

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**LAZER-ATOM ETKİLEŞİMİ İLE ELEKTROMANYETİK
DALGA ÖLÇÜMLERİ**

Y. Müh. Soydan ÇAKIR

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

LAZER-ATOM ETKİLEŞİMİ İLE ELEKTROMANYETİK
DALGA ÖLÇÜMLERİ

Y.Müh. Soydan ÇAKIR

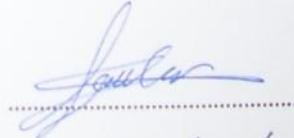
Doç.Dr. Gonca ÇAKIR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Doğan DİBEKÇİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

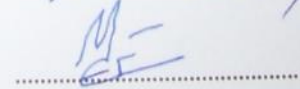
Prof.Dr. Yunus Emre ERDEMLİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

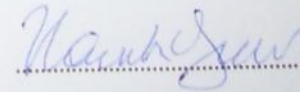
Prof.Dr. Namık YENER
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

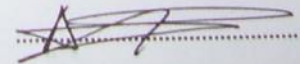
Prof.Dr. Levent SEVGİ
Jüri Üyesi, Doğu Üniv.











Tezin Savunulduğu Tarih: 04.07.2012

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde EM (elektromanyetik) dalga ölçümleri çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Bu ölçümlerde farklı antenler ve klasik izotropik alan sensörleri yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat bu ölçümlerde kullanılan izotropik alan sensörleri ve antenler çeşitli problemler sunmaktadırlar. İzotropik alan sensörleri ve antenler genellikle büyük boyutludur ve küçük alanlarda kullanım zorlukları oluştururlar. Ayrıca bu klasik ölçüm cihazları geniş bantlıdır, bu nedenle hedeflenen ve ölçülmek istenen işaret ile birlikte onun harmoniklerini ve diğer çevresel gürültüleri de ölçmekte ve tamamının toplamını göstermektedirler. Özellikle ölçülecek sinyallerin harmoniklerinin de ölçülüyor olması kalibrasyon izlenebilirliği (traceability) açısından ciddi bir dezavantajdır. Doktora tezi kapsamında klasik elektromanyetik ölçüm metotlarından (anten, izotropik alan sensör ve benzerleri) farklı olarak Lazer – Atom etkileşimine dayanan, atomların enerji geçişlerini kullanan, düşük belirsizlikli ve hassas yeni bir elektromanyetik dalga ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bu yeni atomik ölçme sistemi gerek küçük boyutları, gerekse dielektriksel yapısı ve harmoniksiz ölçme yeteneği ile diğer klasik sensörlere göre ciddi avantajlar göstermektedir. Araştırmalarda ilk etapta, Sezyum (^{133}Cs) atomunun uygun enerji geçişlerini kullanarak, SAR (Specific Absorption Rate), dar bantlı anten kalibrasyonu v.b. temel ölçümlerde önemli bir frekans bölgesi olan 9 GHz bölgesindeki elektromanyetik dalgaların sinüs modunda hassas ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca klasik sistemlerin ölçmede zorlandığı veya yetersiz kaldığı darbe modülasyonlu hızlı sinyallerin bu yeni metot ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İleri aşamalarda ise atomların Zeeman enerji geçişleri kullanılarak RF manyetik alanların ölçümleri yapılmış ve bunun anten ölçümlerinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu tez çalışmasında ilk defa atom-mikrodalga-lazer etkileşimi sonucunda gözlenen çift radyo optik rezonansları (DROR) bir antenin uzak alan koşullarında ve yansımaz ortamda araştırılmış, lazer ve mikrodalga ışına parametrelerinin DROR' a etkileri ölçülmüş ve yorumlanmıştır. Ayrıca, DROR rezonansının Zeeman ayrışmaları sağlanarak atom-lazer-mikrodalga-RF etkileşimi araştırılmış ve ilk defa bu metot ile RF manyetik alanların ölçülebileceği gösterilmiştir.

Tezin her aşamasında bana desteğini eksik etmeyen tez danışmanım, çok değerli hocam Sn. Doç. Dr. Gonca ÇAKIR' a ve yardımcı tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Ramiz HAMİD' e, teorik ve pratik olarak desteklerini esirgemeyen UME Elektromanyetik Metroloji Laboratuvarları sorumlusu Sn. Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ' a, UME Elektromanyetik Metroloji Laboratuvarları EMC birimi çalışanları Sn. Savaş ACAK' a ve Sn. Osman ŞEN' e teşekkür ederim.

Temmuz – 2012

Soydan ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vii
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ	1
1. SEZYUM ATOMUNUN ENERJİ DÜZEYLERİ	8
1.1. Sezyum Atomunun Araştırma Kapsamında Kullanılan Enerji Geçişleri.....	8
1.2. Sezyum Atomlarının D ₂ Enerji Geçişinde Soğurum Spektrumu	11
1.3. Lazer-Atom-Mikrodalga Etkileşimi ve Çift Radyo-Optik Rezonans	13
2. ELEKTROMANYETİK DALGALARIN SERBEST UZAYDA UZAK ALAN KOŞULLARINDA ÖLÇÜMÜ	15
2.1. Uygulanan Yöntem	15
2.2. Deney Düzenegi	18
2.3. Deneysel Sonuçlar.....	23
3. TAŞINABİLİR ATOMİK SENSÖR YAPISI VE KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ.....	40
3.1. Taşınabilir Atomik Sensör Yapısı	40
3.2. Taşınabilir Sensör Yapısı ile Karşılaştırma Ölçümü.....	43
4. YAKIN ALANDA RF MANYETİK ALANLARIN ÖLÇÜMÜ	46
4.1. Uygulanan Yöntem ve Deney Düzenegi	46
4.2. Deneysel Sonuçlar.....	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	66
EKLER.....	71
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	109
ÖZGEÇMİŞ	110

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Sezyum atomunun enerji geçiş diyagramları.....	9
Şekil 1.2.	Sezyum atomunun enerji geçiş süreleri	9
Şekil 1.3.	Dış DC manyetik alan uygulaması ile sezyum atomunun Zeeman ayrışmaları.....	10
Şekil 1.4.	Örnek Doppler çökmesi	12
Şekil 1.5.	Doppler çökmesi üzerinde DROR işareti	14
Şekil 2.1.	Lazer - Atom etkileşimi ve Doppler çökmesi.....	15
Şekil 2.2.	Doppler, DROR çökmeleri ve sezyum atomunun araştırmada kullanılacak enerji geçişleri	17
Şekil 2.3.	Osiloskop ekranında gözlenen Doppler ve DROR işaretleri	17
Şekil 2.4.	Araştırmanın temelini oluşturan ölçüm düzeneği.....	18
Şekil 2.5.	Araştırmanın mikrodalga üretim kısmı ve elektrik alanın teorik değeri	18
Şekil 2.6.	Deney düzeneğinin blok şeması	19
Şekil 2.7.	Yansımaz oda içerisindeki taşınmaz yapıdaki ölçüm düzeneği	22
Şekil 2.8.	(a) Çalışma Küvetinde Doppler soğurulma spektrumu, (b) Referans Küvetinde Doppler-içi rezonansları içeren Doppler soğurulma spektrumu.....	22
Şekil 2.9.	DROR işaretinin spektrumu, (a) 50 mm küvet uzunluğu, (b) 20 mm küvet uzunluğu, (c) 3 mm küvet uzunluğu	24
Şekil 2.10.	DROR genliğinin sezyum küvet uzunluğuna bağımlılığı.....	24
Şekil 2.11.	DROR işaretinin Zeeman ayrışması, DC manyetik alan (a) <math><0,2\text{ Gauss}</math>, (b) 6,5 Gauss, (c) 10,5 Gauss.....	25
Şekil 2.12.	Dikey polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve lazer gücü ilişkisi	26
Şekil 2.13.	Yatay polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve lazer gücü ilişkisi	27
Şekil 2.14.	Yatay polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve mikrodalga şiddeti grafiği.....	28
Şekil 2.15.	Dikey polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve mikrodalga şiddeti grafiği.....	28
Şekil 2.16.	50 mm uzunluğundaki küvet için atomik sensörün darbe modülasyonlu mikrodalgaya tepkisi (üst grafik : ikinci horn anten, alt grafik : DROR işareti), (a) 2 ms darbe periyodu ve 1 ms darbe genişliği, (b) 200 μs darbe periyodu ve 100 μs darbe genişliği, (c) 20 μs darbe periyodu ve 10 μs darbe genişliği.....	30
Şekil 2.17.	2 mm uzunluğundaki küvet için atomik sensörün darbe modülasyonlu mikrodalgaya tepkisi (üst grafik : ikinci horn anten, alt grafik : DROR işareti), (a) 2 ms darbe periyodu ve 1 ms darbe genişliği, (b) 200 μs darbe periyodu ve 100 μs	

	darbe genişliği, (c) 20 μ s darbe periyodu ve 10 μ s darbe genişliği.....	31
Şekil 2.18.	50 mm uzunluğundaki kuvvet için atom yolculuk sürelerinin gösterimi	32
Şekil 2.19.	Uzun süreli ölçümde kaydedilen net güç dalgalanması.....	33
Şekil 2.20.	Uzun süreli ölçümde kaydedilen elektrik alan probu dalgalanması	33
Şekil 2.21.	Uzun süreli ölçümde kaydedilen DROR dalgalanması	34
Şekil 2.22.	Doppler/DROR ve lazer gücü grafiği	36
Şekil 2.23.	Doppler seviyesi ile kuvvet sıcaklığı grafiği	37
Şekil 2.24.	DROR seviyesi ile kuvvet sıcaklığı grafiği	37
Şekil 2.25.	Doppler/DROR seviyesi ile kuvvet sıcaklığı grafiği	38
Şekil 2.26.	Doppler/DROR seviyesi ile mikrodalga şiddeti grafiği.....	39
Şekil 3.1.	Atomik sensörün birinci tip taşınabilir prototipinin fotoğrafı	40
Şekil 3.2.	Atomik sensörün birinci tip taşınabilir prototipinin tasarım şeması.....	41
Şekil 3.3.	İkinci bir lens ile iyileştirilmiş birinci tip taşınabilir prototipin tasarım şeması.....	41
Şekil 3.4.	Atomik sensörün ikinci tip taşınabilir prototipi.....	42
Şekil 3.5.	Atomik sensörün ikinci tip taşınabilir prototipinin tasarım şeması.....	42
Şekil 3.6.	Atomik sensörün taşınabilir prototipinin Türkiye UME' deki ölçümleri	43
Şekil 3.7.	Atomik sensörün taşınabilir prototipinin İngiltere NPL' deki ölçümleri	44
Şekil 3.8.	Atomik sensörün taşınabilir prototipinin genel ölçüm düzeneği	44
Şekil 4.1.	RF manyetik alanların ölçümü için ölçüm düzeneği	47
Şekil 4.2.	RF manyetik alanların ölçümü için genel ölçüm düzeneği fotoğrafı	47
Şekil 4.3.	RF manyetik alanların ölçüm düzeneğinde Helmholtz halkaları ile çevrelenmiş sezyum tüpünün görünümü	48
Şekil 4.4.	Sezyum atomlarının lazer, mikrodalga ve RF etkileşimi için enerji geçişleri.....	49
Şekil 4.5.	Zeeman ayrışmalarının artan statik manyetik alan şiddetiyle elde edilen osiloskop görüntüleri (f sabit bir sayıdır), (a) ≈ 0 μ T, f=0,5, (b) 540 μ T, f=1, (c) 1170 μ T, f=1, (d) 1985,5 μ T, f=1	50
Şekil 4.6.	$6S_{1/2}$ enerji seviyesi için mümkün olan enerji geçişleri	51
Şekil 4.7.	Statik manyetik alan ile RF etkileşim frekansı ilişkisi	52
Şekil 4.8.	1170 μ T' ya karşı gelen 4 MHz RF etkileşim frekansı için $6S_{1/2}$ ($F=3$, m_F) - $6S_{1/2}$ ($F=4$, m_F) enerji geçişleri için Zeeman komponentlerindeki değişim, RF Helmholtz akımı (a) ≈ 0 mA, (b) 19,5 mA , (c) 62 mA	52
Şekil 4.9.	1170 μ T' ya karşı gelen 4 MHz RF etkileşim frekansı için merkez $6S_{1/2}$ ($F=3$, $m_F=0$) - $6S_{1/2}$ ($F=4$, $m_F=0$) π enerji geçişi için Zeeman komponentinin değişimi için osiloskop görüntüleri, RF Helmholtz akımı (a) ≈ 0 mA, (b) 19,5 mA, (c) 62 mA	53

Şekil 4.10.	RF akıma karşı Zeeman komponent genlik değişiminin 2,8 MHz için 16 mW lazer gücündeki gösterimi.....	54
Şekil 4.11.	RF akıma karşı Zeeman komponent genlik değişiminin 1,6 MHz için 9 mW lazer gücündeki gösterimi.....	56
Şekil 4.12.	RF akıma karşı Zeeman komponent genlik değişiminin 2,2 MHz için 9 mW lazer gücündeki gösterimi.....	56
Şekil 4.13.	RF akıma karşı Zeeman komponent genlik değişiminin 3,4 MHz için 9 mW lazer gücündeki gösterimi.....	57
Şekil 4.14.	RF akıma karşı Zeeman komponent genlik değişiminin 3,4 MHz için sabit 9 mW lazer gücünde çeşitli mikrodalga güçleri için gösterimi	59
Şekil 4.15.	RF akıma karşı Zeeman komponent genlik değişiminin 3,4 MHz için sabit 170 W mikrodalga gücünde farklı lazer güçleri için gösterimi	59
Şekil 4.16.	Antene aktarılan güce karşı Zeeman komponent genlik değişimi (Sabit RF gücünde 3,1 MHz için)	60
Şekil 4.17.	Lazer gücüne karşı Zeeman komponent genlik değişimi (Sabit RF gücünde 3,1 MHz için).....	60
Şekil 4.18.	Tasarlanan atomik sensör ile Helmholtz halkası kalibrasyonları	61

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1.	Atomik sensörün taşınabilir prototipin karşılaştırma ölçüm parametreleri	45
Tablo 3.2.	Atomik sensörün taşınabilir prototipin karşılaştırma ölçüm sonuçları (Doppler/DROR).....	45

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Alan, (m^2)
c	: Işık hızı, (m/s)
Cs1	: Sezyum Küveti 1
Cs2	: Sezyum Küveti 2
D	: Mesafe, (m)
D_2	: Sezyum atomunun $6S_{1/2}$ ve $6P_{3/2}$ enerji düzeyleri arasındaki geçişi
e	: Elektron yükü, (coulombs)
E_n	: Atomun enerji düzeyleri, (eV)
F	: Toplam açısal momentum kuantum sayısı
F'	: Üst enerji seviyesi için toplam açısal momentum kuantum sayısı
\vec{F}	: Toplam açısal momentum vektörü
g_l	: Yörünge açısal momentum için Lande g-Faktörü
g_I	: Nükleer Lande Faktörü
g_s	: Spin açısal momentum için Lande g-Faktörü
h	: Planck sabiti, (J.s)
\hbar	: $h/2\pi$, (J.s)
H	: Manyetik alan, (A/m)
I	: Çok elektronlu atom için çekirdek açısal momentum kuantum sayısı
\vec{I}	: Çekirdek açısal momentum vektörü
j	: Tek elektronlu bir atomun elektronik açısal momentum kuantum sayısı
\vec{j}	: Elektronik açısal momentum vektörü
J	: Çok elektronlu atom için elektronik açısal momentum kuantum sayısı
\vec{J}	: Çok elektronlu atom için elektronik açısal momentumu
k	: Dalga sayısı, (1/m)
l	: Tek elektronlu bir atomun yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı
\vec{l}	: Yörüngesel açısal momentum vektörü
L	: Çok elektronlu atom için yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı
\vec{L}	: Çok elektronlu atom için yörüngesel açısal momentumu
m	: Manyetik kuantum sayısı
m_e	: Elektron kütlesi, (kg)
m_F	: Toplam açısal momentum için kuantum sayısı
m_l	: Yörünge için manyetik kuantum sayısı
m_p	: Protonun kütlesi, (kg)
m_s	: Spin için manyetik kuantum sayısı
n	: Enerji kuantum sayısı
\vec{p}	: Açısal momentum vektörü
P_{net}	: Net güç, (Watt)

\vec{r}	: Konum vektörü
s	: Tek elektronlu bir atom için spin açısasal momentum kuantum sayısı
\vec{s}	: Spin açısasal momentumu vektörü
S	: Çok elektronlu atom için spin açısasal momentum kuantum sayısı
\vec{S}	: Çok elektronlu atom için spin açısasal momentum vektörü
T	: Sıcaklık, (K)
v	: Hız, (m/s)
\vec{v}	: Hız vektörü
V_{p-p}	: Tepeden tepeye gerilim genliği, (V)
ω_L	: Açısasal hız, (rad/s)
Z	: Proton sayısı
λ	: Dalga boyu, (m)
μ	: Toplam manyetik moment, (J/T)
μ_B	: Bohr Magneton, (J/T)
μ_l	: Çekirdek manyetik momenti, (J/T)
μ_l	: Yörüngesel manyetik momenti, (J/T)
μ_N	: Nükleer Magneton, (J/T)
μ_s	: Spin manyetik moment, (J/T)
Ω	: Empedans, (ohm)
Ω_0	: Mikrodalga frekansı, (Hz)
$\psi_{nlm}(\vec{r})$: Elektronun dalga fonksiyonu
γ	: Gyromagnetic oran
α	: İnce yapı sabiti
π	: Pi enerji geçisi
%	: Yüzde
η_0	: Serbest uzay empedansı, (ohm)
σ	: Sigma enerji geçisi
Δ	: Laplace operatörü
∇	: Diverjans operatör
ΔE_{4-3}	: Sezyum atomunun temel enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı, (eV)
ΔF	: Toplam açısasal momentum kuantum sayısı farkı
∇_{m_F}	: Toplam açısasal momentum için kuantum sayıları farkı
6s	: Sezyumun altıncı enerji düzeyinin s orbitali
6p	: Sezyumun altıncı enerji düzeyinin p orbitali
6S _{1/2}	: Sezyum atomunun temel enerji düzeyi
6P _{3/2}	: Sezyum atomunun uyarılmış enerji düzeyi

Alt İndisler

<i>ref</i>	: Referans
<i>tar</i>	: Hedef
<i>z</i>	: Kartezyen koordinatlardaki z bileşeni

Kısaltmalar

A	: Amper
AC	: Alternate Current (Alternatif Akım)
AKM	: Askeri Kalibrasyon Metodu
AMR	: Anisotropic MagnetoResistance
au	: Arbitrary Unit (Keyfi Birim)
BNC	: Bayonet Neill Concelman
C	: Celcius
Ca	: Kalsiyum
cm	: Santimetre
CPT	: Coherent Population Trapping (Koherent Popülasyon Yakalama)
Cs	: Sezyum
CW	: Sinüs İşareti
dB	: Decibel
dBm	: Decibel Mili Watt
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
div	: Division (Bölüm)
DROR	: Double Radio Optical Resonance (Çift Radyo Optik Rezonansı)
EM	: ElektroManyetik
EMC	: ElektroManyetik Uyumluluk
EO	: Elektro Optik
FBS	: Fiber Beam Splitter (Fiber Işın Ayırıcı)
FC	: Fiber Coupler (Fiber Kuplajlayıcı)
fs	: Femto Saniye
GHz	: Giga Hertz
GKM	: Genel Kalibrasyon Metodu
GP	: Glan Polarizer (Glan Polarizör)
GPiB	: General Purpose Interface Bus (Genel Amaçlı Arayüz Yolu)
Hz	: Hertz
K	: Kelvin
kHz	: Kilo Hertz
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LiNbO ₃	: Lithium Niobate
LiTaO ₃	: Lithium Tantalate
Log	: Logaritma
m	: Metre
M	: Mirror (Ayna)
mA	: Mili Amper
MFC	: Microsoft Foundation Class (Microsoft Temel Kütüphanesi)
MHz	: Mega Hertz
MIMIC	: Monolithic Microwave Integrated Circuit (Tekparçalı Tümleşik Mikrodalga Devre)
mm	: Mili Metre
ms	: Mili Saniye
mW	: Mili Watt
Na	: Sodyum
Ne	: Neon

nm	: Nano Metre
NPL	: National Physical Laboratory (Ulusal Fizik Laboratuvarı)
OI	: Optic Isolator (Optik İzolatör)
PD	: Photodiode (Fotodiyot)
PP	: Pulse Period (Darbe Periyodu)
ps	: Piko Saniye
PW	: Pulse Width (Darbe Genişliği)
Rb	: Ribidium
RF	: Radyo Frekansı
s	: Saniye
SAR	: Specific Absorption Rate (Özgül Soğurma Oranı)
T	: Telescope (Teleskop)
TAC	: Test Altındaki Cihaz
THz	: Tera Hertz
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
V	: Volt
VCSEL	: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (Dikey-Kavite Yüzey-Yayan Lazer)
W	: Watt
YIG	: Yttrium Iron Garnet (İtrium Demir Garneti)
ZnTe	: Zinc Telluride (Çinko Telürür)
μm	: Mikro Metre
μs	: Mikro Saniye
μV	: Mikro Volt

LAZER-ATOM ETKİLEŞİMİ İLE ELEKTROMANYETİK DALGA ÖLÇÜMLERİ

ÖZET

Bu çalışmada klasik elektromanyetik dalga ölçüm yöntemlerine alternatif olabilecek ve klasik yöntemlere göre avantajlar sunan, lazer-atom etkileşimine dayanan atomik bir elektromanyetik alan sensörünün tasarımı ve karakterizasyonu amaçlanmıştır. Araştırmalarda ilk etapta, Sezyum atomunun uygun spektrum enerji geçişleri kullanılarak 9 GHz bölgesindeki elektromanyetik dalgaların sinüs ve darbe modunda hassas ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının ikinci aşamasında atomik sensörden elde edilen verilerin nasıl daha durağan ve düşük belirsizlikli yapılabileceği konusunda daha ileri çalışmalar gerçekleştirilmiş ve atomik sensörün taşınabilir ilk prototipi oluşturulmuştur. Tez çalışmasının üçüncü aşamasında ise atomların Zeeman enerji geçişleri kullanılarak RF manyetik alanların ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bunun anten ölçümlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır, böylece atomik sensöre geniş bantlı ölçüm yapabilme yeteneği kazandırılmıştır. Bu tez çalışmasında ilk defa atom-mikrodalga-lazer etkileşimi sonucunda gözlenen DROR işareti bir antenin uzak alan koşullarında araştırılmış, lazer ve mikrodalga ışınım parametrelerinin DROR' a etkileri ölçülmüş ve yorumlanmıştır. Ayrıca, DROR rezonansının zeeman ayrışmaları sağlanarak atom-lazer-mikrodalga-RF etkileşimi araştırılmış ve ilk defa bu metot ile RF manyetik alanların ölçülebileceği gösterilmiştir. Böylece bu tez kapsamında lazer-atom etkileşimine dayanan klasik ölçüm metotlarına oranla daha küçük boyutlu, dielektrik yapılı ve harmoniksiz ölçüm kabiliyetine sahip bir atomik elektromanyetik alan ölçüm sensörünün tasarımı ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Atom, Elektromanyetik, Lazer, Mikrodalga, Zeeman.

ELECTROMAGNETIC WAVE MEASUREMENTS BY USING LASER ATOM INTERACTION

ABSTRACT

In this study, the design and characterization of a new electromagnetic field sensor based on the interaction of laser and atoms were introduced. This new measurement system presents advantages over the classical methods. In the researches, firstly, the measurements of electromagnetic waves at around 9 GHz were performed in sinusoidal and pulse mode by using the related energy transitions of Cesium atoms. In the second stage of the research, more advanced researches were performed in order to achieve more stable and precise measurement results, and first mobile prototype of the atomic sensor was designed. In the third stage, the measurements of RF magnetic fields were researched by using this atomic sensor and using the Zeeman energy transitions, and the applicability of the sensor in antenna measurements was studied, hence the atomic sensor was given the capability of making broadband measurements. In this thesis, DROR resonances which result from atom-laser-microwave interaction were researched for the first time in the far field conditions of an antenna, and the influence of the laser and microwave radiation parameters on the DROR was studied and interpreted. Moreover, atom - laser - microwave - RF interaction was researched by splitting the DROR into Zeeman components, and measurements of RF magnetic fields by using this method were presented firstly in this thesis. As a consequence, the design and characterization of a new electromagnetic field sensor based on laser and atom interaction, which has small dimensions, dielectric structure and measurement capability without harmonics, were realized in this thesis.

Keywords: Atom, Electromagnetic, Laser, Microwave, Zeeman.

GİRİŞ

Elektromanyetik dalgaların uzak alan koşullarında elektrik alan ve manyetik alan şiddet değerlerinin ölçümü klasik ölçüm metotlarında izotropik veya yönlü antenler ile birlikte işaret analizörlerinin kullanımı ile yapılmaktadır. Bu metotlar yaygın bir şekilde EMC test ve ölçüm merkezleri tarafından kullanılmaktadır. Uygun antenler [1-4] ile yapılan ölçümler sonucunda ölçümlerin belirsizlik ve kesinlikleri tahmin edilebilmektedir. EMC, yakın alan SAR, darbeli EM dalga ölçümleri, MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) teknolojileri ve benzeri unsurlar ile minyatür tip zamanla değişen elektrik ve manyetik alan sensörlerinin gelişimi tetiklenmiştir. İlk olarak, bir dipol anten tarafından algılanan zamanla değişen elektrik alan işaretinin optik bir işarete çevrilebilmesi için içine diyot yerleştirilmiş bir dipol anten EM ölçümleri için kullanılmıştır [5-6]. Bu sensörler ile frekans ve faz ölçülemediği için ileri çalışmalarda diyot yerine bir lazer diyot veya LED kullanılmıştır. Anten ve alıcı arasında bağlantı kuran bu aktif fiber-optik sistemler sınırlı pil ömürleriyle bir dezavantaja sahiptir [7-10]. Ayrıca, LiNbO_3 ve LiTaO_3 gibi elektrooptik kristaller (EO), aktif sistemlerde yaşanan sınırlamalar olmadan tespit edilen zamanla değişen elektrik alan değerlerini optik sinyale çevirebilmektedirler [11]. Diğer bir çalışmada ise, Pockels efektine [12-13] dayanan, bir optik modülatör olarak kullanılan EO kristalleri dipol elemanların arasına yerleştirilerek düşük frekanslardan GHz mertebelerine kadar elektrik alan değerlerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Ek olarak EO sensörlerinin 5 ns' lik darbe genişlikli darbeli EM dalgalara cevabı da [13]' de başarılı olarak gösterilmiştir. Bu alanda yapılan diğer önemli bir çalışmada ise fiber kablolarla monte edilmiş EO sensörler, dipol bileşen veya herhangi bir anten olmadan, EM dalgaların ölçümünde kullanılmıştır [14]. Aynı metot ile diğer önemli örnek ise yakın alan koşullarında elektrik alan ölçümleri 60 GHz' de gerçekleştirilmiştir [15] ve EO sensörlerinin pikosaniye düzeyindeki cevapları başarılı olarak gösterilmiştir. SAR ölçümlerine yönelik olarak ise fiber EO sensör kullanımı [16]' da gerçekleştirilmiştir. Fiber kenarlı ZnTe kristali elektrik alan ölçümlerinde ve fiber kenarlı bir YIG kristali manyetik alan ölçümlerinde kullanılarak bir mikrostrip iletim

hattının yakın civarında frekans ölçüm analizleri gerçekleştirilmiştir [17]. VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) sensörler kullanılarak 5 GHz' kadar elektrik alan ölçümleri ise [18]' de incelenmiştir.

Literatürde lazer – gaz - EM etkileşimini temel alan çalışmalarda mevcuttur. Uzak alan koşulları yerine mikrodalga kaviteler içerisinde bazı incelemeler rubidium ve sezyum gazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [19-21]. Diğer bir çalışmada ise kuantum tabanlı mikrodalga güç ölçümleri amacıyla açık uçlu bir dalga klavuzu ve Rb ve Cs gazları kullanılarak lazer-atom etkileşimleri yakın alan bölgelerinde incelenmiştir [22-23]. Bu tez çalışmasında ise, yapılan tüm çalışmalardan farklı olarak uzak alan koşullarında ve serbest uzayda detayları aşağıda sunulan kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında lazer-atom etkileşimini temel alan, lazer tabanlı bir atomik elektromanyetik alan sensörünün tasarımı yapılarak serbest uzayda düzlemsel elektromanyetik dalgaların hassas ölçümleri, RF (Radyo Frekansı) manyetik alanların tespiti ve ayrıca bu lazer tabanlı atomik sensörün birçok yönden karakterizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Lazer-Atom etkileşimine dayanan bu yeni atomik sensör klasik ölçüm metotlarına oranla çok daha küçük boyutlu, dielektrik yapılı ve harmoniksiz ölçüm kabiliyetine sahip olup diğer klasik sensörlere göre avantajlar göstermektedir.

Tez çalışmasında ilk olarak, hedeflenen atomik sensörün taşınabilir olmayan ilk sabit prototipi tasarlanmış ve ölçümlerin yapılabilmesi için gerekli ölçüm düzenekleri kurulmuştur. İlk ciddi ölçümler, bu taşınabilir olmayan yerleşik sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda lazer ve mikrodalganın sezyum atomları etkileşimi ile DROR (Double Radio Optical Resonance) işareti oluşturulmuş ve bu işaret yansız bir oda içerisinde 9,2 GHz frekanslı mikrodalganın tespiti amacıyla kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, DROR işareti ile EM dalganın genliği arasında yaklaşık lineer bir ilişki tespit edilmiştir. Aynı zamanda DROR işaretinin lazer gücüne bağımlılığının da benzer şekilde lineer olduğu gözlenmiştir. Çalışmalarda, DROR işaretinin davranışı lineer polarizasyonlu lazer ve mikrodalga için incelenmiştir. Ayrıca lazer gücü ve EM dalganın şiddeti sabit tutularak DROR' un farklı uzunluktaki kuvvetlerdeki (farklı uzunluktaki etkileşim) şekli ve genliği de

araştırılmıştır. Uzak alan EM dalga ölçümlerinin yanı sıra doktora tezi çalışmasının diğer hedefleri arasında RF manyetik alanların da tespiti olduğu için buna imkân verecek Zeeman ayrışmalarının gözlenebilmesi için sezyum tüpüne DC manyetik alan uygulanarak Zeeman ayrışmalarının görüntüleri alınmıştır. Çalışmalarda ayrıca sürekli sinyallere ek olarak darbe modülasyonlu mikrodalgalar ile çalışılmış ve darbeleri EM dalgalara atomik sensörün göstereceği cevap incelenmiştir.

Atomik sensör ile daha ileri düzeyde yapılan ikinci aşama çalışmalarda sensörden elde edilebilecek sonuçların nasıl daha durağan ve düşük belirsizlikli yapılabileceği araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda uzak alan mikrodalga ölçümlerinde, matematiksel Doppler/DROR oranının kullanımı ile yapılan ölçümlerin, sadece DROR kullanımı ile yapılan ölçümlere göre daha hassas sonuçlar verebildiği deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca lazer gücünün ve ortam sıcaklığının DROR ve Doppler/DROR oranlarına olan etkisi incelenmiştir. Ek olarak, sabit lazer gücünde DROR ve Doppler/DROR seviyeleri için uzun zaman periyodunda dalgalanmalar ölçülmüştür. Doppler/DROR oranı için maksimum dalgalanma yaklaşık 0,5 dB olur iken, DROR için maksimum dalgalanma 0,9 dB olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak Doppler/DROR oranının sadece DROR ölçümüne göre daha iyi ve tekrar üretilebilir sonuçlar verdiği deneysel olarak gösterilmiştir.

İzleyen araştırmalarda, 9,192 GHz' de ölçüm yapabilen atomik sensörün taşınabilir ilk prototipi oluşturulmuştur. Bu taşınabilir prototip ile İngiltere' nin NPL firması ile karşılaştırma ölçümlerine girilmiş ve bu kapsamdaki ölçümlerde memnun edici sonuçlar elde edilmiştir.

Doktora tez çalışmasının üçüncü aşamasında tek frekanslı olarak 9,192 GHz' de çalışan atomik sensörün nasıl geniş bantlı yapılabileceği üzerine araştırmalar yapılmış ve bu atomik sensörün RF manyetik alanların ölçümü, halka anten ve özellikle önemli bir halka anten seti olan Helmholtz halkası kalibrasyonlarında kullanılabilirliği üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

RF manyetik alanlar klasik yöntemler kullanılarak yoğun bir şekilde halka antenler ve manyetik alan problemleri kullanılarak ölçülmektedir. Halka antenler ve özel bir halka anten tipi olan Helmholtz halkaları yoğun bir şekilde EMC testlerinde, test edilen cihazdan yayılan manyetik alanları okumak veya test edilen cihaz üzerine

manyetik alanları uygulamak için kullanılmaktadır. Örneğin askeri EMC standardı MIL-STD461E [24] birkaç tip halka anten ve Helmholtz halkaları tanımlayarak manyetik alanların algılanmasını ve uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Halka antenler EMC ölçümlerinde manyetik alanları ölçer iken ölçülen manyetik alan ile maksimum etkileşim kurmakta ve ölçüm sırasında ölçülen manyetik alanı bozmaktadırlar. Diğer yandan klasik manyetik alan problemleri ise tasarım olarak küçüktür ve hedef manyetik alanlara minimum zarar vererek ölçümü gerçekleştirirler. Manyetik alan sensörleri çoğunlukla çevre kirlilik ölçümlerinde kullanılmaktadırlar [25], bazen ise EN50366 [26] gibi ticari EMC standartlarında önerilmektedirler. Klasik bir manyetik alan probu temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır; sensor, kablo ve gösterge. Sensör parçası denilen kısım aslında üç adet birbirine dik yerleştirilmiş küçük boyutlu halka antenlerden oluşmaktadır. Diğer tip manyetik alan sensörleri ise AMR ve Hall sensörleri olup farklı alanlarda kullanılabilirler. Bunlar gibi farklı türden manyetik alan sensörleri, manyetik alan sensörlerindeki gelişmeler ve uygulamaları çok detaylı olarak [27-28]' de, günümüzün atomik sensörleri ise [29]' da anlatılmıştır. Ayrıca yeni tip flux gate/hall etkisine dayanan manyetik alan sensörü [30]' da tartışılmaktadır.

Manyetik alan sensörlerinin ve halka antenlerin manyetik alan ölçümlerinde kullanılmalarının yanısıra onların kalibrasyonları da hayati öneme sahiptir. Tüm manyetik alan sensörleri veya halka antenler kullanımdan önce mutlaka kalibre edilmelidirler. RF manyetik alan sensörlerinin kalibrasyonu özellikle 9 kHz – 10 MHz aralığında Helmholtz halkalarını gerektirmektedir [31]. Bir Helmholtz halkası eşit çaplı ve eşit sarımlı 2 halka antenin karşılıklı bir eksen boyunca birleştirilmiş halindedir ve aralarındaki mesafe halkaların yarıçapı kadardır. İki halka anten seri olarak öyle birbirine bağlanır ki aralarından düzgün ve geniş bir manyetik alan bölgesi oluştururlar [32]. Helmholtz halkaları aslında hava göbekli halka tasarımlarının özel bir şeklidir ve genellikle bir hacim üzerinde düzgün bir manyetik alan bölgesi oluşturmak için kullanılmaktadırlar. Helmholtz halkaları dahil olmak üzere aralarında hava bulunan halka anten sistemlerinin ilk tanımları ve tartışmaları [33-37]' de yapılmıştır. Helmholtz halkalarının sensör kalibrasyonlarındaki tanımları ise çok detaylı olarak [38]' de gerçekleştirilmiştir. Bir Helmholtz halkasının merkezindeki manyetik alan değeri boyut, sarım ve akım bilgisi ile

hesaplanabilmektedir [38]. Bu gerçeğe dayanarak günümüzde manyetik alan sensörleri Helmholtz halkalarının merkezlerine yerleştirilerek kalibre edilmektedir. Manyetik alan sensör kalibrasyon sistemleri ve Helmholtz halkasının bu konudaki avantajları [39]' da alan düzgünlüğü açısından kapsamlı olarak anlatılmıştır. Bir Helmholtz halkasının tanımı iki eş halka antenin halka antenlerin yarıçapı mesafesinde yerleştirilmiş hali olarak tanımlansa da farklı şekil, farklı boyut ve farklı sayıdaki sarım setleri de mevcuttur ve manyetik alan sensör kalibrasyonlarında kullanılabilir. Karesel tip Helmholtz halkasının tasarımı ilk olarak [40]' ta anlatılmıştır. Beş adet eşit mesafeli karesel antenlerle düzgün manyetik alan elde etme çalışmaları [41]' de ve 3 halka antenden oluşan sistemde [42]' de tartışılmıştır.

Manyetik alan sensörlerinden farklı olarak, EMC ölçümlerinde kullanılan halka antenler Helmholtz halkalarına ek olarak hesaplanabilir özel üretim halka antenler ile de kalibre edilebilmektedir [43-44]. Üç ayrı bağımsız halka anten ile yapılan bir kalibrasyon işlemi diğer bir halka anten kalibrasyonu olarak [45]' te anlatılmaktadır. Bir TEM hücresi de manyetik alan sensörleri ve halka antenler için bir kalibrasyon aracı gibi kabul edilsede [31], yüksek manyetik alan seviyelerinde Helmholtz halkaları ile yarışabilmesi mümkün değildir. Bir Helmholtz halkası çok düşük güçlerde istenen manyetik alan seviyelerine ulaşırken, aynı manyetik alan seviyelerine TEM hücreleri içerisinde ulaşmak büyük RF güç gerektirmektedir. Yüksek manyetik alan seviyelerinde Helmholtz halkaları yaygın olarak tercih edilen metottur.

