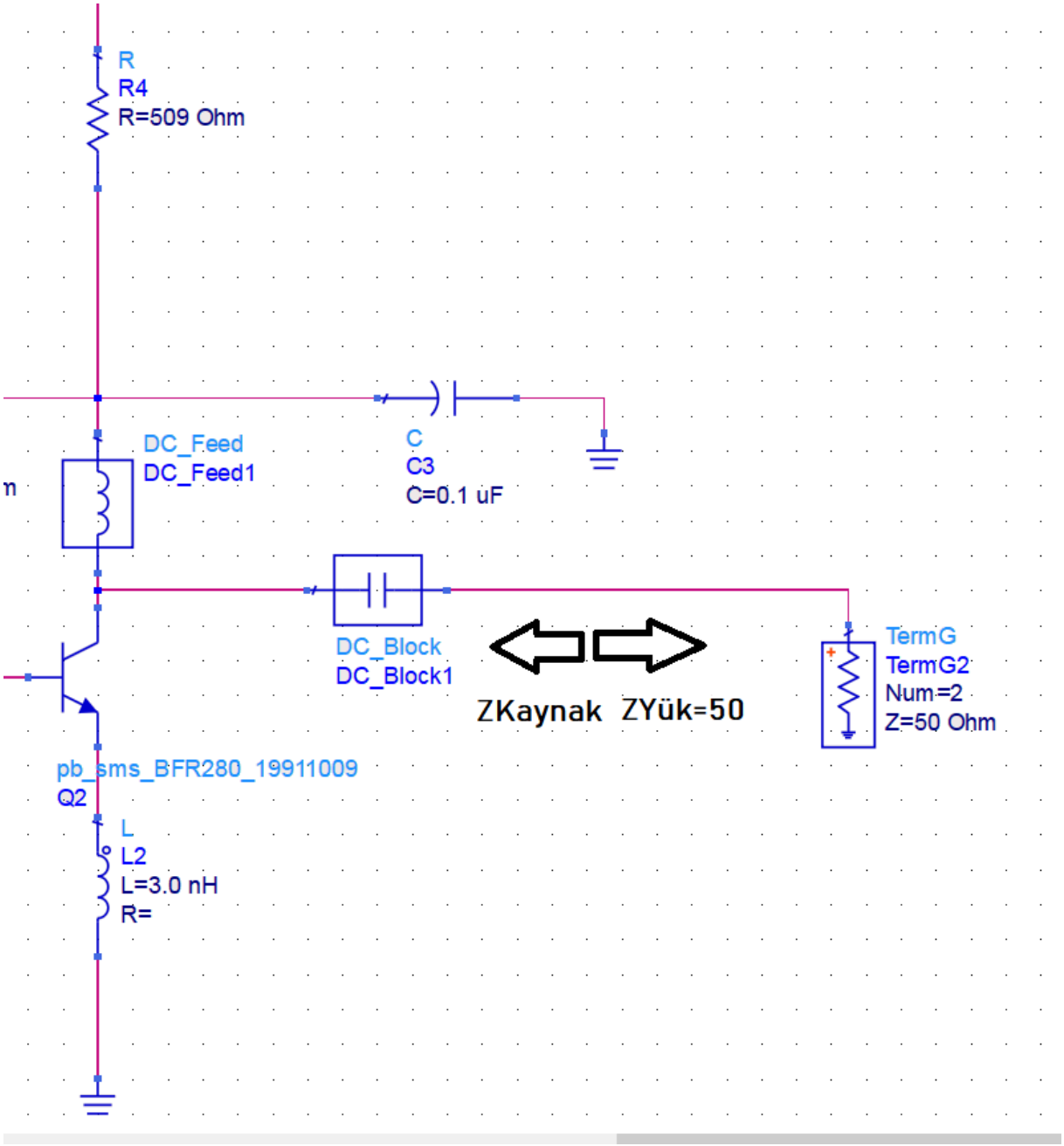


Şekil 5.14: Eşleştirme İşlemi Sonucunda Kurulan Giriş Empedans Eşleştirme Ağı

Şekil 5.14'te empedans eşleştirme işlemi sonrasında kurulan empedans eşleştirme ağı gösterilmektedir. Bu işlemler sonucunda C=2.535pF, L=8.83213nH olarak hesaplanmıştır.

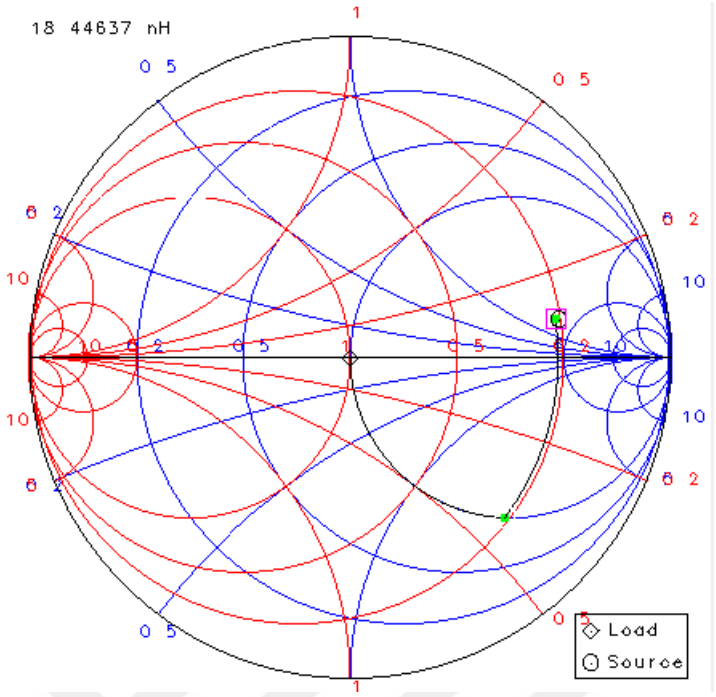
5.1.5.5. Çıkış Eşleştirme Ağı Tasarımı

Çıkış eşleştirme ağı tasarlanırken yine aynı prosedür uygulanmaktadır. Burada ise yük terminalinin imajiner kısmı yoktur. Yani $Z_{Yük}$ = 50Ω olarak kabul edilir.



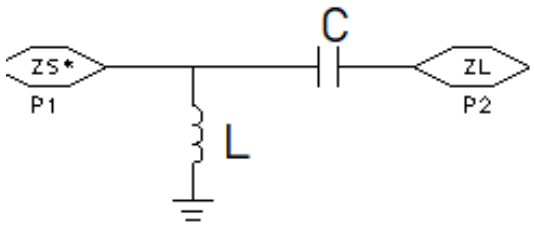
Şekil 5.15: Çıkış Bölgesi Kaynak ve Yük Empedansları

Kaynak empedansı yine simülatör tarafından hesaplanmıştır. Bunun sonucunda Z_{Kaynak} = 203.6+j*87.75 olarak bulunmuştur. İlgili değerler Smith Chart diyagramında işaretlenerek hesaplamalar yapılmıştır.



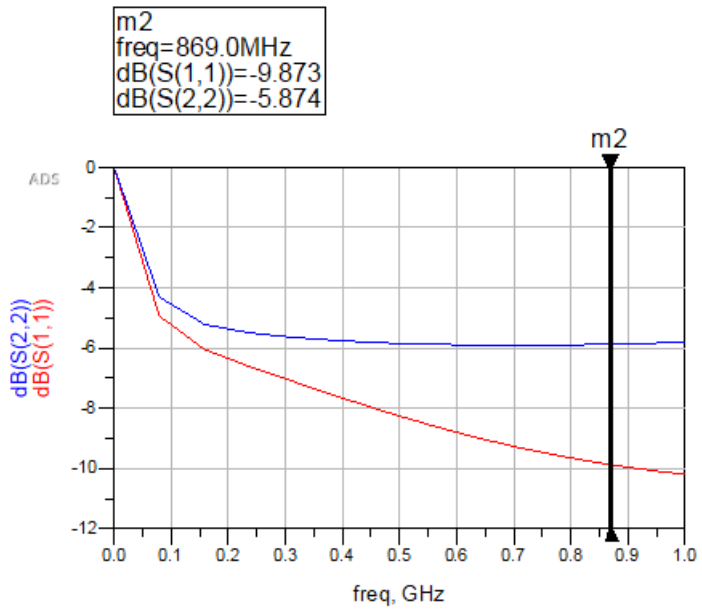
Şekil 5.16: Çıkış Bölgesi İçin Kaynak ve Yük Empedanslarının Smith Chart Diyagramına İşaretlenmesi ve Eşleştirme İşleminin Gerçekleştirilmesi

Şekil 5.16'da Smith Chart diyagramı vasıtasıyla yapılan eşleştirme işlemi gösterilmektedir.

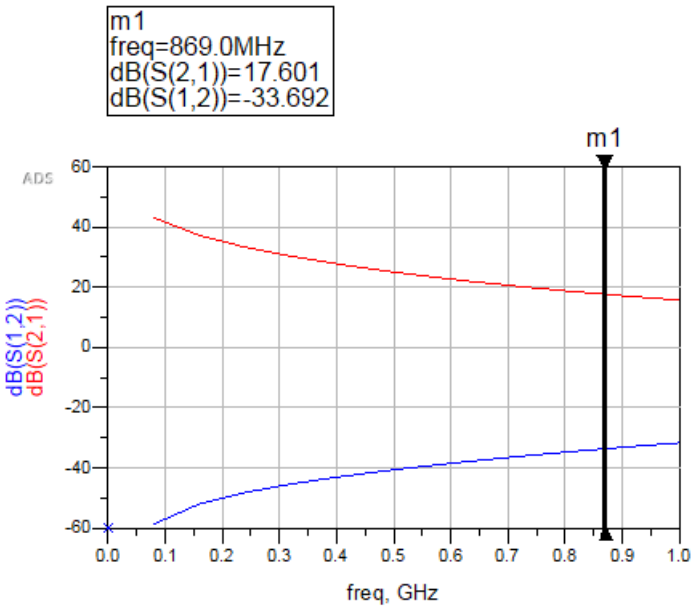


Şekil 5.17: Eşleştirme İşlemi Sonucunda Kurulan Çıkış Empedans Eşleştirme Ağı

Şekil 5.17'de eşleştirme işlemi sonucu kurulan çıkış empedans eşleştirme ağı gösterilmektedir. Bu işlemler sonucunda C=1.91075pF, L=18.44637nH olarak hesaplanmıştır. Eşleştirme ağlarının kurulmasının esas nedeni ilgili çalışma frekanslarında hedef parametreleri yakalayabilmektir. Doğru eşleştirme yapılmadan önce ve sonra S parametrelerinde ciddi farklılıklar gözlenmektedir.

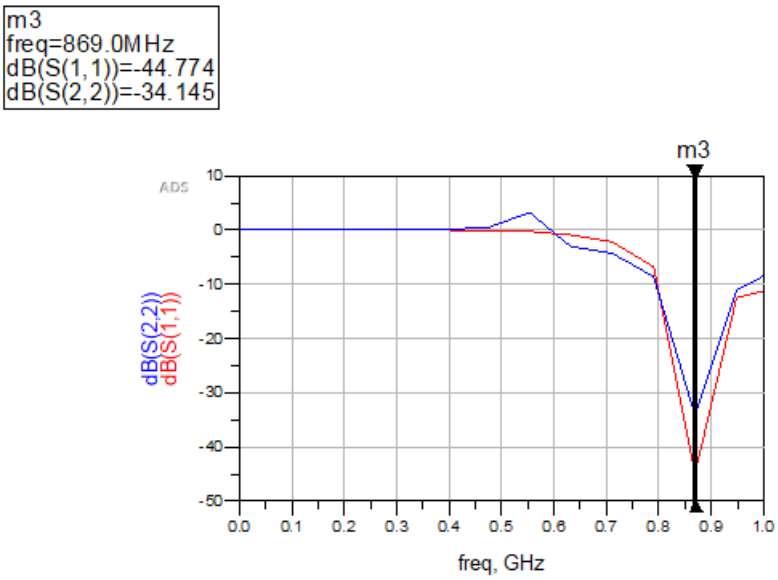


Şekil 5.18: Eşleştirme ağları kurulmadan önce S11 ve S22 parametreleri

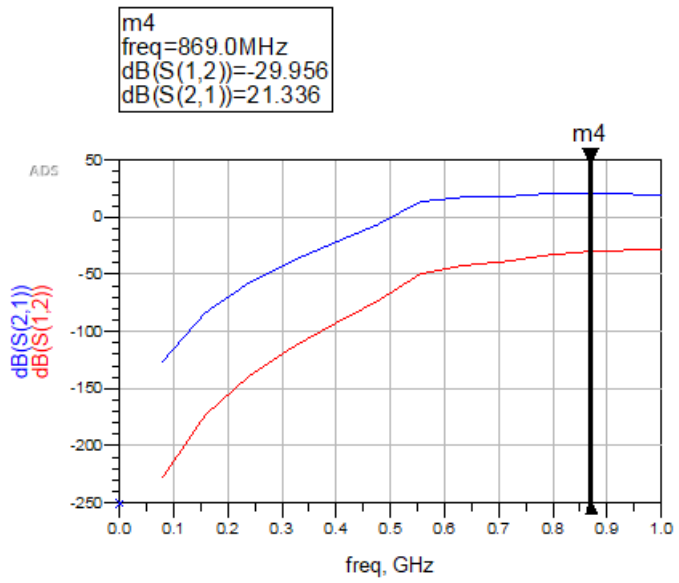


Şekil 5.19: Eşleştirme ağları kurulmadan önce S21 ve S12 parametreleri

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da eşleştirme ağları kurulmadan önce S parametrelerinin değerleri gösterilmektedir. Tablo 5.1'de verilen hedef parametrelerine göre eşleştirilme yapılmadan önce S parametrelerinin istenilen değerlere ulaşamadığı görülmektedir.