Bununla birlikte, Helmholtz halkaları manyetik alan sensör kalibrasyonlarında çok hayati bir cihaz olmasına karşın kendisi için standart bir kalibrasyon metodu mevcut değildir. Genel olarak referans bir manyetik alan sensörü Helmholtz merkezindeki manyetik alanı ölçmek için kullanılabilir veya herhangi bir ölçüm yapılmaksızın boyut, sarım sayısı ve akım bilgisi ile Helmholtz merkezindeki manyetik alan değeri hesaplanmaktadır. Manyetik alan sensörleri genelde büyük boyutlu olduğu için küçük boyutlu Helmholtz halkalarının merkezlerine yerleştirmek mümkün değildir. Alternatif olarak küçük bir halka anten, Helmholtz halkasını kalibre etmek için kullanılabilir fakat bu durumda kalibratör halka antenin metalik parçaları hedef Helmholtz halkası ile karşılıklı etkileşim oluşturabilecektir veya Helmholtz halkası içindeki manyetik alan düzgünlüğüne zarar verebilecektir. Helmholtz halkası

kalibrasyonu konusunda literatürdeki nadir metotlardan biri [46]' da verilmektedir. Bu çalışmada Helmholtz halkası, merkezine yerleştirilen bir gauss metre ve uygulanan DC akım ile kalibre edilmektedir. Ayrıca, Helmholtz halkası merkezine yerleştirilen ekranlı bir halka anten ve network analizörü kullanımı ile gerçekleşen diğer bir Helmholtz halka kalibrasyonu [47]' de sunulmaktadır. Bu metotta, bir akım sensörü akım ölçümü yapar iken küçük bir halka anten Helmholtz halkası merkezindeki manyetik alanı ölçmektedir.

Tez çalışmasının üçüncü çalışma aşamasında, bahsedilen RF manyetik alan ölçüm ve halka anten kalibrasyonlarına, özellikle Helmholtz halka kalibrasyonlarına, iyi bir alternatif olabilecek hassas bir atomik RF manyetik alan sensörünün tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak dış bir statik (DC) manyetik alan uygulanarak DROR işareti Zeeman komponentlerine ayrıştırılmış ve sonra Atom - Lazer – Mikrodalga – RF dörtlü etkileşimi oluşturularak hassas RF manyetik alan ölçümleri yapabilecek geniş bantlı, frekansı ayarlanabilen atomik bir sensörün temelleri atılmıştır. Literatürde CPT (Coherent Population Trapping) [48] kullanımı ile bazı kısmi manyetik alan ölçümleri yapılmış [49] olmasına karşın DROR işaretinin Zeeman ayrışmaları ile yapılan RF manyetik alan ölçümleri bu kapsamda bir ilktir.

Bu RF manyetik alan sensör çalışmasında, oluşturulmuş Zeeman komponentlerine ait RF etkileşim frekanslarının artan statik manyetik alan ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu noktada, Zeeman komponentlerinin RF etkileşim frekansı ve statik manyetik alan arasında lineer bir ilişki olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, sabit bir statik manyetik alanda, etkileşim frekansındaki artan RF manyetik alan şiddeti ile Zeeman komponentlerin genliklerinin değişimi araştırılmış ve belli bir bölgede yaklaşık lineer bir ilişki tespit edilmiştir. Aynı zamanda Zeeman komponent genliklerinin lazer ve mikrodalga güçlerine bağımlılığı da araştırılmıştır. Tasarlanan bu atomik RF manyetik alan sensörünün bir uygulama örneği olarak Helmholtz halkası kalibrasyonlarında nasıl kullanılabilceğine dair teorik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, bu tez çalışmasında, deneysel çalışmalar sırasında bir çok karma laboratuvar cihazının (lazer kaynakları, lazer modülatörler, RF yükselticiler, işaret kaynakları,

osiloskop ve diğer ölçüm cihazları) eş zamanlı kullanımına imkan verecek olan yazılımın tasarımı yapılmış ve tüm deneysel aşamalarda aktif olarak kullanılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında klasik elektromanyetik dalga ölçüm yöntemlerine alternatif olabilecek ve klasik yöntemlere göre avantajlar sunan, lazer-atom etkileşimine dayanan atomik bir elektromanyetik alan ölçüm sisteminin tasarımı ve birçok yönden karakterizasyonu amaçlanmıştır.

1. SEZYUM ATOMUNUN ENERJİ DÜZEYLERİ

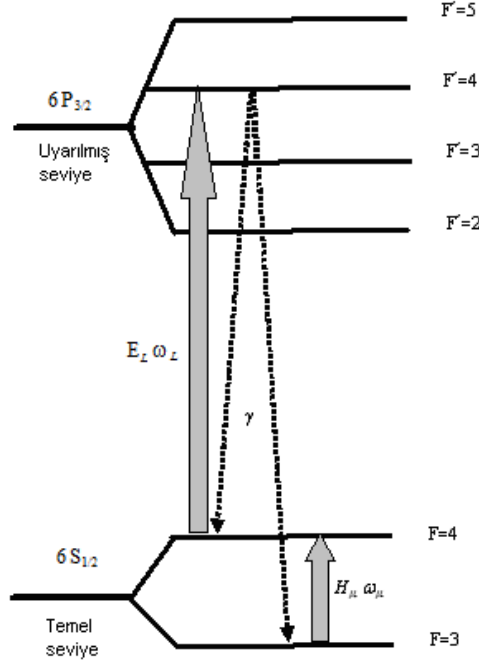
Bu tez çalışmasında bir alkali metal olan sezyum atomları kullanılmış olup, kullanılan sezyum atomunun kütle ağırlığı 133, atom ağırlığı 55' tir. Dolayısıyla çekirdeğinde 55 proton ve 78 nötron, yörüngelerinde 55 elektron bulunmaktadır. Yörüngelerindeki elektron dağılımı orbitaller üzerinde $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$, $4p^6$, $5s^2$, $4d^{10}$, $5p^6$, $6s^1$ şeklinde olacaktır. Bu dağılım uyarınca altıncı enerji düzeyindeki bir serbest elektron çalışmalarımızda hayati rol oynamaktadır. Bu bölümde tez kapsamında kullanılan sezyum atomunun enerji geçişleri anlatılacaktır. Bu bölümü destekleyici şekilde hazırlanmış genel atom fiziği bilgileri ise detaylı bir şekilde EK A.1' de ve gazlar için genel soğurum bilgileri EK A.2' de sunulmaktadır. Bu bölümün ve adı geçen kavramların en iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için EK A' nın incelenmesi yararlı olacaktır.

1.1. Sezyum Atomunun Araştırma Kapsamında Kullanılan Enerji Geçişleri

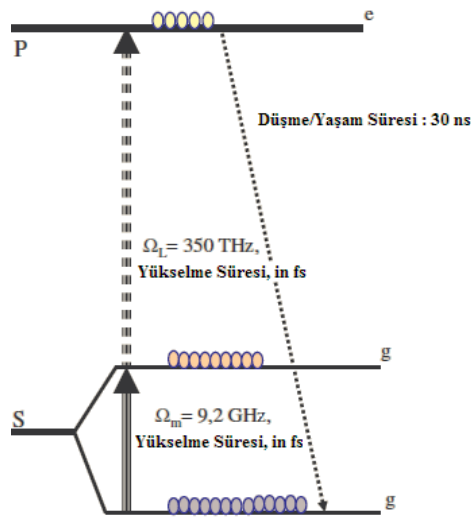
Doktora tez kapsamında yapılacak araştırmalar sezyum atomlarının D_2 olarak isimlendirilen enerji geçişinde ($\lambda = 852$ nm) gerçekleştirilmiştir. Sezyum atomlarının D_2 enerji geçişi, Şekil 1.1' de görüldüğü üzere temel enerji seviyesi $6S_{1/2}$ ve üst enerji seviyesi ise $6P_{3/2}$ arasında gerçekleşmektedir. Bu enerji geçişine karşı düşen geçiş süreleri ise Şekil 1.2' de sunulmuştur.

Doktora tez çalışması sırasında, sezyum atomunun bizim ilgileneceğimiz enerji seviyeleri, temel enerji seviyesi $6S_{1/2}$ ve üst enerji seviyesi ise $6P_{3/2}$ ' dir. Temel enerji seviyesindeki elektronların yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı $L = 0$ (S orbitali), spin kuantum sayısı ise $S = 1/2$ ' dir. $S > L$ olduğundan dolayı çok katlılık değeri $2L+1=1$ olacaktır, yani tek bir J değeri, o da $J = L + S = 1/2$ olacaktır. Atom çekirdeğinin açısal spin momentum kuantum sayısı $I = 7/2$ ' dir. $I > J$ olduğundan dolayı mümkün toplam açısal kuantum sayısı F' lerin muhtemel değerlerinin sayısı $2J+1=2$ adet olacaktır. Temel seviyesindeki elektronların atom çekirdeği ile etkileşimi dikkate alındığında atomun toplam açısal momentum kuantum sayısı $F = I + J$ ve $F = |J - I|$ olarak bulunur. Dolayısıyla atomun toplam açısal momentum

kuantum sayıları $F = 7/2 + 1/2 = 4$ ve $F = 7/2 - 1/2 = 3$ olacaktır ve iki alt aşırı ince yapı (hyperfine structure) enerji seviyesi $6S_{1/2}$ ($F = 4$) ve $6S_{1/2}$ ($F = 3$) oluşacaktır. Bu iki alt seviye arasındaki enerji farkı $\Delta E_{4-3} = h * 9,2$ GHz denkleminde karşı gelmektedir. Sezyum atomlarının mikrodalga ile etkileşimi de bu $6S_{1/2}$ ($F = 3$) - $6S_{1/2}$ ($F = 4$) enerji geçişinde gerçekleşmektedir. (h : Planck sabiti)



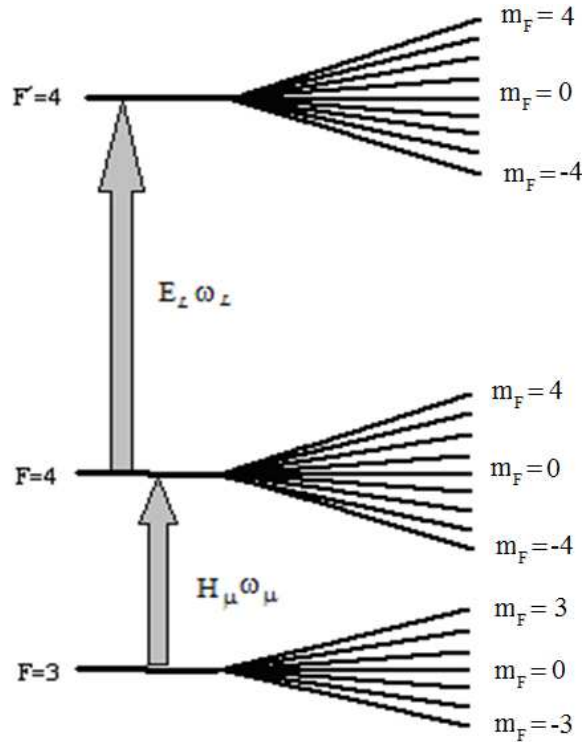
Şekil 1.1. Sezyum atomunun enerji geçiş diyagramları



Şekil 1.2. Sezyum atomunun enerji geçiş süreleri

Üst enerji seviyesi $6P$ için $S=1/2$ ve $L=1$ (P orbitali)' dir. $S < L$ olduğundan dolayı katlılık derecesi $2S+1=2$ olacaktır, yani J' lerin muhtemel değerlerinin sayısı ikidir, dolayısıyla $J=|L-S|=1/2$ ve $J=L+S=3/2$ olmak üzere iki ince yapı komponenti oluşacaktır. Tez kapsamındaki çalışmalarda sadece $J=3/2$ yani $6P_{3/2}$ komponenti ile ilgileneceğiz. Bu üst enerji seviyesi için, çekirdek spin kuantum sayısı $I=7/2$ olduğunu düşünerek muhtemel toplam açılal kuantum sayısı F' lerin adeti $I > J$ olduğu için $2J+1=4$ olacaktır. Bu F değerleri $|J-I|=2$ ve $J+I=5$ arasındaki $+1$ adımlı değerler olacaktır. Dolayısı ile üst enerji seviyesi $6P_{3/2}$ dört alt seviyeye $6P_{3/2}$ ($F = 5, 4, 3, 2$) bölünmektedir. Araştırmalar sırasında lazer frekansı, $6S_{1/2}$ ($F = 4$) - $6P_{3/2}$ ($F = 5, 4, 3$) seviyelerini kapsayacak şekilde taranmış veya $6S_{1/2}$ ($F = 4$) - $6P_{3/2}$ ($F = 4$) enerji seviyesine denk gelecek şekilde sabit tutulmuştur.

Sezyum atomlarına dış bir DC manyetik alan uygulandığında ise Şekil 1.3' de gösterilen Zeeman enerji ayrışmaları oluşacaktır. Her bir enerji seviyesi uygulanan DC manyetik alanın şiddetinin seviyesine uygun olarak $2F+1$ adet alt enerji seviyesine ayrılacaktır.



Şekil 1.3. Dış DC manyetik alan uygulaması ile sezyum atomunun Zeeman ayrışmaları

1.2. Sezyum Atomlarının D₂ Enerji Geçişinde Soğurum Spektrumu

Bu bölümde rezonans lazer ışımalarının atomik gaz ile etkileşimi sonucunda elde edilen Doppler soğurum spektrumları ile ilgili bilgiler sunulacaktır. Frekansı ω_L olan lazer demetinin, içerisinde sezyum atomları olan cam küvet içerisinde geçtiğini ve foto diyot ile algılandığını düşünelim. Temel E_1 ve üst E_2 enerji seviyelerine sahip atomlar \vec{v} hızı ile hareket ediyorsa bu atomlar Doppler etkisine göre lazer ışması ile,

$$\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v} \quad (1.1)$$

şartı sağlandığında etkileşime girer. Başka bir deyiş ile, \vec{v} hızı ile hareket eden atomlar, lazer ile,

$$\omega_0 = (E_2 - E_1) / \hbar \quad (1.2)$$

frekans değerinde değil, $\vec{k} \cdot \vec{v}$ kadar farklı olan ω_L frekans değerinde etkileşime girer. Bu denklemlerde;

$$k = (2\pi / \lambda) \vec{n} \quad (1.3)$$

k : Lazerin dalga vektörü

λ : Lazerin dalga boyu

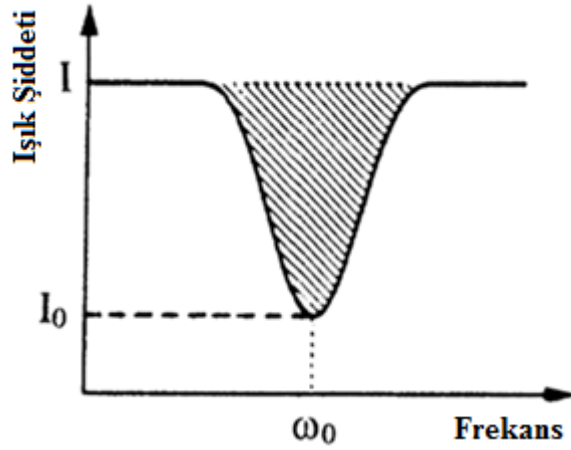
\vec{n} : Lazer demeti yönünde birim vektörü

h : Planck sabiti

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (1.4)$$

Oda sıcaklığında atomların küvet içindeki ortalama hız değerleri $v = 3 \times 10^4$ cm/sn'dir. Atomlar bu sıcaklık değerlerinde 10 m' den fazla mesafeyi çarpışmadan gidebilirler, dolayısı ile çapı 2 cm ve uzunluğu 5 cm olan küvet içerisinde atomlar arası çarpışma ihmal edilebilir. Oda sıcaklığında küvet içerisindeki atomik gaz yoğunluğu 3×10^{10} atom/cm³ civarında olup hız dağılımı ise Maxwell – Boltzman hız dağılımı ile ifade edilmektedir. Eğer atomik küvetin girişindeki lazer gücünün, lazer frekans değişimi ile sabit kaldığı varsayılırsa, bu durumda küvetin çıkışındaki

lazer gücü atomların hız dağılımına benzemektedir ancak ters işaretli olarak değişmektedir. Rezonans atomik gazdan geçen ve frekansı $\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v}$ civarında değişen lazer ışını foto diyot ile algılandığında, foto diyot üzerinde lazer frekans değişimine göre rezonans değişim gösteren bir sinyal algılanacaktır. Bu işarete Doppler işareti denilmektedir. Şekil 1.4' te örnek Doppler soğurum rezonansı verilmiştir. Burada lazer frekansı, sezyum atomlarının $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5, 4, 3)$ enerji geçişini tarayacak şekilde değiştirilmesi gerekmektedir. Doppler spektrumu, sezyum atomlarının temel enerji seviyelerindeki hız dağılımına karşılık gelmektedir ve çizgi kalınlığı yaklaşık 500 MHz civarındadır.



Şekil 1.4. Örnek Doppler çökmesi

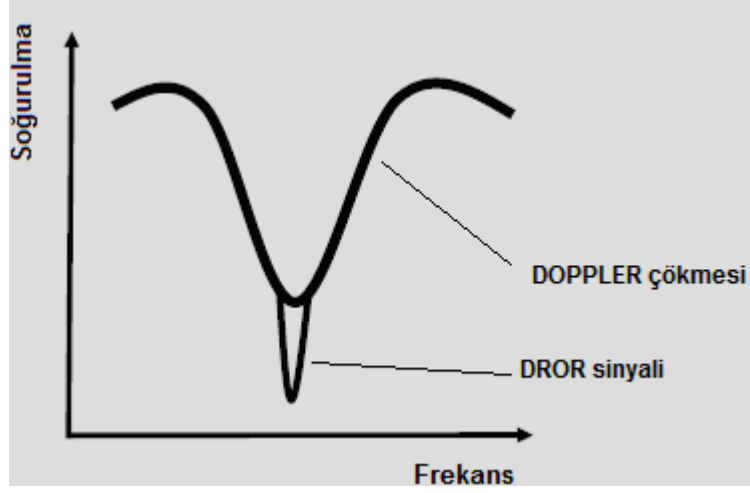
Lazer frekansı $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5, 4, 3)$ geçişlerini kapsayacak şekilde tarandığında lazer ışını, Doppler etkisi ile genişlemiş üç adet soğurum rezonansı, daha doğrusu, $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$, $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 3)$ enerji geçişlerine denk gelen üç rezonansı algılar. Her bir rezonansın çizgi kalınlığı yaklaşık 500 MHz'dir. Ancak tepeleri arasındaki fark sırasıyla 250 MHz ve 200 MHz olduğundan dolayı bu rezonans tek bir Doppler rezonansı olarak gözlenir. Bu üç rezonansın genlikleri de birbirinden farklıdır. Optik pompalama etkisinin çok az olduğu durumda, bu rezonansların genlikleri her enerji geçişine denk gelen atom grubunun fotonları soğurma ihtimaline bağlıdır. $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$, $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 3)$ enerji geçişleri için bu geçiş ihtimal değerleri sırasıyla 0.45, 0.2, 0.07 olarak bilinmektedir. Dolayısı ile deneysel olarak gözlenmesi planlanan Doppler soğurum spektrumu, aralarında sırasıyla 250 MHz ve 200 MHz olan ve genlikleri 0.45, 0.2 ve

0.07 ile orantılı üç spektrumun toplamı olacaktır. $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinden üst seviyeye çıkan atomlardan $6P_{3/2} (F = 5)$ ' e çıkanlar $\Delta F = \pm 1$ prensibine göre $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyesine gitmezler ve geri $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesine gelirler. $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 3) - 6P_{3/2} (F = 3)$ geçişindeki atomlar için ise durum farklıdır. Çünkü bu geçişler açık geçişlerdir ve atomlar üst seviyeden hem geri çıktıkları temel seviyeye hem de fotonlar tarafından etkilenmeyecek diğer temel enerji seviyesi olan $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyesine giderler. Bu grup atomların sayısı $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinde azalır ve dolayısı ile bunların gözlenen toplam Doppler spektrumunda onların etkisi ile iyice azalır. Optik pompalama olarak adlandırılan bu etmeden dolayı deneysel olarak gözlenen toplam Doppler spektrumu esas olarak $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$ geçişine uygun gelen atom grubu ile belirlenir. Lazer ışımalarının gücü arttıkça $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesindeki atomlar daha etkin bir şekilde kullanılmayan diğer temel seviyeye yani $6S_{1/2} (F = 3)$ ' e pompalanırlar dolayısı ile esas kullanılan seviyede $[6S_{1/2} (F = 4)]$ sayıları azalır.

1.3. Lazer-Atom-Mikrodalga Etkileşimi ve Çift Radyo-Optik Rezonans

Lazer frekansı, sezyum atomlarının $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ enerji geçişlerine denk gelecek şekilde ayarlandığı zaman deneysel küvet içindeki atomlar, $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinden $6P_{3/2} (F = 4)$ olan üst seviyeye çıkarlar ve oradanda spontan olarak bu atomların bir kısmı geri $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesine, diğer kısmı ise kullanılmayan $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyesine giderler. Bu optik depolama sonucunda da temel seviye olan $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesindeki atom sayısı azalır ve bu seviyeden $6P_{3/2} (F = 4)$ seviyesine ayarlanan lazer soğurumu da azalır. Sabit lazer frekans değerinde ve sabit lazer gücünde bu işlem kısa süre içerisinde dengeye gelir. Dolayısı ile sezyum küvetinin içinden geçen sabit frekanslı ve sabit güçlü lazerin fotodiyot üzerinde algılanması sonucunda zaman içinde değişmeyen sabit sinyal algılanır. Bu şartlar altında sezyum küvetinin üzerine mikrodalga gönderildiğinde, bu mikrodalganın frekansı iki temel seviye olan $6S_{1/2} (F = 3)$ ve $6S_{1/2} (F = 4)$ arasına denk gelen frekansı (Ω_0) içerecek şekilde yaklaşık ± 10 MHz tarandığında mikrodalga frekansı Ω_0 ' a denk geldiğinde $6S_{1/2} (F = 3)$ alt seviyedeki atomlar mikrodalga ışımalarını soğurarak üst seviye olan $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesine geçerler. Bu geçiş sonucunda $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesindeki atomların sayısı arttığı için $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ geçişine ayarlanmış lazerin soğurumu artacaktır böylece sezyum küvetinden geçen

lazerin soğurum rezonansı artış gösterecektir. Bu da, tez çalışması kapsamında deneysel olarak gözlenip hassas elektromanyetik dalga ölçme işlemlerinde kullanılacak, hedefimiz olan Şekil 1.5’ de gösterilen, çift radyo-optik rezonansa (DROR) sebep olmaktadır.

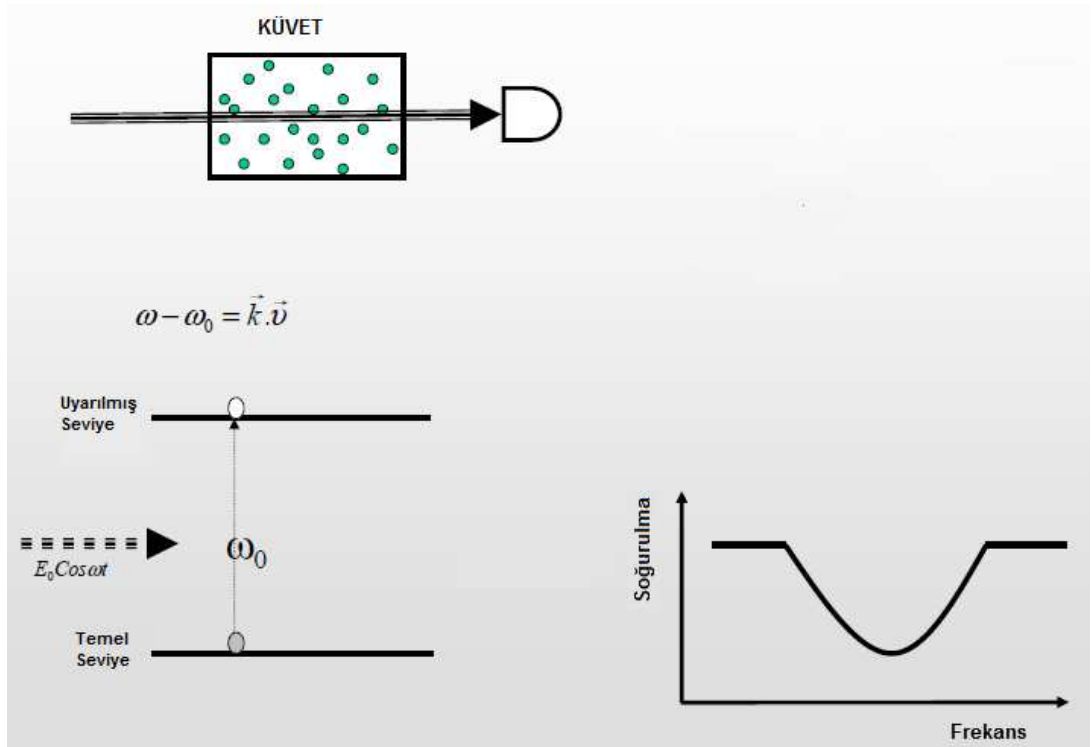


Şekil 1.5. Doppler çökmesi üzerinde DROR işareti

2. ELEKTROMANYETİK DALGALARIN SERBEST UZAYDA UZAK ALAN KOŞULLARINDA ÖLÇÜMÜ

2.1. Uygulanan Yöntem

Araştırmanın ilk aşaması olan bu çalışmada, bir önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere hedef frekans olan 9 GHz' e oldukça yakın enerji geçiş spektrumu bulunan sezyum gazı kullanılmıştır. Kullanılan sezyum atomunun kütle sayısı 133, atom sayısı 55 olup 6s enerji düzeyinden 6p enerji düzeyine uyarılmalar 852 nm dalga boylu lazer ile gerçekleştirilmektedir. 6s düzeyinin kendi içerisindeki iki alt düzeyi arasındaki geçişler ise 9,192 GHz frekanslık mikrodalga ile sağlanmaktadır.



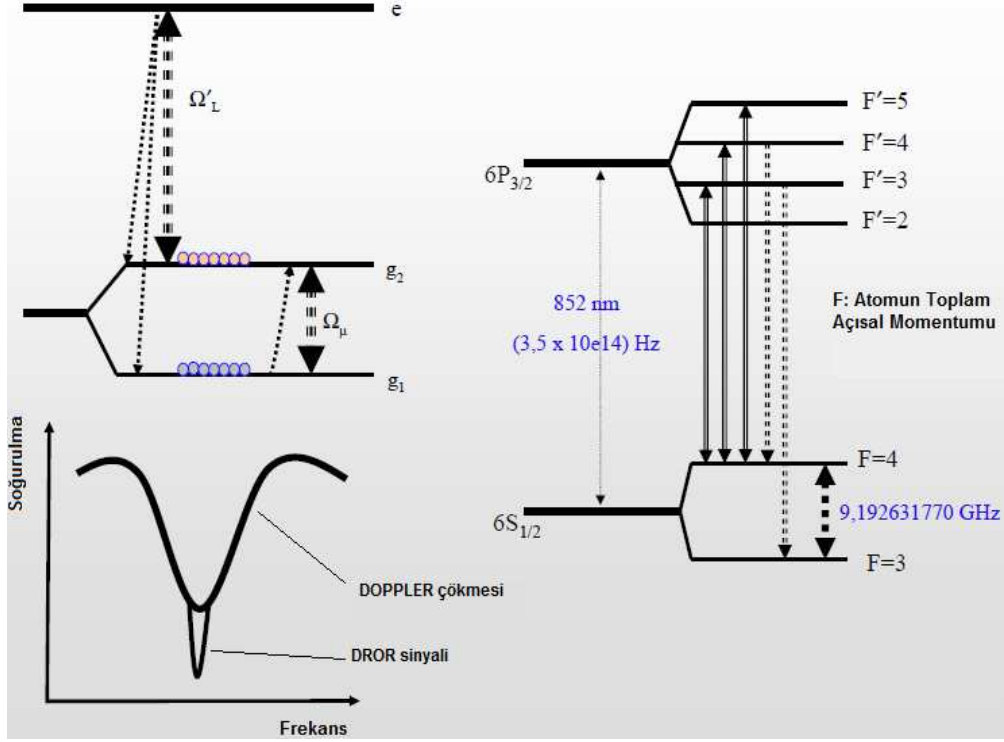
Şekil 2.1. Lazer - Atom etkileşimi ve Doppler çökmesi

Bir cam tüp içerisindeki sezyum gazı atomları ilk olarak 852 nm dalgaboylu bir lazer ışığı ile uyarılarak Şekil 2.1' de görüldüğü üzere Doppler çökmesi elde edilir. Bu Doppler çökmesi, lazer ışığının sezyum atomlarını uyararak 6s → 6p geçişini yapmasını sağlayarak kendisinin enerji kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. 6s → 6p

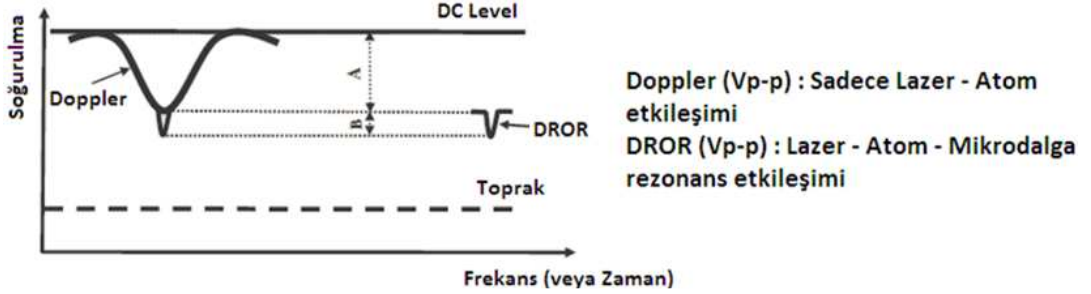
enerji geçişinden dolayı lazer ışığı, dalga boyu sadece 852 nm (350 THz) iken enerji kaybetmekte (yani sezyum atomları ile etkileşime girmekte) bunun dışında atomla etkileşime girmemektedir. Bunun sonucu olarakta alıcı tarafta Doppler çökmesini oluşturmaktadır. Bu Doppler çökmesinin detaylı gösterimi ise Şekil 2.1' de verilmiştir. Şekil 2.1' de görüldüğü üzere lazerdeki enerji kaybı sadece ω_0 (350 THz) ve civarında olmakta diğer lazer frekanslarında herhangi bir etkileşim söz konusu olmamaktadır.

6s düzeyinden 6p düzeyine çıkarılan atomlar çok kısa süre içerisinde foton yayarak tekrar eski enerji düzeyleri olan 6s seviyesine dönmektedirler. Uygulanacak ve ölçümü yapılacak mikrodalga ise bu Doppler çökmesinde ikinci bir çökme (DROR) oluşturur. Bunun nedeni ise uygulanan mikrodalga'nın (9,192 GHz) 6s düzeyindeki alt iki enerji düzeyinde atom geçişleri sağlayarak lazerin etkileşime gireceği atom sayısını arttırmasından kaynaklanmaktadır bunun sonucu olarakta lazerin daha fazla atomla etkileşime girerek daha fazla enerji kaybetmesine sebep olur. Bu ikinci çökmenin (DROR) seviyesi direkt olarak mikrodalga'nın şiddetine bağlıdır. Şekil 2.2' de lazer-atom etkileşimine ek olarak mikrodalga'nın da uygulanması ile oluşan DROR çökmesi ve sezyum atomunun tez kapsamında kullanılacak enerji geçişlerinin detayları bulunmaktadır. Şekil 2.3' te ise osiloskopta görülmesi beklenen Doppler ve DROR işaretlerinin daha detaylı gösterimleri bulunmaktadır. Bu metot kullanılarak, hassas mikrodalga ölçümleri ilk olarak sinüs (CW) modunda ardından da klasik metotların ölçümünde genelde yetersiz kaldığı darbe (Pulse) modunda yapılmıştır.

Zeeman geçişleri ise frekans bandının genişletilerek klasik geniş bantlı anten ölçümlerine yenilikler getirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Zeeman enerji geçişleri normalde var olmayıp atomlara dış DC manyetik alan uygulandığında ortaya çıkan kHz veya MHz mertebelerinde enerji geçişleridir. Bu Zeeman enerji geçişlerinin de kullanılarak daha düşük frekanslı elektromanyetik dalga/anten ölçümleri ileriki bölümlerde incelenecektir.

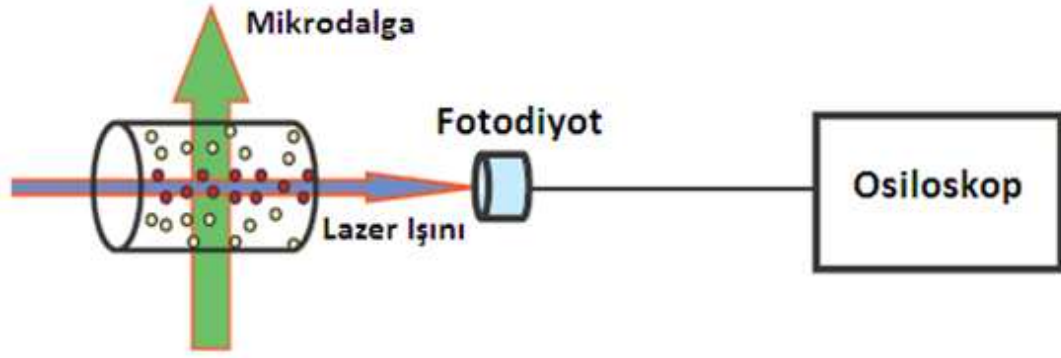


Şekil 2.2. Doppler, DROR çökmeleri ve sezyum atomunun araştırmada kullanılacak enerji geçişleri



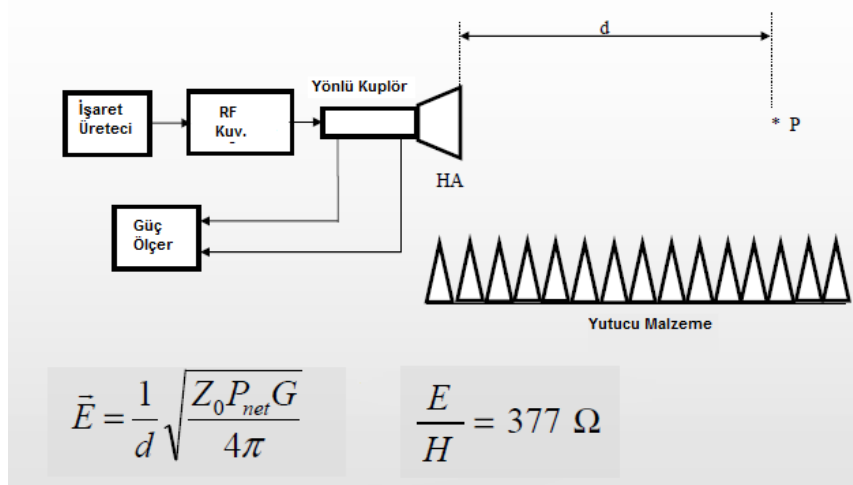
Şekil 2.3. Osiloskop ekranında gözlenen Doppler ve DROR işaretleri

Yapılacak araştırmanın temelini oluşturan ölçüm düzeneği Şekil 2.4' te sunulmuştur. Şekil 2.4' ten görüldüğü üzere lazer ışığı cam küvet içindeki atomik gazla etkileşime girerek alıcı kısımda Doppler çökmesini oluşturmaktadır, bu sırada uzak alan koşulları sağlanmış horn anten ile mikrodalga uygulanarak lazer – atom – mikrodalga üçlü etkileşiminin sonucu olarak Doppler çökmesi üzerinde bir ikinci çökme (DROR) açığa çıkarır. Bu ikinci çökme mikrodalgadan kaynaklanan çökme olup analiz edilip tez kapsamında mikrodalganın seviyesinin hassas ölçümünde kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Araştırmanın temelini oluşturan ölçüm düzeneği

Tez kapsamında yapılacak araştırmanın mikrodalga üretim kısmı ile ilgili kurulan düzenek ise Şekil 2.5' ta sunulmuştur. Bir işaret üretici ile üretilen düşük seviye mikrodalga işaret bir yükseltici vasıtasıyla, girişinde yönlü kuplör (directional coupler) olan bir horn antene yönlendirilmektedir. Yönlü kuplör, antene aktarılan net gücün dolayısıyla hedef noktada oluşturulan hedef elektrik/manyetik alan seviyesinin teorik değerinin hesaplanmasında kullanılır.

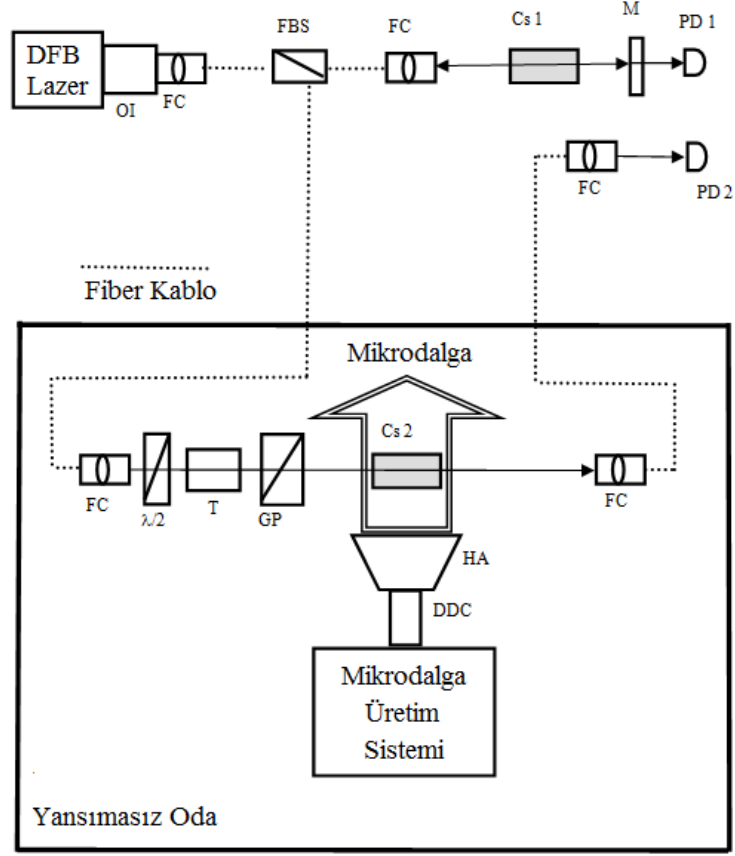


Şekil 2.5. Araştırmanın mikrodalga üretim kısmı ve elektrik alanın teorik değeri

2.2. Deney Düzeneği

Yansımatsız oda içerisinde uzak alan koşullarında elektromanyetik dalga ölçümleri için kurulan taşınmaz yapıdaki araştırma kapsamındaki ilk ölçüm düzeneğinin tam şematik diyagramı Şekil 2.6' da, fotoğrafı ise Şekil 2.7' de sunulmuştur. Ölçüm düzeneği bir optik ve bir mikrodalga kısmı olmak üzere iki ana temel kısımdan

oluşmaktadır. Optik kısımda $6S_{1/2}$ ($F=4$) ve $6P_{3/2}$ ($F'=3,4$ ve 5) enerji seviyelerini tarayan bir lazer kaynağı bulunmaktadır.