Şekil 5.20: Eşleştirme ağları kurulumundan sonra S11 ve S22 parametreleri



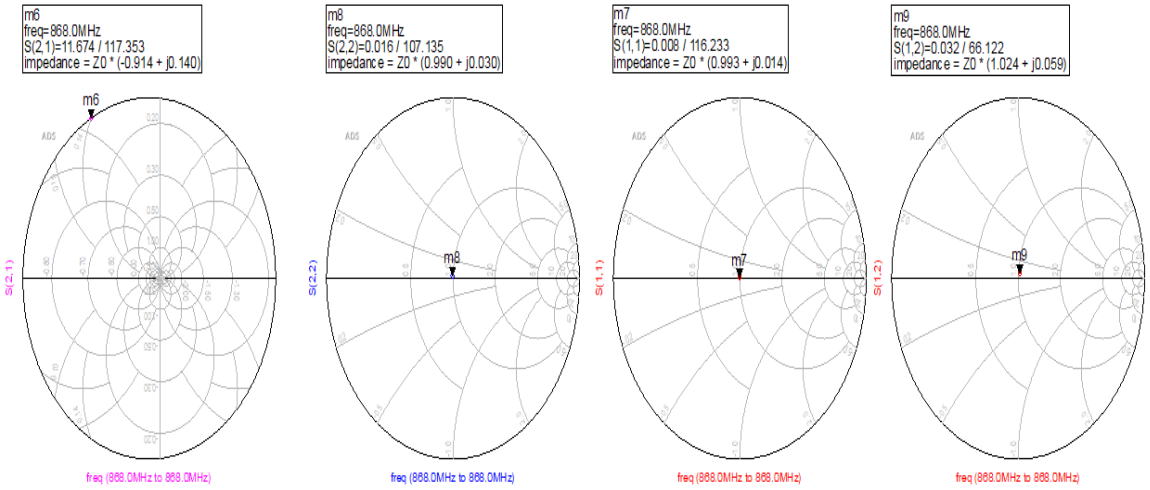
Şekil 5.21: Eşleştirme ağları kurulumundan sonra S21 ve S12 parametreleri

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de eşleştirme ağları kurulumundan sonra S parametreleri değerleri gösterilmektedir. Tablo 5.1'de gösterilen hedef parametreleri eşleştirme ağları kurulduktan sonra sağlanmıştır. Eşleştirme ağlarının kurulumundan sonra;

- S_{11} = -44.774 dB

- S_{22} = -34.145 dB
- S_{12} = -29.956 dB
- S_{21} = 21.336 dB

olarak elde edilmiştir. Bu da S_{11}, S_{22}< -10dB ve S_{21}>20dB hedef parametrelerini sağlamaktadır.



Şekil 5.22: S parametrelerinin kutupsal gösterimi

Şekil 5.22'de S parametrelerinin kutupsal gösterimi verilmiştir. Buna göre;

- S_{11} = 0.008|116.233°
- S_{12} = 0.032|66.122°
- S_{21} = 11.674|117.353°
- S_{22} = 0.016|107.135°

olarak elde edilmiştir. S parametrelerinin kutupsal olarak elde edilmesinden sonra düşük gürültülü kuvvetlendiriciler için bir diğer önemli nokta kararlılık analizidir.

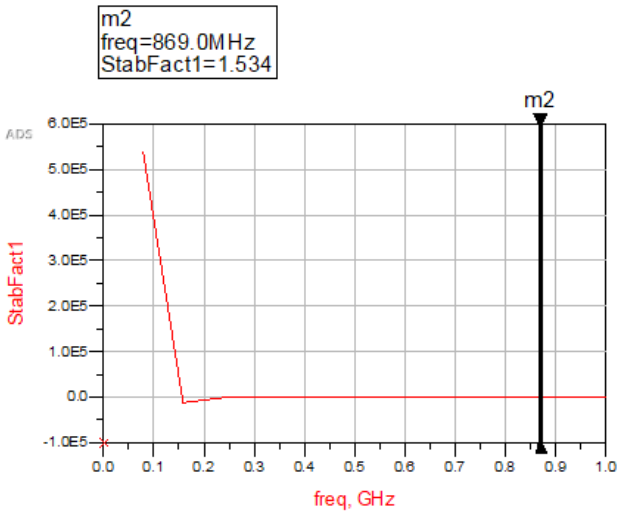
5.1.6. Kararlılık

Düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlarken hedef parametrelerden bir diğeri ise kararlılıktır. Genellikle bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı yapılırken cihazın koşulsuz kararlı olması hedeflenir. Cihazın çalışılmak istenen frekansta koşulsuz kararlı olması çalışma sırasında salınım gözlenmemesi için çok önemlidir. Bunu kontrol etmenin yolu ise Rollet kararlılık faktörü (K) olarak bilinen parametrenin birden büyük olmasının sağlanmasıdır.

$$\Delta = S_{11}xS_{22} - S_{21}xS_{12} \tag{5. 13}$$

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2x|S_{21}|x|S_{12}|} \tag{5. 14}$$

Denklem 5.13 ve 5.14'te kararlılık faktörünün hesaplanmasında kullanılan formüller verilmiştir. Burada Δ önce hesaplanarak kararlılık faktörü hesaplanırken işlem kolaylaştırılır. Şekil 5.22'de verilen S parametre değerleri ilgili formüllerde yerine konulduğunda Rollet kararlılık faktörü (K) = 1.5247 olarak elde edilmektedir. Bu da çalışılmak istenen frekansta cihazın koşulsuz kararlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.23: Rollet Kararlılık Faktörü

Şekil 5.23'te Rollet kararlılık faktörünün ADS platformunda simülasyonu gösterilmiştir.

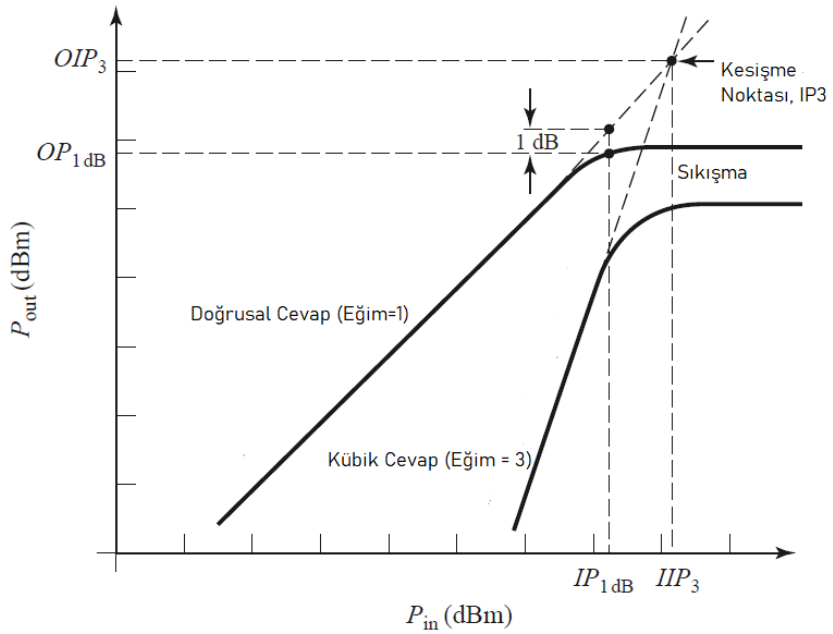
5.1.7. Doğrusallık

Bir kuvvetlendirici belirli bir giriş gücü aralığında, giriş gücü ve çıkış gücü oranı sabit bir şekilde kuvvetlendirme işlemi gerçekleştirir. Bu aralığa doğrusallık denir. Kuvvetlendiricinin doğrusal performans sağladığı bu aralık ne kadar büyük olursa kuvvetlendirici için o kadar iyidir denilebilir. LNA doğrusallaştırma teknikleri, minimum güç ve kalıp alanı tüketirken kazanç, gürültü figürü ve giriş empedans eşleşmesini sağlamalıdır. Bu nedenle, bu büyük bir tasarım zorluğudur [21].

Giriş gücü ve çıkış gücü arasında bulunan bu ilişki denkleme dökülmek istenirse;

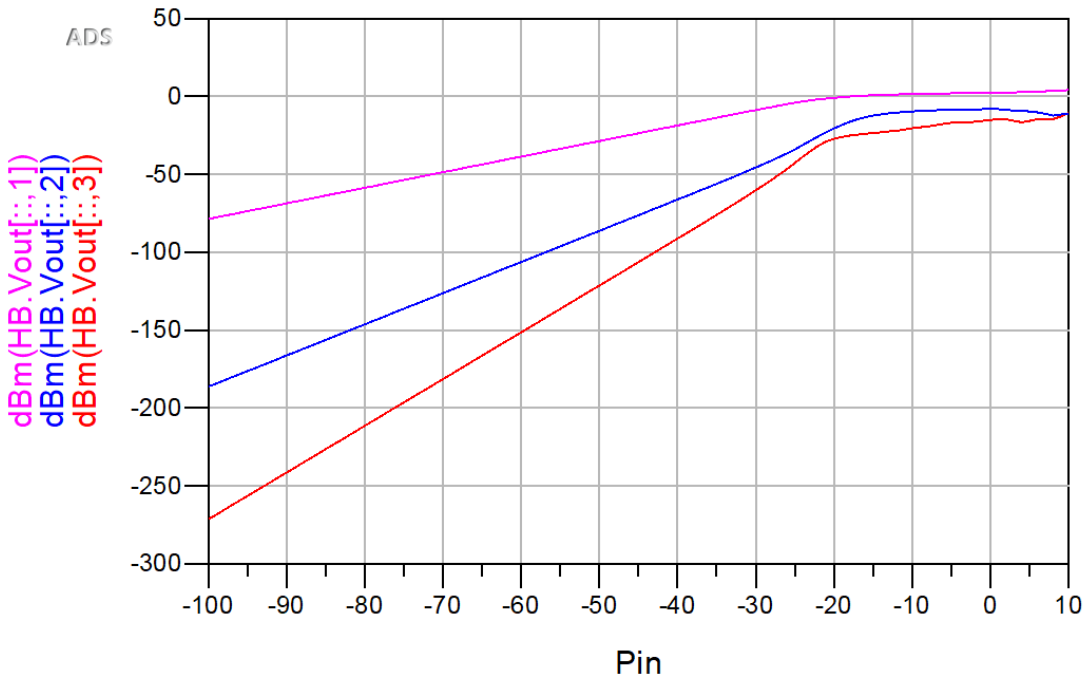
$$Çıkış\ Gücü = Giriş\ Gücü + Kazanç \tag{5. 15}$$

olarak düşünülebilir. Denklem 5.15 belli bir noktaya kadar geçerliliğini koruyacaktır. Bir noktadan sonra kuvvetlendirici çıkışında kazanca bağlı bir artış gözlenmemeye başlanır. Bir diğer ifadeyle kuvvetlendirici doyuma ulaşır. Kuvvetlendiricinin doyuma ulaştığı bu noktaya 1dB sıkıştırma noktası da denmektedir. Bu noktadan sonra cihaz doğrusal olmayan bölgede çalışmaya başlar. Doğrusal olmayan bölgede ise cihaz istenmeyen harmonikler ürettiğinden çıkışta bozulmalar gözlenmektedir. Çalışma noktasında harmoniklerin etkisinin en düşük seviyede tutulması istenmektedir. Bu yüzden harmonik genliği minimumda tutulmalıdır.



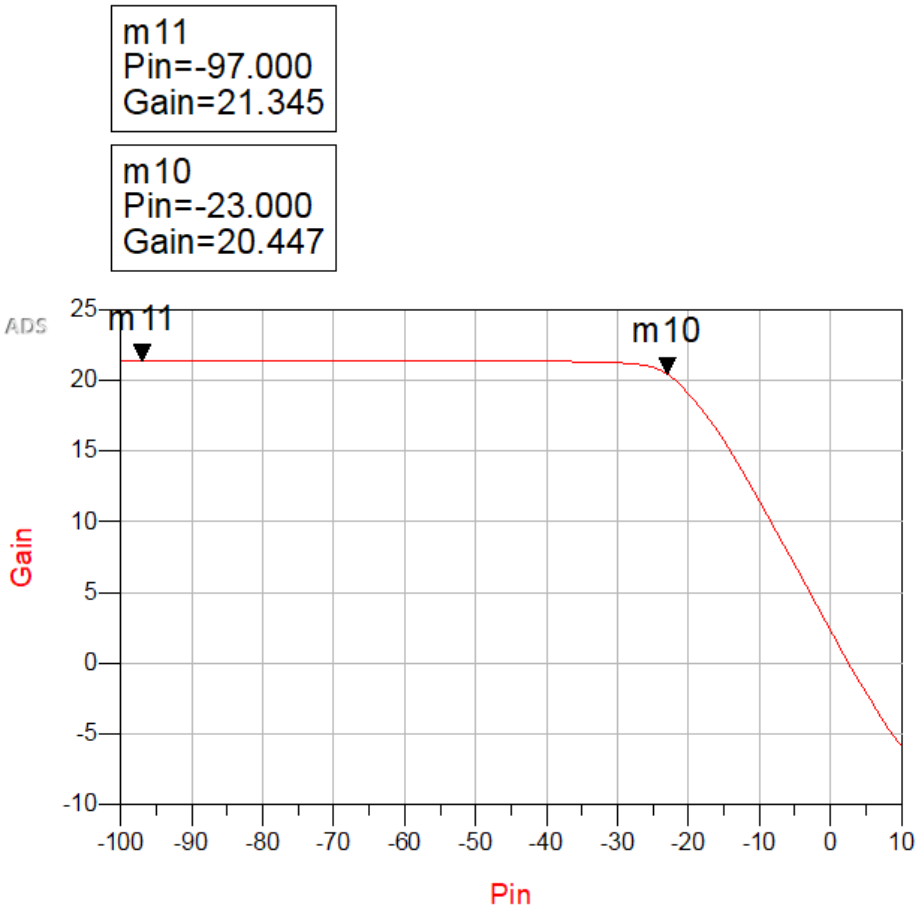
Şekil 5.24: 1dB sıkıştırma noktası ve 3. Derece kesişme noktası [22]

Şekil 5.24'te düşük gürültülü kuvvetlendiricinin doğrusallığını gösteren iki önemli parametre verilmiştir. Üçüncü derece harmonikler cihazın çalışma frekansına çok yakın bir frekansta meydana gelmektedir. Bu yüzden bu harmoniklerin etkisini filtreleme yoluyla yok etmek oldukça zordur. Cihazın temel doğrusal cevabı her bir desibel artış gösterdiğinde üçüncü harmonikler de üç desibel artış göstermektedir. 1dB sıkıştırma noktasından sonra kuvvetlendirme eğrisi artık doğrusal devam etmez. Aynı şekilde üçüncü harmonikler de doğrusal devam etmez. İki eğrininde doğrusal devam etmesi durumunda bir noktada kesişmesi gerekir. Çünkü üçüncü harmonik eğrisi, temel kazanç eğrisinden çok daha hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Bu kesişme noktası ise üçüncü derece kesişme noktası olarak adlandırılır. Temelde 1dB sıkıştırma noktası ve üçüncü derece kesişme noktası ne kadar yüksek olursa cihaz o kadar doğrusaldır denebilir.



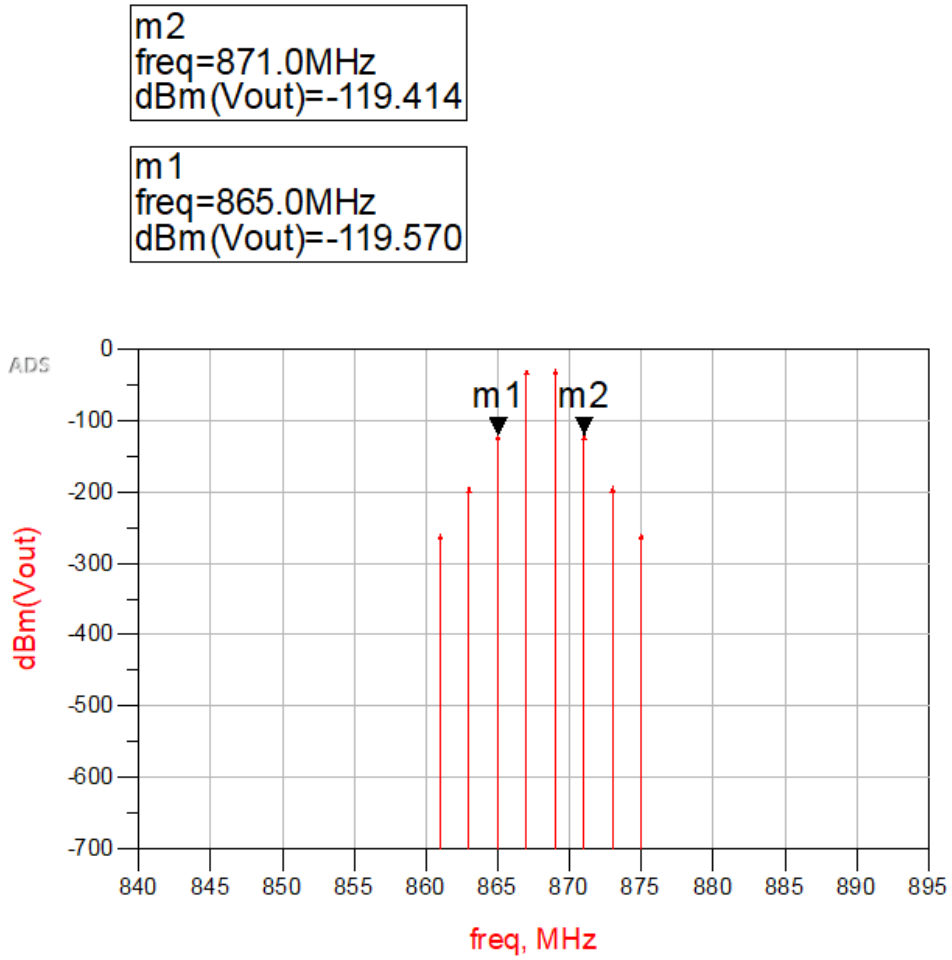
Şekil 5.25: Temel Kazanç Eğrisi (Mor), İkinci Harmonik (Mavi), Üçüncü Harmonik (Kırmızı)

Şekil 5.25'de tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendiricinin temel kazanç eğrisi, ikinci ve üçüncü harmonik eğrileri gösterilmektedir. Dikkat edilirse üçüncü harmonik eğrisi temel kazanç eğrisine giderek yaklaşmaktadır. Bir süre sonra bu iki eğrinin kesişmesi gerekirken bir noktadan sonra bu iki eğrinin de yukarı yönlü hareketi durmaktadır. Bu durma eylemi genellikle sabit kazanç değerinin 1dB altında gerçekleşmektedir. Bu yüzden bu noktaya da 1dB sıkıştırma noktası denmektedir.



Şekil 5.26: Tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendiricinin 1dB sıkışma noktası

Şekil 5.26'da tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendiricinin 1dB sıkışma noktası grafikte gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında kazançta 1dB düşme gerçekleşen nokta giriş gücünün yaklaşık -23dBm civarında olduğu noktadır. Yani tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendirici giriş gücünün -23dBm'e denk geldiği noktaya kadar sorunsuz bir şekilde çalışmaktadır. Bundan sonra ise üçüncü derece kesişme noktasının tam olarak kaç dBm'e tekabül edeceği kontrol edilecektir.



Şekil 5.27: Üçüncü derece harmonikler

Şekil 5.27'de kuvvetlendiricinin girişine -50dBm giriş gücü uygulandığında ortaya çıkan üçüncü derece harmonikler gösterilmektedir. Bu harmoniklerin arasında kalan iki darbe ise çıkış gücüne tekabül etmektedir. Arada kalan darbelerden solda olanı -28.649dBm, sağda olanı ise -28.666dBm'e tekabül etmektedir. Şekil 5.26'da görüldüğü üzere sabit kazanç değeri 21.345dBm civarındadır. Denklem 5.15'te giriş gücü -50dBm, çıkış gücü -28.649dBm ve kazanç değeri 21.345dBm olarak alınırsa denklemin sağlandığı görülebilir. -50dBm giriş gücü altında üretilen üçüncü derece harmonik değerleri -119.414dBm ve -119.570dBm olarak gözlenmiştir. Çıkış gücündeki her 1dB artışa karşılık, üçüncü derece harmoniklerde 3dB artış olmaktadır. Bundan sonra yapılması gereken ADS aracı vasıtasıyla üçüncü derece kesişme noktasını hesaplamaktır.

Eqn DDIP3_Low=ip3_out(Vout,{1,0},{2,-1},50)

Eqn DDIP3_High=ip3_out(Vout,{0,1},{-1,2},50)

freq	OIP3_Lower	OIP3_Upper
<invalid>Hz	16.811	16.709

Şekil 5.28: Üçüncü derece kesişme noktası

Gerekli eşitlikler simülasyon programına tanımlanarak üçüncü derece kesişme noktası hesaplanmmış ve Şekil 5.28'de verilmiştir. Buna göre tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendiricinin üçüncü derece kesişme noktası 16.811dBm'e denk gelmektedir. Tablo 5.1'de hedef parametrelere göre doğrusallığın -60dBm'den daha büyük olması hedeflenmekteydi. 1dB sıkışma noktası ve üçüncü derece kesişme noktası değerlerine dayanarak doğrusallık parametresinde hedefe ulaşıldığı söylenebilir.

5.1.8. Maksimum Kullanılabilir Kazanç

İki kapılı ağlarda maksimum kullanılabilir kazanç için iki terminalinde eşlenik olarak eşleme işleminin gerçekleştirilmesi gerekir. Eşleme işleminden sonra maksimum kullanılabilir kazanç hesaplanabilir.

$$MAG = 10log\frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} + 10log\left|K - \sqrt{K^2 - 1}\right| \quad \textbf{(5. 16)}$$

Denklem 5.16'da maksimum kullanılabilir kazanç hesaplaması verilmiştir. K, rollet kararlılık faktörüdür. Daha önce K=1.534, S_{21}=11.674|117.353°, S_{12}=0.032|66.122° olarak hesaplanmıştı. Düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlanırken iki terminalinde eşlenik eşleştirme işlemi gerçekleşmişti. İlgili değerler denklem 4.16'da yerine konulduğunda maksimum kullanılabilir kazanç değeri 21.3dB olarak elde edildiği görülmektedir. Bu da kuvvetlendiricinin kazancıyla neredeyse eşittir. Kuvvetlendiricinin kazanç değeri hesaplandıktan sonra düşük gürültülü kuvvetlendiricilerde kilit bir faktör olan gürültü figürü incelenecektir.

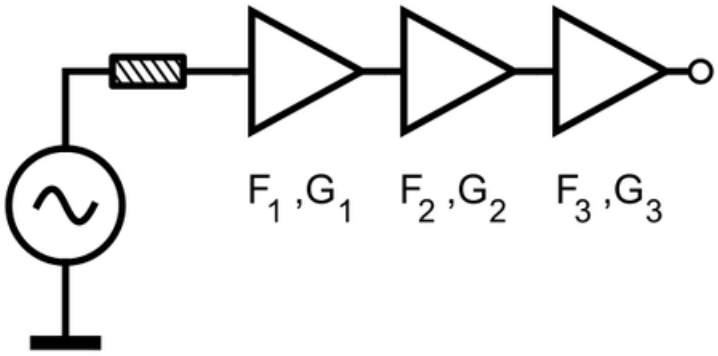
5.1.9. Gürültü Figürü

Gürültü figürü düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımında kilit faktörlerden bir tanesidir. Düşük gürültülü kuvvetlendiricinin amacı ise düşük genlikteki sinyalleri kuvvetlendirirken bunların üzerine haberleşmeyi etkilemeyecek ölçüde gürültü ekleyerek kuvvetlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda kuvvetlendiricinin gürültü figürü (NF) düşük olmalıdır. Gürültü figürü hesaplanırken gürültü faktörü (F) adı verilen bir parametre kullanılmaktadır.

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} \tag{5. 17}$$

$$NF = 10log_{10}(F) = 10log_{10}\left(\frac{SNR_i}{SNR_o}\right) = SNR_{i,dB} - SNR_{o,dB} \tag{5. 18}$$

Denklem 5.17'de gürültü faktörü hesaplanması verilmiştir. Burada SNR_i, SNR_o giriş ve çıkış sinyal-gürültü oranlarıdır. Denklem 5.18'de ise gürültü faktörüne bağlı olarak gürültü figürü hesabı gösterilmektedir. Kaskat sistemlerde ise birden fazla kuvvetlendirici birbirlerine bağlı olduklarından gürültü faktörü, Frii'nin gürültü denklemi vasıtasıyla hesaplanır.



Şekil 5.29: Kaskat sistemlerde gürültü faktörü [23]

Şekil 5.29'da gürültü faktörü hesabı yapılabilecek bir kaskat kuvvetlendirici zinciri gösterilmektedir. Bu tip sistemlerin gürültü faktörü hesaplanırken denklem 5.19'dan faydalanılır.

$$Ftoplam = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \ldots G_{n-1}} \quad \textbf{(5.19)}$$

Burada;

F_1: 1. Kuvvetlendiricinin Gürültü Faktörü,

G_1: 1. Kuvvetlendiricinin Kazancı,

F_2: 2. Kuvvetlendiricinin Gürültü Faktörü,

G_2: 2. Kuvvetlendiricinin Kazancı,

F_3: 3. Kuvvetlendiricinin Gürültü Faktörü,

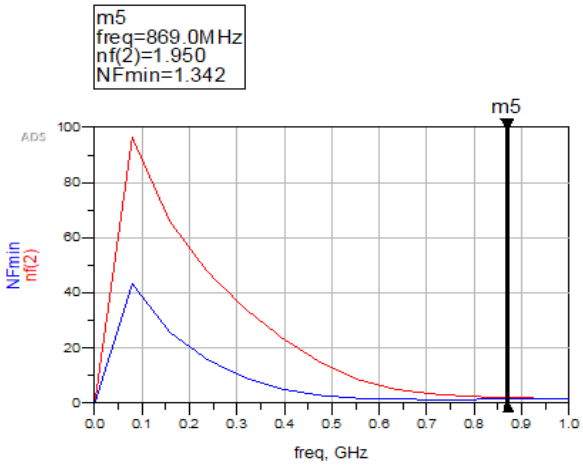
F_n: n. Kuvvetlendiricinin Gürültü Faktörü,

G_n: n. Kuvvetlendiricinin Kazancıdır. Bu formül aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$F_{Receiver} = F_{LNA} + \frac{F_{rest} - 1}{G_{LNA}} \quad \textbf{(5. 20)}$$

$$NF_{Receiver} = 10\log\left(F_{Receiver}\right) \quad \textbf{(5. 21)}$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere bir radyo alıcısının gürültü performansı, büyük ölçüde birinci kademe amplifikatörün gürültü rakamı tarafından belirlenir [24]. Çünkü denklemde birinci kuvvetlendiricinin gürültü faktörü herhangi bir kazanç değerine bağlı değildir. Bu yüzden haberleşme sistemlerinde bir kuvvetlendirici zinciri kullanılmak isterken, zincirdeki ilk kuvvetlendiricinin düşük gürültülü kuvvetlendirici olması hayati önem taşımaktadır.



Şekil 5.30: Tasarlanan Düşük Gürültülü Kuvvetlendiricinin Gürültü Figürü

Şekil 5.30'da çalışmada tasarlanan düşük gürültülü kaskat kuvvetlendiricinin gürültü figürü gösterilmektedir. Tablo 5.1'de hedef parametrelerinden bir tanesi de gürültü figürünün 2dB'den daha düşük olmasıydı. Tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendirici, çalışma frekansı olan 868 MHz'de 1.95dB gürültü figürüne ulaşmaktadır. Bu değerde hedef parametresini sağlamaktadır.