Şekil 2.6. Deney düzeneğinin blok şeması

Şekil 2.6' dan da görüleceği üzere lazer ışığı ilk olarak optik izolatör (optic isolator - OI) ve fiber kuplajlayıcı (fiber coupler - FC)' dan geçerek bir fiber ışın ayırıcı (fiber beam splitter - FBS) ile 10/90 oranında ikiye ayrılır. Lazer ışın parçalarından biri (%10' luk kısım) küvet 1 (Cs1), diğeri (%90' luk parça) ise küvet 2 (Cs2) ile etkileşir. Cs1 küveti referans küvet olup oda dışında, Cs2 küveti ise ölçümlerin yapılacağı sensör olup yansımaz oda içerisinde konuşlandırılmıştır. Fiber optik ile sonlandırılmış bir FC kullanarak % 10' luk lazer ışını Cs1 küveti üzerinden geçirilir ve %99 yansıtma özelliği olan bir düz aynadan (M) yansıtılarak geriye gönderilir. İletilen lazer ışını ilk fotodiyot (PD1) ile algılanır ve osiloskop ile gözlenir. Ölçümlerimizde kullandığımız referans küvetin (Cs1) boyutları 5 cm (boy) x 2 cm (en)' dir. Referans küvet oda dışında olduğu için çevreden gelen manyetik alanlardan etkilenmemesi için çevresi ekranlanmıştır. Lazer ışığının diğeri %90' luk kısmı ise bir

FC çıkışlı 50 m' lik bir fiber kablo ile yarı yansız oda içerisine gönderilir. Bu lazer ışını bir $\lambda/2$ dalga düzlemi ($\lambda/2$ wave plate), bir teleskop (telescope -T), bir glan polarizör (glan polarizer - GP) aracılığıyla Cs2 küveti içerisinden geçirilerek yine 50 m' lik her iki ucunda FC bulunan fiber optik kablo ile yarı yansız oda dışında bulunan ikinci fotodiyot olan PD2' ye getirilir ve algılanır. Ölçümlerde kullanılan fiber kablolar tek modlu (single mode) ve polarizasyona duyarlı kablolardır. Teleskop ve glan polarizör ise lineer polarizeli lazer ışığı ve daha etkili kesit alanı için kullanılmıştır. Küvetlerden geçen lazer ışığının çapı yaklaşık 3 mm olarak ayarlanmıştır.

Ölçümler sırasında, diyot lazer kaynağının sıcaklığı (25 GHz/K) ve akımı (1GHz/mA) uygun olarak değiştirilerek lazer frekansı sezyum atomlarının $6S_{1/2}$ (F=4) ve $6P_{3/2}$ (F'=3,4 ve 5) geçişini yapacak şekilde ayarlanmıştır. Sabit lazer sıcaklığında, DC lazer akımı, bir düşük frekans işaret üretici kullanılarak 9 Hz testere işareti ile modüle edilmiş ve tarama aralığı osiloskop üzerinde görülür hale getirilmiştir ki bu işleme akord kaydırma (detuning) işlemi denilmektedir. Bu işlemler sonrasında Şekil 2.8' den görüleceği üzere osiloskop ekranında Cs1 (küvet 1) küvetinden Doppler-İçi Rezonanslar ile birlikte Doppler spektrumu gözlenirken, Cs2 (küvet 2) küvetinden ise sadece Doppler spektrumu gözlenmiştir. Ölçümlerde bu iki spektrum lazer frekans ayarlanması, gözlenmesi ve optik / mikrodalga etkisiyle $6S_{1/2}$ (F=4) ve $6S_{1/2}$ (F=3) arasındaki atom pompalamasının verim kontrolü için kullanılmıştır. Ölçümlerde referans küvet (Cs1) girişindeki lazer gücü 0,33 mW ve şiddeti $4,7 \text{ mW/cm}^2$ iken, çalışma küveti (Cs2) girişindeki değerler bu değerlerin 9 katıdır. Lazer gücü arttıkça taban $6S_{1/2}$ (F=4) durumundan diğer taban durumu $6S_{1/2}$ (F=3) geçiş artar ve bu artış $6S_{1/2}$ (F=4) - $6S_{3/2}$ (F') optik geçişlerini azaltacak dolayısıyla optik yutulma azalacaktır. Bu nedenle Şekil 2.8' de referans küvetten elde edilen Doppler soğurulması, çalışma hücrelerinden elde edilenden çok daha büyüktür çünkü referans küvete toplam üretilen lazerin sadece %10' u, çalışma küvetine ise %90' u gönderilmektedir. Ölçümlerde lazer ışığının sezyum atomları ile etkileşimi $6S_{1/2}$ (F=4) ve $6P_{3/2}$ (F'=3,4 ve 5) geçişinde oluşur iken, mikrodalga'nın sezyum atomları ile etkileşimi $6S_{1/2}$ (F=3) ve $6S_{1/2}$ (F=4) enerji geçişinde gerçekleşir.

Ölçüm düzeneği ve mikrodalga sistemi, 10 m ölçüm mesafeli ve 40 GHz' lik kesim frekansı olan yarı yansız odada kurulmuştur. Düzeneğin mikrodalga üretim

kısmı bir mikrodalga işaret üretici, mikrodalga güç yükseltici, çift yönlü kuplör ve standart kazançlı horn anten içermektedir. Horn anten girişindeki net gücü ölçmek için çift yönlü kuplör ve iki adet güç sensörü kullanılmıştır. Bilinen net güç ve bilinen anten kazancı ile kontrollü bir mikrodalga sezyum çalışma küveti üzerine gönderilebilmiştir. Mikrodalğanın gönderilmesi ile çalışma küvetinden (Cs2) elde edilen Doppler işareti üzerinde ayrıca DROR işareti gözlenmeye başlanmıştır. Bu gözlem sırasında lazer frekansı $6S_{1/2}$ ($F=4$) ve $6P_{3/2}$ ($F'=4$) geçişi yapacak şekilde, mikrodalga ise 9,192 GHz merkez frekansını tarayacak şekilde ayarlanır. DROR işaretinin, lazer ve mikrodalgaya olan fonksiyonunun incelenmesi için modülasyonlu mikrodalga kullanılmıştır. Bunun için mikrodalga üretici 125 Hz' lik (4 ms darbe genişliği, 8 ms darbe periyodu) bir iç modülatör ile ayarlanmıştır. Bu 125 Hz frekansı, aynı zamanda DROR ölçümü sırasında Lock-In Amplifier için referans işaret olarak uygulanmıştır. DROR ölçümü ve sensörün darbe cevabı ölçümleri dışındaki tüm ölçümler için ise mikrodalga üretici sürekli dalga (CW) modunda kullanılmıştır.

Ölçümler sırasında sezyum çalışma küveti (Cs2) küveti ve horn anten ucu arasındaki mesafe yaklaşık 75 cm olarak ayarlanmış, böylece $2D^2/\lambda$ formülü kullanılarak horn anten için 73 cm olarak hesaplanan uzak alan koşulu sağlanmıştır. Burada anten boyutu $D \approx 12$ cm ve $\lambda \approx 3,3$ cm ($f = 9,192$ GHz)' dir. Hesaplanan manyetik alan değeri horn antenden yaklaşık $d \approx 75$ cm' de formül (2.1) ve formül (2.2) ile teorik olarak hesaplanır.

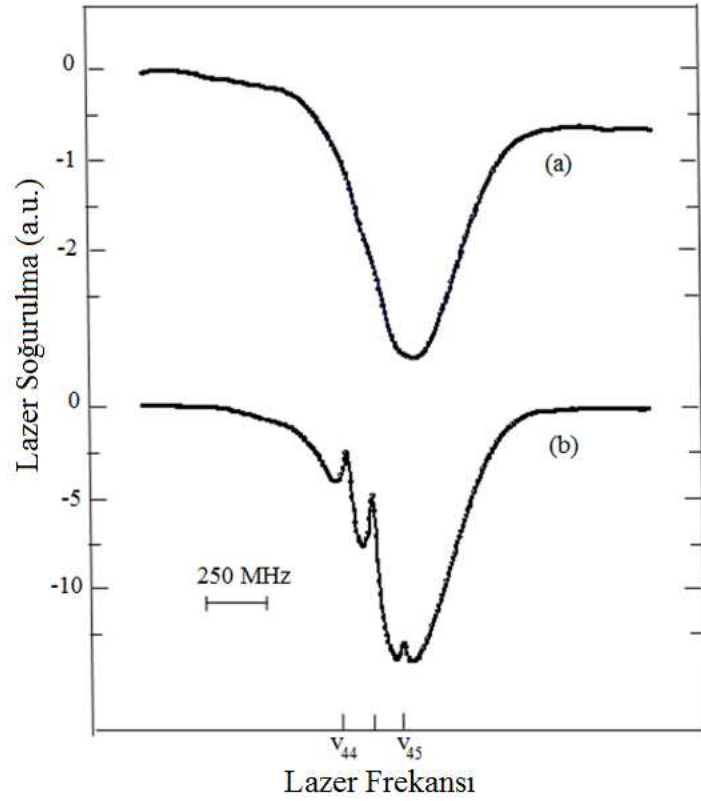
$$E = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\eta_0 P_{net} G}{4\pi}} \quad (2.1)$$

$$\frac{E}{H} = 377 \Omega \quad (2.2)$$

Burada η_0 serbest uzay karakteristik empedansı 377Ω , P_{net} (W) anten girişindeki net güç değeri ve d (m) ise mesafedir. Sezyum çalışma küveti, horn antenin ön uç merkezine tam karşısına, zeminden 120 cm yükseklikte yerleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Yansımaz oda içerisindeki taşınmaz yapıdaki ölçüm düzeneği

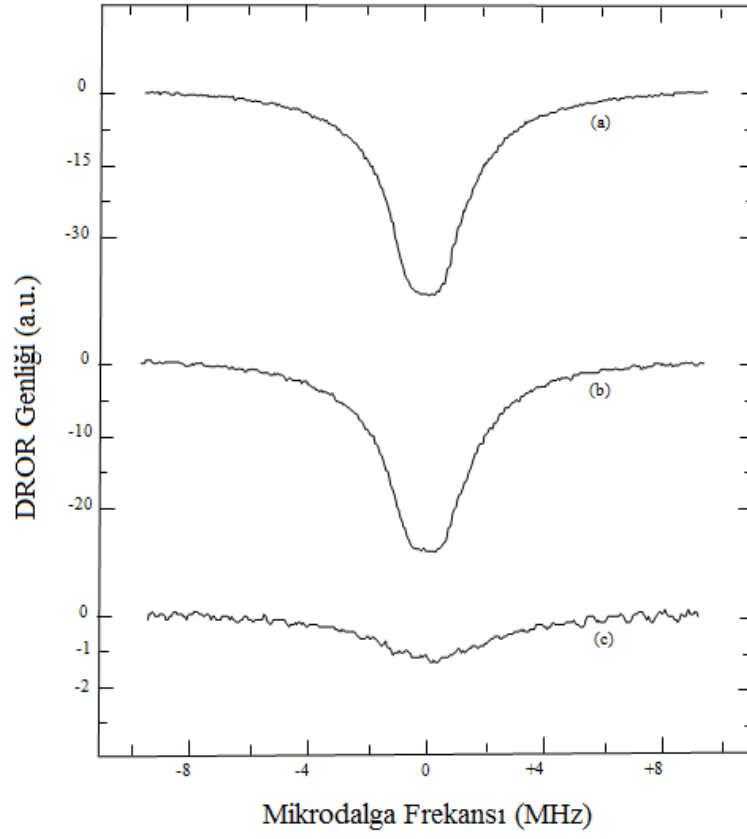


Şekil 2.8. (a) Çalışma kuvvetinde Doppler soğurulma spektrumu, (b) Referans kuvvetinde Doppler-içi rezonansları içeren Doppler soğurulma spektrumu

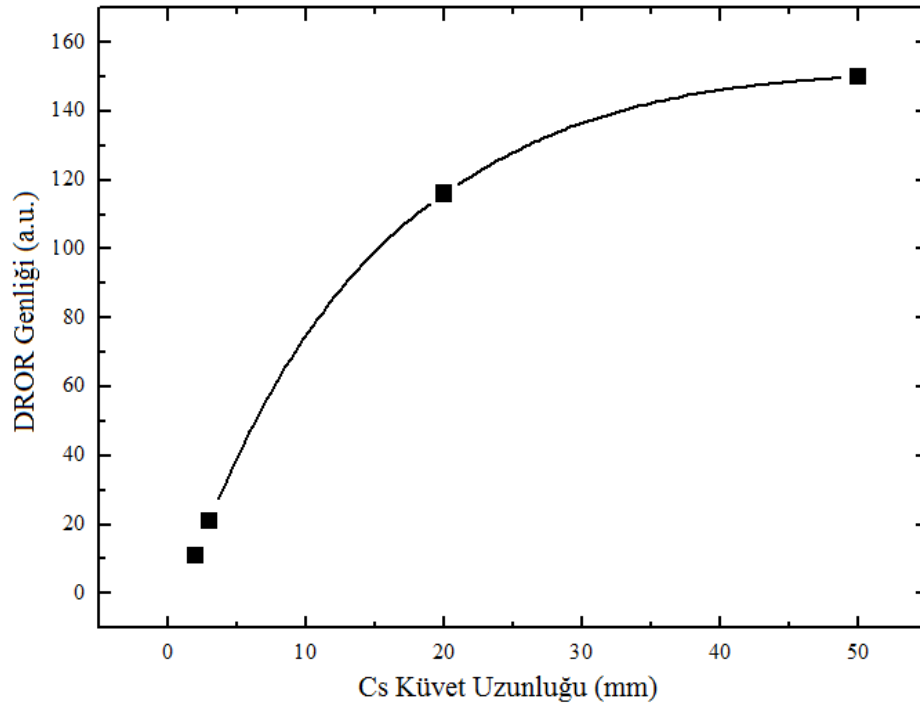
2.3. Deneysel Sonuçlar

Ölçümler sonucunda elde edilen, sabit lazer ve mikrodalga gücünde çeşitli küvet boyutlarındaki DROR işaretinin mikrodalga frekans tarama bilgisine göre görüntüsü Şekil 2.9’ da sunulmuştur. Bu ölçümde, lazer frekansı $6S_{1/2} (F=4) - 6S_{3/2} (F'=4)$ aralığında ayarlanmış olup CW mikrodalğanın frekansı ise $6S_{1/2} (F=3) - 6S_{1/2} (F=4)$ aralığına karşı gelen merkez 9,192 frekansının ± 10 MHz aralığında taranmıştır. $6S_{1/2} (F=4)$ taban enerji durumundaki atomlar lazeri yutarak $6S_{3/2} (F'=4)$ uyarılmış enerji düzeyine çıkar ve kısa süre içerisinde anlık emisyonlar yayarak $6S_{1/2} (F=3)$ veya $6S_{1/2} (F=4)$ taban enerji düzeyine düşerler. Bu nedenle, bu etkileşim $6S_{1/2} (F=4)$ düzeyindeki atom sayısını azaltırken $6S_{1/2} (F=3)$ düzeyindeki atom sayısını arttıracaktır. Tam bu anda mikrodalga uygulandığında, $6S_{1/2} (F=3)$ düzeyindeki atomlar $6S_{1/2} (F=4)$ düzeyine uyarılmaya başlanacak ve mikrodalga etkisiyle $6S_{1/2} (F=4)$ düzeyindeki atom sayısı artmaya başlayacak ve bu da lazer ile etkileşime giren atom sayısının artması anlamına gelecektir. Bunun sonucu olarakta lazer daha fazla enerji kaybederek Şekil 2.9’ da deneysel olarak ölçülen DROR (Double Radio Optical Resonance) işareti gözlenecektir. DROR tanım olarak lazer ve mikrodalğanın birlikte atomlarla etkileşimi sonucunda elde edilen rezonansa verilen isimdir. DROR işleminde lazer, atomları $6S_{1/2} (F=4) - 6S_{3/2} (F'=4)$ enerji aralığında uyarırken, mikrodalga ise atomları $6S_{1/2} (F=3) - 6S_{1/2} (F=4)$ enerji aralığında uyarır.

Şekil 2.9’ daki tüm üç durumda da lazer ve mikrodalga polarizasyonu lineer (dikey) olarak tutulmuştur. Görülen spektrum oda sıcaklığında, 3 mW lazer gücünde ve 3 A/m manyetik alan için farklı küvet uzunlukları için, sırasıyla 50 mm, 20 mm ve 3 mm küvet için alınmıştır. Grafiklerden görüldüğü üzere küvet boyu azaldıkça lazer-atom-mikrodalga etkileşimi sonucunda elde edilen DROR genliğı azalmaktadır. Ölçülen DROR işaretinin genliğinin sezyum küvet boyuna olan bağımlılığı Şekil 2.10’ da gösterilmiştir. DROR genliğı sırasıyla 2 mm, 3 mm, 20 mm ve 50 mm sezyum küvet boyları için ölçülmüştür.

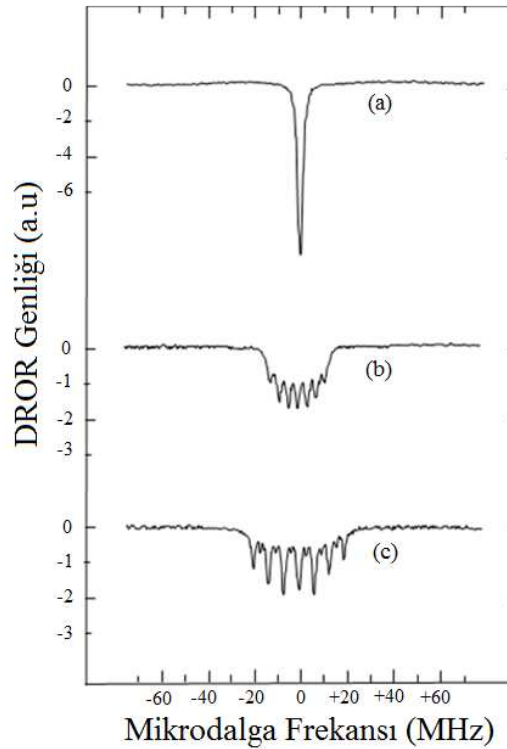


Şekil 2.9. DROR işaretinin spektrumu, (a) 50 mm küvet uzunluğu, (b) 20 mm küvet uzunluğu, (c) 3 mm küvet uzunluğu



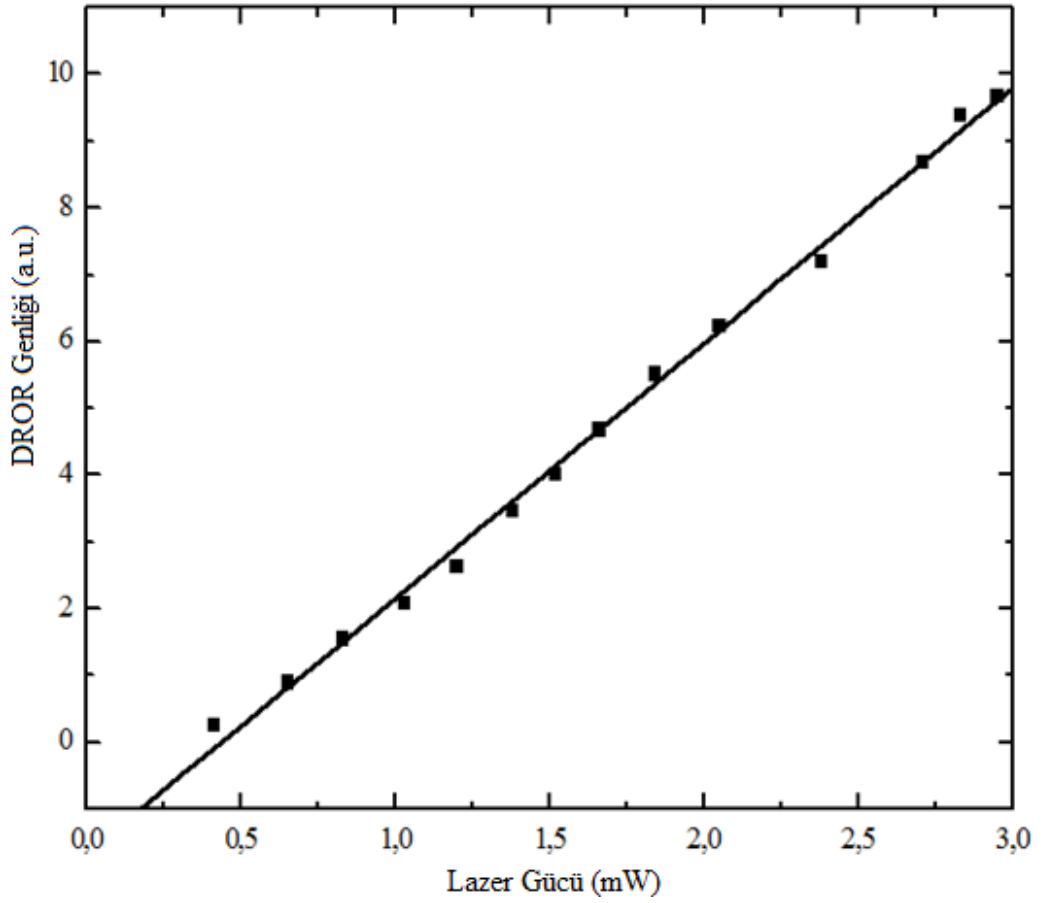
Şekil 2.10. DROR genliğinin sezyum küvet uzunluğuna bağımlılığı

Zamanla değişen EM dalgaları ölçmek için tasarlanmış bu sensörün DC manyetik alana olan davranışının gözlenmesi için bir Helmholtz halkası aracılığı ile ayrıca DC manyetik alan uygulanmıştır. DC manyetik alanın yönü mikrodalganın manyetik alanına ve lazer ilerleme yönüne paralel tutulmuştur. Sabit lazer ve mikrodalga gücünde, farklı DC manyetik alan değerlerinde gözlenen DROR spektrumu Şekil 2.11’ de sunulmuştur. Bu ölçümde mikrodalga işaret üretici CW modda, merkez 9,192 GHz olacak şekilde ± 60 MHz civarında taranmıştır. Gösterilen spektrumlar oda sıcaklığında, 3 mW lazer ve 3 A/m mikrodalga manyetik alanında sırasıyla $<0,2$ Gauss, 6,5 Gauss, 10,5 Gauss statik manyetik alanlarında kayıt edilmiştir. $6S_{1/2}(F=3, m_F) - 6S_{1/2}(F=4, m_F)$, $\nabla m_F=0$ enerji geçişlerine karşı gelen 7 dominant rezonans Şekil 2.11’ de görülmektedir. Bu ölçümde ayrıca lazer ve mikrodalga dikey polarizasyonda tutulmuştur. Horn antenin çıkışındaki EM ışımının tam lineer polarizasyonlu olmamasından veya çevredeki hafif yansımalarından dolayı azda olsa $\nabla m_F=0$ geçişlerine denk gelen 7 adet rezonansların arasında küçük genlikli ve $\nabla m_F \neq 0$ geçişlerine denk gelen rezonanslar gözlenmektedir.

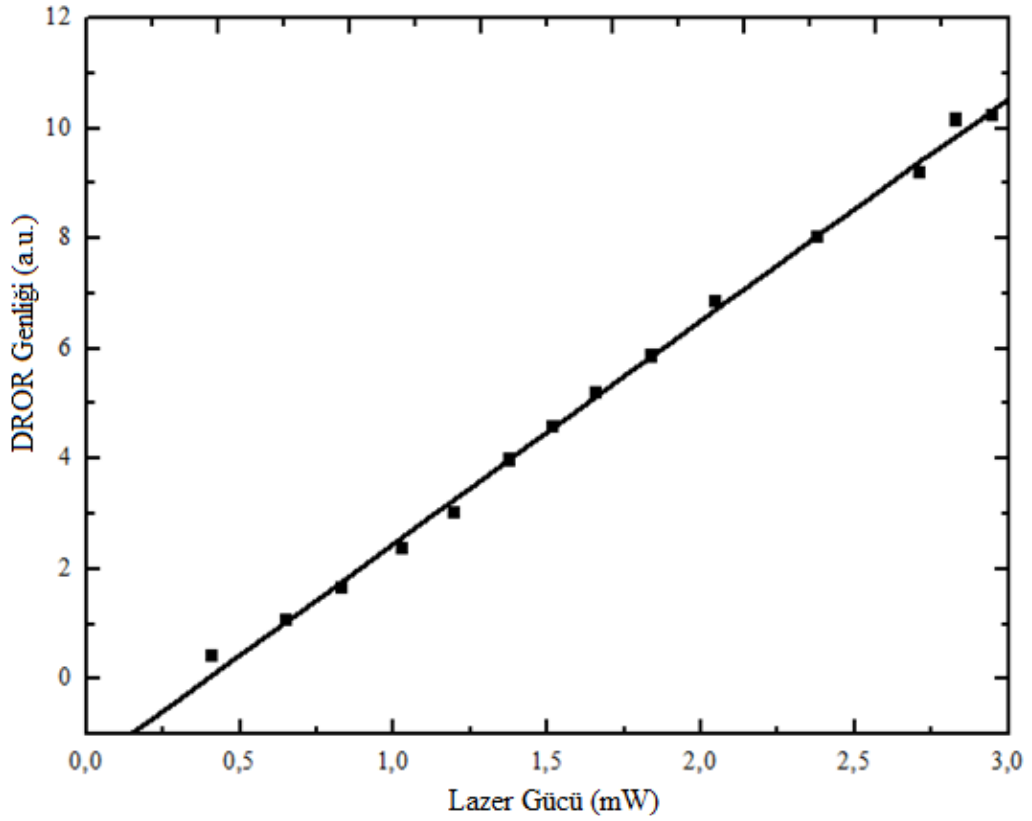


Şekil 2.11. DROR işaretinin Zeeman ayrışması, DC manyetik alan (a) $<0,2$ Gauss, (b) 6,5 Gauss, (c) 10,5 Gauss

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’ te ise DROR işaretinin lazer gücüne bağımlılığı sabit mikrodalga gücü $H = 3 \text{ A/m}$ ’ de ölçülmüştür. Bu ölçümde, mikrodalga üretici darbe modunda çalıştırılmıştır. 9,192 GHz frekansındaki mikrodalga 8 ms darbe periyodu ve 4 ms darbe genişliği ile modüle edilmiştir. Bu ölçümlerde lock-in amplifier kullanılmıştır. Kullanılan sezyum hücrenin boyu 50 mm’ dir. Lazer gücü 0,41 mW’ tan 2,95 mW’ a kadar optik zayıflatıcı kullanılarak ayarlanmıştır. Lazer ve mikrodalga dikey polarizasyonları için elde edilen sonuç Şekil 2.12’ de, dikey polarizasyonlu lazer ve yatay polarizasyonlu mikrodalga için Şekil 2.13’ te sunulmuştur. Bu şekillerden DROR - Lazer gücü ilişkisinin yaklaşık lineer olduğu tespit edilmiştir.



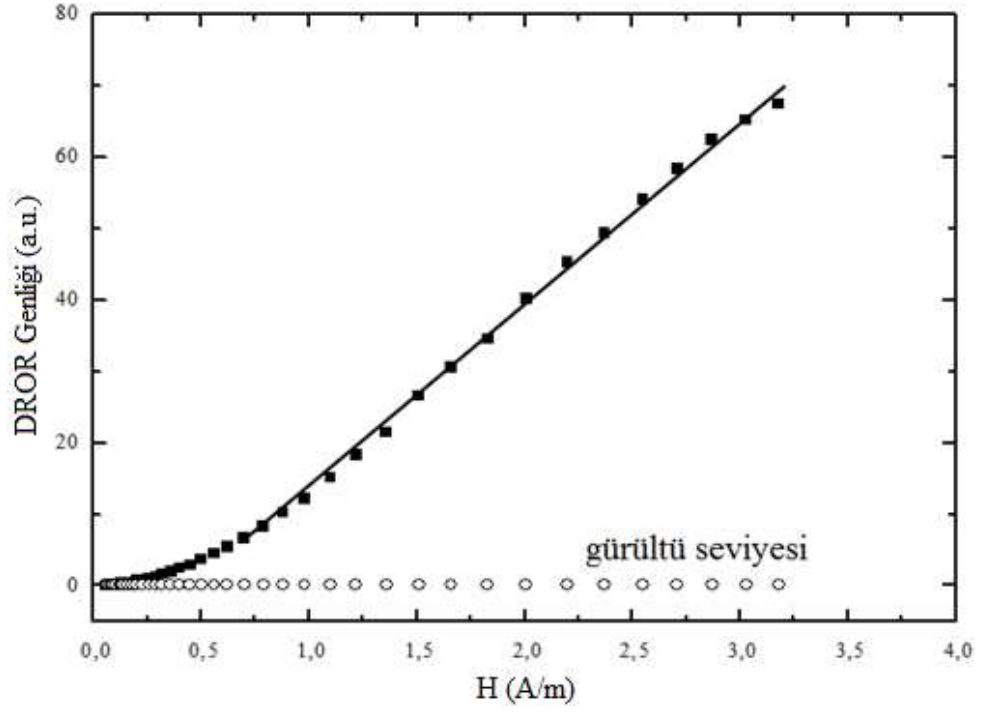
Şekil 2.12. Dikey polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve lazer gücü ilişkisi



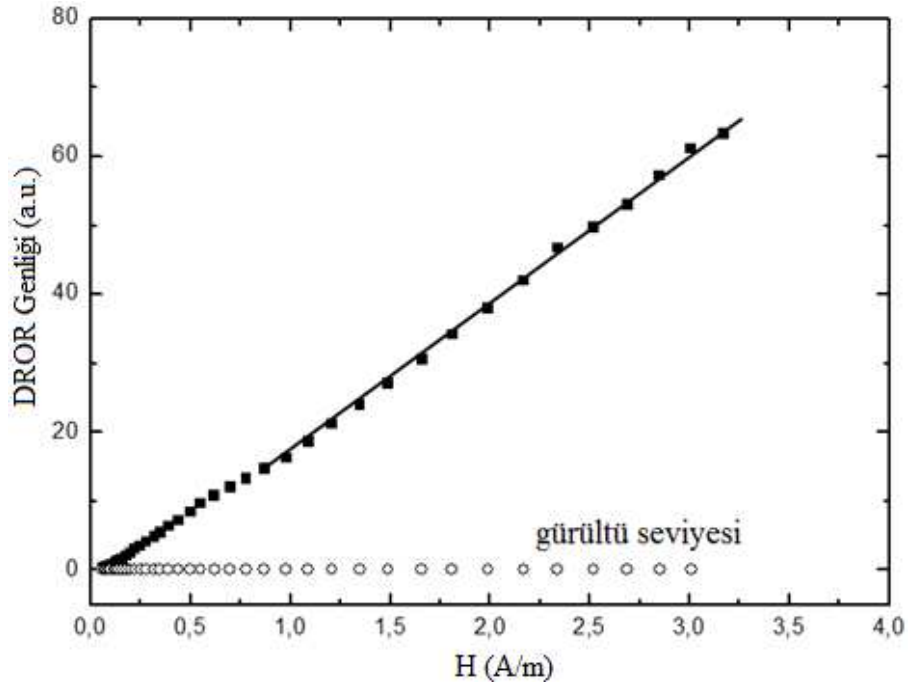
Şekil 2.13. Yatay polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve lazer gücü ilişkisi

Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’ de ise DROR genliğinin sabit 2,95 mW lazer gücünde mikrodalga genliğine olan bağımlılığı verilmiştir. Bu ölçümde mikrodalga, 100 μ s darbe periyodu ve 50 μ s darbe genişliği ile modüle edilmiştir. Bu ölçümde de 50 mm uzunluğundaki küvet kullanılmıştır.

Mikrodalğanın yatay polarizasyonu için elde edilen grafik Şekil 2.14’ de, dikey polarizasyonu için elde edilen grafik Şekil 2.15’ de sunulmuştur. Her iki ölçümde de elde edilen dinamik aralık yaklaşık 40 dB olarak tespit edilmiştir. Bu ölçümlerde lazer polarizasyonu dikey olarak kullanılmıştır. Kullanılan manyetik alan, ölçümlerde 0,06 A/m’ den 3,18 A/m’ ye kadar artırılmıştır. Bu ölçümde tespit edilen minimum mikrodalga seviyesi 0.06 A/m olup gürültü taban seviyesi olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.14’ te 0,06 A/m – 0,75 A/m aralığında küçük bir lineer olmayan bölge mevcut olup, Şekil 2.15’ te tüm aralık için lineer bir bağımlılık gözlenmiştir.



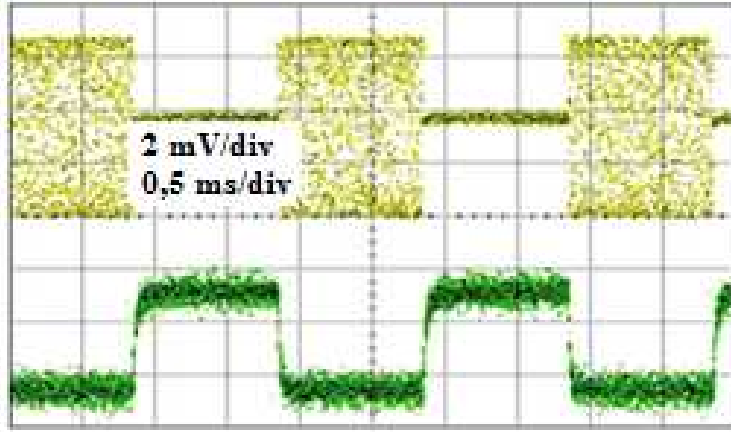
Şekil 2.14. Yatay polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve mikrodalga şiddeti grafiği



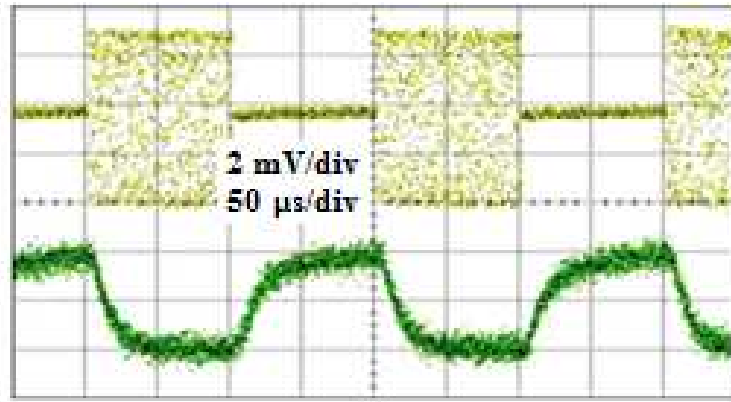
Şekil 2.15. Dikey polarizasyonlu mikrodalga için DROR genliği ve mikrodalga şiddeti grafiği

Tüm bu çalışmalardan sonra sensörün darbe modülasyonlu EM dalgalara karşı duyarlılık tespit çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda mikrodalga işaret üretici

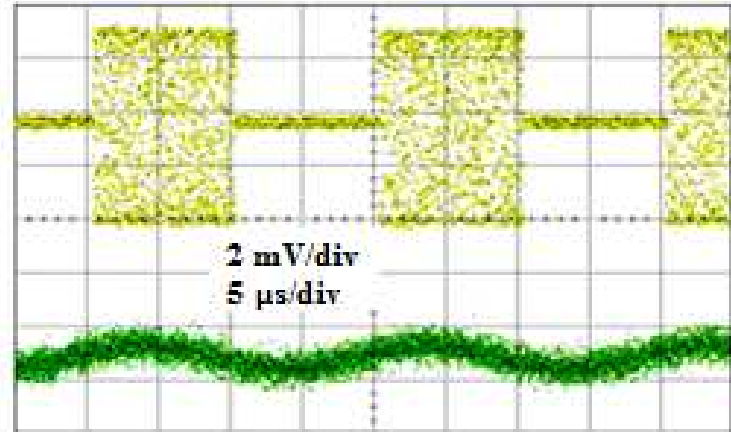
darbe modunda çalıştırılmıştır. Ölçümlerde 50 mm uzunluğundaki küvet ve 3 mm çaplı lazer demeti kullanılmıştır. Ayrıca verici antenden darbe modülasyonlu EM dalganın sorunsuz bir şekilde gönderildiğinin tespiti için ikinci bir anten küvet yakınlarına konarak havadaki küvete ulaşan EM dalga incelenmiştir. Bu ikinci horn antenden okunan işaret, DROR işareti ile birlikte eş zamanlı olarak yüksek hızlı 50 GHz bandgenişlikli bir osiloskop tarafından okunmuştur. Oda sıcaklığında sezyum atomlarının ortalama hızı yaklaşık $v=300$ m/s' dir. 50 mm uzunluğundaki lazer ışını boyunca, sezyum atomlarının uçuş süresi yani lazer-mikrodalga-atom etkileşim uzunluğu yaklaşık $T=L/v=160$ μ s' dir. Atomların bu lazer ışınına dikey olarak geçiş süresi ise $t=d/v=10$ μ s' dir. Kullanılan ikinci alıcı horn antenden ve PD2' den alınan işaretler Şekil 2.16' da sunulmuştur. Grafiklerde 3 farklı darbe modülasyonu için aynı skalada hem ikinci horn antenden alınan ve 50 GHz' lik osiloskoptan okunan işaret hemde atomik sensörden alınan DROR işareti gözükmektedir. Üstteki işaret, ikinci alıcı horn antenden gelen işaret olup, alttaki işaret atomik sensörden gelip PD2 aracılığı ile okunan DROR işaretidir. Darbe modülasyon parametreleri Şekil 2.16 (a)' da 2 ms darbe periyodu ve 1 ms darbe genişliği, Şekil 2.16 (b)' de 200 μ s darbe periyodu 100 μ s darbe genişliği ve Şekil 2.16 (c)' de 20 μ s darbe periyodu ve 10 μ s darbe genişliği olarak uygulanmıştır. Şekil 2.16 (c)' den görüldüğü üzere 20 μ s darbe periyotlu ve 10 μ s darbe genişlikli mikrodalga için DROR sinyali kaybolma eğilimi göstermektedir. Atomların lazer ve mikrodalga rezonans etkileşimi, uyarılma için femtosaniye düzeylerinde, anlık geri düşme için nanosaniyeler mertebesinde olmasına karşın, atomik sensörün 10 μ s mertebesindeki darbelere cevap verememeye başlaması atomların, lazer ışını en genişlediğinden kaynaklanan dikey geçiş süresi olan 10 μ s süresi ile açıklanabilir. Bu dikey geçiş süresi, darbeleri algılamada sensörü sınırlamaktadır. 50 mm uzunluğundaki küvet için ise $T=160$ μ s' lik yatay yolculuk süresi ise aşırı derecede bir algılama sınırlaması oluşturmamaktadır. Bundan emin olabilmek için 2 mm' lik küvetle benzer ölçümler tekrarlanmıştır ve sonuçlar aynı formatta Şekil 2.17' de gösterilmiştir. Bu çalışmada bir önceki çalışmadan farklı olarak Sinyal/Gürültü oranının düşüklüğünden dolayı osiloskop ortalama (average) modda çalıştırılmıştır. Sonuçta elde edilen grafikler şunu göstermiştir ki sensör yine 50 mm boyundaki küvette olduğu gibi 10 μ s' de limitlenmeye başlamaktadır. Bu durum görsel olarak Şekil 2.18' de özetlenmiştir.