Tablo 5.2: Hedef parametreleri ve Simülasyon Değerleri

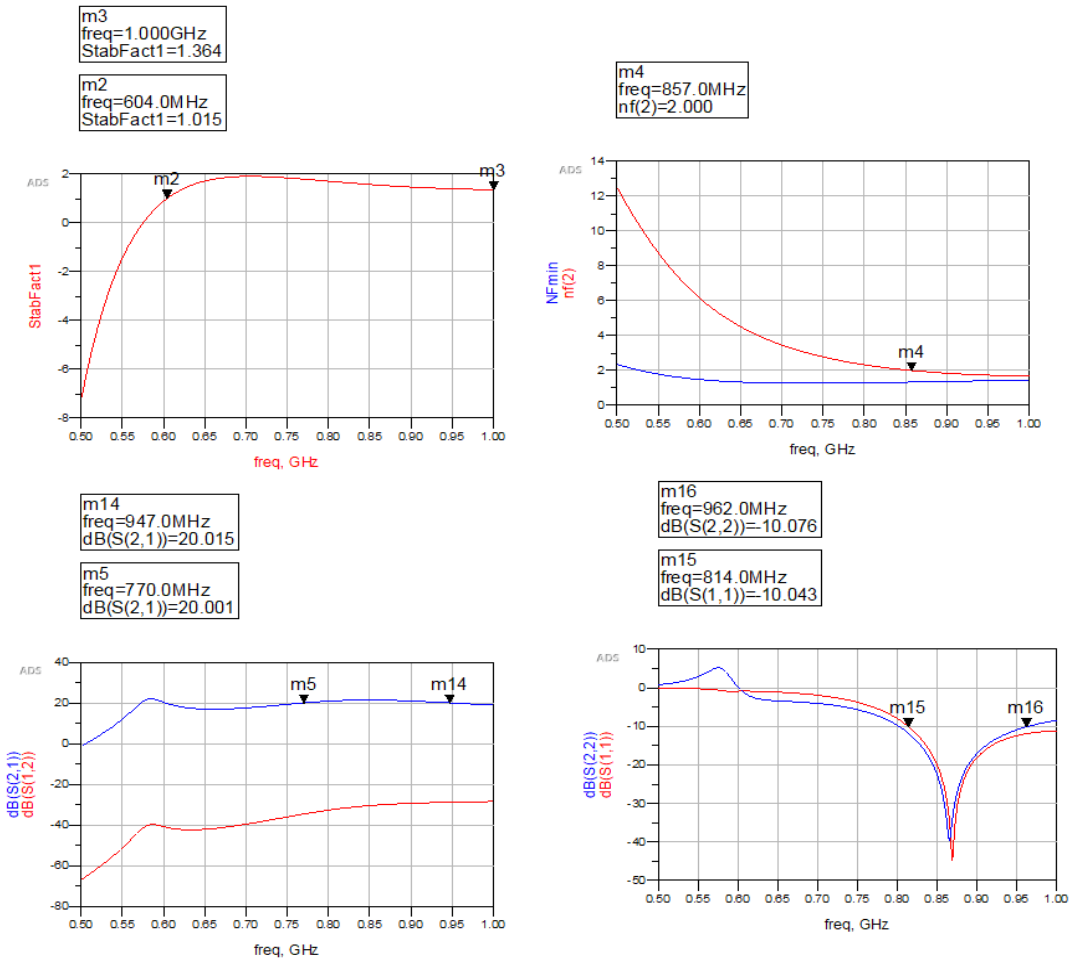
Parametreler	**Değerler**	**Simülasyon Değerleri**
DC Gerilim Kaynağı	1V-2V	2V
Besleme Akımı	700uA-1.5mA	1.88mA (Her aşama için)
Frekans	868MHz	868MHz
Gürültü Figürü	<2dB	1.95dB
Güç Kazancı	>20dB	21.336dB
Giriş Geri-Dönüş Kaybı	<-10dB	-44.774dB
Çıkış Geri-Dönüş Kaybı	<-10dB	-34.145dB
Doğrusallık	>-60dBm	16.811dBm

Tablo 5.2'de hedef parametreleri ve buna karşılık olarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Belirlenen hedef parametreleri arasında hedefi tam olarak sağlamayan tek değer besleme akımı değeridir. Bu değerdeki sapmanın esas nedeni kullanılan aktif cihazla ve seçilen kaskat yapıda diğer parametrelerde hedefi yakalayabilmektir.

Kısa bir değerlendirme yapılacak olursa, RF sistemlerde kullanılabilecek yüksek seviyede doğrusal 868MHz çalışma frekansında koşulsuz kararlı ve düşük seviyede güç tüketecek ve bir alıcı ön ucu olarak kullanıldığında haberleşme mesafesini yeterli seviyelere çıkartabilecek bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlanmıştır.

5.1.10. Düşük Gürültülü Kuvvetlendiricinin Bant Genişliği

Bir düşük gürültülü kuvvetlendirici için bant genişliği kavramı, bütün hedef parametrelerin sağlandığı frekans aralığı olarak düşünülebilir. Bu yüzden simülatörde hedef parametrelerinden sapma gerçekleşen en düşük ve en yüksek frekans noktaları belirlenmelidir.

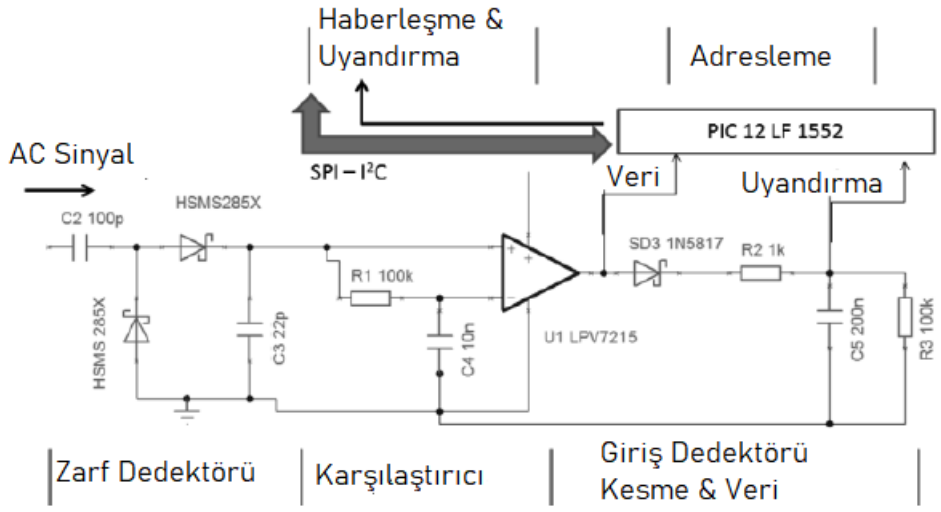


Şekil 5.31: Frekans Aralığının Belirlenmesi

Şekil 5.31'de hedef parametrelerin sağlandığı minimum ve maksimum frekans aralıkları işaretlenmiş ve gösterilmiştir. Buna göre hedef parametrelerin hepsinin aynı anda sağlandığı en düşük frekans noktası gürültü figürünün 2dB'e eşit olduğu 857MHz frekansıdır. Yine aynı şekilde bütün parametrelerin aynı anda sağlandığı en yüksek frekans noktası ise güç kazancı (S_{21}) parametresinin 20.015dB'e eşit olduğu 947MHz noktasıdır. Buradan hareketle düşük gürültülü kuvvetlendirici istenilen şekilde 857-947MHz frekans aralığında çalışmaktadır ve bant genişliği 90MHz olarak hesaplanır.

5.2. UYANDIRMA ALICISI TASARIMI

Uyandırma alıcısı olarak [3]'te sunulan çalışmadan faydalanılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan uyandırma alıcısı üç farklı karşılaştırıcı bileşeniyle farklı sonuçlar almaktadır. Çalışmada kullanılacak olan karşılaştırıcı bileşen ise LPV7215'tir.



Şekil 5.32: Uyandırma Alıcısı Tasarımı [25]

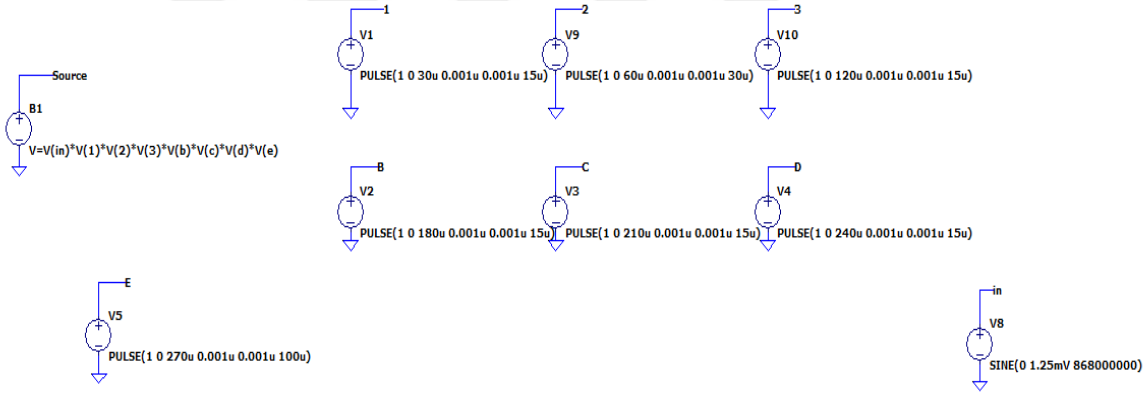
Şekil 5.32'de uyandırma alıcısı tasarımı gösterilmektedir. Uyandırma alıcısı temel olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Zarf dedektörü
- Karşılaştırıcı
- Giriş dedektörü olarak verilmiştir.

Uyandırma alıcısının tasarımı ve simülasyonlarının gerçekleştirilmesi için çalışmada LTSPICE XVII simülatörü kullanılmıştır.

5.2.1. OOK Modülasyon Tekniği

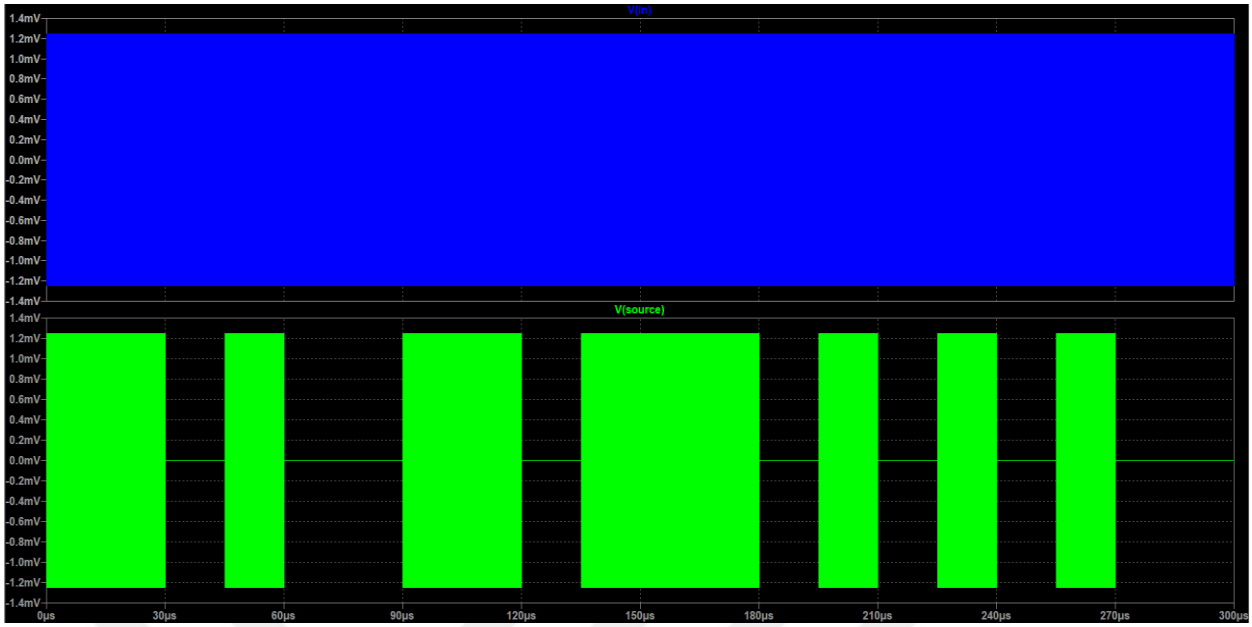
Uyandırma alıcısı ultra düşük güç tüketimine sahip basit bir radyo alıcısı olarak kabul edilebilir, bu nedenle mimarisinin çok basit olması önemlidir. Bu tasarım hedefi aynı zamanda uyandırma alıcısı üzerinde kullanılan modülasyon tekniği üzerinde kısıtlamalar getirmektedir. Kullanılan modülasyon karmaşıksa (örneğin Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK) ya da Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) vs.) alıcının sahip olduğu demodülasyon devreleri oldukça karmaşık olacak ve daha fazla güç tüketimi gerekecektir [25]. Bu çalışmada kolay bir alıcı mimarisi gerçekleştirmek için genlik kaydırmalı anahtarlamanın en basit biçimi olan açma kapama anahtarlama (OOK) modülasyon tekniği kullanılmıştır [26]. Bu teknikte taşıyıcı dalganın varlığı ve yokluğu ikili sistemle (1,0) gösterilmektedir.



Şekil 5.33: OOK Modülasyonu gerçekleştirilmesi için gerilim kaynaklarının kullanılması (LTSPICE XVII)

Şekil 5.33'te LTSPICE XVII simülatöründe OOK modülasyonu gerçekleştirmek için kullanılan devre şeması gösterilmektedir. V8 gerilim kaynağı 868MHz frekanslı modüle edilecek sinyali temsil etmektedir. Burada gönderilmek istenen adrese göre taşıyıcı dalga için açık kapalı anahtarlama tekniği kullanılacaktır. B1 gerilim kaynağı ise devrenin girişinin besleneceği kaynak girişini temsil etmektedir. Burada modülasyon yapılırken gönderilmek istenen veriye göre modülasyon işleminin yapılmasına dikkat edilmesi gerekilmektedir. Çalışmada uyandırma sinyali olarak 16bit bir sinyal gönderilmek istenmektedir. Bu sinyalin adres dizini;

Uyandırma Sinyali: 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1 olarak belirlenmiştir. Modülasyon işlemi de bu uyandırma sinyaline göre yapılmıştır.

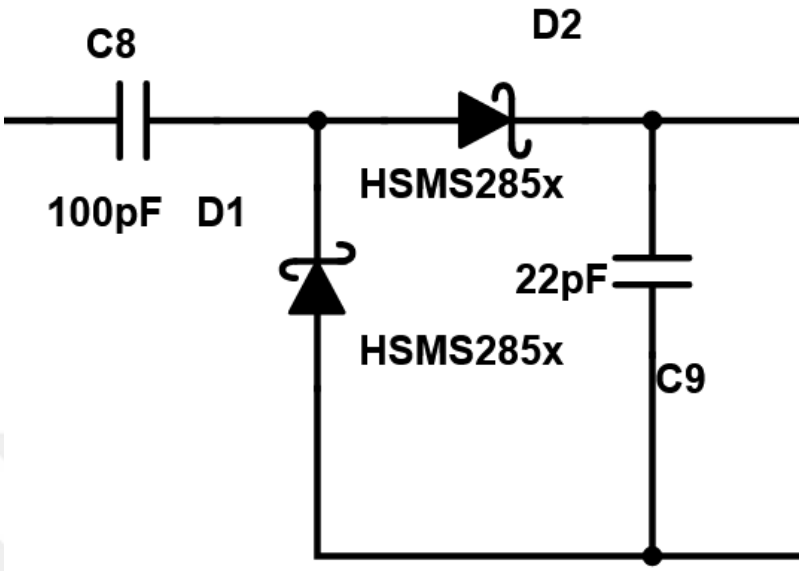


Şekil 5.34: Giriş Sinyali ve OOK Modüle Edilmiş Kaynak Sinyali

Şekil 5.34'te 868MHz frekanslı giriş sinyali ve buna bağlı modüle edilmiş kaynak sinyali gösterilmektedir. Devrenin girişi bu kaynak sinyali ile beslenecektir. Kaynakta 30us uzunlukta bir hazırlık sinyali gönderilmesi uygun bulunmuştur. Burada hazırlık sinyalinin asıl amacı mikro denetleyiciyi senkronize etmek ve iletimin ne zaman başladığını göstermektir. Hazırlık sinyalinden sonra her bir bit için 15us iletim zamanı belirlenmiştir. Bu iletim zamanına bağlı olarak grafikte gösterilen kaynak gerilimi takip edilirse gönderilmek istenen uyandırma sinyali ile eşleştiği görülebilir.