(a)

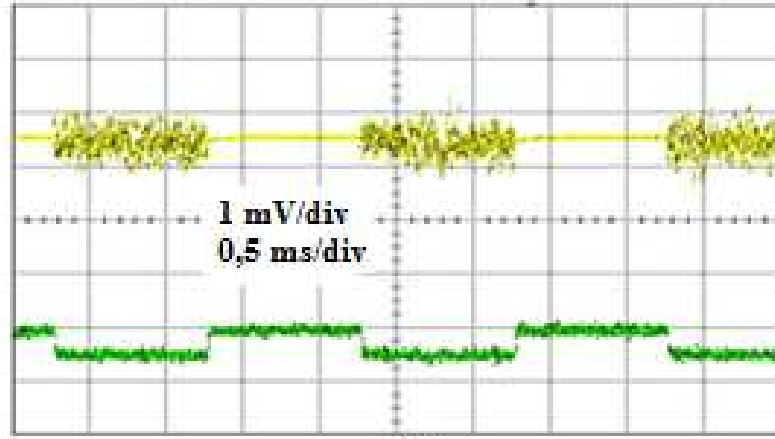


(b)

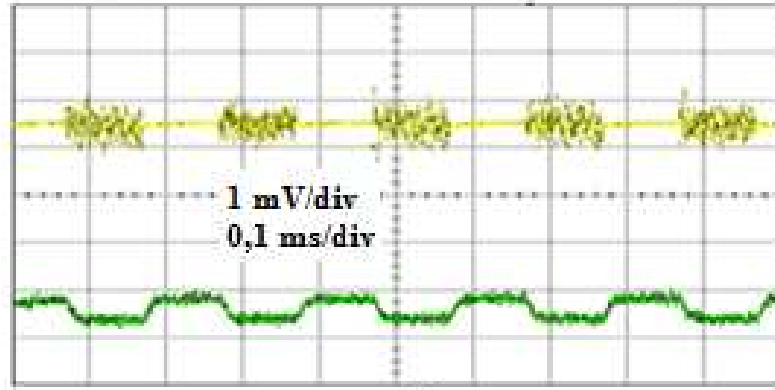


(c)

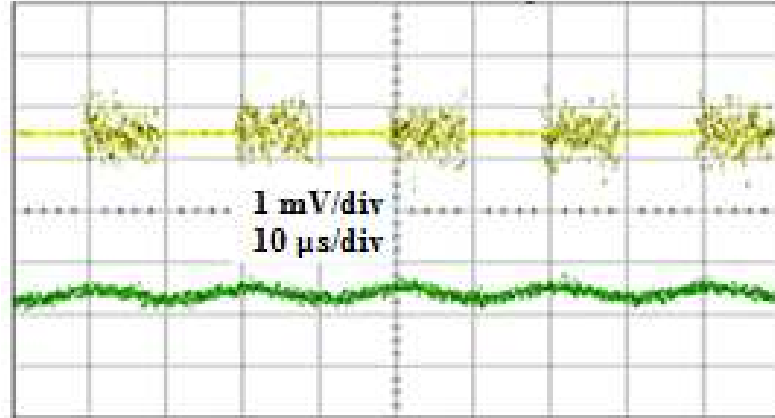
Şekil 2.16. 50 mm uzunluğundaki küvet için atomik sensörün darbe modülasyonlu mikrodalgaya tepkisi (üst grafik : ikinci horn anten, alt grafik : DROR işareti), (a) 2 ms darbe periyodu ve 1 ms darbe genişliği, (b) 200 μ s darbe periyodu ve 100 μ s darbe genişliği, (c) 20 μ s darbe periyodu ve 10 μ s darbe genişliği



(a)

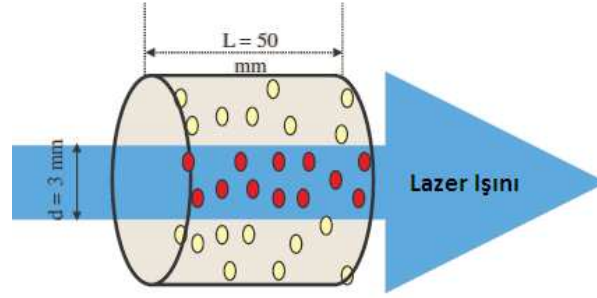


(b)



(c)

Şekil 2.17. 2 mm uzunluğundaki küvet için atomik sensörün darbe modülasyonlu mikrodalgaya tepkisi (üst grafik : ikinci horn anten, alt grafik : DROR işareti), (a) 2 ms darbe periyodu ve 1 ms darbe genişliği, (b) 200 μ s darbe periyodu ve 100 μ s darbe genişliği, (c) 20 μ s darbe periyodu ve 10 μ s darbe genişliği



$$v = 300 \text{ m/s (atom hızı @ } 23^\circ\text{C)}$$

$$T = L/v \approx 160 \mu\text{s}$$

Cs atomlarının lazer ışınına paralel uçuş süresi

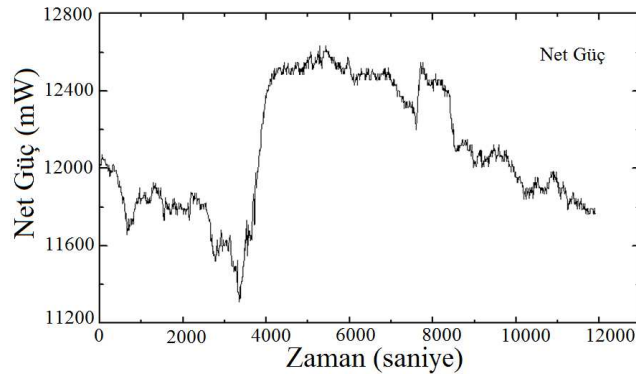
$$t = d/v \approx 10 \mu\text{s}$$

Cs atomlarının lazer ışığına dik uçuş süresi

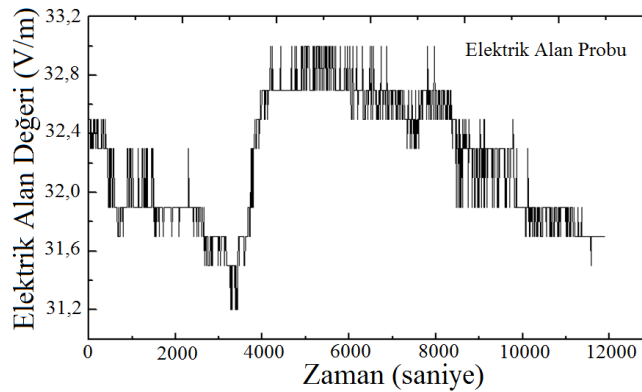
Şekil 2.18. 50 mm uzunluğundaki küvet için atom yolculuk sürelerinin gösterimi

Ölçümlerde kullandığımız mikrodalganın zamanla dalgalanmasının, ölçüm sonuçlarımızdaki etkisini görebilmek için mikrodalganın zamanla nasıl dalgalandığını tespit çalışması yapılmıştır. Mikrodalga genlik ölçümü için bir ticari izotropik alan probu küvet yakınlarına konularak hem atomik sensörden okunan DROR sinyali hemde izotropik alan probu eş zamanlı uzun bir periyotta okunarak dalgalanmaları incelenmiştir. Bu iki parametreye ek olarak ayrıca mikrodalgayı üreten horn antene aktarılan net gücün dalgalanması da güç sensörleri ve dual yönlü kuplörler aracılığı ile aynı zaman periyodunda incelenmiştir. Tüm kayıt işlemi yaklaşık 12000 sn periyodu içinde bilgisayar kontrollü olarak alınmıştır. Mikrodalga işaret üretici -15 dBm gibi nispeten düşük bir seviyeye ayarlanarak kablo, anten giriş konnektörü, mikrodalga güç yükseltici gibi istenmeyen ısınmalardan kaynaklanan ek gürültüler azaltılmıştır. Ek olarak bu ölçümde küvet bir peltier kontrollü bir sistem içine yerleştirilerek sıcaklığı sabit tutulmuş ve mikrodalgadan kaynaklanabilecek istenmeyen ısınmanın seviyesi azaltılmıştır. Net güçteki, ticari prob ile okunan elektrik alandaki ve DROR seviyesindeki 12000 saniye içerisindeki dalgalanma sırasıyla Şekil 2.19, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’ de sunulmuştur. Şekiller dikkatli bir şekilde incelendiğinde görülmektedir ki ilk 3500 saniyedeki zaman diliminde horn antene aktarılan net güç azalma eğilimi gösterdikten sonra sert bir şekilde artmış, 4200 saniyeden sonra tekrar düşüş eğilimi göstermiştir. Elektrik alan probu da

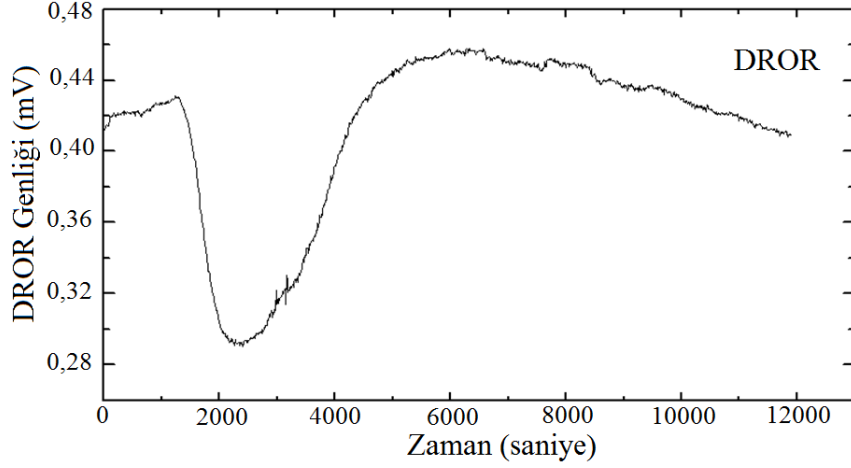
beklendiği gibi benzer bir davranış sergilemiştir. DROR ise biraz farklı bir davranış sergilemiştir. DROR ilk olarak 1300 saniyeye kadar yavaşça artış göstermiş, sonra 2300 saniyeye kadar sert bir şekilde düşmüştür. Bundan sonra 5300 saniyeye kadar sert bir çıkış ve sonra yavaş bir düşüş göstermiştir. DROR' un bu farklı davranışı peltiere rağmen sezyum küvetindeki mikrodalgadan kaynaklanan hafif ısı dalgalanmaları ile açıklanabilir. Küvet içindeki sezyum atomları hem gaz hemde katı, yani metal, halde bulunmaktadır. Küvet mikrodalgaya maruz kaldığında bu metalik kısım ısınmakta ve buharlaşma artmaktadır. Buharlaşmanın artması küvet içindeki gaz miktarını artırarak lazer ile etkileşen atom sayısını arttıracığından DROR sinyali artacaktır. Peltier kontrollü sisteme rağmen ölçüm grafiğindeki DROR' un ilk artışı bundan kaynaklanmaktadır. 2300 ve 5300 saniyeler arası ısısal denge peltier sistemi tarafından hemen hemen sağlanmıştır, bu nedenle bundan sonraki DROR davranışı, net güç ve izotropik alan probu ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 2.19. Uzun süreli ölçümde kaydedilen net güç dalgalanması



Şekil 2.20. Uzun süreli ölçümde kaydedilen elektrik alan probu dalgalanması



Şekil 2.21. Uzun süreli ölçümde kaydedilen DROR dalgalanması

EMC ölçümlerinde yönlü antenler ve izotropik alan sensörleri yoğun olarak kullanılmasına karşın, doktora tezi çalışmasında tasarlanan yeni atomik sensörün avantajları ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir. EMC testlerinde kullanılan EM kaynakları ana istenen frekans dışında birçok harmonik ve alt-harmoniklerde yaymakta ve kullanılan sensörler geniş bandlı olduklarından istenen istenmeyen tüm EM dalgaları okuyarak toplamını gösterirler. Bu geleneksel EM sensörlerinin en büyük dezavantajıdır. Tek frekanslı atomik sensörün en büyük avantajı ise hedeflenen frekans dışındaki hiçbir EM dalgaya cevap vermeyerek harmonik ve alt-harmoniklerin etkisi tamamiyle yok edilmektedir. Doktora tezi kapsamındaki tasarlanan sensör 9,192 GHz' i algılayarak bu frekansın harmonik ve alt-harmoniklerine cevap vermemektedir. Bu özelliği ile bu frekansta çalışan antenler ve sensörler için, örneğin SAR sensörleri ve antenleri için, hassas bir referans kalibratör olarak kullanılabilir. Farklı gazlar (Rb, Ca ve benzeri) ve farklı enerji geçişleri ile bir çok frekans için kalibratör üretilebilecek ve geniş bandlı antenlerin de kalibrasyonu mümkün olabilecektir. Çünkü geniş bandlı anten kalibrasyonları zaten spot frekanslarda yapılan bir işlemdir. Kısacası doktora tez kapsamında tasarlanan bu atomik sensörün ana hedefi direkt olarak EMC testlerinde kullanılmaktan çok EMC testlerinde kullanılan anten ve sensörlerin hassas kalibrasyonlarının yapılması ve dolayısıyla EMC testlerindeki belirsizliklerin daha da aşağıları çekilebilmesi olacaktır.

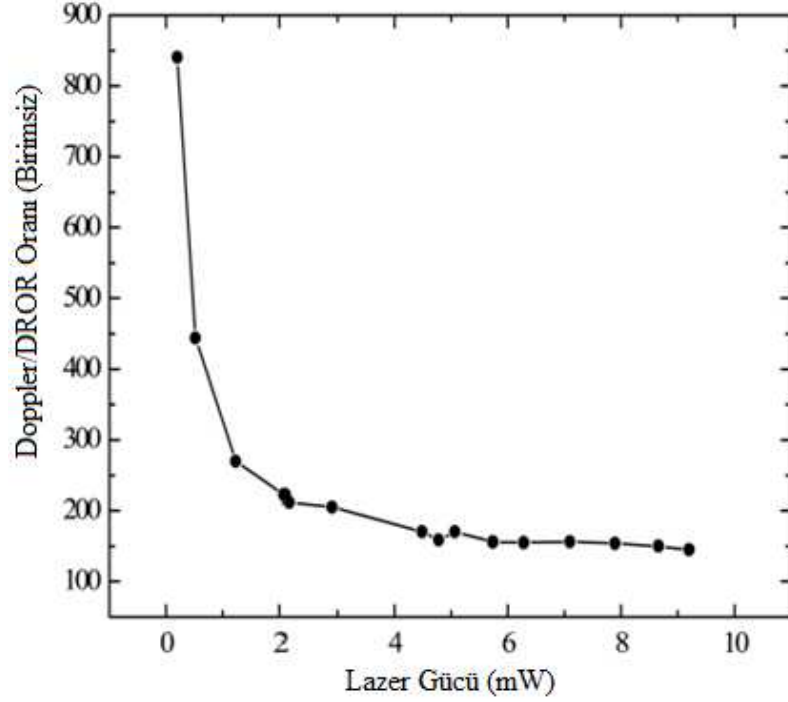
Bu ilk aşama ölçümlerde DROR işareti 0,06 A/m ile 3,18 A/m arasında ölçülebilmştir. Üst değeri laboratuvar ortamındaki cihazların gücü ile

sınırlandırılmış iken, alt değer ölçüm cihazlarının hassasiyeti ile sınırlanmıştır. Daha hassas ve güçlü cihazlar ile bu aralığın daha da genişletilebileceği aşikârdır.

Daha ileri ölçümlerde ise, atomik sensörden elde edilen sonuçların daha durağan ve tekrar üretilebilir olması için sadece DROR ölçümleri yerine Doppler/DROR oranı da incelemeye alınmıştır. Tekrar üretilebilirliği arttırmak ve daha durağan sonuçlar elde etmek için Doppler/DROR oranının kullanımının sadece DROR kullanımından daha etkili olabileceği görülmüştür. Rezonans etkileşim sırasında, lazer yayılımının elektrik alanı atomları $6S_{1/2}$ (F=4) enerji düzeyinden $6S_{3/2}$ (F'=4) uyarılmış düzeye sürmektedir, sonra uyarılmış atomlar tekrar $6S_{1/2}$ (F=4) ve $6S_{1/2}$ (F=3) taban durumuna anlık emisyon ile düşerler (Bakınız Şekil 1.1). Bu nedenle, bu etkileşim $6S_{1/2}$ (F=4) düzeyinde atom sayısını azaltıyor olmasına karşın, atomların $6S_{1/2}$ (F=3)' teki sayıları artmaktadır. Mikrodalga uygulandığında ise atomlar $6S_{1/2}$ (F=3) düzeyinden tekrar $6S_{1/2}$ (F=4) düzeyine sürülür. Artan lazer şiddeti, optik pompalama etkisiyle atomik soğurulmayı (Doppler) azaltmaktadır fakat diğer yandan DROR' u arttırmaktadır. Ek olarak, mikrodalga etkisiyle ise $6S_{1/2}$ (F=4) seviyesindeki atom sayısı arttığı için hem Doppler hem de DROR seviyesi artmaktadır. Hem lazer hem de mikrodalga etkisiyle oluşan belirtilen geçişler aynı zamanda geri pompalama etkisi yapar. Hepsinin sonucu olarak Doppler/DROR kullanımı 9,192 GHz' deki mikrodalga ölçümlerinde sadece DROR ölçümüne göre daha durağan ve tekrar üretilebilir sonuçlar vermektedir. Bu kapsamdaki ölçümler için ilk aşama olarak sabit küvet sıcaklığı (T=23 °C) ve sabit mikrodalga seviyesinde (E≈400 V/m) farklı lazer güçlerinde, Doppler soğurma genliği ve DROR ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Atomik soğurma (Doppler seviyesi), atomik pompalama etkisiyle azalmaktadır. Fakat atomik soğurmadan (Doppler) farklı olarak DROR seviyesi ise atomik pompalama etkisiyle artmaktadır.

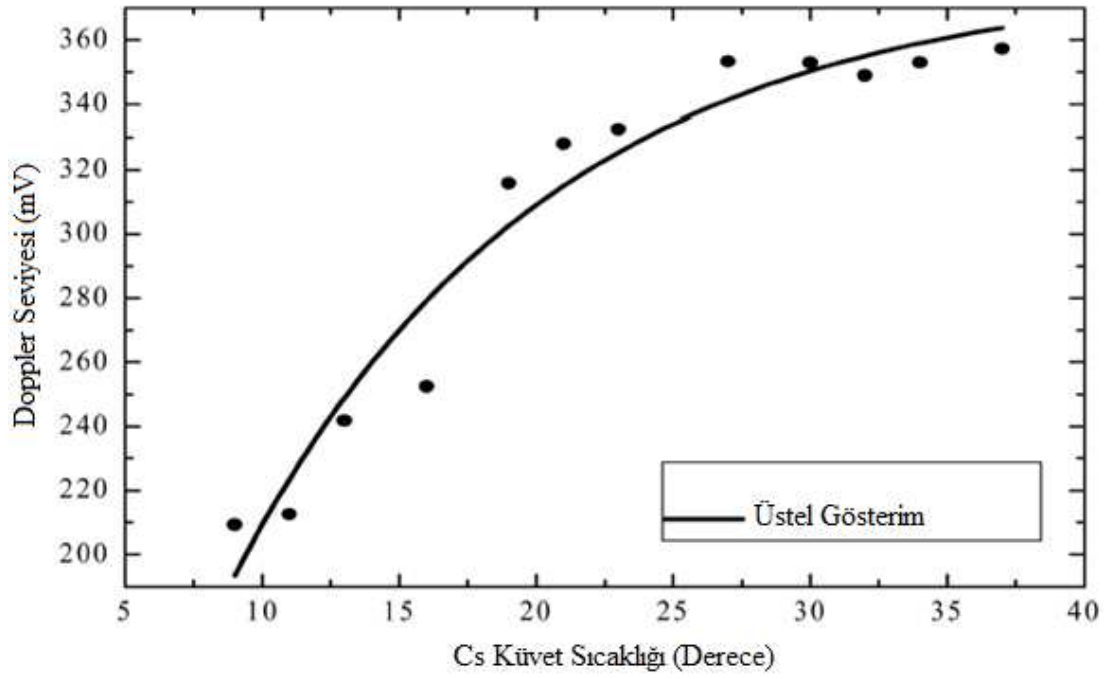
Doppler/DROR oranının, 0,2 mW' tan 9,2 mW' a kadar olan lazer gücüne karşı grafiği Şekil 2.22' de sunulmuştur. Şekil 2.22' den görüldüğü üzere Doppler/DROR oranı düşük lazer güçleri için keskin olarak azalmaktadır, fakat 5 mW – 9 mW arası lazer gücüne bağımlılık Doppler/DROR için daha düşük ve dolayısıyla daha durağan olduğu görülmektedir. Uzak alan doğrulama faktörlerinin bulunması aşamasında lazer gücüne bağımlılığın minimum olması, istenmeyen lazer güç değişimlerinin etkisinin minimum olması demek olacağından daha hassas ve düşük belirsizlikli

ölçümler yapmak mümkün olabilecektir. Tüm bu ölçümler lazer ve mikrodalganın dikey polarizasyonunda gerçekleştirilmiştir. Diğer polarizasyonlar örneğin eliptik polarizasyon daha ileri ölçüm cihazları ve teorik çalışma gerektirdiğinden dolayı şu an için doktora çalışma kapsamının dışında tutulmuştur.

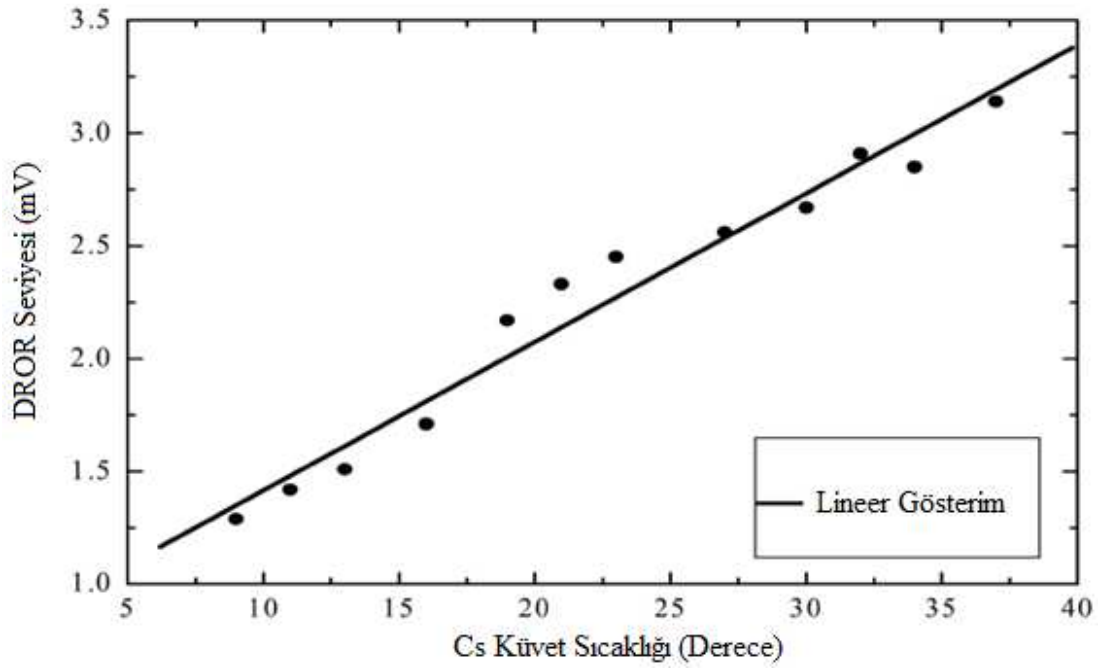


Şekil 2.22. Doppler/DROR ve lazer gücü grafiği

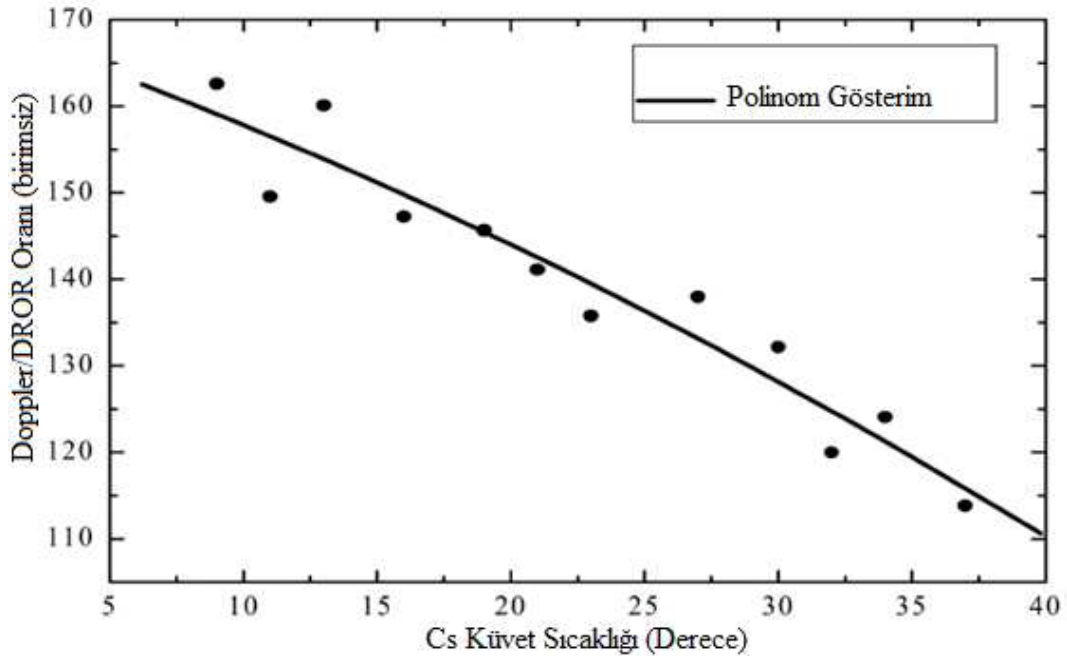
Aynı araştırma kapsamında, Doppler, DROR ve Doppler/DROR' un sıcaklık değişimine olan cevapları ise sırasıyla Şekil 2.23, Şekil 2.24 ve Şekil 2.25' te gösterilmiştir. Sıcaklık artışı metalik sezyum atomunu buharlaştırmakta, dolayısıyla lazer ve mikrodalga ile etkileşen atom sayısını arttırmaktadır, yani iletilen lazerin atomlar tarafından soğurulması artmaktadır. Yüksek soğurulma yüksek Doppler seviyesi ile sonuçlanmaktadır. Şekil 2.23' te Doppler seviyesi ile sıcaklık arasındaki eksponansiyel ilişki deneysel olarak gösterilmektedir. Şekil 2.24' te ise hemen hemen lineer DROR - Sıcaklık ilişkisi görülmektedir. Doppler/DROR – Sıcaklık ilişkisi ise Şekil 2.25' de görülmektedir. Bu ölçümler sırasında sezyum küveti Peltier kontrollü bir sistem içine yerleştirilerek kontrollü olarak 9 °C' den 37 °C' ye kademeli olarak ± 1 °C hassasiyetle yükseltilmiştir.



Şekil 2.23. Doppler seviyesi ile kuvet sıcaklığı grafiği

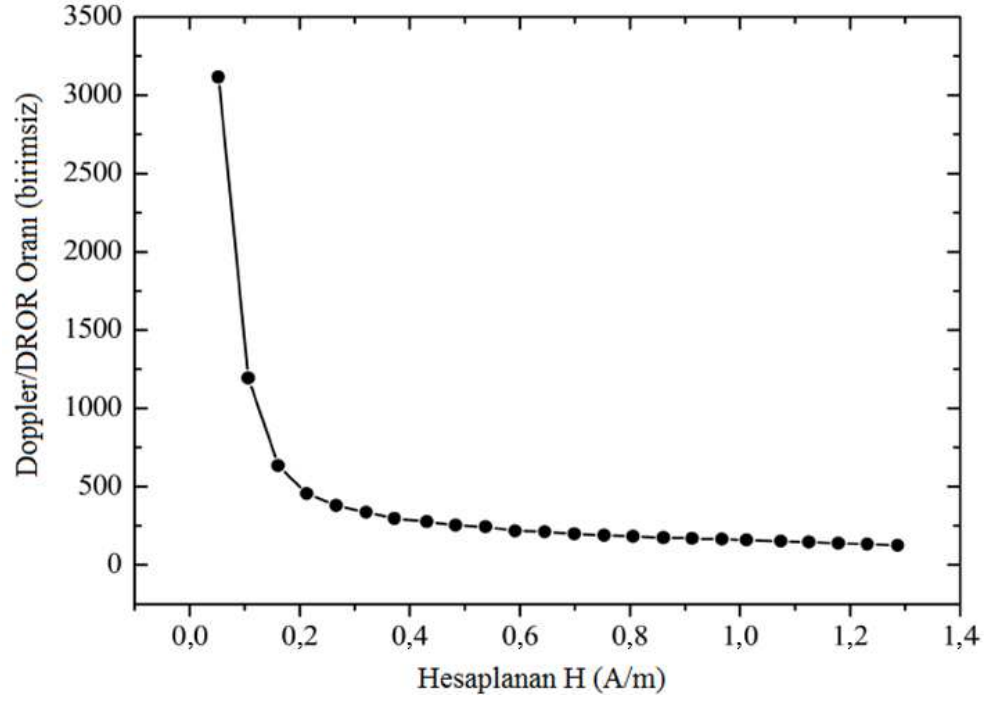


Şekil 2.24. DROR seviyesi ile kuvet sıcaklığı grafiği



Şekil 2.25. Doppler/DROR seviyesi ile küvet sıcaklığı grafiği

Şekil 2.26' da ise Doppler/DROR oranının mikrodalgaya olan bağımlılığı sabit 8,3 mW lazer gücünde ve sabit sezyum küvet sıcaklığında (23 °C) gösterilmiştir. Şekil 2.26' dan görüleceği üzere Doppler/DROR oranı 0,3 A/m (≈ 113 V/m)' den düşük değerler için keskin düşüş yaşar iken daha sonra yavaş bir eğimle azalmaktadır. Aslında mikrodalga atomları $6S_{1/2}$ (F=3) düzeyinden $6S_{1/2}$ (F=4) düzeyine sürmektedir. $6S_{1/2}$ (F=4) düzeyindeki atom artışı atomik yutulmayı (Doppler) arttırmakta aynı zamanda DROR seviyesini de arttırmaktadır. Buraya kadar yapılan tüm çalışmalar yine horn antenin uzak alan şartlarında gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak, DROR ve Doppler/DROR ölçümlerinin dalgalanma seviyesini ölçmek için 24 saat süresince 3 aşamalı sırasıyla 3, 16 ve 5 saat periyotlu uzun bir ölçüm başlatılmıştır. Tüm ölçüm boyunca lazer gücü, küvet sıcaklığı ve yansız oda sıcaklığı sırasıyla 8,3 mW, 23 °C ve 19 °C' lerde sabit bırakılmıştır. Mikrodalga ise 1,07 A/m' de (≈ 405 V/m) olarak ayarlanmıştır. Tüm ölçümler sonucunda 24 saat diliminde Doppler/DROR oranı 0,5 dB dalgalanma yapar iken DROR oranı 0,9 dB dalgalanma yapmıştır, yani Doppler/DROR oranı sadece DROR ile karşılaştırıldığında daha durağan ve tekrar üretilebilir sonuçlar üretmiştir.



Şekil 2.26. Doppler/DROR seviyesi ile mikrodalga şiddeti grafiği

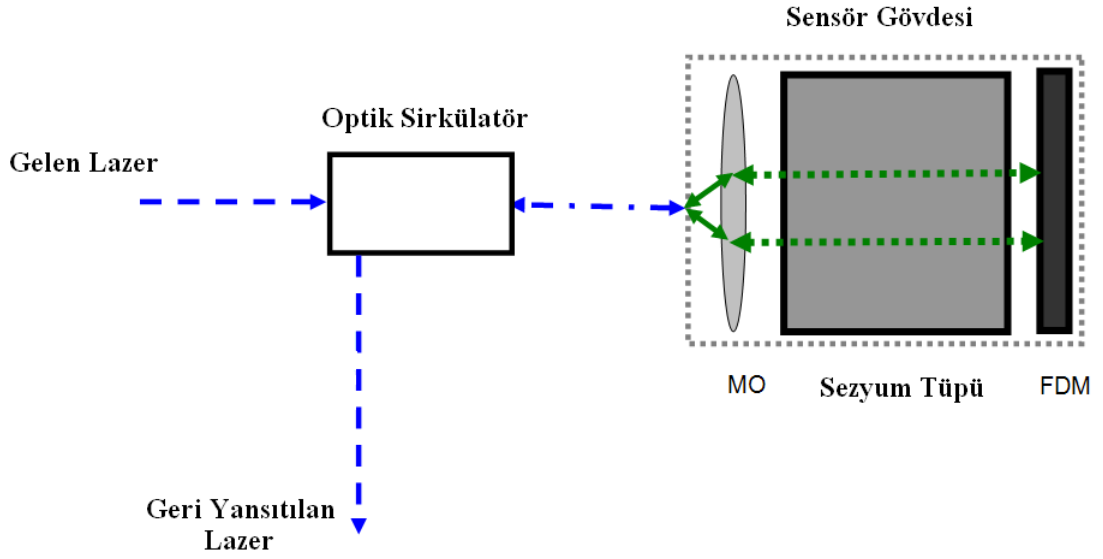
3. TAŞINABİLİR ATOMİK SENSÖR YAPISI VE KARŞILAŞTIRMA ÖLÇÜMLERİ

3.1. Taşınabilir Atomik Sensör Yapısı

Doktora tez çalışmasının bu aşamasında, 9,192 GHz' de ölçüm yapabilen atomik sensörün taşınabilir ilk prototipi oluşturulmuştur. Bu taşınabilir prototip ile İngiltere' nin NPL firması ile karşılaştırma ölçümlerine girilmiş ve bu kapsamdaki ölçümlerde memnun edici sonuçlar elde edilmiştir. Taşınabilir hale getirilen atomik sensörün birinci tip taşınabilir prototipinin fotoğrafı Şekil 3.1' de ve tasarım şeması ise Şekil 3.2' de sunulmuştur. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' den görüleceği üzere bir PM (polarized mantain) fiber kablo içindeki lazer ışığı ilk olarak optik sirkülatör girişine yönlendirilir. Sirkülatör çıkışı ise fleksi cam maddesinden yapılmış sensör gövdesinin girişine yönlendirilir. Sezyum hücresi içerisinde paralel lazer ışınlarının elde edilebilmesi için ayarlanabilir bir mikro-objektif (MO) lens sezyum hücresi önünde kullanılmıştır. DROR işaretini taşıyan lazer ışığı sezyum tüpü çıkışında bir düz dielektrik ayna (Flat Dielectric Mirror - FDM) tarafından sirkülatöre geri yansıtılır. Geri yansıtılan lazer ışığı da sirkülatör tarafından fotodiyota dolayısıyla osiloskoba bir multi mode (MM) fiber kablo ile gönderilir.