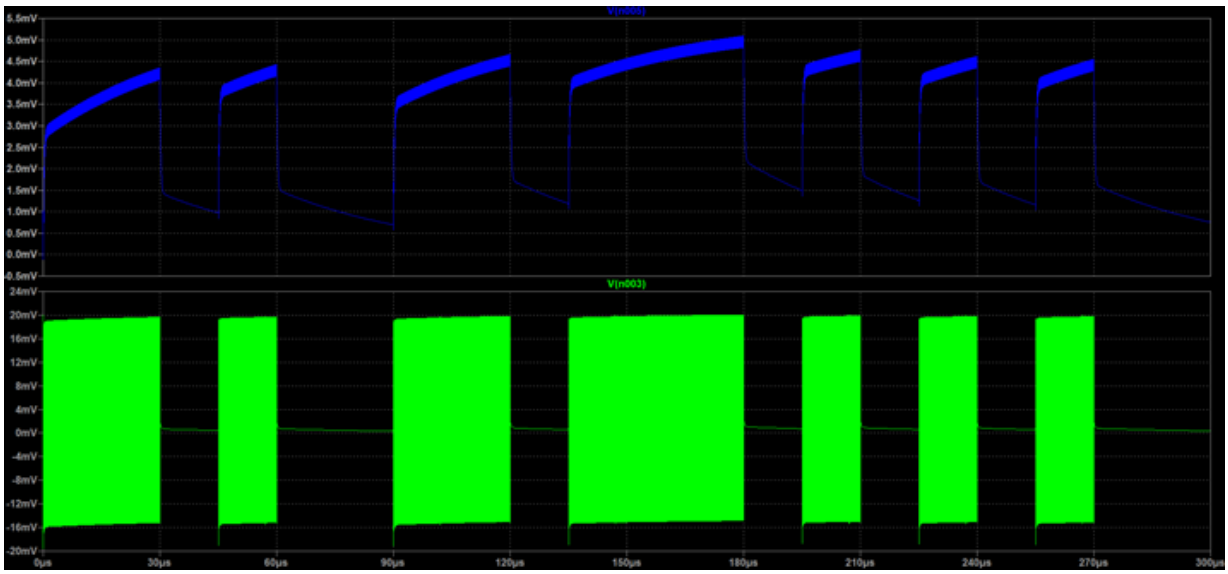
5.2.2. Zarf Dedektörü

OOK modülasyon tekniği anlaşıldıktan sonra uyandırma alıcısının tasarlanması gereken ilk kısmı zarf detektörüdür. Zarf dedektörleri, basit bir demodülasyon yöntemi ve düşük güç tüketimi avantajlarına sahiptir [27]. Bu kısımda iki adet diyot ve iki adet kapasitörden oluşmaktadır. Diyot olarak HSMS285X diyotları kullanılmaktadır. Bu kısım, alıcı girişinden alınan AC sinyalin genliğinin zirve yaptığı noktaları takip ederek bir doğrultucu olarak çalışmaktadır. Bu sayede sinüzoidal sinyallerin dijital 1 olarak tanımlandığı noktalarda negatif bileşenleri ortadan kaldırılarak detektörden hemen sonra gelen, karşılaştırıcı ve dedektör arasındaki referans üretecine hazırlık yapılmış olur.



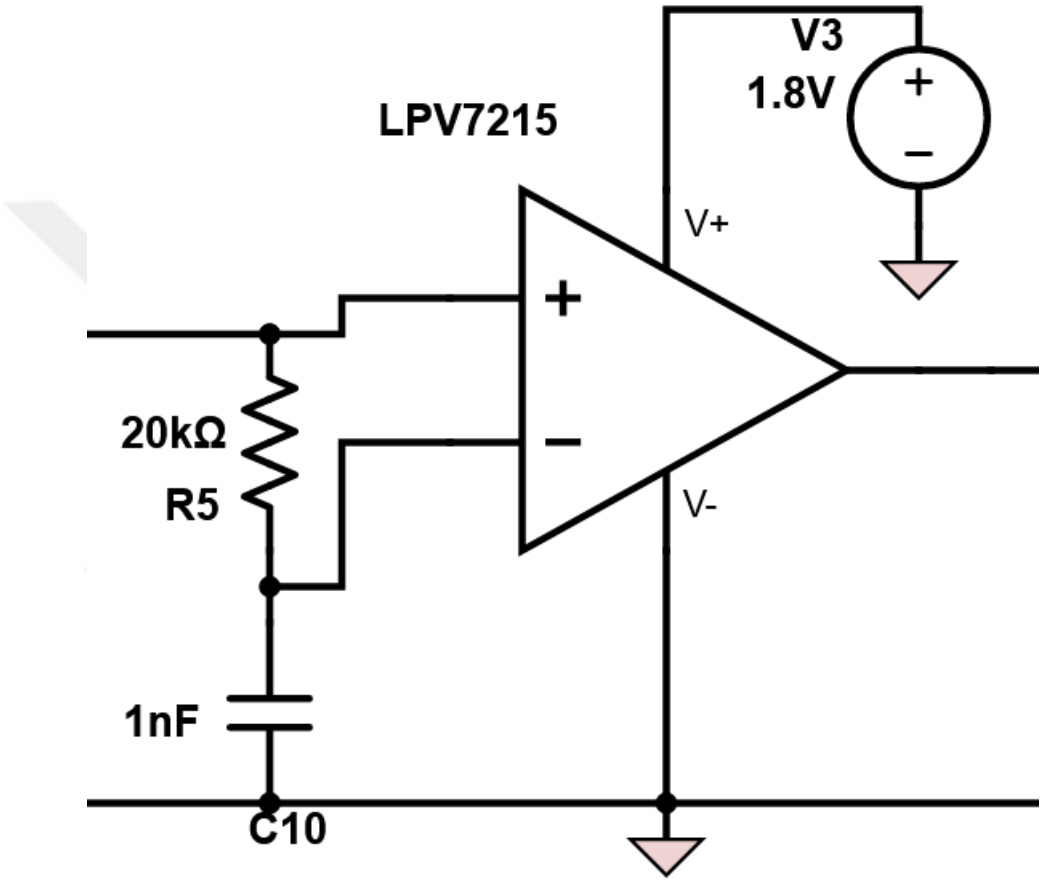
Şekil 5.35: Zarf Dedektörü Devresi

Şekil 5.35'de LTSPICE simülatöründe kurulan zarf dedektörünün devre şeması gösterilmiştir. Burada D1 ve D2 diyotları olarak HSMS285x diyotlarının SPICE parametreleri bulunarak kullanılmıştır. C1 kapasitörü 100pF, C2 kapasitörü 22pF olarak belirlenmiştir.



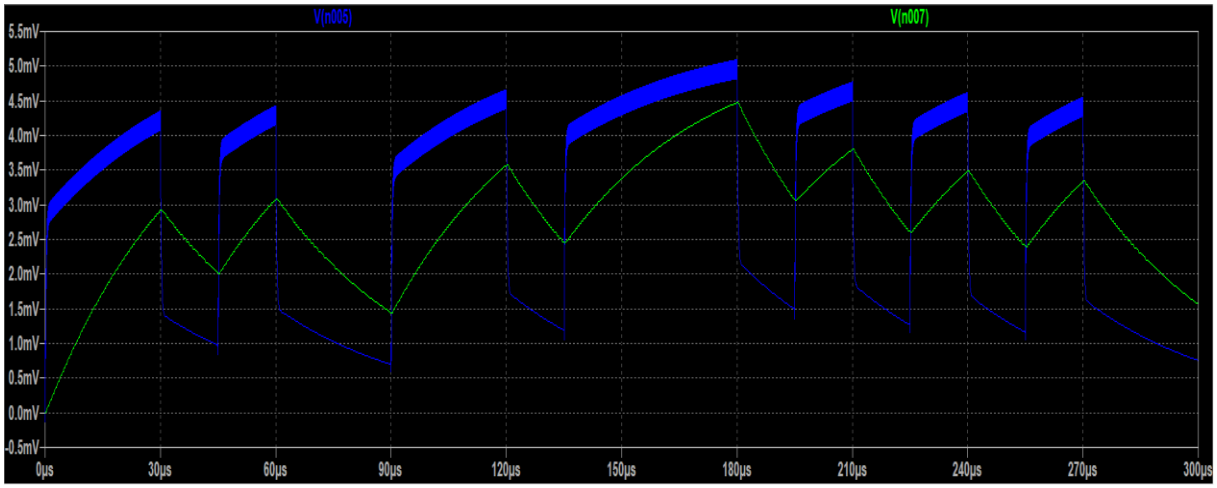
Şekil 5.36: Zarf Dedektörünün Giriş ve Çıkışı (Giriş:Yeşil-Çıkış:Mavi)

Şekil 5.36'da zarf dedektörünün giriş ve çıkış işaretleri gösterilmiştir. Girişine uygulanan sinüzoidal girişi daha düşük bir genlik değeri ile takip eder ve sinyaldeki negatif bileşenleri ortadan kaldırır. Bu sayede karşılaştırıcı devrenin pozitif girişine uygulanacak sinyal elde edilmiş olur. Karşılaştırıcının negatif girişine uygulanacak sinyal ise referans üreteci tarafından elde edilir.



Şekil 5.37: Referans Üreteci Ve Karşılaştırıcı

Referans üreteci Şekil 5.37'de gösterilen R2 direnci ve C3 kapasitörünün, voltaj bölücü olarak kullanılmasıyla elde edilir. Bu sayede karşılaştırıcının negatif girişi için bir referans gerilimi elde edilmektedir.



Şekil 5.38: Referans Üretecinin Çıkışı

Referans üretecinin çıkışı Şekil 5.38'de yeşil renkte gösterilmiştir. Bundan sonra ise devrenin karşılaştırıcı kısmı gelmektedir.

5.2.3. Karşılaştırıcı

[3]'te verilen çalışmada üç adet karşılaştırıcı kullanılmıştır. Üç karşılaştırıcının da yapılmak istenen çalışmaya göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Karşılaştırıcılardan ilki TLV3691'dir. Bu karşılaştırıcı 152nW seviyesinde çok düşük güç tüketirken, ofset gerilimi 2.2mV seviyelerindedir. Karşılaştırıcı uyandırma alıcı devresinde kullanıldığında -32dBm hassasiyet seviyesine ulaşılmaktadır.

İkinci karşılaştırıcı ise AS1976'dır. Bu karşılaştırıcı 365nW seviyesinde güç tüketirken, ofset gerilimi ise 1.8mV seviyelerindedir. Karşılaştırıcı uyandırma alıcısında kullanıldığında ise -42dBm hassasiyet seviyesine ulaşılmaktadır.

Üçüncü karşılaştırıcı ise LPV7215'tir. Bu karşılaştırıcı 1.2uW seviyesinde güç tüketirken, ofset gerilimi 0.3mV seviyelerindedir. Karşılaştırıcı uyandırma alıcısında kullanıldığında ise -55dBm hassasiyet seviyesine ulaşılmaktadır.

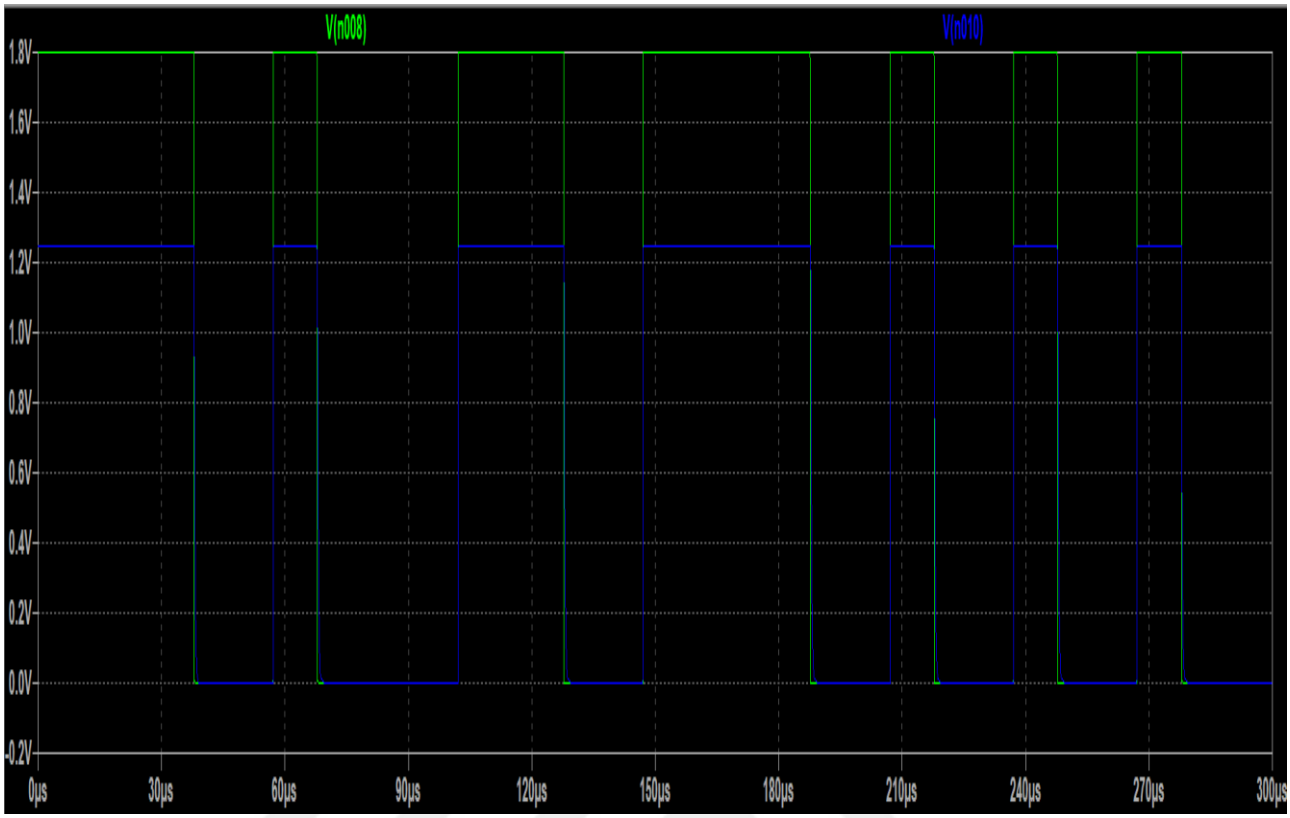
Tablo 5.3: Farklı Karşılaştırıcılarla Tasarlanan Uyandırma Alıcıları [3].

Uyandırma Alıcısı	Karşılaştırıcı	Güç Tüketimi (nW)	Ofset Gerilimi (mV)	Hassasiyet (dBm)
1	TLV3691	152	2.2	-32
2	AS1976	365	1.8	-42
3	LPV7215	1196	0.3	-55

Tablo 5.3'ten de görüldüğü gibi ofset gerilimi ve güç tüketimi arasında bir ters orantı vardır. Aynı şekilde hassasiyet ve güç tüketimi değerleri arasında da bir ters orantı mevcuttur. Çalışmada uzak mesafeler için bir uyandırma alıcısı tasarlanmak istenmektedir. Bunun için güç tüketiminde belirli ölçüde bir taviz verilmektedir. Bu yüzden karşılaştırıcının güç tüketim değeri uyandırma alıcısının önüne eklenen düşük gürültülü kuvvetlendiricinin yanında ihmal edilebilir kalmaktadır. Bundan dolayı çalışmada hassasiyet seviyesi en yüksek olan LPV7215 karşılaştırıcının kullanılması uygun görülmüştür. Böylelikle kuvvetlendiricinin eklenmesi ile bu hassasiyet seviyesi istenen seviyelere çekilebilecektir.

Şekil 5.38'de gösterilen çıkışlardan mavi olanı karşılaştırıcının pozitif girişine, yeşil olanı ise karşılaştırıcının negatif girişine uygulanmaktadır. Belirli zaman aralıklarında mavi ile gösterilen pozitif gerilim girişi seviyesi, yeşil ile gösterilen negatif gerilim girişi seviyesinin altına düşmektedir. Bu durumlarda karşılaştırıcı çıkışında '0' değeri okunmaktadır. Tersi durumda ise karşılaştırıcı çıkışında karşılaştırıcının pozitif besleme gerilimi seviyesi çıkış olarak alınmaktadır.

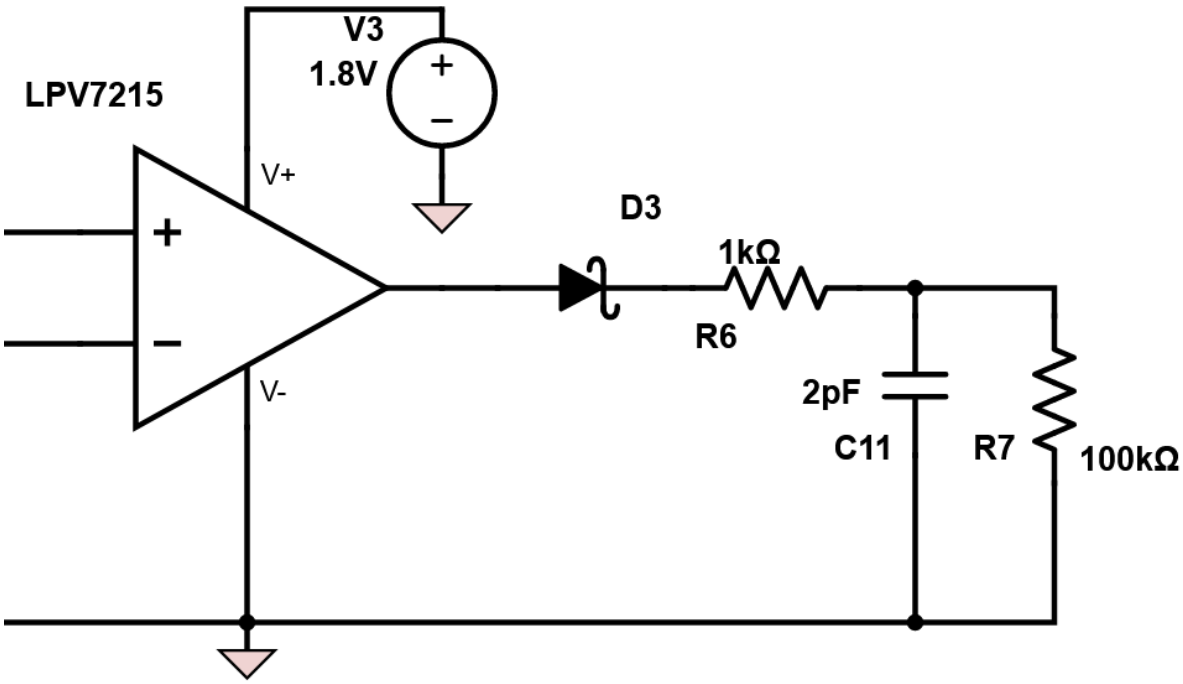
LPV7215 çeşitli pille çalışan uygulamalar için, 1.8V ile 5.5V arasında geniş bir besleme gerilimi aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır [28]. Bu besleme gerilimlerinden anlaşılacağı üzere karşılaştırıcının pozitif girişi, negatif girişinden büyük olduğunda 1.8V ile 5.5 V aralığında seçilen besleme gerilimi değeri çıkışta gözlenecektir. Karşılaştırıcının negatif besleme gerilimi girişi topraklanmalıdır. Bu sayede karşılaştırıcının negatif girişi, pozitif girişinden büyük olduğunda çıkışta '0' gözlenecektir.



Şekil 5.39: Karşılaştırıcı ve Giriş Dedektörü Çıkışı

Şekil 5.39'da tasarlanan devrede karşılaştırıcının çıkışı yeşil ile, giriş dedektörünün çıkışı ise mavi ile gösterilmektedir. Karşılaştırıcı için pozitif besleme gerilimi 1.8V olarak seçilmiştir. İki gerilim arasında kalan 0.6V'luk fark giriş dedektörü ve karşılaştırıcı arasındaki schotky diyottan dolayı meydana gelmektedir. Böylelikle girişte uygulanan sinüzoidal sinyal karşılaştırıcı çıkışında dijital bir sinyale dönüştürülmüştür.

5.2.4. Giriş Dedektörü

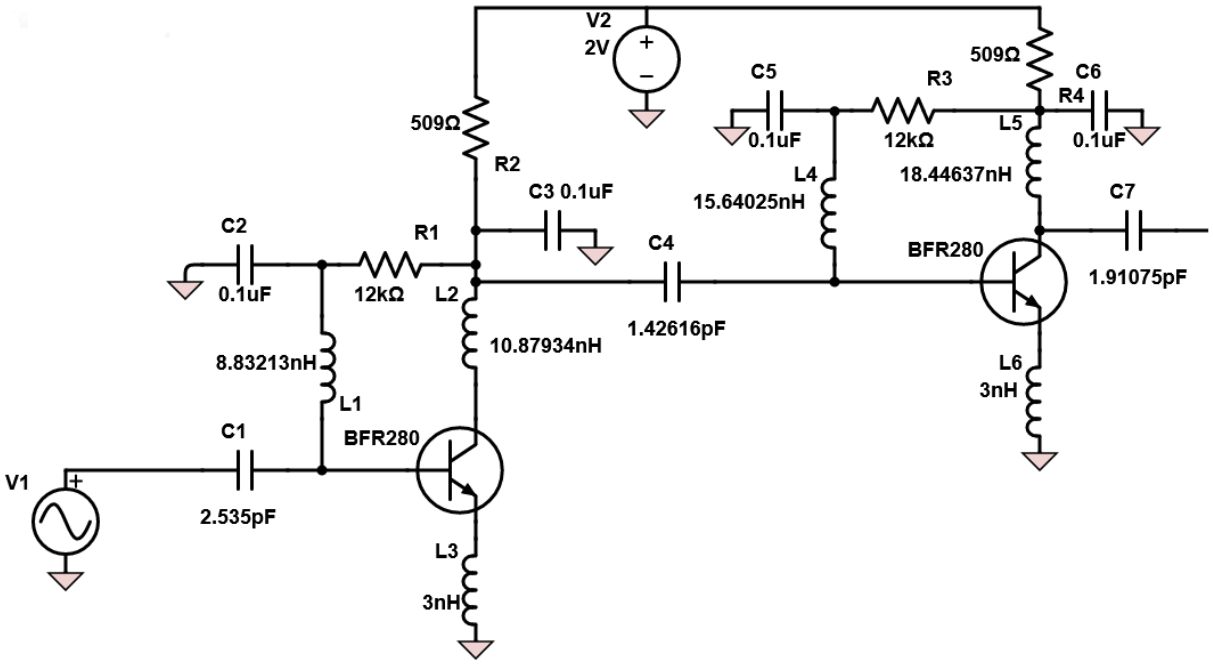


Şekil 5.40: Giriş Dedektörü

Şekil 5.40'da giriş dedektörünün devre şeması gösterilmektedir. Bu kısım uyandırma alıcısından sonra gelen mikrodenetleyici için uyandırma kesintisi oluşturmaktan görevlidir. Ayrıca gürültü ve diğer nedenlerden kaynaklanan paraziti engellemek için kullanılır [29]. C_4 kapasitörü ve R_3 direnci birbirleriyle bir alçak geçiren filtre oluşturmaktadır. Bu iki değerin kombinasyonuyla belirli bir frekansın altında kalan sinyaller için herhangi bir uyandırma sinyali oluşturulmaz. D_3 schottky diyotu sayesinde C_4 kapasitörü sadece R_4 üzerinden boşalabilmektedir. Böylelikle bu kapasitörün karşılaştırıcı üzerinden boşalmasının önüne geçilmektedir.

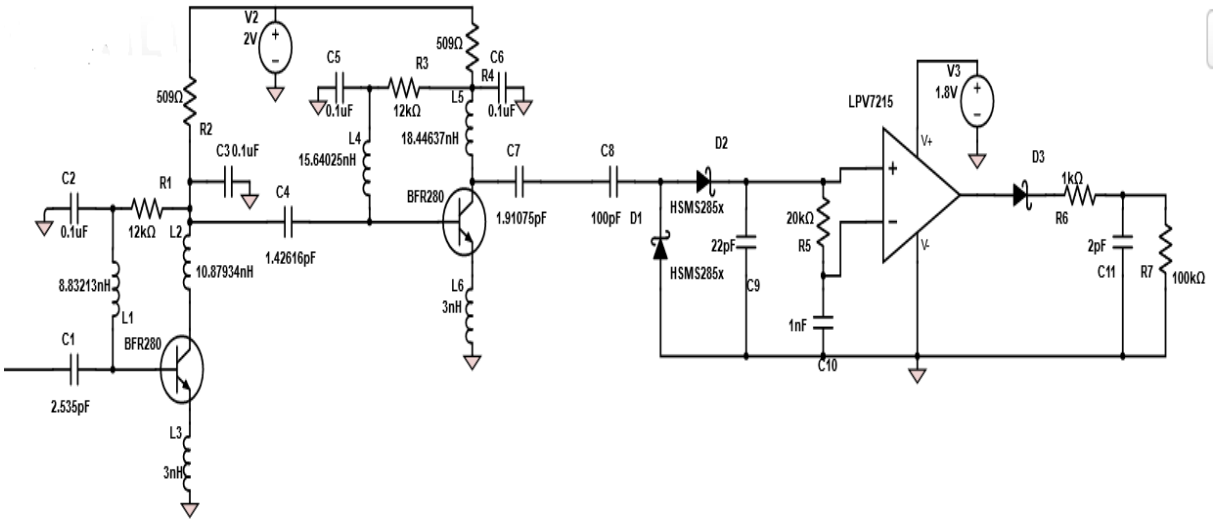
5.2.5. Tamamlanmış Uyandırma Alıcısı Devresi

Uyandırma alıcı devresini tamamlamak için Advance Design System programında tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendirici LTSPICE XVII simülatörüne taşınmıştır.



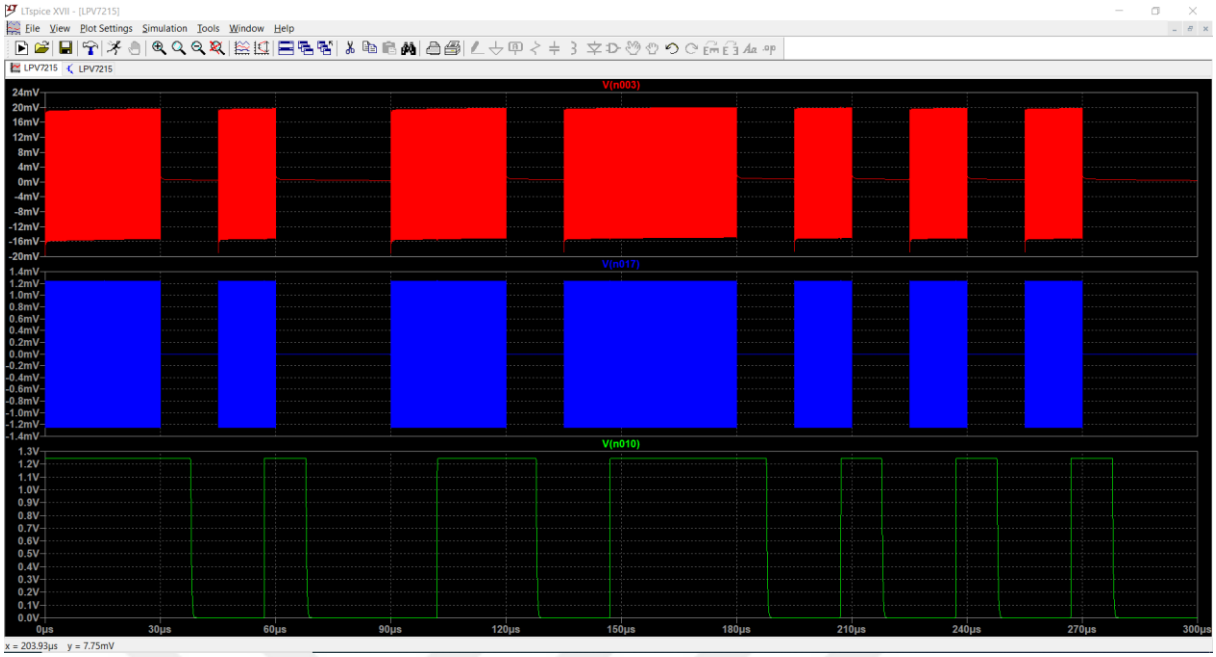
Şekil 5.41: LTSPICE programında tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendirici

Daha sonra tasarlanan uyandırma alıcısının ön ucuna bu düşük güçlü kuvvetlendirici eklenerek Şekil 5.42'de gösterilen uyandırma alıcısı tasarımı tamamlanmıştır.