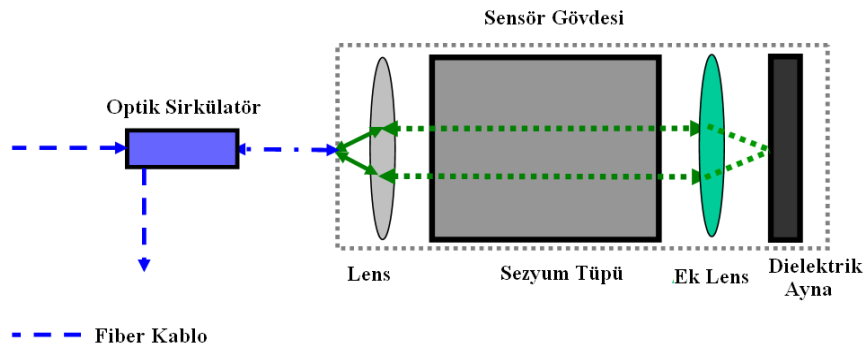


Şekil 3.1. Atomik sensörün birinci tip taşınabilir prototipinin fotoğrafı



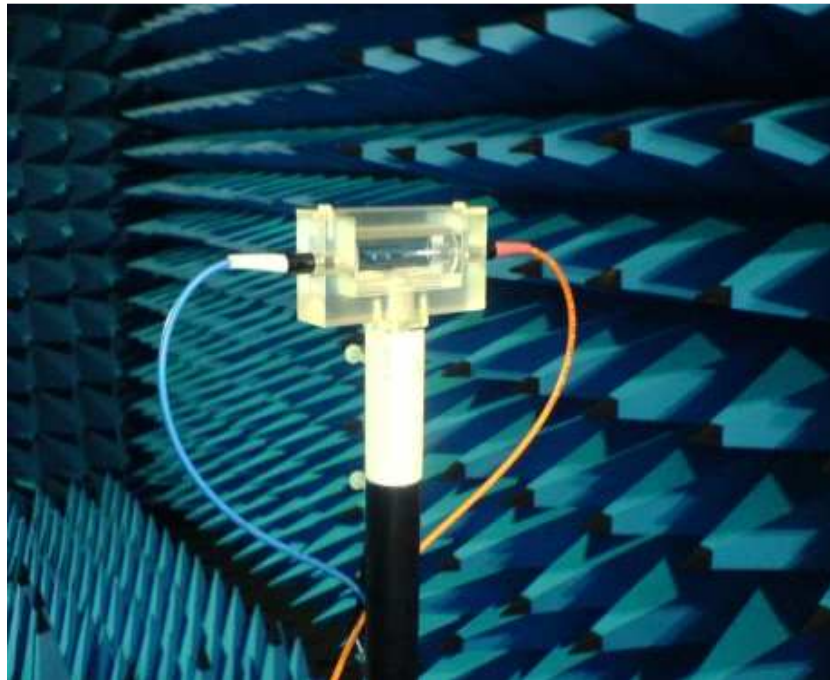
Şekil 3.2. Atomik sensörün birinci tip taşınabilir prototipinin tasarım şeması

Bu birinci tip taşınabilir atomik sensörün kullanımında bazı kısıtlamalar ile karşılaşmıştır. Bu kısıtlamaların en önemlisi yansıyan lazerin 5 μm çaplı fiber kablo içine verimli bir şekilde sokulabilmesi için dielektrik aynanın çok hassas bir şekilde ayarlanma zorunluluğudur. Bu hassas ayar genellikle çok kolayca bozulabildiğinden veya verimli yapılamadığından dolayı elde edilen DROR işareti çok küçük seviyelerde kalıp çoğu kez yeterli çalışma seviyesine getirilememektedir. Bu kısıtlamalardan dolayı bu birinci tip taşınabilir sensör prototipi sezyum tüpü çıkışına ikinci bir lens konarak iyileştirilmiş ve ayrıca fiber çapı 100 μm olan fiber kablo kullanılmıştır. Bu iyileştirilmiş prototipin tasarım şeması Şekil 3.3' te sunulmuştur. Sezyum tüp çıkışına yerleştirilen ek lens yardımıyla geriye yansıtılan ve DROR bilgisini taşıyan lazer ışığı için daha iyi bir odaklama sağlanmış ve elde edilen DROR seviyesi arttırılmıştır.

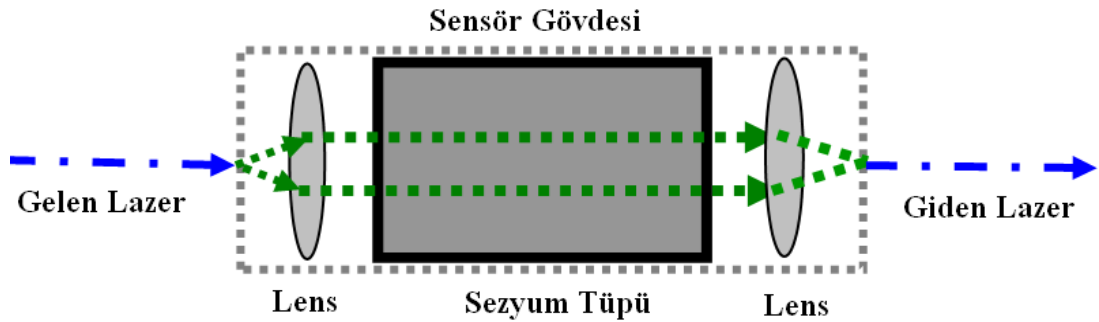


Şekil 3.3. İkinci bir lens ile iyileştirilmiş birinci tip taşınabilir prototipin tasarım şeması

DROR seviyesini daha da yüksek seviyelere taşıyabilmek için ikinci tip taşınabilir bir prototipin tasarımına gidilmiştir. Bu ikinci tip taşınabilir prototipin fotoğraf ve tasarım şemaları sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ te sunulmuştur. Bu ikinci prototipte, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ ten görüldüğü üzere 2 adet lens yardımıyla, gelen lazer sezyum tüpüne gönderilirken, sezyum tüpü çıkışında yansıtılmadan ikinci bir fiber optik kablo ile alınmaktadır. Bu son tasarım ile elde edilen DROR işareti oldukça iyi seviyelerde olduğundan dolayı, ölçümlere bu ikinci tip taşınabilir prototip ile devam edilmiştir.



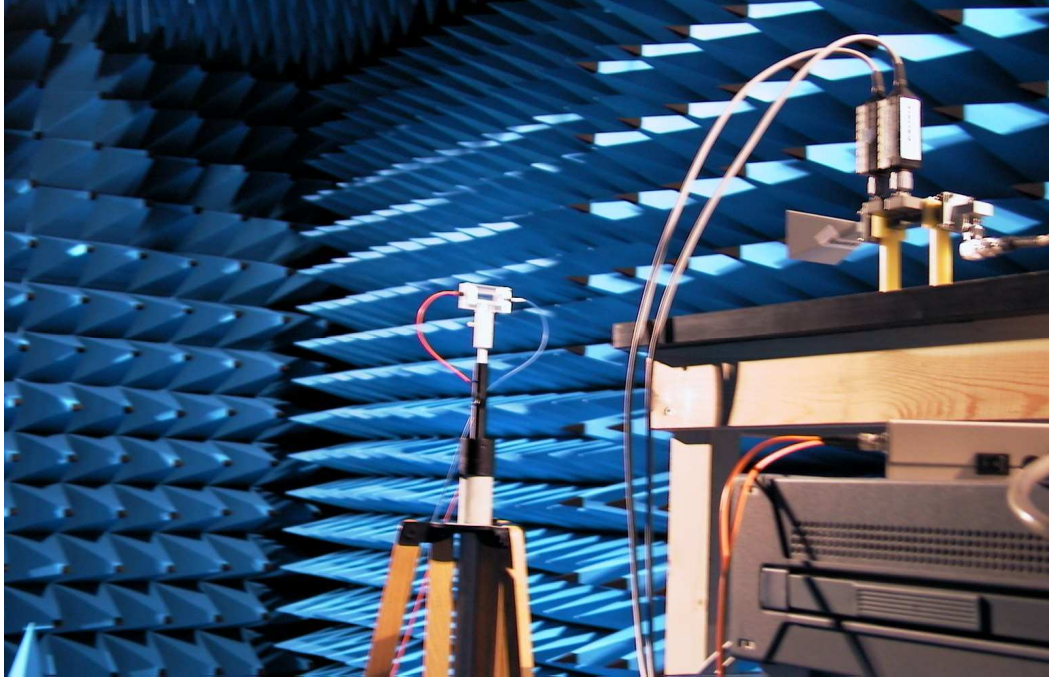
Şekil 3.4. Atomik sensörün ikinci tip taşınabilir prototipi



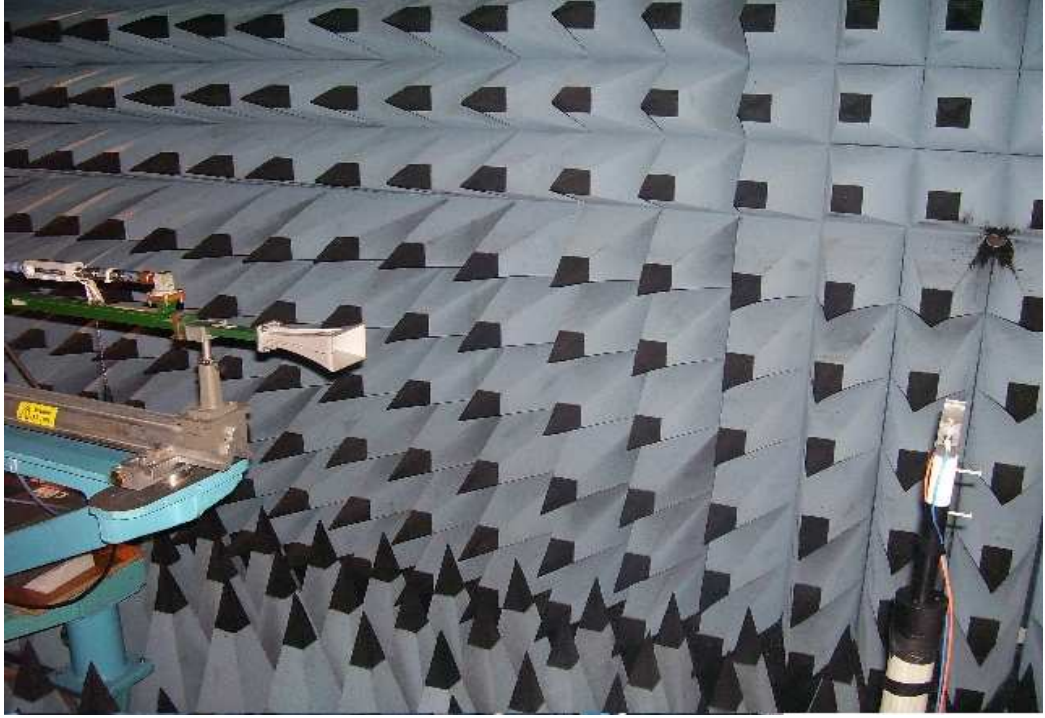
Şekil 3.5. Atomik sensörün ikinci tip taşınabilir prototipinin tasarım şeması

3.2. Taşınabilir Sensör Yapısı ile Karşılaştırma Ölçümü

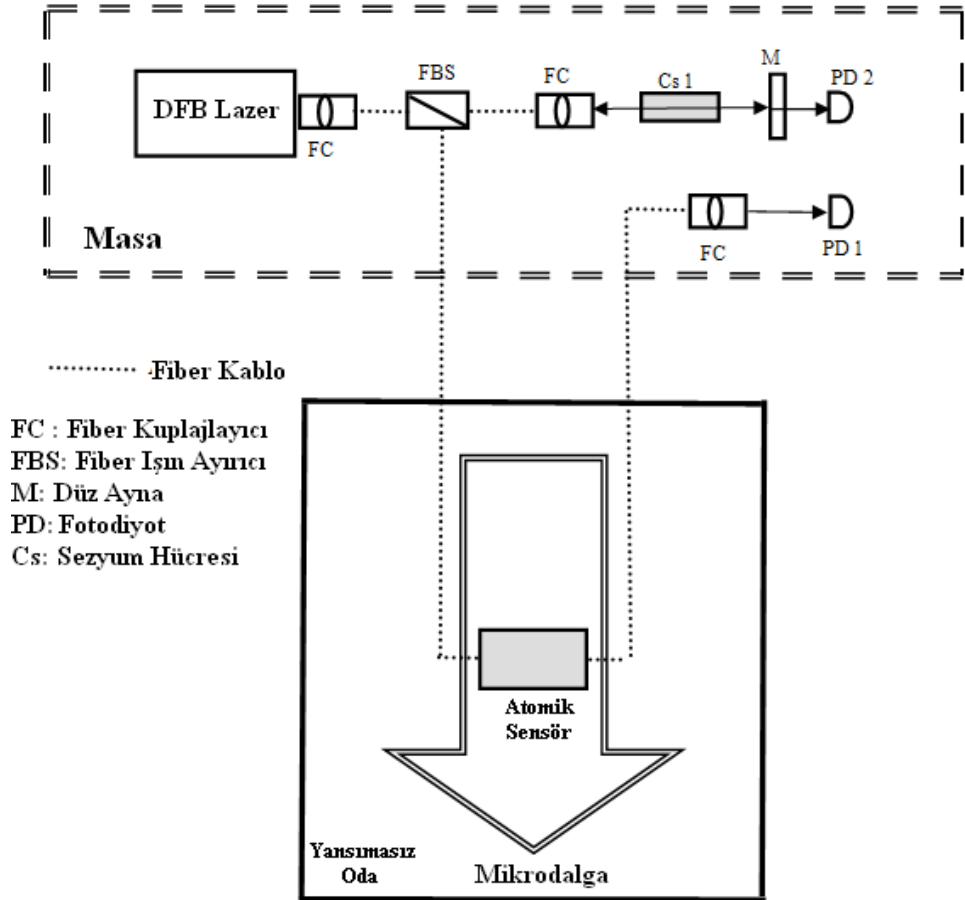
Atomik sensörün taşınabilir bu nihai şekli ile hem Türkiye’ de Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) laboratuvarlarında hem de İngiltere - NPL (National Physical Laboratory) laboratuvarlarında bir karşılaştırma ölçümü düzenlenmiş ve atomik sensörün taşınabilir versiyonunun ilk ciddi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sırasında UME ve NPL firmalarında kurulan deney düzeneklerinin fotoğrafları sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’ de ve en genel ölçüm düzeneği Şekil 3.8’ de verilmiştir.



Şekil 3.6. Atomik sensörün taşınabilir prototipinin Türkiye UME’ deki ölçümleri



Şekil 3.7. Atomik sensörün taşınabilir prototipinin İngiltere NPL’deki ölçümleri



Şekil 3.8. Atomik sensörün taşınabilir prototipinin genel ölçüm düzeneği

Karşılaştırma ölçümleri Tablo 3.1’ de verilen ölçüm parametreleri baz alınarak yapılmıştır. Tablo 3.1’ den görüleceği üzere sensörün darbe ölçme yeteneklerinin de karşılaştırmaya dahil edilebilmesi için karşılaştırma ölçümleri darbe modülasyonlu mikrodalga ile yapılmıştır. Tablo 3.1’ de darbe periyodu, PP (Pulse Period) kısaltması ile gösterilirken, darbe genişliği ise PW (Pulse Width) kısaltması ile gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Atomik sensörün taşınabilir prototipin karşılaştırma ölçüm parametreleri

Hedef E (V/m)	Darbe Parametreleri (9,2 GHz Mikrodalga)
500	PP 10 ms, PW 5 ms
500	PP 10 ms, PW 1 ms
500	PP 10 ms, PW 0,1 ms
500	PP 1 ms, PW 0,5 ms
500	PP 1 ms, PW 0,1 ms

Atomik sensörün ikinci taşınabilir prototipi ile UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) ve NPL (National Physical Laboratory) arasında düzenlenen karşılaştırma ölçümlerinin sonuçları Tablo 3.2’ de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Atomik sensörün taşınabilir prototipin karşılaştırma ölçüm sonuçları (Doppler/DROR)

Hedef Elektrik Alan (V/m)	Darbe Parametreleri (9,2 GHz Mikrodalga)	NPL Sonuçları	UME Sonuçları	Fark 20LOG (dB)
500	PP 10 ms, PW 5 ms	143,04	145,08	-0,12
500	PP 10 ms, PW 1 ms	155,46	163,98	-0,46
500	PP 10 ms, PW 0,1 ms	169,96	162,72	0,38
500	PP 1 ms, PW 0,5 ms	154,18	152,90	0,07
500	PP 1 ms, PW 0,1 ms	163,77	158,59	0,28

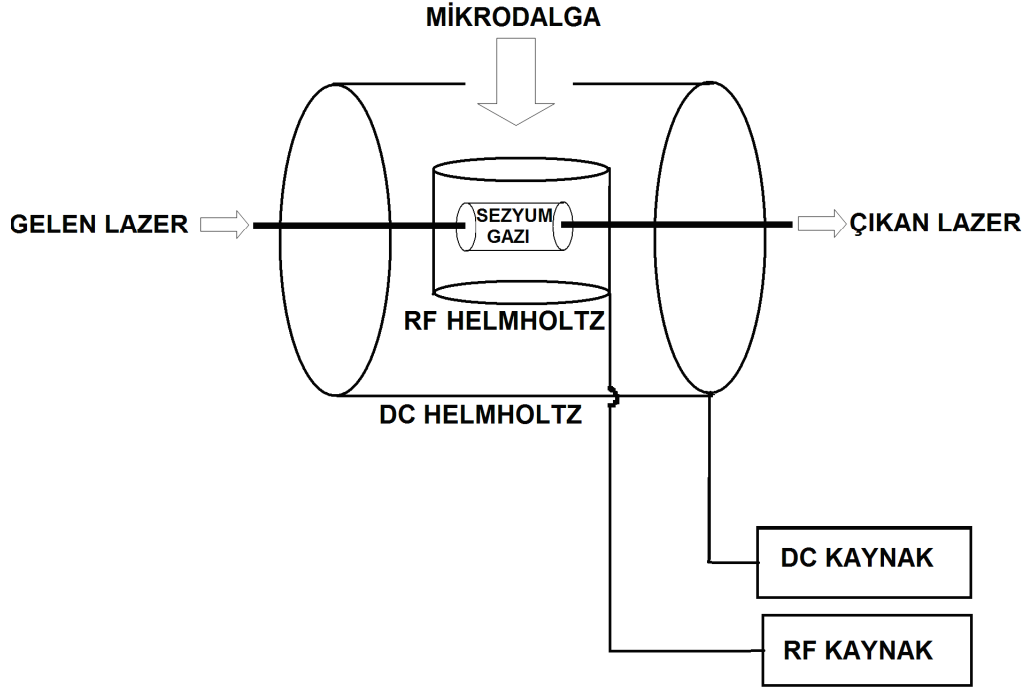
Her iki laboratuvardan elde edilen bu $\pm 0,5$ dB içindeki farklar prototipin ilk ölçümleri açısından memnuniyet verici olarak bulunmuştur.

4. YAKIN ALANDA RF MANYETİK ALANLARIN ÖLÇÜMÜ

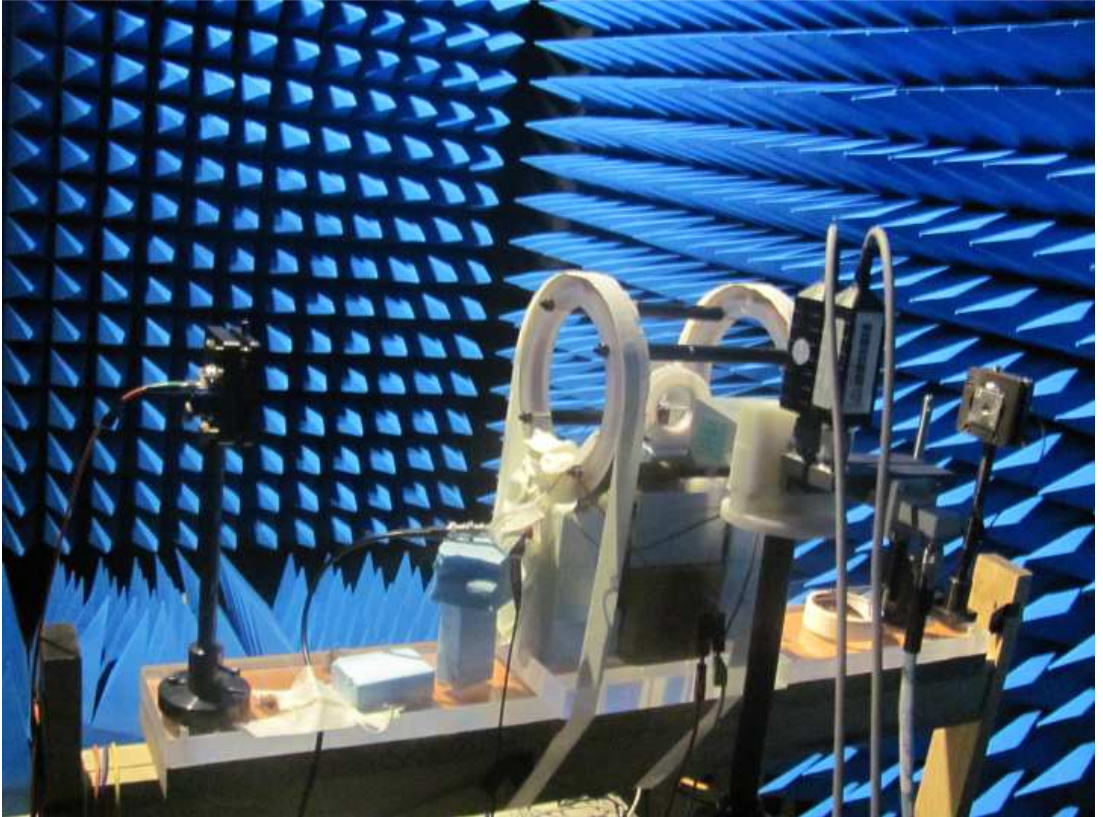
4.1. Uygulanan Yöntem ve Deney Düzenegi

Doktora tez çalışmasının bu aşamasında, DROR işaretinin Zeeman ayrışmalarına dayanan frekansı ayarlanabilir genişbandlı bir RF manyetik atomik sensörünün temelleri atılmıştır. Ayrıca bu tür bir sensörün özellikle her tür halka setlerinin, örneğin Helmholtz halkalarının, kalibrasyonlarına çok uygun olabileceği ve var olan klasik halka anten metotlarına alternatif bir metot olabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Tez kapsamı içerisinde bu bölümü destekleyici ve bu bölümün bir ön araştırması olarak var olan klasik halka anten kalibrasyonlarına ait yapılan araştırma EK-B' de detaylı olarak sunulmuştur.

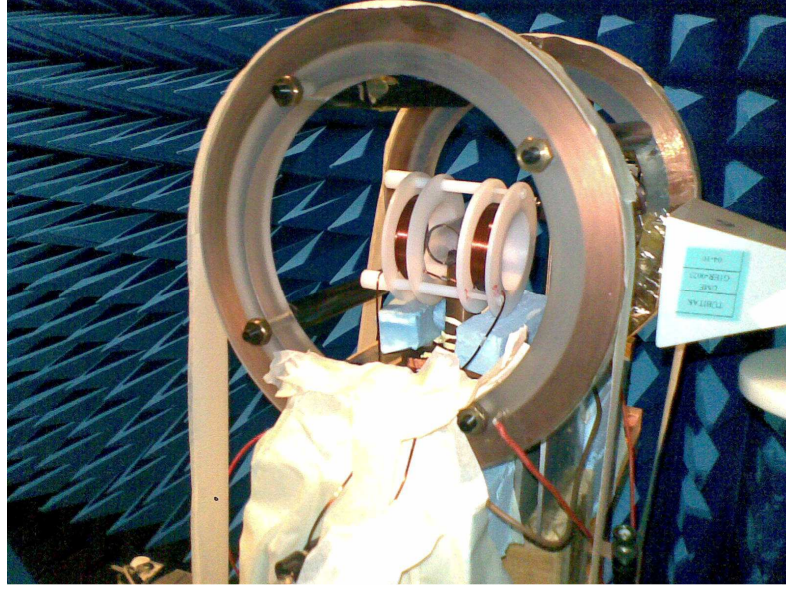
Bu çalışma kapsamında, ilk olarak lazer ve mikrodalga etkileşimi ile DROR işareti oluşturulmuş ve 9,192 GHz frekansının tespiti yapılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak sezyum tüpü horn antenin yakın alan bölgesinde konuşlandırılmış böylece mikrodalga seviyesi dolayısıyla DROR işaret seviyesi maksimum konuma getirilmiştir. Şekil 4.1' de görüldüğü üzere iki Helmholtz halkası birbirine dik ve sezyum tüpünü merkezlerine alacak şekilde yerleştirilmiştir. Helmholtz halkalarından biri DROR işaretinin Zeeman komponentlerinin üretimi için gerekli olan statik manyetik alan için kullanılmıştır. Diğer Helmholtz halkası ise incelenecek olan RF manyetik alanların üretimi için kullanılmıştır. Statik manyetik alanın yönü lazer ışığına paralel olarak, RF manyetik alanın yönü ise lazer ışığına dik olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1. RF manyetik alanların ölçümü için ölçüm düzeneği



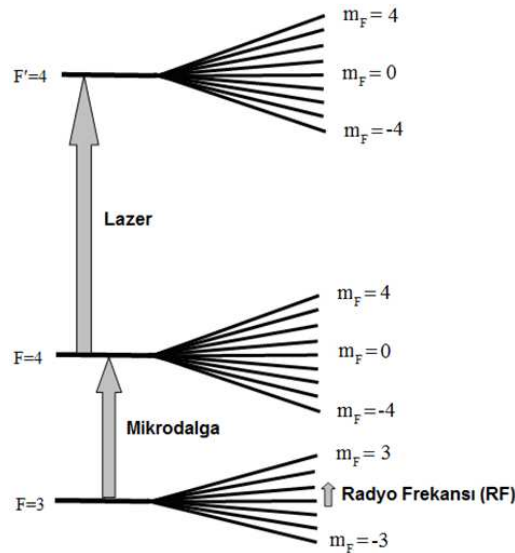
Şekil 4.2. RF manyetik alanların ölçümü için genel ölçüm düzeneği fotoğrafı



Şekil 4.3. RF manyetik alanların ölçüm düzeneğinde Helmholtz halkaları ile çevrelenmiş sezyum tüpünün görünümü

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3' te fotoğrafları verilen düzende, DC ve AC Helmholtz halkaları ile çevrelenmiş sezyum tüpü, horn anten ve lazer giriş/çıkışına imkan veren fiber kafaları yansısız oda içerisinde konuşlandırılırken, lazer ve mikrodalga kaynakları ve diğer ilgili tüm elektronik cihazlar oda dışarısında konuşlandırılmıştır. Ölçümler sırasında lazerin polarizasyonu lineer olarak tutulmuş ve sezyum tüpü dikey polarize horn antenden yaklaşık 10 cm mesafede, antenin yakın alanında konuşlandırılmıştır. Bu çalışmanın ana amacı Zeeman komponentlerinin RF manyetik alan ile değişimini incelemek olduğundan mikrodalganın seviyesini net olarak bilmek yerine onu sabit ve olabildiğince yüksek seviyede tutmak, taban gürültüsünden yükseklerde ölçüm yapabilmek için önemlidir. Ölçümlerde ortam sıcaklığı (22 ± 2) °C iken sezyum tüpünün sıcaklığı ise bir peltier sistemi yardımıyla (25 ± 2) °C' de tutulmaya çalışılmıştır. Böylece mikrodalgadan kaynaklanabilecek kontrolsüz bir ısı artışının önüne geçilmiştir. Statik alan üretimi için kullanılan Helmholtz halkası 18 cm halka çap/mesafeli olup, 0,5 ohm üzerinden bir DC bir akım kaynağı ile beslenmiştir. RF manyetik alan üretimi için kullanılan Helmholtz halkası ise 12 cm sarım sayılı ve 40 cm halka çap/mesafeli olup diğer Helmholtz halkasına dik olarak yerleştirilmiştir. Bu RF Helmholtz halkasından akan RF akımı bir Tetronix CT-2 akım probu yardımıyla tespit edilmiştir. Ölçümler öncesinde statik manyetik alan üreten Helmholtz halkasının merkezindeki statik manyetik alan değeri

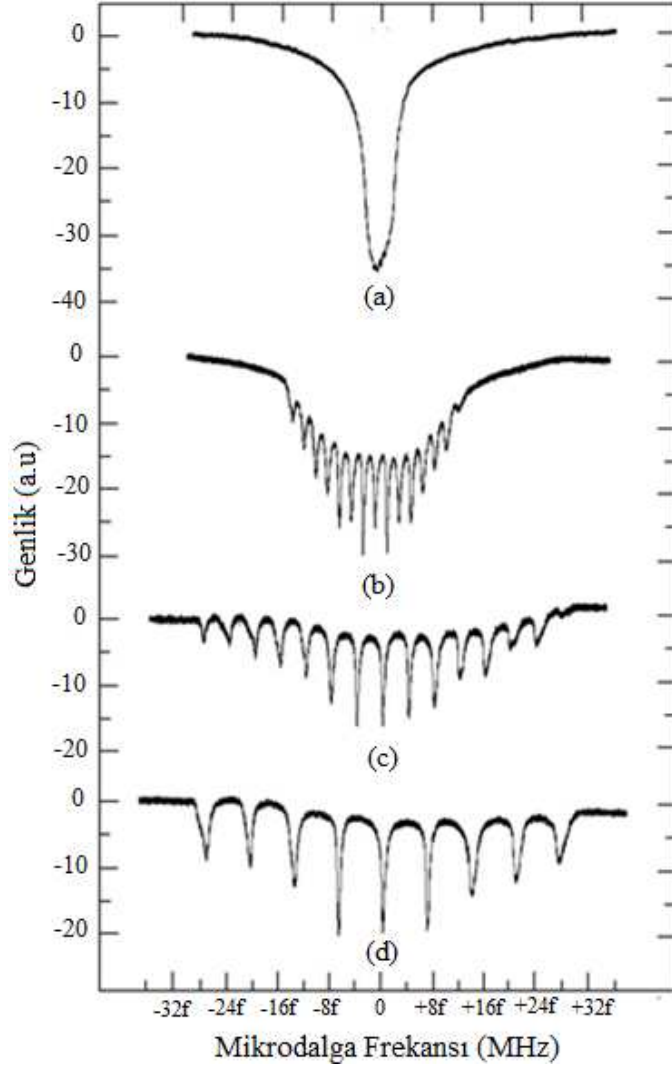
kalibreli bir magnetometre kullanılarak ölçülmüştür, ayrıca o alana karşı gelen doğru akım değeri de kayıt edilmiştir. Bu ön ölçüm sırasında sezyum tüpü çıkarılmış ve magnetometrenin sensörü tam olarak tüpün olduğu yere konumlandırılmıştır fakat peltier sisteminin metalik parçaları düzenekler arası tutarlılığın sağlanması için yerinde bırakılmıştır. Bu ölçüm sonrası, sezyum tüpü normal yerine konulmuş ve statik manyetik alan ile Zeeman komponentleri üretilmiştir. Her bir Zeeman ayrışmasına karşı gelen etkileşim RF frekansın tespiti için, RF kaynağı uygun olarak manuel olarak taranmıştır. Sonra da her bir incelenen etkileşim frekansı için Zeeman komponent seviyesinin artan RF manyetik alan şiddeti ile değişimi ölçülmüş ve ayrıca Zeeman komponentlerinin lazer ve mikrodalga gücüne bağımlılığı incelenmiştir. Bu çalışmadaki ölçümler temel olarak sezyum atomlarının lazer, mikrodalga ve RF alanlarıyla etkileşimine dayanmaktadır. Rezonans etkileşim, sezyum atomunun elektronik geçişlerinde gerçekleşmektedir. Bir DFB (distributed feedback) diyot lazer, $6S_{1/2} (F=4) - 6P_{3/2} (F'=4)$ geçişlerine ayarlanmıştır. Mikrodalga frekansı sırasıyla ± 35 MHz ve $\pm 2,64$ MHz aralığında 9,192 GHz civarında taranmıştır. Bu tarama $6S_{1/2} (F=3) - 6S_{1/2} (F=4)$ mikrodalga enerji geçişine karşı gelmektedir. RF alanlar ve sezyum atomları arası etkileşim ise her bir Zeeman komponenti arasında $6S_{1/2} (F=3, m_F)$ ve $6S_{1/2} (F=4, m_F)$ düzeylerinde oluşur. Tüm bu enerji geçişleri Şekil 4.4' te açık bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Sezyum atomlarının lazer, mikrodalga ve RF etkileşimi için enerji geçişleri

4.2. Deneysel Sonuçlar

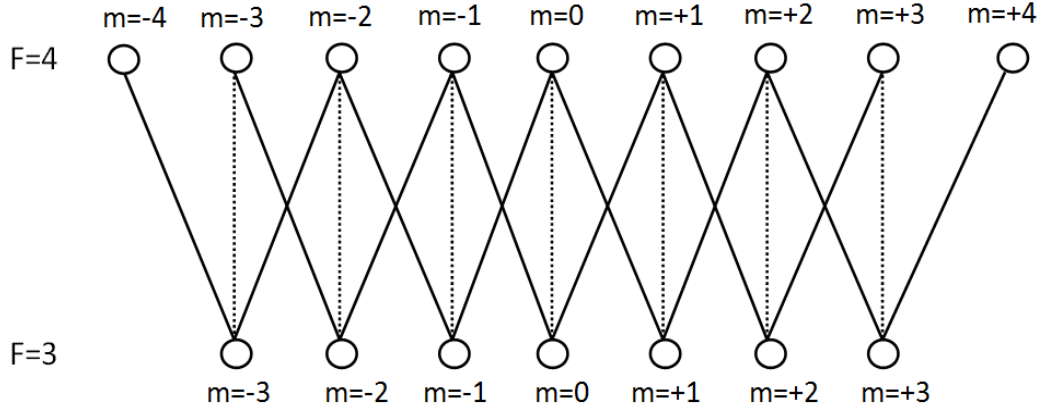
Uygulanan statik manyetik alan ile DROR sinyalinden üretilen Zeeman ayrışma spektrumu Şekil 4.5' te sunulmuştur. Şekil 4.5' ten görüldüğü üzere statik manyetik alan değeri arttıkça Zeeman ayrışmasındaki her bir Zeeman komponenti arasındaki mesafe, dolayısıyla RF etkileşim frekansı da artmaktadır.



Şekil 4.5. Zeeman ayrışmalarının artan statik manyetik alan şiddetiyle elde edilen osiloskop görüntüleri (f sabit bir sayıdır), (a) $\approx 0 \mu\text{T}$, $f=0,5$, (b) $540 \mu\text{T}$, $f=1$, (c) $1170 \mu\text{T}$, $f=1$, (d) $1985,5 \mu\text{T}$, $f=1$

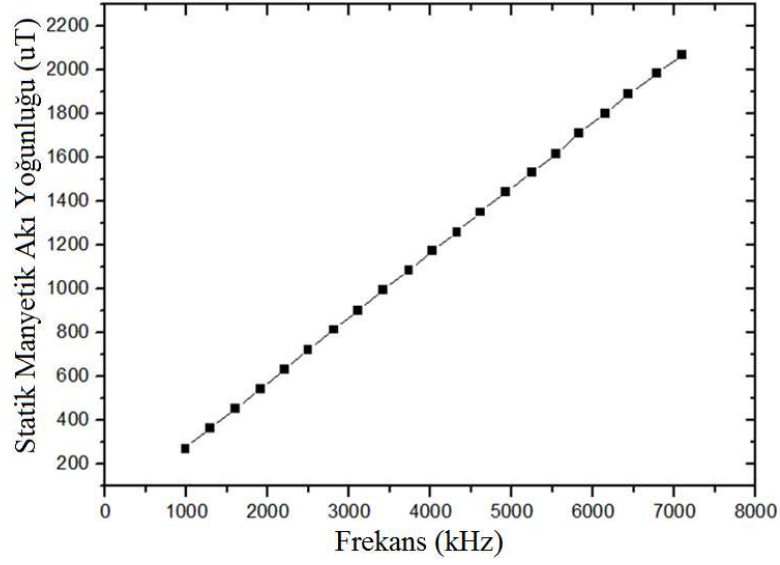
Bu çalışmada horn anten yakın alan konfigürasyonunda yerleştirilmiş olup, polarizasyonu ise dikey olarak seçilmiştir. Normalde bu konfigürasyonda sadece 7π enerji geçişine karşı gelen 7 Zeeman komponenti görmeliydik fakat gerek RF

Helmholtz halkasının metalik sargıları üzerinden gelen yansımalar gerekse diğer yansımalar sebebiyle, toplam mikrodalga polarizasyonu lineer polarizasyondan eliptik polarizasyona dönüşmektedir. Eliptik polarize olmuş mikrodalga $6S_{1/2}$ ($F=3, m_F$) ve $6S_{1/2}$ ($F=4, m_F$) enerji düzeyleri arasında hem π hem σ geçişlerine sebep olmaktadır. Sezyum atomlarının aşırı ince yapı temel seviyesindeki mümkün olan tüm geçişler basitçe Şekil 4.6' da sunulmuştur.