Şekil 5.42: Tamamlanmış Uyandırma Alıcısı Tasarımı

Uyandırma alıcısının tasarımı tamamlandıktan sonra alıcı girişine adres dizini 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1 olan uyandırma sinyali uygulanmıştır. Uygulanan sinyale bağlı elde edilen giriş ve çıkış sinyalleri Şekil 5.43'te gösterilmektedir.



Şekil 5.43: Alıcı Girişi (Mavi), Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici Çıkışı (Kırmızı), Alıcı Çıkışı (Yeşil)

Şekil 5.43'ten de görüldüğü üzere alıcının çıkışından alınan sinyalle, alıcının girişine uygulanan sinyal sorunsuz bir şekilde eşleşmektedir.

Düşük gürültülü kuvvetlendiricinin uyandırma alıcısının girişine uygulanmasıyla bu eşleşme işlemi daha düşük gerilim seviyelerinde sorunsuz bir şekilde elde edilebilmektedir.

5.2.6. Güç Tüketimi

Uyandırma alıcısı tasarımı yapılırken en önemli parametrelerden bir tanesi güç tüketimidir. Çalışmada yapılan uyandırma alıcısı tasarımında daha yüksek iletişim mesafesi hedeflendiğinden güç tüketiminden bir miktar taviz vermek bir zorunluluktur. Uyandırma alıcısının çekirdek devresinde aktif olarak güç tüketen tek bileşen karşılaştırıcıdır. Tasarımda kullanılan LPV7215 karşılaştırıcısı 1196nW güç tüketmektedir. Tasarıma sonradan eklenen düşük gürültülü kuvvetlendiricinin her bir aşaması ise 2V DC gerilim kaynağından 1.96mA akım tüketimi yapmaktadır. Tasarımın toplam güç tüketimi düşük gürültülü kuvvetlendiricinin güç tüketimi ve uyandırma alıcısının çekirdek devresinin güç tüketimlerinin toplanmasıyla elde edilmektedir.

Düşük gürültülü kuvvetlendiricinin güç tüketimi 2Vx1.96mAx2 işleminin sonucunda 7.85mW olarak elde edilmektedir.

Uyandırma alıcısının çekirdek devresi ise 1196nW güç tüketmektedir. Bu durumda uyandırma alıcısının toplam güç tüketimi 7.85mW+1196nW≈7.85mW olarak hesaplanır.

5.2.7. Hassasiyet

Uyandırma alıcısı tasarımında arttırılması hedeflenen parametre hassasiyet olarak belirlenmiştir. Uyandırma alıcısı devresinde hassasiyeti belirleyen en önemli bileşen karşılaştırıcı bileşenidir. Hassasiyet kısaca alıcının girişine uygulandığında çıkışta istenen dalganın elde edildiği en zayıf sinyaldir. Uyandırma alıcısında karşılaştırıcı belirli bir giriş gücündeki sinyallere kadar modülasyon işlemini gerçekleştirebilirken belirli bir seviyenin altındaki sinyallerde bu modülasyonu gerçekleştirememektedir. LTSPICE XVII için tasarlanan LPV7215 karşılaştırıcısının tasarımı gerçek bileşenin hassasiyet değerinden farklı bir hassasiyet değerine sahiptir. Uyandırma alıcısı bu simülatör vasıtasıyla tasarlandıktan sonra yapılan simülasyonlarda düzgün bir çıkış sinyali elde edilebilen en düşük giriş gerilimi seviyesi 10mV olarak gözlenmiştir. Geleneksel alıcı hassasiyeti ölçüm yöntemi, güç adımlama prosedürünü kullanan uzun bir süreçtir [30].

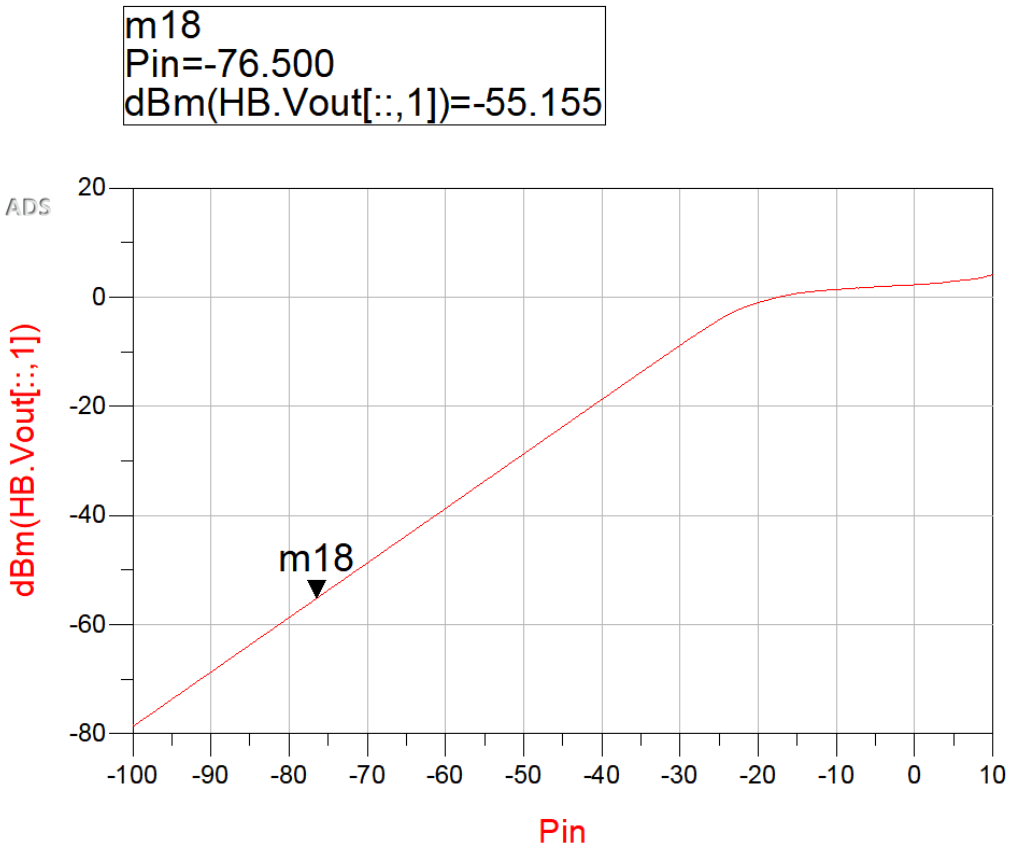
$$Sensitivity_{dBm} = 10xlog\left((V_{rms}^2 x1000)/Z\right) \quad \textbf{(5. 22)}$$

Denklem 5.22'de hassasiyetin giriş gerilimine bağlı ölçümü gösterilmiştir. 10mV giriş geriliminin rms değeri 0.00707V olarak elde edilmektedir. Alıcının empedans değeri 50Ω olarak belirlenmiştir. İlgili değerler denklemde yerine konulduğunda -30dBm hassasiyet değerine ulaşılmaktadır.

Düşük gürültülü kuvvetlendiricinin LTSPICE XVII'da tasarlanmasından sonra düzgün bir çıkış sinyali alınan en düşük giriş gerilimi seviyesi 0.79mV seviyesine gelmektedir. 0.79mV giriş geriliminin rms değeri 0.000558V olarak elde edilmektedir. İlgili değerler tekrar denklemde yerine konulduğunda -52dBm hassasiyet seviyesine ulaşılmaktadır. Bu da hassasiyet seviyesinde 22dBm seviyesinde bir artış olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3'te LPV7215 karşılaştırıcısı kullanılarak tasarlanan uyandırma alıcısının hassasiyet değeri -55dBm olarak verilmiştir. Buradan uyandırma alıcısının girişine -55dBm giriş gücüne sahip bir giriş dalgası uygulandığında sorunsuz bir şekilde uyandırma mesajı elde edilebildiği

anlaşılmaktadır. Bu durumda düşük gürültülü kuvvetlendiricinin girişine uygulandığında çıkışta alabileceğimiz en düşük güç seviyesi -55dBm olmalıdır.



Şekil 5.44: Hassasiyet Analizi

Şekil 5.44'te düşük gürültülü kuvvetlendiricinin çıkışından -55dBm çıkış gücü alabilmek için uygulanması gereken giriş gücü seviyesi gösterilmektedir. Bu durumda uyandırma alıcısının ulaşabildiği en yüksek hassasiyet değerinin -76.5dBm olacağı söylenebilir. Denklem 5.22'de verilen eşitlik ve yapılan hesaplamalar göz önüne alındığında tutarlılık sağlandığı gözlenebilir.

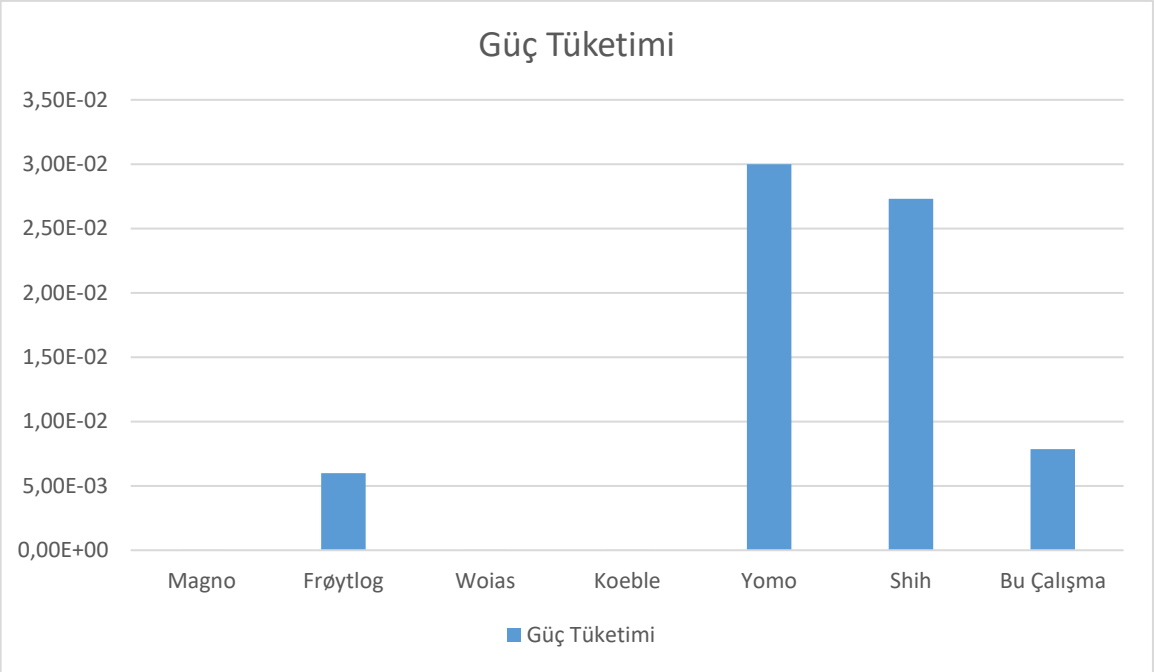
6. TARTIŞMA

Literatür taramasındaki çalışmalarla tasarlanan çalışmanın karşılaştırılması yapıldığında güç tüketiminden bir miktar taviz verilerek daha yüksek seviyede bir hassasiyet değerine ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 6.1: Çalışmanın Literatürdeki Çalışmalarla karşılaştırılması

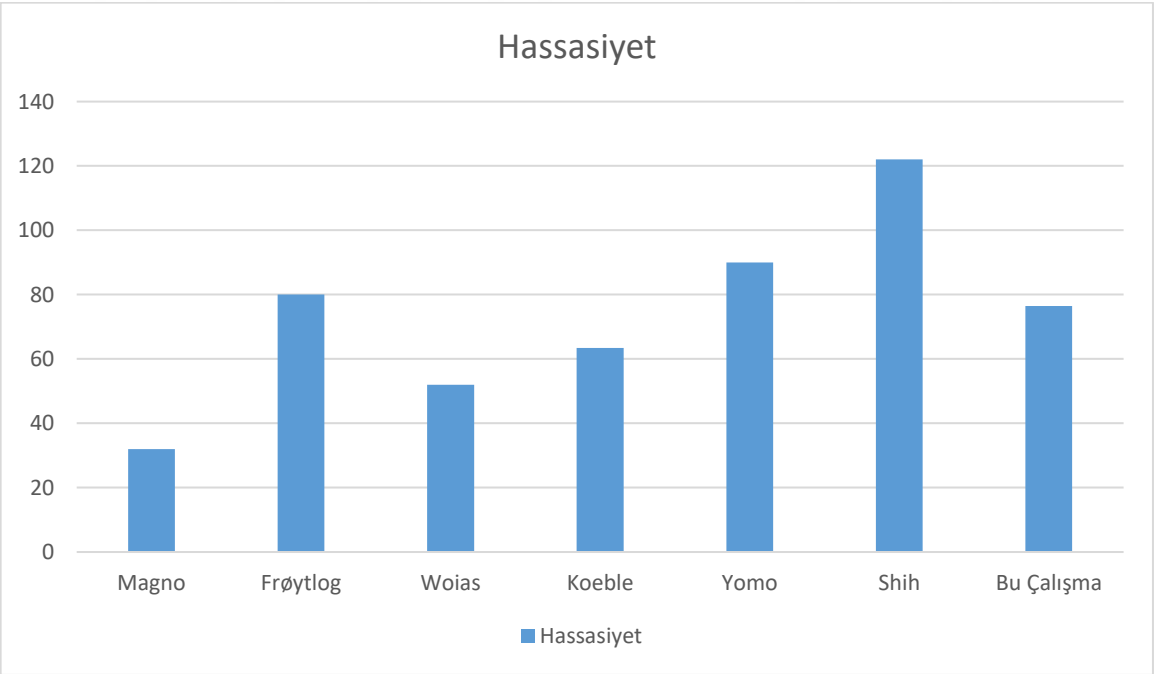
Kaynak	Güç Tüketimi	Hassasiyet
Magno, [3]	152nW	-32dBm
Frøytlog, [8]	6mW	-80dBm
Woias, [9]	7.4uW	-52dBm
Koeble, [10]	8.7uW	-63.4dBm
Yomo, [11]	30mW	-90dBm
Shih, [13]	27.3mW	-122dBm
Bu Çalışma	7.85mW	-76.5dBm

Tablo 6.1'den de görüleceği üzere belirli bir seviyenin altında güç tüketmekte olan uyandırma alıcıları çok yüksek seviyelerde hassasiyet değerlerine ulaşamamaktadır. Yapılan çalışmada yola çıkılan çalışma [3]'te verilen Magno'nun çalışmasıdır. Bu çalışmada Magno'nun çalışmasında tasarlanan uyandırma alıcısının girişine bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlanarak eklenmiştir. Tasarlanan düşük gürültülü kuvvetlendirici devrenin güç tüketimini arttırdığı ölçüde hassasiyetini de yükseltmektedir. Çalışmada 7.85mW güç tüketimi ile -76.5dBm hassasiyet seviyesine sahip bir uyandırma alıcısı tasarımı yapılmıştır. Bu hassasiyet seviyesi uyandırma alıcısını wifi ve bluetooth modülleri kullanımı açısından elverişli duruma getirmektedir.