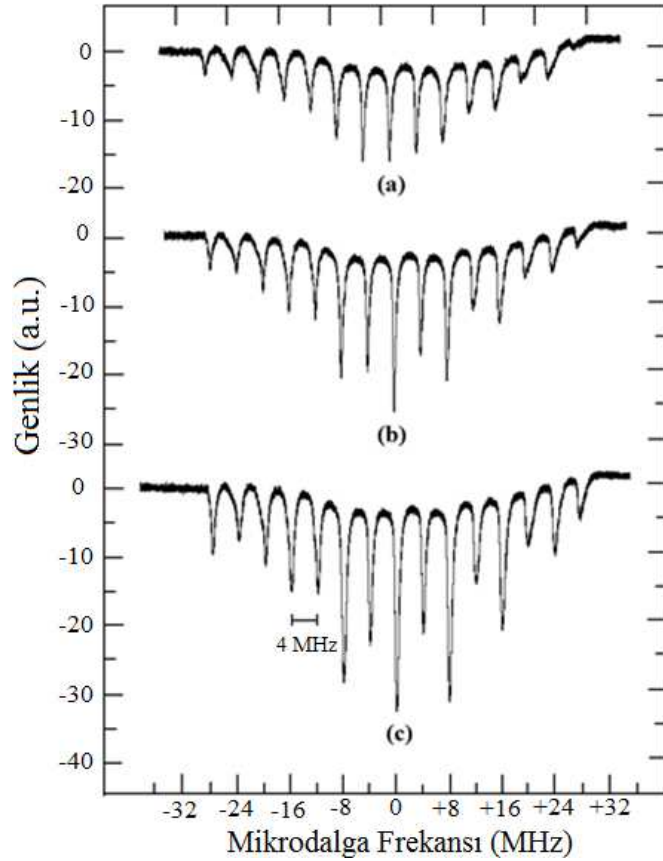


Şekil 4.6. $6S_{1/2}$ enerji seviyesi için mümkün olan enerji geçişleri

Şekil 4.6' da verilen kesikli çizgiler $\Delta m_F = 0$ olan π geçişleridir, düz çizgiler ise $\Delta m_F = \pm 1$ olan σ geçişleridir. Sayısı 14 olan σ geçişlerinin 12 tanesi çiftler halinde birbirine çok yakın frekanslara sahiptir. Her bir çiftin bileşenleri arasındaki frekans, ölçüm cihazlarının frekans ölçme yeteneğinin ötesinde olduğundan 14 adet σ geçişi yerine 8 adet σ geçişi osiloskop ekranında gözükmektedir. 7 adet π geçişi ile beraber toplam 15 adet geçiş osiloskop ekranında gözükmektedir [50,51]. Şekil 4.5 aynı zamanda şunu da göstermektedir, statik manyetik alan arttıkça gözlenebilen Zeeman komponent sayısı değişmektedir ve yüksek statik manyetik alanlar için gözlenebilen Zeeman komponent sayısı azalmaktadır, çünkü bazı komponentler mikrodalga taramasının dışında bırakılmaktadır. Bu nedenden dolayı Şekil 4.5 (b) ve (c)' de 15 Zeeman komponenti görülürken Şekil 4.5 (d)' de 9 Zeeman komponenti görülmektedir. Statik manyetik ile RF etkileşim frekansı arasındaki ilişki Şekil 4.7' de verilmiştir. Beklendiği üzere, aralarındaki ilişki lineer olmuştur. Şekildeki grafiğin eğimi ise yaklaşık $3,5 \text{ kHz}/\mu\text{T}$ ' dir. Bu değer sezyum atomlarının $6S_{1/2}$ enerji durumunun Lande faktörü ile uyushmaktadır [50].

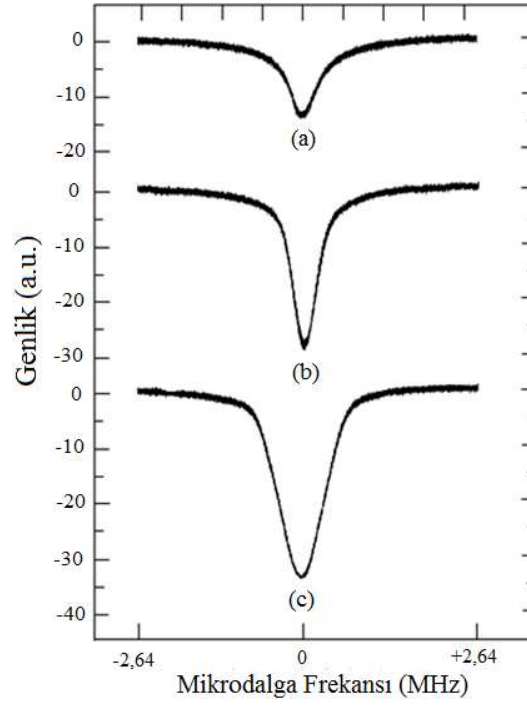


Şekil 4.7. Statik manyetik alan ile RF etkileşim frekansı ilişkisi



Şekil 4.8. 1170 μT 'ye karşı gelen 4 MHz RF etkileşim frekansı için $6S_{1/2} (F=3, m_F) - 6S_{1/2} (F=4, m_F)$ enerji geçişleri için Zeeman komponentlerindeki değişim, RF Helmholtz akımı (a) ≈ 0 mA, (b) 19,5 mA, (c) 62 mA

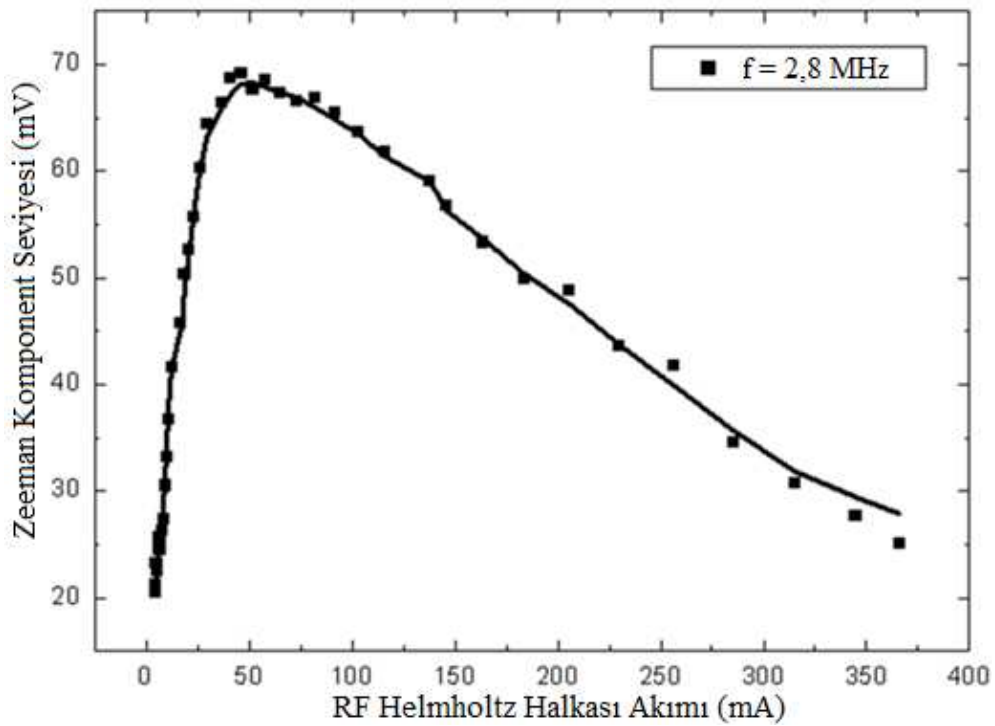
Bu ilişki frekansı ayarlanabilir atomik manyetik alan sensörünün temellerini oluşturmaktadır. Bu atomik sensör, o anki ayarlanmış karşı gelen RF frekansa cevap verip, diğerlerine cevap vermemektedir. Çalışmamızda 1170 μT statik manyetik alana karşı gelen 4 MHz RF frekansı, Zeeman komponentlerinin artan RF manyetik alan ile olan değişimini görsel olarak göstermek amacıyla örnek olarak seçilmiştir. Şekil 4.8’ de görüldüğü üzere artan manyetik alan ile Zeeman komponent seviyeleri artış göstermektedir.



Şekil 4.9. 1170 μT ’ ya karşı gelen 4 MHz RF etkileşim frekansı için merkez $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) - 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π enerji geçişi için Zeeman komponentinin değişimi için osiloskop görüntüleri, RF Helmholtz akımı (a) ≈ 0 mA, (b) 19,5 mA , (c) 62 mA

Tez çalışması kapsamında ayrıca mikrodalga tarama aralığı uygun şekilde daraltılarak $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) - 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ enerji geçişine ait π geçişine karşı gelen merkezi Zeeman komponentinin artan RF manyetik alan ile oluşan davranışına odaklanılmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 4.9’ da sunulmuştur. Şekil 4.9’ dan görüldüğü üzere RF manyetik alandaki artış DROR işaretin Zeeman komponentlerinde genişleme ve genliklerinde de artışa neden olmaktadır. RF manyetik alan daha da artıp kritik bir değerin üzerine çıktığında genişlemeden dolayı

komponentler birbirinin üzerine çıkmaya başlar ve bu olay sonrası genlikleri azalmaya başlar. Zeeman komponentlerinin genliklerinin neden RF manyetik alan ile değiştiği ilk yaklaşım olarak şu şekilde açıklanabilir. RF manyetik alan, $6S_{1/2}$ ($F=3, m_F$) ve aynı zamanda $6S_{1/2}$ ($F=4, m_F$) alt enerji düzeylerinde RF pompalama işlemi oluşturmaktadır. Bu RF pompalama işlemi $6S_{1/2}$ ($F=3, m_F$) düzeyindeki atomik dağılımı değiştirerek atomların $6S_{1/2}$ ($F=3$) düzeyinden $6S_{1/2}$ ($F=4$) düzeyine toplam geçiş olasılığını artırır ve bunun sonucu olarak Zeeman komponentlerinin genlik ve genişlikleri değişir.



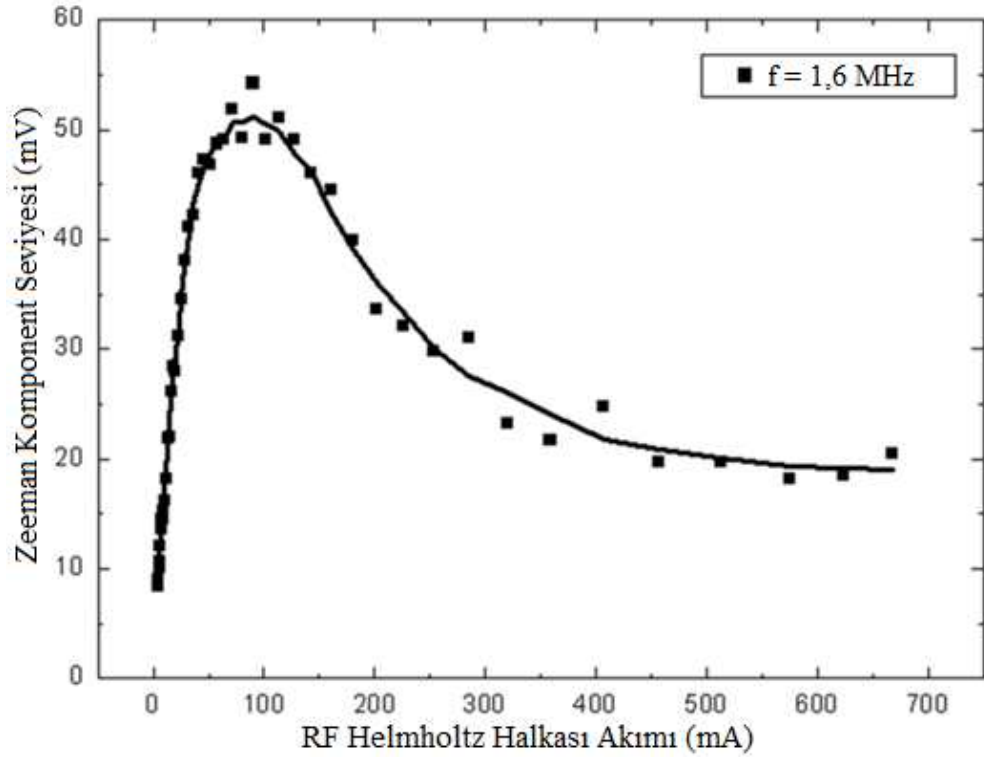
Şekil 4.10. RF akıma karşı Zeeman komponent seviye değişiminin 2,8 MHz için 16 mW lazer gücündeki gösterimi

815,95 μT statik manyetik alana karşı gelen örnek olarak seçilmiş 2,8 MHz için $6S_{1/2}$ ($F=3, m_F=0$) - $6S_{1/2}$ ($F=4, m_F=0$) π enerji geçişine karşı gelen Zeeman komponentinin RF manyetik alana bağımlılığı Şekil 4.10' da sunulmuştur. Beklendiği üzere Zeeman komponentlerinin genlikleri RF pompalamadan dolayı ilk olarak artar, sonra da genişleme ve üst üste binme olayından dolayı genlik azalımı oluşur.

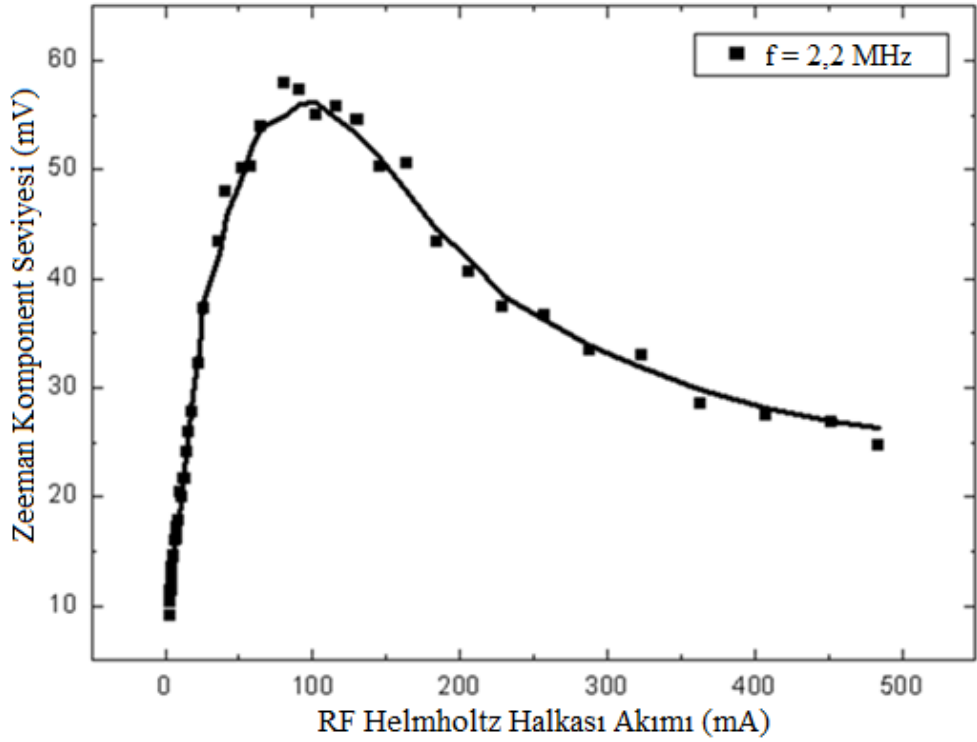
Bir Helmholtz halkasının merkezindeki RF manyetik alan Helmholtz halkasının üzerinden akan akım ile doğru orantılı olduğundan Şekil 4.10 için yapılan ölçümde Helmholtz halkası merkezindeki RF manyetik alan yerine onun sargılarından akan

RF akımı kullanılmıştır. Örnek frekans olarak seçilen 2,8 MHz için yaklaşık 10 dB'lik bir dinamik aralık elde edilmiştir. Şekil 4.10' dan görüldüğü üzere Zeeman komponent genliği 20 mV' tan artmaya başlayarak yaklaşık 50 mA RF akımında 70 mV' a ulaşmaktadır ve sonra komponentlerin genliği genişleme ve üst üste binme olayından dolayı azalmaktadır. Bu ölçümde lazer gücü 16 mW olarak kullanılmış olup, sezyum hücresi üzerindeki elektrik alan değeri anten - sezyum tüp mesafesi, anten girişindeki net güç ve uzak alan kabulü ile kabaca 1500 V/m' nin üzerinde şeklinde tahmin edilebilir. Tez kapsamındaki çalışmalarda elde edilen grafiklerde Zeeman komponentlerinin gerçek davranışını daha net görebilmek ve grafik üzerindeki dalgalanmalardan kurtulmak için grafikler yumuşatılarak gösterilecektir. Yumuşatılmış çizim ve gerçek ölçüm dataları aynı grafik üzerinde birlikte sunulacaktır. Grafiklerdeki dalgalanmalar bizim kendi tasarımı olan peltier sistemine rağmen mikrodalgadan kaynaklanan istenmeyen ısınmalardan ve manüel kontrol edilen DC akım kaynağındaki istenmeyen kaymalardan kaynaklanabilmektedir. Bu dalgalanmalar daha iyi bir ısı kontrol sistemi ve bilgisayarlı geri besleme kontrollü bir DC akım kaynağı ile minimum seviyeye getirilebilir.

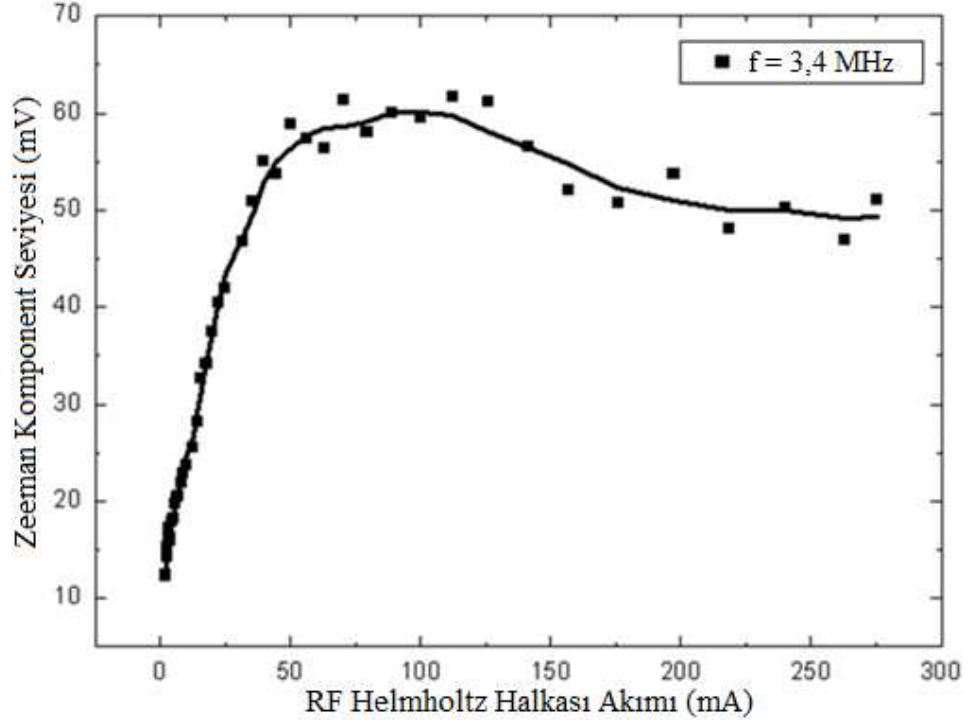
Sonraki üç ölçüm diğer örnek frekanslar olan 1,6 MHz, 2,2 MHz ve 3,4 MHz' lerde icra edilmiştir. Bu üç frekans bizim ölçümlerimizde sırasıyla 455,85 μ T, 632,79 μ T ve 995,22 μ T statik manyetik alanlara karşı gelmektedir. Bu ölçümlerde lazer gücü 9 mW ve horn antene gönderilen mikrodalga gücü 170 W (52,3 dBm) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.11 – Şekil 4.13' te görüldüğü üzere benzer bir bağımlılık tüm frekanslar için mevcuttur, fakat grafikler arasında sadece bazı küçük farklar göze çarpmaktadır. Bu farklar, enerji seviyeleri üzerinde farklı atomik pompalama oluşumuna sebep olan farklı lazer ve mikrodalga güçlerinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca elde edilen grafikler şunu göstermektedir ki her RF frekansı kendisine özel Zeeman komponent genliği - RF manyetik alan seviyesi grafiğine sahiptir.



Şekil 4.11. RF akıma karşı Zeeman komponent seviye değişiminin 1.6 MHz için 9 mW lazer gücündeki gösterimi



Şekil 4.12. RF akıma karşı Zeeman komponent seviye değişiminin 2,2 MHz için 9 mW lazer gücündeki gösterimi



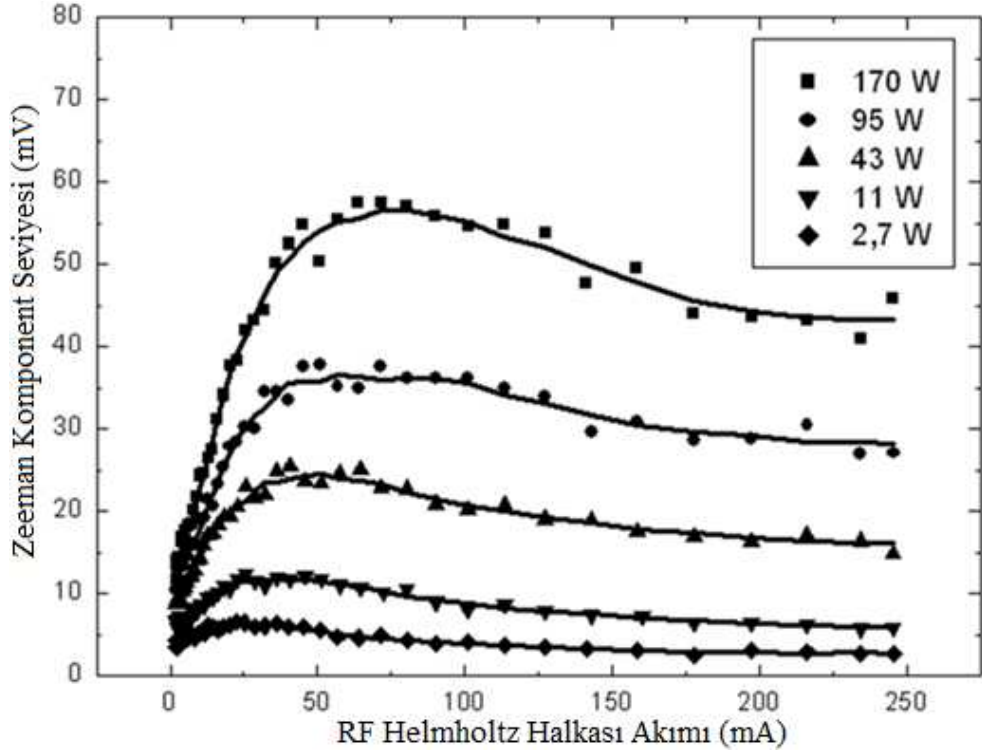
Şekil 4.13. RF akıma karşı Zeeman komponent seviye değişiminin 3,4 MHz için 9 mW lazer gücündeki gösterimi

Tez çalışması kapsamında ayrıca Zeeman komponent seviyesinin lazer ve mikrodalga güçlerine bağımlılığı araştırılmıştır. Bu araştırma 1084,14 μT statik alana karşı gelen 3,7 MHz' de gerçekleştirilmiş ve lazer gücü 9 mW' ta sabit tutulup ölçümler sırasıyla beş farklı mikrodalga gücünde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise horn antene aktarılan mikrodalga gücü 170 W' ta sabit tutulup lazer gücü belli adımlarla artırılmıştır. Ölçümlerde sezyum tüpü üzerine düşen elektrik alan yerine horn antene aktarılan güç kullanılmıştır çünkü sezyum hücresi antenin yakın alan bölgesinde olup net bir şekilde elektrik alan değerini bilebilmek mümkün değildir. Bu araştırmanın sonuçları Şekil 4.14 ve Şekil 4.15' te verilmiştir. Zeeman komponentlerinin genliklerinin lazer ve mikrodalga gücüne bağımlılığını daha hassas gözlemek için benzer bir ölçümü maksimum Zeeman seviyesine karşı gelen RF akımında 3,1 MHz' de gerçekleştirilmiştir. 3,1 MHz frekansı ölçümlerimizde 907,36 μT statik manyetik alana karşı gelmektedir. Bu son deneyin sonuçları ise Şekil 4.16 ve Şekil 4.17' de sunulmuştur. Şekil 4.14 – Şekil 4.17' de verilen tüm sonuçlar şu şekilde yorumlanabilir. Sabit lazer gücünde, mikrodalgadaki artış $6S_{1/2}$ (F=3) ve $6S_{1/2}$ (F=4) enerji düzeyleri arasında daha fazla atomik pompalamaya sebep olmaktadır, bu nedenle $6S_{1/2}$ (F=4, $m_F=0$) enerji düzeyindeki Zeeman komponent seviyesi

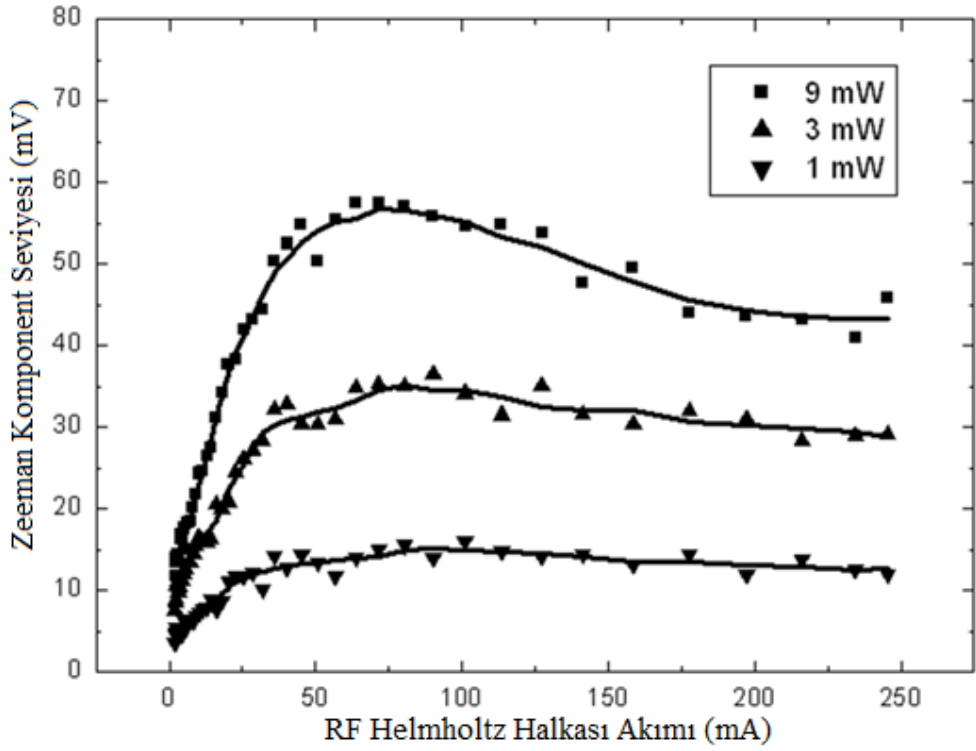
artmaktadır. $6S_{1/2}$ (F=4) enerji düzeyindeki sezyum atomlarındaki artış aynı zamandan maksimum Zeeman seviyesine ulaşmak için gerekli RF akımında arttırmaktadır (Şekil 4.14). Ek olarak, düşük mikrodalga seviye bölgesinde, temel seviye enerji seviyeleri arasında optik pompalama daha efektif iken, doyum etkileri nedeniyle yüksek mikrodalga bölgesinde daha az etkilidir. Bunun sonucu olarak, Zeeman komponent seviyesindeki artış oranı düşük seviye mikrodalga bölgesinde daha yüksek, fakat yüksek mikrodalga bölgesinde daha düşüktür (Şekil 4.16).

Diğer yandan sabit mikrodalga gücündeki lazer artışı $6S_{1/2}$ (F=4) enerji düzeyindeki sezyum atomlarının sayısını azaltmaktadır fakat $6P_{3/2}$ aracılığı ile $6S_{1/2}$ (F=4)' ten $6S_{1/2}$ (F=3)' e optik pompalama ile iletilen atomlar $6S_{1/2}$ (F=3) enerji düzeyindeki atom sayısını arttırmaktadır. Düşük lazer güç seviyelerindeki (1mW – 3 mW) işaret genliğindeki artış oranı optik pompalama işlemindeki doyum işleminden dolayı yüksek lazer seviyelerinde (3mW – 9mW) azalmaya başlamaktadır (Şekil 4.17). Bu son durum ise şu şekilde açıklanabilir. Osiloskopta okunan ve Şekil 4.15 ve Şekil 4.17' de çizilen Zeeman işaret genlik seviyesi fotodiyot girişindeki lazer gücü ile doğru orantılı fotodiyot çıkışında tespit edilen işarettir. Fakat sezyum hücresi girişindeki lazer gücündeki artış optik pompalama nedeni ile $6S_{1/2}$ (F=4) enerji düzeyindeki atom sayısını dolayısıyla buna karşı gelen Zeeman rezonanslarını azaltır, bu nedenle fotodiyotta tespit edilen işaret, lazer gücüne bağlı olarak lineer olmayan bir şekilde artar. Dahası, Şekil 4.10 ve 4.15' ten görüleceği gibi, $6S_{1/2}$ (F=4) enerji düzeyindeki atom azalışı maksimum Zeeman seviyesine ulaşmak için gereken RF akım seviyesini de azaltmaktadır.

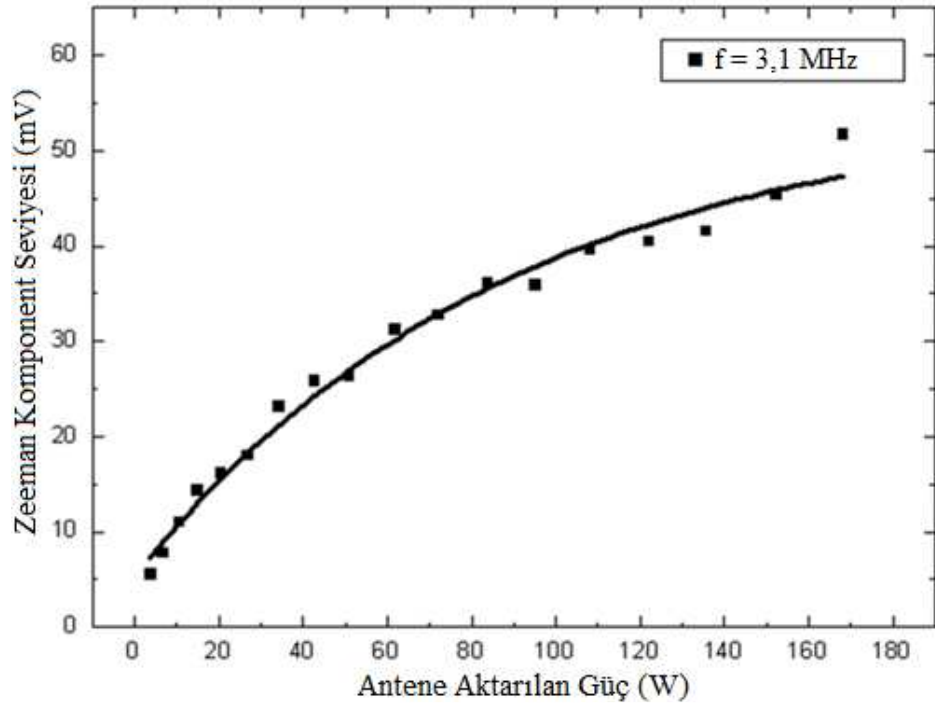
Hepsinin sonucu olarak bu atomik sensörün dinamik aralığı lazer ve mikrodalga gücü arttıkça artmaktadır. Atomik sensörün bu davranışı frekans ayarlama özelliğine ek olarak dinamik aralık ayarlama özelliğinin temellerini oluşturur.



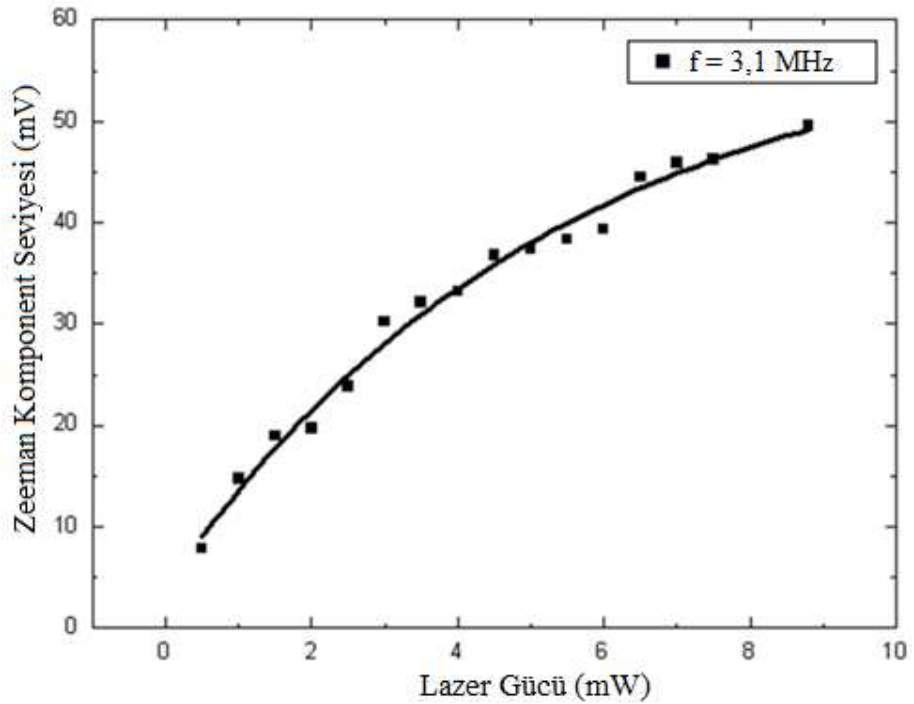
Şekil 4.14. RF akıma karşı Zeeman komponent seviye değişiminin 3,4 MHz için sabit 9 mW lazer gücünde çeşitli mikrodalga güçleri için gösterimi



Şekil 4.15. RF akıma karşı Zeeman komponent seviye değişiminin 3,4 MHz için sabit 170 W mikrodalga gücünde farklı lazer güçleri için gösterimi



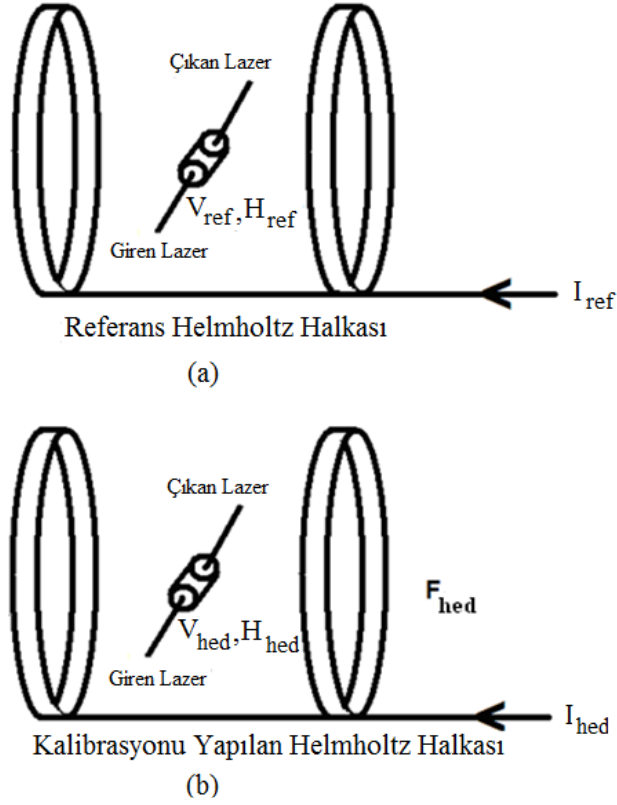
Şekil 4.16. Antene aktarılan güce karşı Zeeman komponent seviye değişimi (Sabit RF gücünde 3,1 MHz için)



Şekil 4.17. Lazer gücüne karşı Zeeman komponent seviye değişimi (Sabit RF gücünde 3,1 MHz için)

Nihai olarak, bu atomik sensörün bir uygulama örneği olarak halka antenlerin önemli bir türü olan Helmholtz halkası kalibrasyonlarında kullanılabilirliği için

teorik bir yol önerilecektir. Halka anten türlerinden özellikle Helmholtz halkasının seçilmesinin nedeni birçok halka anten tipi kalibrasyonu için EK B' de anlatıldığı üzere klasik standart metotlar mevcut olmasına karşın Helmholtz halka anten kalibrasyonları için klasik standart bir metodun mevcut olmamasıdır. Böylece tasarlanan bu atomik sensör kullanımı ile bu boşluk doldurulmaya çalışılacaktır.



Şekil 4.18. Tasarlanan atomik sensör ile Helmholtz halkası kalibrasyonları

Bu atomik sensörün biraz daha geliştirilmesi ve iyileştirilmesi ile, Şekil 4.10 – Şekil 4.13' de görülen grafiklerdeki yükselen bölgeler halka antenlerin özellikle her tür Helmholtz halka kalibrasyonları için bir kalibrasyon metodu olarak kullanılabilir. Helmholtz halkaları için standart tanımlanmış bir faktör olmamasına karşın, bizler onu basit bir şekilde Helmholtz girişindeki akımın, merkezinde oluşan manyetik alana oranı şeklinde basitçe tanımlayabiliriz. Bu faktör çok kullanışlıdır çünkü Helmholtz halkasının boyut ve sarım sayısı bilgilerine güvenmek zorunda kalmadan ve hesap yapmadan merkezindeki manyetik alan değerine ulaşabiliriz. Bu atomik sensörün bir referans kalibratör olarak kullanımı şu şekilde açıklanabilir. Atomik sensör ilk olarak hesaplanabilir birincil seviye bir

standart kullanılarak, örneğin birincil seviye bir Helmholtz halkası içinde, kalibre edilmelidir. Bu birincil seviye kalibrasyonda, lineer bölgedeki Zeeman komponent seviyesi V_{ref} ve birincil seviye Helmholtz halkasının giriş akımı, sarım sayısı ve boyutları kullanılarak atomik sensör üzerindeki manyetik alan H_{ref} ilerde kullanılmak üzere kayıt edilir [Şekil 4.18 (a)]. Atomik sensör bir kere birincil seviye Helmholtz içinde kalibre edildikten sonra, herhangi bir boyuttaki başka bir Helmholtz halkasının kalibrasyonunda referans kalibratör olarak kullanılabilir. Atomik sensör kalibre edilecek hedef Helmholtz merkezine yerleştirildiğinde ve hedef Helmholtz halkası merkezindeki Zeeman component seviyesi V_{hed} , V_{ref} ' e ulaştığında hedef Helmholtz halkası içindeki manyetik alan H_{hed} , H_{ref} olacaktır. Sonuç olarak hedef Helmholtz girişindeki akım I_{hed} ' ın merkezindeki manyetik alana H_{ref} ' e oranı hedef Helmholtz halkasının faktörünü verecektir [Şekil 4.18 (b)].

Bu tez kapsamının bir parçası olarak tasarlanan RF atomik manyetik alan sensörünün hem avantajlarından hemde dezavantajlarından bahsetmemiz gerekmektedir. Bu sensörün en önemli avantajı onun küçük boyutlarıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan sezyum tüpünün boyutları 5 cm (boy) x 2 cm (çap) olmasına rağmen, piyasada çok daha küçük sezyum hücreleri mevcuttur. Sezyum atomlarının boyutları dikkate alındığında bu atomik sensör pratikte mm hatta μ m boyutlarına kadar küçültülebilir. Ayrıca bu atomik sensör yapısının sadece cam küvet ve fiber optik kablolardan oluşmasından dolayı, bu sensör RF manyetik alanlar ile minimum etkileşim yaparak ölçüm gerçekleştirir. Bu durum minimum saçılma ve yansımaya sebep olacaktır ve daha düşük belirsizlikli ölçüm ve kalibrasyonların yolunu açacaktır. Dahası manyetik alan kaynakları genellikle ana frekans dışında harmonik ve alt harmonikleri de içermektedir. Geleneksel manyetik alan sensörlerinin ana işaret dışında harmonik ve alt harmonikleri de ölçmesi, geleneksel sensörlerin en büyük dezavantajıdır. Tanıtılan atomik sensör sadece ana sinyali ölçmekte diğer frekanstaki işaretlere cevap vermemektedir çünkü bu atomik sensörün çalışması sezyum atomunun enerji seviyelerine ve kuantum fiziğine dayanmaktadır. Diğer yandan, bu tez kapsamında tasarlanan genişbandlı ve şu anda 1 MHz ve üzeri çalışan atomik sensörün çalışması için bir mikrodalga kaynağı, fiber optik kablolar, fotodiyotlar, bir osiloskop ve bir doğru akım kaynağı gereklidir. Belirtilen cihazların eş zamanlı kullanımı, kullanım kolaylığı için bir yazılım gerektirmektedir. Bu gereksinimler bu sensörü diğer

manyetik alan sensörleri ile karşılaştırıldığında çalışma ve kullanım açısından pahalı ve karmaşık yapmaktadır. Çalışmamızdaki horn antenin kullanım gerekliliği ileri araştırmalarda DROR yerine CPT (Coherent Population Trapping) [48] işareti kullanımı ile kaldırılabilir. Diğer yandan CPT işareti, frekansları arasındaki fark 9,192 GHz olan 2 adet faz kitlemeli lazer gerektirecektir. İkinci olarak bu sensör çevre ısısına diğer tip sensörlere göre çok daha duyarlıdır, bu nedenle sıcaklık kontrollü bir ortamda veya yüksek kalite sıcaklık kontrol sistemiyle birlikte kullanılmalıdır. Yinede belirtilen bu dezavantajlara rağmen bu atomik RF manyetik sensör sıcaklık kontrollü bir laboratuvar ortamında hassas RF mikrodalga ölçümlerinde ve Helmholtz halkası gibi özel kalibrasyonlarda hassas kalibratör olarak kullanılabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında klasik elektromanyetik dalga ölçüm ve anten kalibrasyon sistemlerine iyi bir alternatif olabilecek ve bir çok yönden üstünlükler getiren oldukça küçük boyutlu, dielektrik yapılu ve harmoniksiz ölçüm yeteneğine sahip lazer-atom etkileşimine dayanan atomik bir elektromanyetik ölçüm sisteminin temelleri atılmıştır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, geliştirilen atomik sensörün taşınamaz sabit prototipinde ilk ölçümler gerçekleştirilmiştir. Atomik sensör verici antenin uzak alan bölgesine yerleştirilmiş ve atom-lazer-mikrodalga etkileşimi ile 9,192 GHz' de mikrodalga ölçümleri gerçekleştirilmiştir. DROR işareti, farklı lazer ve mikrodalga güçlerinde ölçülmüştür. DROR' un genlik değişimi 0,06 A/m – 3,18 A/m mikrodalga aralığı için yaklaşık 40 dB dinamik aralık ile gösterilmiştir. DROR' un Zeeman açılımı 6,5 Gauss – 10,5 Gauss statik manyetik alanı aralığı için icra edilmiştir. Ayrıca atomik sensörün darbeleri mikrodalgalara olan cevabı araştırılmış ve 10 µs' de bir limitleme gözlenmiştir. Tek frekanslı olmasına karşın bu atomik sensör özellikle anten ve sensör kalibrasyonlarında hassas bir kalibratör olarak kullanılabilir. Farklı enerji geçişleri ve farklı gazlar ile farklı frekanslar elde edilebilecektir.

Tez çalışmasının ikinci aşaması olarak yapılan ileri çalışmalar kapsamında atomik sensörün uzak alandaki karakterizasyonu ve uzak alan koşullarında sezyum - lazer – mikrodalga etkileşiminden elde edilen DROR ve Doppler/DROR ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca lazer gücü ve sıcaklığın, DROR ve Doppler/DROR ölçümlerine etkisi araştırılmıştır. 24 saatlik uzun bir ölçümde Doppler/DROR ve DROR ölçümlerinin dalgalanmaları sırasıyla 0,5 dB ve 0,9 dB olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla Doppler/DROR kullanımı ile yapılan elektromanyetik ölçümlerin sadece DROR kullanımı ile yapılan ölçümlere göre daha durağan ve hassas sonuçlar verebildiği deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca 9,192 GHz' de çalışan bu atomik sensör taşınabilir hale getirilerek İngiltere' nin NPL firması ile karşılaştırma ölçümlerine girilmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Üçüncü aşamada ise DROR' un Zeeman enerji geçişleri kullanılarak atomik sensör, RF manyetik alanları ölçebilecek şekilde tasarlanmış, frekansı ve dinamik aralığı ayarlanabilen genişbandlı bir RF manyetik alan sensörünün temelleri atılmıştır. Bu çalışmalarda RF manyetik alanların, DROR işaretinin Zeeman komponentlerine etkisi araştırılmış ve her bir Zeeman açılımına karşı gelen bir RF etkileşim frekansı olduğu gösterilmiştir. Seçilen örnek frekanslarda, RF alanlara karşı Zeeman komponent genliği grafiklerinde 10 dB' nin üzerinde dinamik aralık elde edilmiştir. Ayrıca lazer ve mikrodalga gücünün değiştirilmesi ile dinamik aralığın değiştirilebileceği gösterilmiştir. Küçük boyutları, karşılıklı etkileşimsiz dielektrik yapısı ve harmoniksiz ölçüm kabiliyeti dikkate alındığında, bu atomik RF manyetik alan sensörü hassas RF mikrodalga ölçümlerinde ve özellikle her tür Helmholtz halkası kalibrasyonlarında hassas kalibratör olarak kullanılmaya uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] Kanda M., Driver L. D., An isotropic electric-field probe with tapered resistive dipoles for broad-band use, 100 kHz to 18 GHz, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1987, **35**, 124-130.
- [2] Alexander M. J., Salter M. J., Loader B. G., Knight D. A., Broadband calculable dipole reference antennas, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 2002, **44**, 45-58.
- [3] Knight D. A., Nothofer A., Alexander M. J., Comparison of calibration methods for monopole antennas, with some analysis of the capacitance substitution method, *Nat. Phys. Lab.*, Teddington, U.K., NPL Rep. DEM-EM 005, 2004.
- [4] Alexander M. J., Salter M. J., Gentle D. G., Knight D. A., Loader B. G., Holland K. P., Calibration and use of antennas, focusing on EMC applications, *Nat. Phys. Lab.*, Teddington, U.K., Meas. Good Practice Guide No 73, NPL, 2004.
- [5] Kanda M., Ries F. X., A broad-band isotropic real-time electric-field sensor (BIERS) using resistively loaded dipoles, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 1981, **23**, 122-132.
- [6] Berger H. S., Kumara V., Matloubi M., Consideration in the design of a broadband E-field sensing system, *IEEE Symp. Electromagn. Compat.*, Seattle, ABD, 2-4 Ağustos 1988.
- [7] Murakawa K., Kuwabara N., Amemiya F., Radiation properties of a spherical dipole antenna, *IEEE Symp. Electromagn. Compat.*, Nagoya, Japonya, Eylül 1989.
- [8] Crawford M. L., Workman J. L., Spherical dipole for radiating Standard fields, *Conf. Precision Electromagn. Meas. Dig.*, Braunschweig, Almanya, 17-20 Haziran 1980.
- [9] Phelan R. J., Larson D. R., Simpson P. A., A sensitive, high frequency, electromagnetic field probe using a semiconductor laser in a small loop antenna, *SPIE, Fiber Opt. Laser Sens. III*, 1986, **566**, 300-306.
- [10] Pfaff W. R., Feser K., Lutz M., Potential-free special sensor for field strength measurement in NEMP research and testing, *8th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat.*, Zürich, İsviçre, 7-9 Mart 1989.
- [11] Kuwabara N., Amemiya F., Tokuda M., An electric field probe using a bulk LiNbO₃ electro-optic crystal, *OEC*, Japonya, 1990.

- [12] Wyss J. C., Sheeran S. T., A practical optical modulator and link for antenna, *J. Lightwave Technol.*, 1984, **3**, 316-321.
- [13] Kuwabara N., Tajima K., Kobayasi R., Amemiya F., Development and analysis of electric magnetic field sensor using LiNbO₃ optical modulator, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 1992, **34**, 391-396.
- [14] Yang K., David G., Yook J. G., Papapolymerou I., Katehi L. P. B., Whitaker J. F., Electrooptic mapping and finite-element modeling of the near-field pattern of a microstrip patch antenna, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2000, **48**, 288-294.
- [15] Togo H., Sasaki A., Hirata A., Nagatsuma T., Characterization of millimeter-wave antenna using photonic measurement techniques, *Int. J. RF Microw.*, 2004, **14**, 290-297.
- [16] Togo H., Onishi T., Kiminami K., Shimizu N., Nagatsuma T., Uebayashi S., Tip-on-fiber electro-optic probe for specific absorption rate measurement, *AP-MWP*, Kobe, Japonya, Nisan 2006.
- [17] Wakana S., Ohara T., Abe M., Yamazaki E., Kishi M., Tsuchiya M., Fiber-edge electrooptic/magneto-optic probe for spectral-domain analysis of electromagnetic field, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2000, **48**, 2611-2616.
- [18] Mann W., Petermann K., Tiny opto-electronic E-field probes for up to 5 GHz, *ESA Workshop Aerosp. EMC*, Florence, İtalya, 30 Mart - 1 Nisan 2009.
- [19] Zibrov A. S., Zhukov A. A., Yakovlev V. P., Velichansky V. L., Shape of the signal of double radio-optical resonance in ⁸⁵Rb atomic vapors in strong fields, *JETP Lett.*, 2006, **83**, 136-140.
- [20] Litvinov A., Kazakov G., Matisov B., Mazets I., Double radio-optical resonance in ⁸⁷Rb atomic vapour in a finite-size buferless cell, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2008, **41**, 1-8.
- [21] Budker D., Holberg L., Kimball D. F., Kitching J., Pustelny S., Yashchuk V. V., Microwave transitions and nonlinear magneto-optical rotation in anti-relaxation-coated cells, *Phys. Rev. A*, 2005, **71**, 1-9.
- [22] Paulusse D., Rowell N., Michaud A., Realization of a atomic microwave power standard, *Conf. Precision Electromagn. Meas.*, Ottawa, ON, Kanada, 16-21 Haziran 2002.
- [23] Crowley T. P., Donley E. A., Heavner T. P., Quantum-based microwave power measurements: Proof-of-concept experiment, *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**, 2575-2580.
- [24] Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems And Equipment, *Department of Defence USA*, MIL-STD-461F-2007.

- [25] IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz, IEEE Std C95.3-2002.
- [26] Household and similar electrical appliances - Electromagnetic fields - Methods for evaluation and measurement, EN 50366:2003.
- [27] Ripka P., Janosek M., Advances in Magnetic Field Sensors, *IEEE Sensors Journal*, 2010, **10**, 1108-1116.
- [28] James Lenz, Alan Edelstein, Magnetic Sensors and Their Applications, *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**, 631-649.
- [29] John Kitching, Svenja Knappe, Elizabeth Donley, Atomic Sensors-A Review, *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**, 1749-1758.
- [30] Petridis C., Dimitropoulos P. D., Hristoforou E., New Magnetic Field Sensor Based on Combined Flux-Gate/Hall-Effect Arrangement, *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**, 128-134.
- [31] IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antenna, from 9 kHz to 40 GHz, IEEE Std 1309-2005.
- [32] Bronaugh E. L., Helmholtz Coils for EMI Immunity Testing: Stretching the Uniform Field Area, *Electromagnetic Compatibility, 7th Int'l. Cod. on EMC*, Institution of Electrical Engineers, York, İngiltere, 28-31 Ağustos 1990.
- [33] Ruark A.E., Peters M. F., Helmholtz coils for producing uniform magnetic fields, *J. Opt. Soc. Am. and Rev.Sci. Instr.*, 1926, **13**, 205-212.
- [34] McKeehan L. W., Combinations of circular currents for producing uniform magnetic fields, *Review of Scientific Instruments*, 1936, **7**, 150.
- [35] Barker J. R, New coil systems for the production of uniform magnetic fields, *J. Sci. Instrum.*, 1950, **27**, 197.
- [36] Garrett M. W., Axially symmetric systems for generating and measuring magnetic fields, *J. Appl. Phys.*, 1951, **22**, 1091-1107.
- [37] Carter R. G, Coil-system design for production of uniform magnetic fields, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1976, **123**, 1279-1283.
- [38] Bronaugh E. L., Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Atlanta, ABD, 14-18 Ağustos 1995.
- [39] Frix W. M., Karady G. G., Venetz B. A., Comparison of calibration systems for magnetic field measurement equipment, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, **9**, 100-108.

- [40] Firester Arthur H., Design of Square Helmholtz Coil Systems, *Review of Scientific Instruments*, 1966, **37**, 1264-1265.
- [41] Rubens S. M., Cube-Surface Coil for Producing a Uniform Magnetic Field, *Review of Scientific Instruments*, 1954, **16**, 243-245.
- [42] Pasmooij W. A., A Helmholtz large loop antenna system for improved magnetic field measurements, *Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility*, Edinburgh, İskoçya, 21-24 Eylül 1992.
- [43] IEEE Standard Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength of Sinusoidal Continuous Waves, 30 Hz to 30 GHz, IEEE Std 291-1991.
- [44] Electromagnetic Interference Measurement Antennas; Standard Calibration Method, SAE-ARP 958 Rev.D.
- [45] Ishii M., Hirose M., Komiyama K., Measurement Method for Magnetic Antenna Factor of Small Circular Loop Antenna by 3-Antenna Method, *URSI North American Radio Science Meeting*, Columbus, ABD, 22-27 Haziran 2003.
- [46] Pierre P., Fredriksen A., B-dot Plasma Probe, *Florian Lucien Measures Physiques*, 2008.
- [47] DeTroye D. J., Chase R. J., 1994, November, The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields, Army Research Laboratory, MD, <http://www.dtic.mil/> (Ziyaret tarihi : 01 Ekim 2011).
- [48] Jacques Vanier, Aldo Godone, Filippo Levi, Coherent population trapping in cesium: Dark lines and coherent microwave emission, *Phys. Rev. A*, 1998, **58**, 2345-2358.
- [49] Nagel A., Graf L., Naumov A., Mariotti E., Biancalana V., Meschede D., Wynands R., Experimental realization of coherent dark-state magnetometers, *Europhys. Lett.*, 1998, **44**, 31-36.
- [50] Thomas Olsen, Toke Lynas Larsen, 2004, May., Double Resonance Spectroscopy On The Cesium Atomic Clock, Quantop Laboratory Niels Bohr Institute University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, <http://dcwww.camd.dtu.dk/~tolsen/bachelor.pdf> (Ziyaret tarihi : 01 Ekim 2011).
- [51] Wynands R., Nagel A., Brandt S., Meschede D., Weis A., Selection rules and line strengths of Zeeman-split dark resonances, *Phys. Rev. A*, 1998, **58**, 196-203.
- [52] Bekir Karaoğlu, *Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik*, First edition, ARTE GÜVEN, İstanbul, 73-260, 1996.
- [53] Haken H., Wolf H. C., *The Physics of Atoms and Quanta*, Sixth edition, Springer, New York, 81-201, 2000.

- [54] Marcis Auzinsh, Dmitry Budjer, Simon Rochester, *Optically Polarized Atoms*, First edition, Oxford University Press, New York, 8-29, 2010.
- [55] Constantine Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, Third edition, Wiley-Interscience A John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey, 27-112, 2005.
- [56] IEEE Antenna Standards Committee, and Boles, M., A., ANSI/IEEE Std 149-1979 IEEE Standard Test Procedures for Antennas, (Revision of IEEE Std 149-1965), *IEEE*, 78-84, 1979.
- [57] Jean-Louis Picque, Hyperfine Optical Pumping of a Cesium Atomic Beam, and Applications, *2nd Symposium on Frequency Standards and Metrology*, Copper Mountain, Colorado, ABD, 5-7 Temmuz 1976.
- [58] Paulusse D., Rowell N., Michaud A., Realization of a atomic microwave power standard, *Conf. Precision Electromagn. Meas.*, Ottawa, ON, Canada, 16–21 Haziran 2002.
- [59] Demtröder W., *Laser Spectroscopy*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1996.
- [60] ANSI/IEEE Standard C63.4-1992, American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz.
- [61] CISPR 16-1-4, Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measurement Methods, IEC 2004.
- [62] CENELEC EN50147-1: 1996, Anechoic Chambers Part 1: Shield Attenuation Measurement.
- [63] Şen O., Sezyum (Cs) atomik gazı ile mikrodalga ve lazer ışınımının rezonans etkileşimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009, 245367.

EKLER

EK-A

A.1. ATOM FİZİĞİ

Bu bölümde, doktora tez çalışmasında kullanılan atom fiziği konularının desteklenmesi ve daha iyi anlaşılması için gerekli olacak en temel atom fiziği konuları [52,53,54] referansları kullanılarak anlatılacaktır. Bu amaçla ilk olarak temel unsur olarak hidrojen atomunun incelenmesi gerekmektedir. Hidrojen atomunun tek elektronu için en basit zamandan bağımsız Schrödinger dalga fonksiyonu;

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta - \frac{e^2}{r} \right) \psi_{nlm}(\vec{r}) = E_n \psi_{nlm}(\vec{r}) \quad (\text{A.1})$$

olarak verilir. Burada;

h = Planck sabiti, $\hbar = h/2\pi$, m_e = elektron kütlesi, e = elektron yükü

\vec{r} = elektronun çekirdeğe göre konum vektörü

$$\Delta = \nabla^2 = \sum_i \frac{\partial^2}{\partial r_i^2}$$

E_n = Atom için enerji düzeyleri (hidrojen, tek elektronlu olduğundan tek elektronun enerji düzeyi atomun enerji düzeyi olacaktır)

$\psi_{nlm}(\vec{r})$ = İlgili enerji düzeyi için elektronun dalga fonksiyonu olarak verilir.

Şu an için elektronun kendi eksenini çevresindeki dönüş hareketi ihmal edilirse sadece çekirdek çevresinde yörünge hareketi yaptığı varsayılırsa E_n enerjisi sadece ana kuantum sayısı olarak bilinen n sayısına bağlı olacaktır.

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{m_e e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad n = 1,2,3,\dots \quad (\text{A.2})$$

Eşitlik (A.1)' de görülen dalga fonksiyonuna dikkat edilirse iki kuantum sayısı ile daha etiketlenmiştir. Bunlardan biri yörünge kuantum sayısı l ve diğeri manyetik kuantum sayısı m dir. Her ikisi de elektronun çekirdek çevresindeki yörünge hareketi ile ilişkili kuantum sayılarıdır. Şimdilik elektronun kendi eksenindeki spin hareketini hesaba katmaz isek, l ve m kuantum sayıları ile bir enerji seviyeye (n) karşı gelen n^2 farklı dalga fonksiyonu vardır. Kısacası her enerji düzeyi, n farklı dalga fonksiyonlarına sahiptir ve elektron o dalga fonksiyonlardan herhangi birine sahip olabilir.

Tek elektronlu hidrojen atomunda l açısal momentum kuantum sayısı açısal momentum vektörünün modülü ile ilişkili bir sayıdır.

$$|\vec{l}| = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (\text{A.3})$$

Bu eşitlikteki momentum vektörü \vec{l} ile kuantum sayısı l karıştırılmamalıdır. Eşitlik (A.3)' ten görüldüğü gibi l kuantum sayısı kesinlikle \vec{l} vektörünün doğrudan büyüklüğünü gösteren bir sayı değildir sadece onun büyüklüğü ile ilişkili bir değerdir. Bu formülün en önemli sonucu elektronun açısız momentumunun kuantalı (sadece belirli değerler alan) olduğu gerçeğidir. Bir E_n enerji durumu için, n kuantum sayısı olmak üzere, açısız kuantum sayısı $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ değerlerini almaktadır. Bu değerler daha sonra inceleneceği üzere s, p, d, \dots orbitallerine karşı gelmektedir. Kuantum mekaniğinde açısız momentumun yönünü bilmek mümkün değildir, fakat bilebileceğimiz maksimum bilgi elektronun açısız momentumunun bir eksen üzerindeki izdüşümüdür. Genel kullanım amacıyla bu eksen z ekseni olarak seçilmektedir. Açısız momentumun z ekseni üzerinde izdüşümü kuantalı (sadece belirli kesikli) değerler almaktadır.

$$l_z = m\hbar \quad m = -l, -l+1, \dots, l-1, l \quad (\text{A.4})$$

Şu kesin olarak söylenebilir ki z ekseni üzerinde izdüşüm büyüklüğü $\sqrt{l(l+1)}\hbar$ ' den küçük olacaktır çünkü bu değer açısız momentumun toplam büyüklüğüdür, yani x ve y bileşenleri dahil büyüklüğüdür. Burada m , manyetik kuantum sayısı olarak isimlendirilir. Her farklı m sayısı, açısız momentum vektörünün uzaydaki farklı yönelimini göstermektedir.

Tekrar tek elektronlu en basit atom olan hidrojene dönersek n, l ve m kuantum sayılarının her bir kombinasyonu farklı bir dalga fonksiyonuna $\psi_{nlm}(\vec{r})$ karşı gelmektedir. Hidrojen atomu için bu dalga fonksiyonunun çözümünün ilk adımı onu radyal (r) ve açısız (θ, φ) parçalara ayırmaktır böylece dalga fonksiyonu polar koordinatlarda,

$$\psi_{nlm}(\vec{r}) = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (\text{A.5})$$

olarak ifade edilebilir. Görüldüğü üzere radyal parça n ve l kuantum sayılarına bağlı, açısız parça ise l ve m kuantum sayılarına bağlıdır. Dalga fonksiyonunun radyal ve açısız parçalara ayrılması aslında sadece hidrojene özgü değildir. Her elektronun sadece merkezi bir kuvvetin etkisinde olduğu varsayımı ile bu kural tüm atomlardaki elektronlara uygulanabilir. Yani bu varsayım ile elektronun sadece çekirdeğe olan mesafesi potansiyel enerjisini belirleyecektir. Çok elektronlu atomlarda ise, bir elektron için, diğer tüm elektronların ve çekirdeğin etkilerinin toplamının yaklaşık merkezi olduğu yaklaşımı yapılabilir.

Şu ana kadar bir elektronun sadece yörüngesel açısız momentuma sahip olduğu kabul edilmiştir, fakat deneysel çalışmalar yörüngesel açısız momentuma ek olarak elektronun kendi eksenindeki dönüşünden kaynaklanan doğal bir açısız momentuma daha sahip olduğunu göstermiştir. Buna spin açısız momentum denilmektedir ve s spin kuantum sayısı ile karakterize edilir. Yörünge açısız momentum kuantum sayısı

(l)' den farklı olarak spin kuantum sayısı s tek bir değer olan $1/2$ değerini alır. Bunun anlamı bir elektronun spin açısal momentumunun modülü,

$$|\vec{s}| = \sqrt{s(s+1)}\hbar = \frac{\sqrt{3}}{2}\hbar \quad (\text{A.6})$$

olacaktır. Benzer şekilde z eksenine düşen izdüşüm,

$$s_z = m_s \hbar \quad m_s = \pm \frac{1}{2} \quad (\text{A.7})$$

olur. Spin aşağı ve spin yukarı terimleri z eksenindeki izdüşümünün yönünü ifade etmektedir.

Hem yörüngesel açısal momentum hem de spin açısal momentuma ulaştıktan sonra şimdi yörüngesel ve spin moment (sırasıyla μ_s ve μ_l) kavramlarını inceleyip momentumla ilişkilerini gösterelim. Klasik fizikten biliyoruz ki A alanına sahip ve üzerinden I akımı akan bir halkanın manyetik moment büyüklüğü $|\vec{\mu}| = \mu = IA/c$ olur. Buradaki akımı oluşturan çekirdek çevresinde yörünge hareketi yapan elektron olacaktır. Ayrıca momentumun kütle ve hızın çarpımı ($\vec{p} = m_e \vec{v}$), açısal momentumun da momentum ile merkezi konum vektörünün çarpımı ($\vec{l} = \vec{p} \times \vec{r}$) olduğu dikkate alınarak yörünge manyetik momentini (μ_l) ile yörünge açısal momentumunu (\vec{l}) arasındaki aşağıdaki ilişkiye ulaşabiliriz.

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m_e c} \vec{l} = -\gamma \vec{l} \quad (\text{A.8})$$

Burada $\gamma = e/2m_e c$ sabitine “gyromagnetic” oran denilmektedir. Artık az önce vektör olarak verdiğimiz manyetik moment eşitliğinde, daha önce bulunan yörünge açısal momentumu yerine koyarak manyetik moment büyüklüğünü bulabiliriz.

$$\mu_l = -\frac{e\hbar}{2m_e c} \sqrt{l(l+1)} = -\mu_B \sqrt{l(l+1)} \quad (\text{A.9})$$

Burada, $\mu_B = e\hbar/2m_e c$ sabitine “Bohr Magneton” ismi verilmiştir.

Benzer şekilde spin manyetik momentini de,

$$\mu_s = -2\frac{e\hbar}{2m_e c} \sqrt{s(s+1)} = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)} \quad (\text{A.10})$$

olarak tanımlanır. Yörünge manyetik momentten farklı olarak bu eşitlikte ekstra olarak $g_s \approx 2$ faktörü olduğuna dikkat edilmelidir. Yörünge manyetik moment fomülünde yazılmasa bile $g_l \approx 2$ olduğu düşünülür. Artım toplam manyetik moment,

$$\vec{\mu} = -\mu_B(\vec{l} + 2\vec{s}) \quad (\text{A.11})$$

olarak yazabiliriz.

Şimdi yörüngeden kaynaklanan açısız momentum (\vec{l}) ile spin açısız momentumun (\vec{s}) etkileşimini inceleyeceğiz. Bu iki momentumun etkileşim olayına spin-yörünge etkileşimi denilmektedir. Elektronun yörünge hareketi sırasında, bu olay tam ters olarak çekirdek elektron çevresinde dönüyormuş gibi düşünülebilir ve bu durum elektron üzerinde bir manyetik alan oluşturacaktır. Bu manyetik alan elektronun spin manyetik momenti ile etkileşecektir ve bu etkileşim bir enerji kayması oluşturmaktadır. Bu enerji kayması \vec{l} ve \vec{s} vektörlerinin yönelimine bağlı olacaktır. Bu iki vektörün vektörel toplamı toplam açısız momentum olarak anılmaktadır. Şu anda tek elektronlu hidrojen atomunu incelediğimizden dolayı bu toplam açısız momentumu atomun açısız momentumu olarak kabul edebiliriz. Toplam açısız momentum;

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s} \quad (\text{A.12})$$

olacaktır. Benzer şekilde,

$$|\vec{j}| = \sqrt{j(j+1)}\hbar \quad (\text{A.13})$$

ve

$$j_z = m_j\hbar \quad |m_j| \leq j \quad (\text{A.14})$$

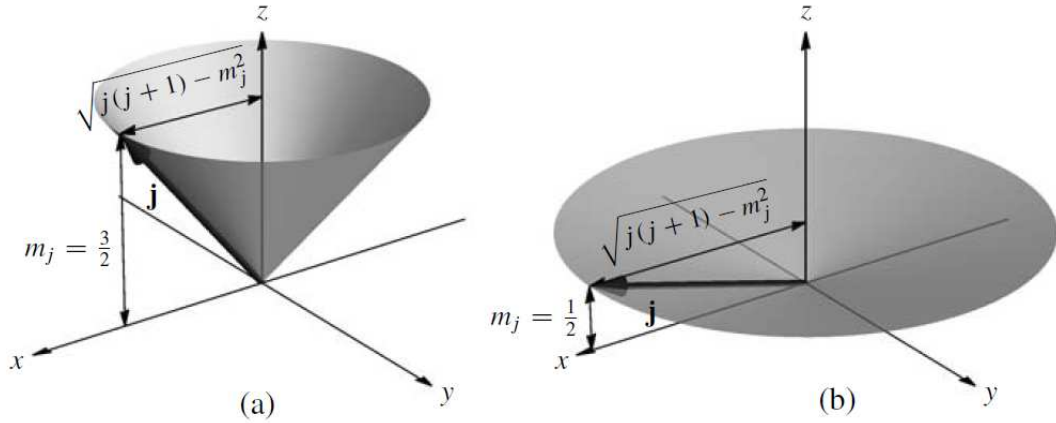
olacaktır. j ' nin değerlerini bulabilmek için \vec{l} ve \vec{s} vektörlerini klasik vektörlermiş gibi düşünerek toplamlarını düşünebiliriz. O halde j değeri $|l - s|$ ile $|l + s|$ arasındaki +1 adımlı değerler olacaktır. Hidrojenin tek elektronu için $s = 1/2$ olduğundan $l = 0$ için $j = 1/2$ ve $l > 0$ için $j = l \pm 1/2$ olacaktır. Elektronun yörüngesel hareketi ve spinin etkileşimi ile birlikte diğer rölativistik etkiler için Schrödinger denkleminde bir düzeltme faktörü uygulanması gerekmektedir. Bu düzeltme faktörleri normalde sadece n sayısına bağlı olması gereken enerji seviyelerinde kaymalara sebep olacaktır. Yörünge ve spin etkileşimi hesaba katıldığında daha önce verilen enerji eşitliğinin aşağıdaki gibi yenilenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yeni enerji eşitliği,

$$E_n = \left[-\frac{1}{n^2} + \alpha^2 \left(\frac{3}{4n} - \frac{1}{j+1/2} \right) \frac{1}{n^3} \right] \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \quad (\text{A.15})$$

olacaktır. Buna Dirac formülü denilmektedir. Boyutsuz ince yapı (fine structure) sabiti $\alpha = e^2 / \hbar c = 1/137$ olarak tanımlanır. Bu α ' nın küçük oluşu nedeniyle bundan spin-yörünge etkileşiminden kaynaklanacak enerji kaymasının çok küçük olduğu görülecektir. Bu nedenle bu kaymaya ince yapı (fine structure) kayması denilmektedir. Bu ince yapıya güzel bir örnek vermek için hidrojen atomunu düşünelim. Hidrojenin tek elektronunun, ikinci enerji kabuğunun p orbitalinde ($l=1$)

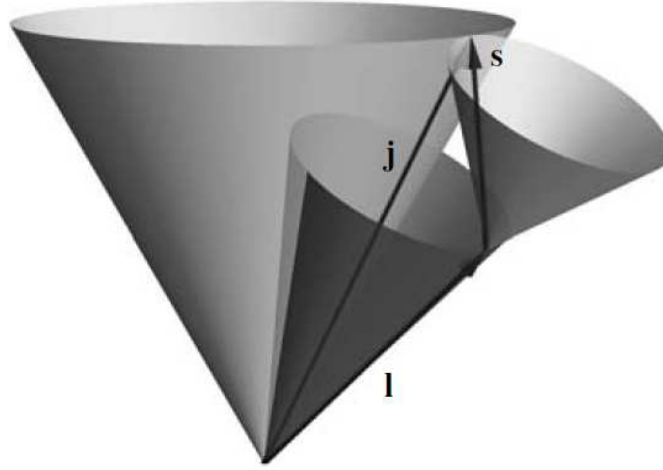
olduğunu düşünelim. Yani $n = 2$ ve $l = 1$ dir. Bu noktada elektronun spin aşağı veya spin yukarı ($s = 1/2$ veya $s = -1/2$) olma durumuna göre toplam açısal momentum sayısı j ' nin iki değeri olacaktır, $j = 1/2$ ve $j = 3/2$. Bu iki j değeri için Eşitlik (A.15) uyarınca iki farklı enerji durumu oluşacaktır fakat bu iki enerji düzeyi arasındaki fark o kadar küçüktür ki bu tür yörünge-spin etkileşiminden kaynaklanan enerji ayrılmasına ince yapı denilmektedir. Burada bir önemli noktaya daha değinmek gerekmektedir. Belirtilen Dirac eşitliği ayrıca şunu da söylemektedir, eğer ki bir veya birkaç enerji durumu için n ve j kuantum sayıları aynı ise bunların enerji sevipleri eşit olmalıdır çünkü Dirac eşitliği l ve s kuantum sayılarını içermemektedir yani enerji bu iki kuantum sayısından bağımsızdır. Diğer bir deyişle, yörünge-spin etkileşiminden kaynaklanan enerji ayrımı yani ince yapı l ve s kuantum sayılarına bağlı değildir. Fakat deneysel veriler bununla tam olarak uyuşmamaktadır. n ve j sayıları aynı olsa bile l sayısı farklı durumlar için çok küçük enerji farkları tespit edilmektedir. Örneğin $n=2$, $j=1/2$, $l=1$ durumu ile $n=2$, $j=1/2$, $l=0$ durumu arasında ince yapı yoktur ama ondan çok daha küçük "Lamp" kayması denilen bir enerji kayması bulunmaktadır. Burada "Lamp" kayması çok detaya girilmeden sadece bilgi amaçlı verilmiştir.

Her alanda olduğu atom fiziği alanında da görsel şekiller çok yararlı olmaktadır. Bu nedenle hidrojen atomu için toplam açısal momentumun (\vec{j}) vektörel gösterimi Şekil A.1' de belirtilmiştir. Kuantum fiziğinde bulunan belirsizlik ilkesi nedeniyle (Heisenberg belirsizlik ilkesi) tam olarak yönünü bilmek mümkün değildir fakat z eksenine izdüşüm değeri net olarak bilinmektedir. Bu nedenle \vec{j} vektörünün gösteriminde klasik vektör gösteriminden farklı olarak z eksenine izdüşümü belli ama x ve y izdüşümleri tam olarak bilinmeyen aşağıdaki koni şeklinde sürekli bir gösterim uygun olacaktır. \vec{j} vektörünün büyüklüğü ve z eksenin üzerindeki izdüşümü $|\vec{j}| = \sqrt{j(j+1)}\hbar$ ve $j_z = m_j\hbar$ $|m_j| \leq j$ uyarınca sabittir, ama koni üzerindeki tam pozisyonu belli değildir.



Şekil A.1. \vec{j} vektörünün vektörel gösterim, (a) $m_j = 3/2$, (b) $m_j = 1/2$ [54]

Ayrıca tek elektronlu hidrojen atomu için \vec{s} ve \vec{l} vektörlerinin vektörel toplamları ile \vec{j} vektörünün elde edilmesinin görsel şekli Şekil A.2' de verilmiştir.



Şekil A.2. Spin açısai momentum (\vec{s}) ve yörünge açısai momentum (\vec{l}) vektörlerinin vektörel toplamları ile toplam açısai momentum (\vec{j}) vektörünün elde edilmesi [54]

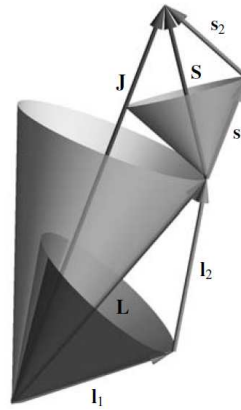
Şu ana kadar tamamiyle tek elektronlu hidrojen atomu incelendi, şimdi ise çok elektronlu atomları inceleyeceğiz. Çok elektronlu atomların tek elektronlu olanlardan en büyük farkı bir elektronun sadece çekirdek ile değil aynı zamanda diğer elektronlar ile de etkileşim içinde olmasıdır. Çok elektronlu bir atomda bu durum, Schrödinger denkleminde aşağıdaki gibi yansıyacaktır.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \sum_i \Delta_i - \sum_i \frac{Ze^2}{r_i} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{r_{ij}} \right) \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_Z) = E \psi(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_Z) \quad (\text{A.16})$$

Bu eşitlikte i ve j elektron etiketleridir. Bu eşitlikteki j ile toplam açısai momentum kuantum sayısı j birbirine karıştırılmamalıdır. $r_{ij} = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ olup iki elektron arasındaki mesafeyi vermektedir. Z ise çekirdekdeki proton sayısıdır. Kısacası, hidrojen atomuna kıyas ile çok elektronlu bir atom içindeki bir elektrona çok daha karmaşık bir elektrik alan etki etmektedir.