Şekil 6.1: Uyandırma Alıcılarının Güç Tüketimi Açısından Karşılaştırılması

Şekil 6.1'de uyandırma alıcılarının güç tüketimi açısından karşılaştırılması grafiğe dökülmüştür.



Şekil 6.2: Uyandırma Alıcılarının Hassasiyet Açısından Karşılaştırılması

Şekil 6.2’de uyandırma alıcılarının hassasiyet bakımından karşılaştırılması grafiğe dökülmüştür. Grafikler incelendiğinde yapılan çalışma güç tüketimi olarak üçüncü sırada hassasiyet seviyesi olarak dördüncü sırada bulunmaktadır. Yapılan çalışma uygulamaya hazır durumdadır. Çalışma baskı devre işlemi gerçekleştirilerek IoT düğümleri için haberleşmede uyandırma alıcısı işlevi görebilir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 868MHz çalışma frekansında işlevsel düşük güç tüketen yüksek hassasiyete sahip bir uyandırma alıcısı tasarımı yapılmıştır. Çalışmada hassasiyeti yükseltmek amacıyla 857-940MHz frekans aralığında çalışabilen, 1.95dB gürültü figürüne sahip, giriş geri dönüş kaybı -44.375dB, çıkış geri dönüş kaybı -34.145dB, güç kazancı 21.336dB olan BFR280 transistörleri kullanılarak tasarlanan, P1dB noktası -22.75dB, IIP3 noktası -4.534dBm, OIP3 noktası 16.811dBm olan yüksek doğrusallığa sahip bir düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı yapılmıştır.

Düşük gürültülü kuvvetlendiricinin, uyandırma alıcısının ön ucuna eklenmesi ile alıcı hassasiyet -55dBm seviyesinden -76.5dBm seviyelerine yükseltilmiştir. Bu çalışma gelişen teknoloji ile beraber ileride daha işlevsel hale getirilebilir. Gelişen teknoloji ile beraber her geçen gün daha işlevsel teknolojik cihazlar geliştirilmektedir. Yeni teknolojinin getirdiği aktif cihazların seçimi ile daha yüksek hassasiyet seviyelerine daha düşük güç tüketimi değerleri ile ulaşmak mümkün olabilir.

Tercih edilen kutuplama devresi yaklaşımı veya düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarlanırken tercih edilecek farklı yaklaşımlarla kazanç seviyesi ve gürültü figüründe daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Gerçekleştirilmek istenen işe bağlı olarak farklı senaryolarla farklı tasarımlar yapılabilir. Gerek görülmesi halinde hassasiyet seviyesinin daha fazla arttırılması veya azaltılması mümkündür.

Tasarlanan uyandırma alıcısı sensör düğümlerinde kullanılarak binlerce sensör düğümüyle gözlenmek istenen bir ortam belirlenebilir ve ilgili ortamda ihtiyaç duyulan veriler bu sensör ağı vasıtasıyla toplanabilir. Böylece uzun ömürlü ve birbiriyle kablosuz haberleşme kapasitesine sahip bir akıllı ortam gerçekleştirilebilir ve çalışma kapsamı genişletilebilir.

KAYNAKLAR

[1]. Stankovic, J.A., 2008, Wireless Sensor Networks, Computer, 41 (10), 92-95.

[2]. https://www.wikidata.org/wiki/Q336038, [Ziyaret Tarihi: 2 Mart 2022].

[3]. Magno, M. vd., 2016, Design, Implementation, and Performance Evaluation of a Flexible Low-Latency Nanowatt Wake-Up Radio Receiver, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12 (2), 633-644.

[4]. https://medium.com/@orangepisersa/veri%CC%87-i%CC%87leti%CC%87mi%CC%87-data-transmission-266342c89188, [Ziyaret Tarihi: 4 Mart 2022].

[5]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parallel_and_Serial_Transmission.gif, [Ziyaret Tarihi 4 Mart 2022].

[6]. https://pediaa.com/what-is-the-difference-between-synchronous-and-asynchronous-data-transfer/, [Ziyaret Tarihi: 4 Mart 2022].

[7]. https://rahsoft.com/courses/microwave-amplifier-and-low-noise-amplifier-lna-design-theory-and-principles-online-course-rahrf526/, [Ziyaret Tarihi: 5 Mart 2022].

[8]. Frøytlog, A. vd., 2019, Design and implementation of a long-range low-power wake-up radio for IoT devices, 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 15-18 Nisan 2019, Limerick/İrlanda, IEEE, ISBN: 978-1-5386-4980-0, 247-250.

[9]. Woias, P. vd., 2018, A highly sensitive and ultra-low-power wake-up receiver for energy-autonomous embedded systems, 17th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2017), 14-17 Kasım 2017, Kanazawa/Japonya, IOP, ISBN: 1052 012024.

[10]. Koeble, S. vd., 2019, A narrow-band and ultra-low-power 433 MHz wake-up receiver, 18th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, 4-7 Aralık 2018, Florida/ABD, IOP, ISBN: 1407 012093.

[11]. Yomo, H. vd., 2012, Receiver design for realizing on-demand WiFi wake-up using WLAN signals, 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 3-7 Aralık 2012, Anaheim/CA/ABD, IEEE, ISBN: 978-1-4673-0920-2.

[12]. Bdiri, S. vd., 2017, A Tuned-RF Duty-Cycled Wake-Up Receiver with −90 dBm Sensitivity, Sensors, 18 (1), 86.

[13]. Shih, W. vd., 2015, A Long-Range Directional Wake-Up Radio for Wireless Mobile Networks, Journal of Sensor and Actuator Networks, 4 (3), 189-207.

[14]. Sarah, O. vd., 2021, 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 22-25 Mart 2021, Monastir/Tunus, IEEE, ISBN: 978-1-6654-1493-7.

[15]. Iyer, M. vd., 2018, 2017 IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCS), 29 Mart 2018, Thiruvananthapuram/Hindistan, IEEE, ISBN: 978-1-5090-6481-6.

[16]. https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/216/BFR280-pdf.php, [Ziyaret Tarihi: 8 Mart 2022].

[17]. https://diyot.net/kollektor-beyz-polarmasi/, [Ziyaret Tarihi: 8 Mart 2022].

[18]. Zeynep, H.T. vd., 2018, RLGC(f) modeling of a busbar distribution system via measured S-parameters at CENELEC and FCC bands, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 26 (1), 489-500.

[19]. Xiaowei, Z. vd., 2014, A distinctive method of eliminating out-band instability in cascaded active device system based on narrow-band attenuation, Progress In Electromagnetics Research Letters, 48, 59-65.

[20]. https://www.wikiwand.com/tr/Smith_aba%C4%9F%C4%B1, [Ziyaret Tarihi: 9 Mart 2022].

[21]. H. Zhang, E. Sánchez-Sinencio, Linearization Techniques for CMOS Low Noise Amplifiers: a Tutorial, IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Pap. 58 (1) (2011) 22–36.

[22]. https://www.everythingrf.com/community/what-is-ip3, [Ziyaret Tarihi: 9 Mart 2022].

[23]. https://en.wikipedia.org/wiki/Friis_formulas_for_noise, [Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2022].

[24]. Westerwick, E.H., 2002, A 5 GHz band CMOS low noise amplifier with a 2.5 dB noise figüre, 2001 International Symposium on VLSI Technology, Systems, and Applications. Proceedings of Technical Papers, 18-20 Nisan 2001, Hsinchu/Tayvan, IEEE, ISBN: 0-7803-6412-0.

[25]. Magno, M., Luca, B., 2014, 2014 IEEE 10th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 8-10 Ekim 2014, Larnaca/Kıbrıs, IEEE, ISBN: 978-1-4799-5041-6.

[26]. Lee, J. vd., 2010, A Low-Power Low-Cost Fully-Integrated 60-GHz Transceiver System With OOK Modulation and On-Board Antenna Assembly, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 45(2), 264-275.

[27]. Cheng, K.W., Chen, S.E., 2017, An Ultralow-Power Wake-Up Receiver Based on Direct Active RF Detection, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 64(7), 1661-1672.

[28]. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lpv7215.pdf?ts=1647940350822&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLPV7215%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dasc-amps-null-prodfolderdynamic-cpc-pf-google-wwe%2526utm_content%253Dprodfolddynamic%2526ds_k%253DDYNAMIC%2BSEARCH%2BADS%2526DCM%253Dyes%2526gclid%253DCj0KCQjw5-WRBhCKARIsAAId9FkyrYnRFnm3nacXPVoZoZumpu9QQq2EiYIUKVptgV4TR7Tk6jSiUL0aAteeEALw_wcB%2526gclsrc%253Daw.ds, [Ziyaret Tarihi: 22 Mart 2022].

[29]. Basagni, S. vd., 2019, Wake-up Radio Ranges: A Performance Study, 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 15-18 Nisan 2019, Marakeş/Fas, IEEE, ISBN: 978-1-5386-7647-9.

[30]. Liu, Z. vd., 2015, An effective receiver sensitivity measurement, 2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, 15-21 Mart 2015, Santa Clara/ABD, IEEE, ISBN: 978-1-4799-1993-2.

EKLER

Bu çalışmada kullanılan bazı cihazların LTSPICE XVII programında tasarlanabilmesi için bazı SPICE kodlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

HSMS285x diyotları için SPICE parametreleri aşağıdaki gibidir;

.model HSMS285x D(BV=3.8 CJO=0.18pF EG=0.69eV IBV=3e-4 IS=3e-6 N=1.06 RS=25 VJ=0.35 XTI=2 M=0.5).

Simülasyonların yapılabilmesi için LPV7215 karşılaştırıcısının LTSPICE programında tasarlanması gerekmektedir. Bu karşılaştırıcının SPICE parametreleri doğrudan karşılaştırıcının üreticisinin web sitesinden alınmıştır. LPV7215 karşılaştırıcısının SPICE parametreleri aşağıdaki gibidir;

.SUBCKT LPV7215 Vin+ Vin- V+ V- Vout

R_RT 0 N867010 50 TC=0,0

R_RIS N866236 V+ 1u TC=0,0

V_VHYST N866848 0 0

X_U6 V+ V+_BUFFER V- V-_BUFFER Supply_Buffer

I_IBP VIN+ V- DC -40f

I_IBN VIN- V- DC -40f

I_IS N866236 V- DC 825n

X_S2 CMP 0 N866412 N867010 Top_Level_S2

X_S1 CMP 0 N866412 N866406 Top_Level_S1

C_CINPH VIN+ V+ 0.5p TC=0,0

X_U4 CMP N866406 Prop_Delay

C_CINPL V- VIN+ 0.5p TC=0,0

V_VOS N866548 IN+BUFF 0.3m

X_U5 N866290 INRANGE 0 V+ V+_BUFFER V- V-_BUFFER N866780 VOUT Output_Stage

X_U3 N866548 IN-BUFF CMP V+_BUFFER V-_BUFFER N866848 HPA_COMPHYS

C_CINNL V- VIN- 0.5p TC=0,0

X_U2 IN-BUFF IN+BUFF INRANGE V+_BUFFER V-_BUFFER INPUTRANGE

X_U7 N866290 0 V+_BUFFER V-_BUFFER Supply_Enable

R_RS N867004 CMP 50 TC=0,0

X_U1 IN+BUFF IN-BUFF VIN+ VIN- Input_Buffer

T_TPD N867004 0 N867010 0 Z0=50 TD=7.7u

C_CINNH VIN- V+ 0.5p TC=0,0

E_E1 N866780 V-_BUFFER N866412 V-_BUFFER 2

.ENDS

Tasarımda kullanılan BFR280 transistörünün SPICE parametreleri aşağıdaki gibidir.

.MODEL BFR280 NPN(IS=6.472f ISE=1.5596E-14 ISC=1.409f XTI=3 BF=89.888 BR=20.238 IKF=0.073457 IKR=0.012696 XTB=1.5 VAF=25.609 VAR=5.6909 VJE=0.70035 VJC=1.1943 RE=2.4518 RC=6.989 RB=15 RBM=14.999 IRB=3.1958E-5 CJE=3.6218E-14 CJC=2.5299E-13 XCJC=0.19188 FC=0.96275 NF=1.0801 NR=0.83403 NE=1.6163 NC=1.0651 MJE=0.69773 MJC=0.30017 TF=1.1744E-11 TR=2.3693n ITF=0.0062179 VTF=0.2035 XTF=0.21585 EG=1.11 VCEO=15 ICRATING=10m MFG=SIEMENS)