Çok elektronlu atomlarda bir elektronun sadece çekirdek ile değilde diğer elektronlar ile de etkileşim içinde olma gerçeğine rağmen, her bir elektronun sadece merkezi toplam elektrik alan gördüğünü kabul etmek iyi bir yaklaşım olabilir. Bu yaklaşımla her elektronu merkezi potansiyelli Schrödinger denklemleri ile ifade etmek ve dolayısıyla hidrojene benzer şekilde radyal ve açısai olarak iki parça şeklinde çözmek mümkün olabilecektir. Bu en ideal yaklaşımda, önemli iki parametre ihmal edilmektedir, bunlardan biri aslında merkezi olmayan yada merkezi olarak kabul edilemeyen elektronlardan kaynaklanan kalıntı Coulomb enerjisi, diğeri ise spin-yörünge etkileşiminden kaynaklanan enerjidir. Ayrıca, çok elektronlu atomlara geçtiğimizde, az önce hidrojenin tek elektronu, ve tek elektron olmasından dolayı atomun tamamı için geçerli olan \vec{s} , \vec{l} , \vec{j} vektörleri, çok elektronlu bir atom için bir

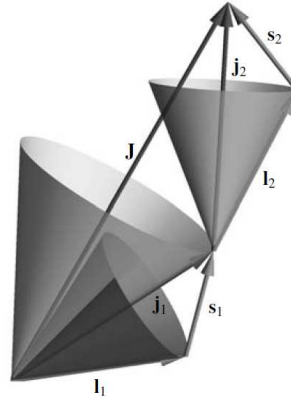
çok elektronunun bileşkesi olan atomun tamamı için geçerli olacak olan büyük harfli \vec{S} , \vec{L} ve \vec{J} vektörlerine dönüşecektir. Artık atom içinde tek elektron olmadığı için her elektronun \vec{l}_i ve \vec{s}_i vektörlerinin bileşkeleri alınarak atomun kendisi için toplam spin açısal momentumundan (\vec{S}), toplam yörünge açısal momentumundan (\vec{L}) ve toplam açısal momentumundan (\vec{J}) bahsedilmesi gerekmektedir. Bu bileşke işleminin gerçekleşme şekli iki şekilde olmaktadır. Bunlardan biri kalıntı Coulomb kuvvetinin baskın olduğu durumda “*LS* Bileşkesi”, diğeri ise spin-yörünge etkileşiminin baskın olduğu durumdaki “*jj* Bileşkesi” olarak isimlendirilmektedir. Her iki bileşke metodu her atomda görülmesine karşın, hafif atomlarda baskın olarak “*LS* Bileşkesi” görülürken, ağır atomlarda “*jj* Bileşkesi” baskındır. *LS* bileşkesinin vektörel gösterim şekli Şekil A.3’ de verilmiştir. Her elektronun yörünge açısal momentumları (\vec{l}_i) kendi aralarında toplanarak atomun toplam yörünge açısal momentumunu (\vec{L}) oluştururken, benzer şekilde her elektronun spin açısal momentumunda (\vec{s}_i) vektörel toplanarak atomun toplam spin açısal momentumunu (\vec{S}) oluşturur. Bundan sonra toplam yörünge açısal momentumunu (\vec{L}) ve toplam spin açısal momentumunu (\vec{S}) vektörel toplanarak atomun toplam açısal momentumunu (\vec{J}) oluşturur. Hafif atomlarda baskın olarak görülen *LS* bileşkesinin asıl sebebi merkezi yaklaşım dışında kalan, bu merkezi kuvvet yaklaşımını bozan, merkezi yapılamayan kalıntı “Coulomb” etkileşimidir. Bu merkezi olarak kabul edilemeyen kalıntı etkileşim nedeniyle her elektronun \vec{l}_i vektörü kendi aralarında, her bir elektronun \vec{s}_i vektörü kendi aralarında toplanır \vec{L} ve \vec{S} vektörleri oluşturulur. Bu hafif atomlarda her elektron için spin-yörünge etkileşimi ihmal edilmektedir. Onun yerine tüm elektronlardan gelen toplam \vec{L} ile \vec{S} etkileşmektedir. Az sonra inceleneceği üzere ağır atomlarda ise her elektron için \vec{s}_i ve \vec{l}_i etkileşimini kısacası spin-yörünge etkileşimi baskınlık kazanacaktır.



Şekil A.3. Çok elektronlu en basit atom Helyum için *LS* kuplajlama [54]

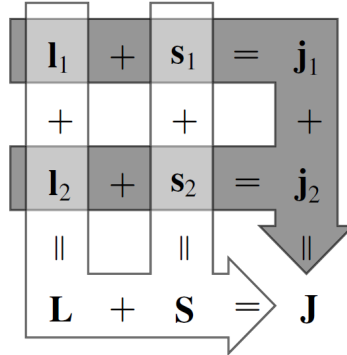
Çok elektronlu atomların en basiti olan hafif iki elektronlu helyum atomu için örnek LS kuplajlama Şekil A.3' te verilmiştir. Artık oluşan nihai \vec{L} ve \vec{S} vektörlerinin birbirlerine göre göreceli yönelmeleri hidrojende de incelendiği gibi ince yapı (fine structure) enerji ayrılmasına sebep verecektir.

Bazı durumlarda, örneğin ağır atomlarda spin-yörünge etkileşimi kalıntı Coulomb kuvvetinden (LS kuplajlamaya sebep olan kuvvet) daha etkili olabilmektedir, bu durumda LS kuplajlama şeması artık kullanılamaz. Burada artık jj kuplajlama daha baskındır ve örnek vektörel gösterimi iki elektronlu bir atom için Şekil A.4' te verilmiştir. Dikkat edilirse LS kuplajlamadan farklı olarak her elektronun \vec{l}_i ve \vec{s}_i vektörleri ilk olarak kendi arasında toplanarak o elektron için \vec{j}_i vektörünü oluşturur ve nihai olarak tüm elektronlardan gelen \vec{j}_i ' ler toplanarak atom için toplam açısal momentum vektörü \vec{J} elde edilir.



Şekil A.4. İki elektronlu atom için jj kuplajlama gösterim şekli [54]

Örnek olarak iki elektronlu bir atom için LS ve jj kuplajlama arasındaki farkı en iyi anlatan gösterim Şekil A.5' te sunulmuştur.



Şekil A.5. LS ve jj kuplajlamanın farkının gösterim şekli [54]

Bu noktada çok elektronlu atomlarda durumları gösteren notasyondan bahsetmemiz gerekmektedir. Bir atomik durumun n , l , m ve s gibi kuantum numaraları ile betimlenmekte olduğu daha önce belirtilmiş idi. Bunların tamamı sayılarla ifade edilirken, bu kuantum numaralarından yörüngesel açısal momentum (l) sayılara ek olarak ayrıca harflerle de (orbital) ifade edilmektedir. Bu durum aşağıda gösterilmiştir.

$$l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, \dots$$

$$l = s, p, d, f, g, h, i, k, l, m, \dots$$

Çok elektronlu atomların elektron dizilişleri temel kuantum sayısı n ve bu orbital harfleri ile ifade edilir. Örneğin temel seviyesindeki 11 elektronlu sodyum (Na) için elektron açılımı $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s$ şeklinde olur. Bazen bu elektron açılımı en yakın asal gazın ismi kullanılarak yapılabilir. Örneğin 10 elektronlu Neon (Ne) gazını kullanarak, 11 elektronlu Sodyum (Na) atomu $[\text{Ne}]3s$ olarak ifade edilebilir.

Daha önce görülen LS kuplajlama şemasında da atomun durumu L , S ve J kuantum sayıları ile verilmektedir. L sayısı toplam yörünge açısal momentum kuantum sayısı olup atom için yine $0, 1, 2, 3, 4, \dots$ sayıları ama büyük orbital harfleri ile gösterilir, S, P, D, F, \dots . Genel gösterim;

$$n^{2S+1}L_J \quad (\text{A.17})$$

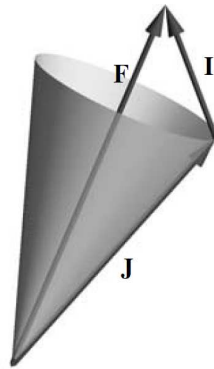
şeklindedir. Bu gösterimde n , çok elektronlu atomun elektron taşıyan son enerji kabuğu, L çok elektronlu atomun kapalı enerji kabukları dışındaki merkezi yapılamayan elektronların toplam yörünge açısal momentumu, S çok elektronlu atomun kapalı enerji kabukları dışındaki merkezi yapılamayan elektronların toplam spin açısal momentumudur. $2S+1$ terimi çok katlılık (multiplicity) ifadesi olarak ifade edilir, ve bu $2S+1$ değeri 1 ise “singlet”, 2 ise “doublet” ve 3 ise “triplet” olarak isimlendirilir. Bu çok katlılık (multiplicity) o atom için muhtemel farklı J değerlerinin ve dolayısıyla ince yapı (fine structure) komponent sayısını gösterir. Çok katlılık (multiplicity) şu şekilde hesaplanır, eğer atom için S değeri L ’ den küçük veya ona eşitse çok katlılık değeri $2S+1$ olacaktır, ama S değeri L ’ den büyük ise çok katlılık değeri $2L+1$ olacaktır. Örneğin $2^2P_{3/2}$ ile belirtilen bir atom için S değeri $1/2$, L değeri ise 1 ’ dir (P orbitali). S , L ’ den ufak olduğu için ince yapı komponentlerinin sayısı yani muhtemel J nin değerlerinin sayısı $2S+1$ yani 2 olacaktır. Bu atomun iki adet ince yapı ile ayrılmış enerji durumu olacaktır. Diğer örnek olarak $2^2S_{1/2}$ ile belirtilen bir atoma bakalım, bu atom için S değeri $1/2$, L değeri ise 0 ’ dir (S orbitali). S , L ’ den büyük olduğu için ince yapı komponentlerinin sayısı yani muhtemel J nin değerlerinin sayısı $2L+1$ yani 1 olacaktır. Bu aşamada muhtemel bir karışıklığın engellenmesi için önemli bir noktanın daha vurgulanması gerekmektedir. Maalesef toplam spin açısal momentum kuantum sayısı (S) ile bir toplam yörünge açısal momentum kuantum sayısı değeri olan S orbitali aynı harf ile ifade edilmektedir. Cümlelerin anlamından hangisinin ifade edildiği çıkarılmak zorundadır. Aynı durum tek elektron için spin kuantum sayısı (s) ve yörünge açısal momentum kuantum sayısının aldığı değerlerden biri olan s orbitali aynı harf ile ifade edilir ki gerçekten dikkatli olunması gereklidir.

Artık doktora tez çalışması kapsamında atom fiziği konusunda ihtiyaç duyulan önemli bir konu olan atom çekirdeğinin de etkisini içine alan aşırı ince yapının da

(hyperfine structure) özellikle incelenmesi gerekmektedir. Şu ana kadar atom çekirdeğinin enerji ayrışmalarına etkisini hiç hesaba katmadık. Atom çekirdeğinin çekirdek spini, diğer adıyla çekirdek açısai momentumu \vec{I} ile gösterilir. Daha önce incelenen konulara benzer olarak çekirdek manyetik momenti,

$$\vec{\mu}_l = g_l \mu_N \vec{I} \quad (\text{A.18})$$

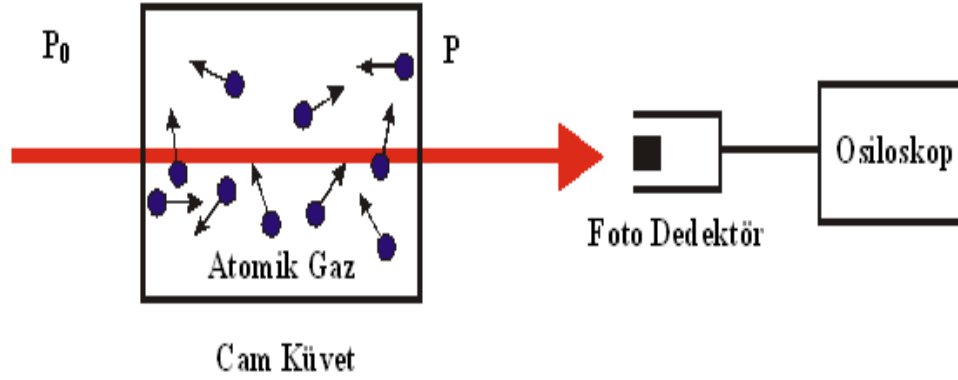
eşitliği ile ifade edilir. Burada g_l boyutsuz nükleer Lande faktörü ve $\mu_N = e\hbar/(2m_p c)$ ise nükleer magnetondur. Bu daha önce incelenen Bohr magnetondan farklıdır ve değeri Bohr magnetonundan yaklaşık 2000 kat daha düşüktür. Bunun anlamı şudur ki çekirdeğın elektronlarla etkileşimi, elektron-elektron etkileşimleriyle karşılaştırıldığında çok düşük boyutlardadır. Bu nedenle çekirdek, ince yapı (fine structure) içerisinde ekstra olarak çok küçük enerji ayrışmalarına daha sebebiyet vererek ünlü aşırı ince yapı (hyperfine structure) komponentlerini oluşturmaktadır. Artık toplam açısai momentumu hesaplariken çekirdeğın varlığını da hesaba katmamız gerekmektedir ve atom için hesaplanan elektronik açısai momentum (\vec{J}) (artık \vec{J} için toplam açısai momentum yerine elektronik açısai momentum ifadesini kullanacağız) vektörüne ayrıca çekirdek spin açısai momentum (\vec{I}) vektörü de eklenerek çekirdeğın etkisinin de dahil edildiği Şekil A.6' da da görüldüğü üzere toplam açısai momentum vektörü (\vec{F}) elde edilir. Mümkün olan aşırı ince yapı (hyperfine structure) durumlarının sayısı daha önce incelenen ince yapı (fine structure) ayrışmalarının sayısına benzer şekilde hesaplanır. Kuantum sayısı F ' nin en küçük değeri $|J - I|$ ve maksimum değeri $J + I$ olacaktır. Eğer çekirdek spin (I), elektronik açısai momentum (J) değerinden küçük ve ona eşit ise mümkün olan F değerleri sayısı $2I+1$, eğer çekirdek spin (I) değeri elektronik açısai momentum (J) değerinden büyük ise mümkün olan F değerleri sayısı $2J+1$ olacaktır. Örnek vermek gerekirse Sodyum (^{23}Na) atomunun çekirdek spin değeri $= 3/2$ ' dir. Temel durumunda $3^2S_{1/2}$ ince yapı (fine structure) durumu iki adet aşırı ince yapı (hyperfine structure) durumuna ayrılacaktır.



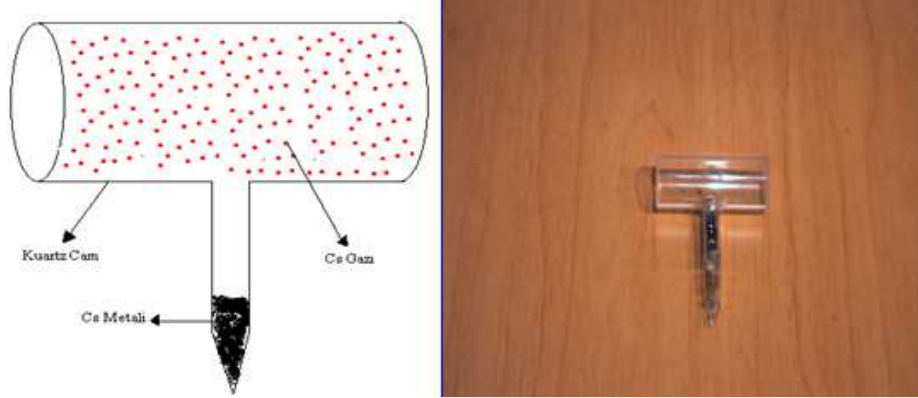
Şekil A.6. Atom çekirdeğinin etkisiyle toplam açısai momentum vektörünün ($\vec{F} = \vec{J} + \vec{I}$) gösterimi [54]

A.2. ATOMİK GAZLARDA SOĞURUM SPEKTROSKOPİSİ

Bu bölümde, frekansı değişen lazer demetinin atomik gazla etkileşiminden, lazer fotonlarının atomlar tarafından soğurulmasından ve etkileşim sonucunda elde edilen soğurum spektrumlarından bahsedilecektir [59,63].



Şekil A.7. Cam küvet içindeki atomik gazla etkileşime giren lazer ışın demeti



Şekil A.8. Örnek bir sezyum küvetinin şekli ve fotoğrafı

İçerisinde atomik bir gaz olan cam bir küvetin kullanıldığı Şekil A.7’ deki gibi ölçüm düzeneğini düşünelim. Böyle bir düzende kullanılan ve aynı zamanda bu tez çalışmasının kalbi olan sezyum cam küvetin detaylı gösterimi ve örnek bir fotoğrafı ise Şekil A.8’ de gösterilmiştir. Bu cam küvetin içerisindeki atomların herhangi bir x yönü boyunca hız dağılımı Maxwell-Boltzmann hız dağılımına göre Eşitlik (A.19)’ daki gibi belirlenmiştir.

$$N = N_0 \frac{1}{v_0 \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{v_x}{v_0} \right)^2 \right] \quad (\text{A.19})$$

Burada;

N_0 : Atomların sayısının ortalama hızdaki maksimum sayısıdır.

v_0 : Atomların maksimum ortalama hızıdır.

Bu küvet içerisindeki atomların sayısının onların hızına bağlılığı grafiği Şekil A.9’ da verilmiştir. Bu atomların E_1 ve E_2 olmak üzere iki temel enerji seviyelerine sahip olduklarını varsayalım.

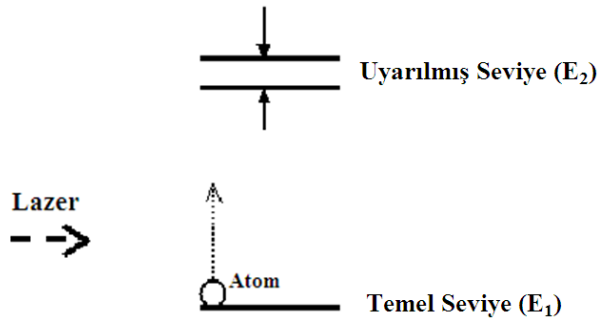


Şekil A.9. Maxwell dağılımınca atom sayısının hızlarına göre değişimi [63]

Şekil A.7’ de görüldüğü gibi, eğer lazer demeti cam küvetin içerisinde bir x yönü boyunca ilerlerse atomların lazer demeti ile etkileşime girme olasılığı vardır. Eğer lazer frekansı ω_L , atomların E enerji geçişlerine denk gelirse Eşitlik (A.20) uyarınca temel enerji seviyesindeki atom $h\omega_L$ enerjisine sahip fotonu yutarak E_1 temel enerji seviyesinden E_2 temel enerji seviyesine çıkacaktır. E_2 enerji seviyesine çıkan atom orada doğal yaşam süresi τ_{rad} kadar kalır ve daha sonra spontan olarak herhangi bir yönde bu fotonu bırakarak E_1 temel enerji seviyesine geri döner.

$$\omega_L = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (A.20)$$

Tez kapsamındaki çalışmalarda, sezyum atomları için E_2 enerji seviyesi $6P_{3/2}$ seviyesi olup buradaki doğal yaşam süresi 30 ns’dir. Temel ve uyarılmış seviyelerin görsel sunumu Şekil A.10’ da gösterilmiştir.



Şekil A.10. Elektromanyetik dalganın atom tarafından soğurumu

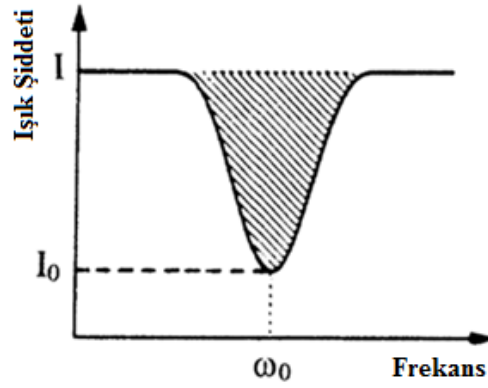
Eğer atomlar hareketli ise v hızı ile hareket eden atomların, k dalga vektörüne sahip lazer demetiyle etkileşime girebilmesi için Doppler kuralına göre lazer demetinin frekansı Eşitlik (A.21)' deki kurala uygun olmalıdır.

$$\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v} \quad (\text{A.21})$$

Eşitlik (A.21)' de verilen ω_0 değeri aşağıdaki gibidir.

$$\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (\text{A.22})$$

Lazerin atomik gazla etkileşimi sonucunda lazer demetinin bir kısmı atomlar tarafından soğurulduğu için küvet çıkışındaki lazer demeti gücü girişteki güçten her zaman az olacaktır. Küvet çıkışındaki lazerin gücünün lazer frekansına bağımlılığı Şekil A.11' de verilen grafikteki gibi olacaktır.



Şekil A.11. Atomlar tarafından soğrulan lazer ışık gücünün lazer frekansına göre değişimi

Lazer demetinin rezonans atomik gazla etkileşimi sırasında, gücünün küvet boyunca azalması aşağıdaki formüle göre gerçekleşmektedir.

$$P = P_0 e^{-\alpha l} \quad (\text{A.23})$$

Burada;

P_0 : Lazer demetinin küvet girişindeki gücü

l : küvet uzunluğu

α : atomların ve lazerin parametrelerine bağlı bir katsayıdır.

Doppler soğurum çizgisinin çizgi kalınlığı ise daha çok küvet içindeki sıcaklıkla belirlenmektedir ve şu formülle ifade edilir.

$$\Delta\omega_D = 4\pi\omega_0 \sqrt{\frac{2k_B T}{Mc^2}} \ln 2 \quad (\text{A.24})$$

k_B : Boltzmann katsayısı

M : atomik kütle

c : ışık hızı
T : atomik gazın sıcaklığıdır.

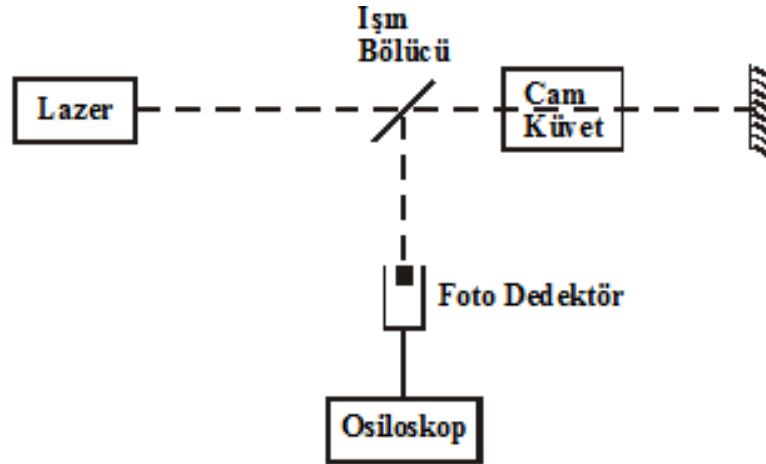
Örnek olarak, sezyum atomlarının D_2 enerji geçişi olan $6S_{1/2} - 6P_{3/2}$ enerji geçişlerine uygun gelen ω_0 frekansı $\omega_0=5 \times 10^{14}$ Hz' dir. Ayrıca oda sıcaklığındaki (300 K) sezyum atomik gaz için Doppler soğurum çizgi kalınlığı $\Delta\omega_D = 5 \times 10^8$ Hz' dir (500 MHz).

Sonuç olarak, frekansı değişen ve sabit güçlü bir lazer demetinin rezonans atomik gazla etkileşimi sonucunda merkez frekansı ω_0 olan ve çizgi kalınlığı $\Delta\omega_D$ olan soğurum spektrumu elde edilmektedir ve bu yöntemde, atomların enerji geçişleri arasındaki fark Eşitlik (A.25)' deki gibidir.

$$E_2 - E_1 = h(\omega_0 \pm \Delta\omega_D) \quad (A.25)$$

Burada $\Delta\omega_D$ Doppler çizgi kalınlığı olup aslında bir belirsizlik değeridir ve atomların hız dağılımından kaynaklanmaktadır.

Bu belirsizliğin azaltılabilmesi için doyum soğurum spektroskopisi yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil A.12' de verilen bu yöntemde, atomik gazın aynı anda karşı karşıya yönlendirilmiş iki lazer demetiyle etkileşiminden istifade edilmektedir.



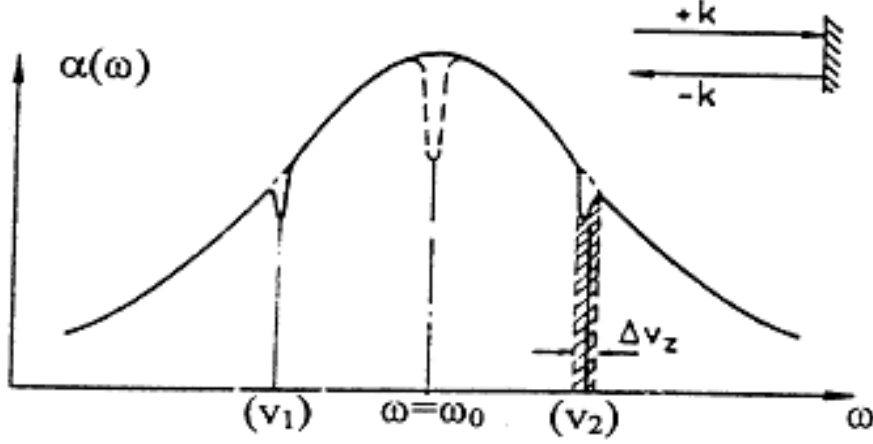
Şekil A.12. Doyum soğurum spektroskopisi deney düzeni blok şeması [63]

Lazer demeti küvet içerisinden geçirilerek aynadan geri yansıtılır. Geri yansıyan lazer demeti yeniden atomik gazla etkileşime girerek demet bölücü aracılığıyla bir dedektörle algılanır. Bu düzenekte, cam küvete ve aynaya gönderilen lazere pompalama (pumping) lazeri, aynadan geri dönüp detektöre gelen lazere ise algılama (probe) lazeri denilmektedir.

Küvet içerisinde karşı karşıya gönderilmiş iki lazer demetinin frekansları aynı fakat yönleri başka deyişle, dalga vektörleri (+k, -k) farklıdır. Bu nedenle Doppler etkisine göre eğer lazer frekansı ω_0 eşit değil ise karşı karşıya gönderilen iki lazer demeti Eşitlik (A.26)' daki gibi farklı hızlarda hareket eden atomik grup ile

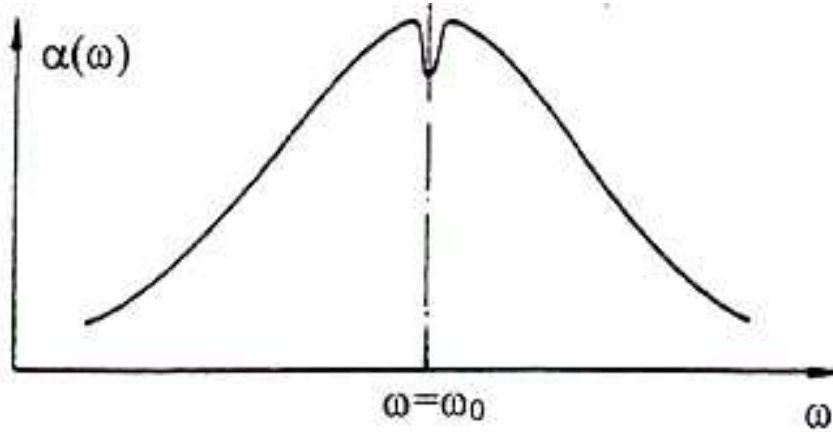
etkileşime girerek Şekil A.13' te verilen çökmeler oluşacaktır. Bu grafikte y eksenini $\alpha(\omega)$ olup frekansa bağlı soğurulma katsayısı, x eksenini frekans eksenidir.

$$v = \frac{\omega_L - \omega_0}{k} \quad (\text{A.26})$$



Şekil A.13. Doppler soğurum spektrumu üzerinde bir lazer demetiyle elde edilen çökme [63]

Lazer frekansı ω_0 ' a eşit olursa ($\omega_L = \omega_0$) her iki yöndeki lazer demeti aynı grup atomlarla (lazer demetine dik olan atomlarla) etkileşime girecektir. Dedektöre gönderilen algılayıcı (prob) lazer demeti karşı yönde gönderilen pompalama (pump) lazer demetinin etkilediği atomik grupla aynı anda etkileşecek ve Şekil A.14' te görülen lamb çukuru oluşacaktır.



Şekil A.14. Doppler soğurum spektrumu üzerinde rezonans frekansta ($\omega = \omega_0$) oluşan Lamb çukuru [63]

Pompalama lazer demeti belli sayıdaki atomları E_2 enerji seviyesine çıkardığı için, algılama lazer demetinin E_1 enerji seviyesinde algıladığı atom sayısında azalma gözlenecektir. Özellikle vurgulanması gereken bir diğer şey ise bu etkileşimin ω_0 frekansında seçici karakter taşıdığıdır. Bu seçiciliğin bandgenişliği $\Delta\omega_D$ ile değil γ_{rad}

ile belirlenecektir. Gerçekte bu band genişliği γ birkaç fiziksel etkenden dolayı γ_{rad} olmayıp daha büyüktür. Bunlardan bir tanesi doyum etkisi, ikincisi karşı karşıya gönderilen iki demet arasındaki açı, bir diğeri ise atomlar arasındaki çarpışmalardır.

Bu durumda γ değerini Eşitlik (A.27)' deki gibi yazılabilir.

$$\gamma = \gamma_{rad} \sqrt{1+G} + \Delta\omega_D \times \theta + \gamma_c \quad (\text{A.27})$$

Burada farklı olarak dikkat çeken terimler γ_c atomların çarpışması ile ilgili, θ iki lazer demeti arasındaki açı, G doyum etkisi ile ilgili parametredir. Sezyum atomları için serbest uçuş mesafesi 300 m olarak bilinmektedir, küvet uzunluğu ise 3 cm'dir bu nedenle çarpışmalar yok sayılabilir ve bu eşitlikteki çarpışmalarla ilgili γ_c terimi ihmal edilebilir. İki lazer demeti karşı karşıya çok küçük açıyla ayarlanmış ise ($\theta < 10^{-3}$ radyan ise) o zaman açıdan kaynaklanan genişleme 0,5 MHz'ten küçük olacaktır. Eğer karşı karşıya gönderilen demetlerin gücü soğurumun doyumu için düşük ise ($G \ll 1$) bu durumda Eşitlik (A.27)' de verilen formüle göre elde edilen doppler-altı rezonansların çizgi kalınlığı $\gamma_{rad} = 5$ MHz olarak bulunacaktır. Sonuç olarak doyum soğurum spektroskopisi yöntemi ile atomların enerji geçişleri $E_2 - E_1$ arasındaki farkı Eşitlik (A.28)' deki doğrulukla elde etmek mümkün olacaktır.

$$E_2 - E_1 = h(\omega_0 \pm \gamma) \quad (\text{A.28})$$

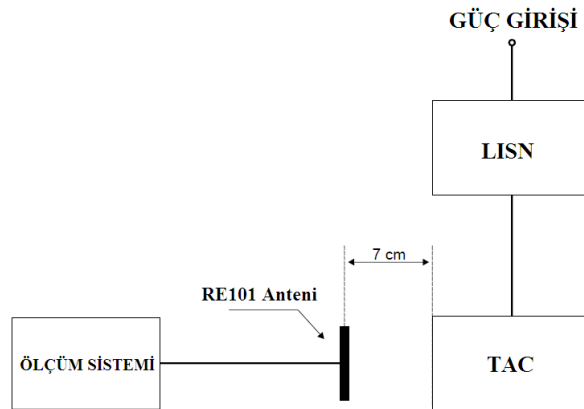
EK-B

B.1. GİRİŞ

Bu bölümde, doktora tez çalışmasının atomik RF manyetik alan sensör tasarım aşaması öncesinde bir ön araştırma olarak yapılan ve bu aşamayı destekleyecek şekilde klasik manyetik alan ölçme yöntemlerinin temelini oluşturan halka antenler ve klasik halka anten kalibrasyon yöntemleri üzerine yapılan araştırma sonuçları sunulacaktır.

Halka antenler, ve ayrıca manyetik alan sensörleri, geniş bir şekilde özellikle 30 MHz altı frekanslarda manyetik alanların ölçülmesinde kullanılmaktadır. Halka antenler EMC test ve ölçümlerinde hayati rol oynamaktadır. Şu an kullanılan klasik metotlar uyarınca halka antenler IEEE 291 [43] ve SAE-ARP958 [44] uyarınca kalibre edilmektedir.

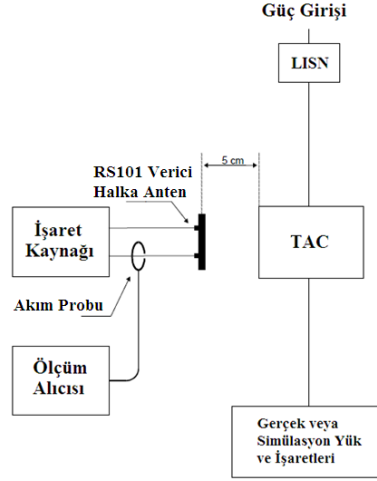
ANSI C63.4 ve CISPR16-1-4 standartları manyetik alan ölçümlerinde halka antenlerin kullanımını tanımlamaktadır [60,61]. MIL-STD461 [24] standardı da EMC ölçümlerinde halka antenlerin kullanımını zorunlu kılan diğer önemli standartlardan biridir. MIL-STD461 standardı içindeki önemli EMC testlerinden biri olan RE101 testi 13,3 cm çaplı ve 36 sarımlı ekranlı bir halka antenin kullanımını zorunlu kılmaktadır. RE101 halka antenlerinin kalibrasyonu SAE-ARP 958 [44] standardında 12 cm mesafede indirgeniş bir hesaplama yöntemi ile tanımlanmıştır, bu nedenle kalibrasyon faktörleri normal halka anten kalibrasyon yöntemlerinin ürettiği faktörlerden bir miktar sapmaktadır. Bu durum ilerleyen bölümlerde deneysel olarak gösterilecektir. RE101 halka antenin faktörleri genel olarak dBpT/ μ V ile tanımlanmaktadır. RE101 deney düzeneği basit bir şekilde Şekil B.1' de gösterilmektedir.



Şekil B.1. RE101 testi düzeneği [24]

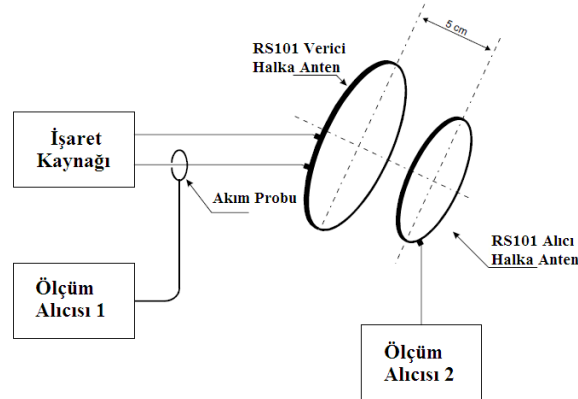
MIL-STD461 standardında halka anten kullanımını zorunlu tutan diğer önemli test, RS101 testidir. RS101 testi içerisinde 2 tane farklı halka anten tanımlanmaktadır.

RE101 testinden farklı olarak RS101 bir bağışıklık testi olup, ana amacı TAC (Test Altındaki Cihaz)' ı 30 Hz – 100 kHz aralığında manyetik alanlara maruz bırakmaktır. RS101 testinin gerektirdiği antenlerden biri verici anten olup 12 cm çaplı ve 20 sarımlı bir antendir, ve TAC üzerine gerekli manyetik alanı uygulamakta kullanılır. Bu anten aynı zamanda SAE-ARP958 standardı tarafından RE101 alıcı antenin kalibrasyonu için de verici anten olarak seçilmiştir. RS101 testi tarafından zorunlu kılınan diğer bir anten 51 sarımlı be 4 cm çaplı bir alıcı halka anten olup, test öncesi sadece doğrulama amaçlı kullanılıp test sırasında aktif rol oynamamaktadır. RS101 deneyinde halka anten kullanımının görünümü Şekil B.2' de sunulmuştur.



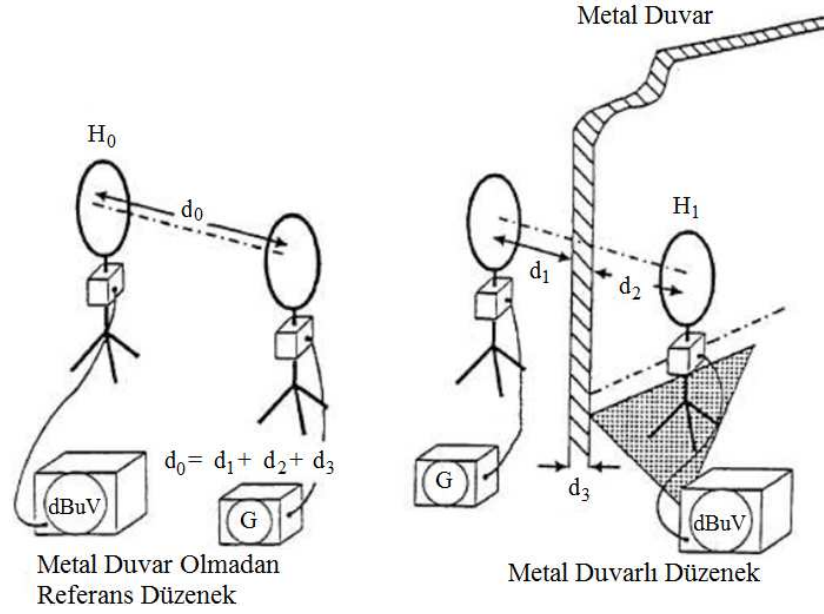
Şekil B.2. RS101 test düzeneğinde halka anten kullanımı [24]

RS101 deneyinde TAC üzerinde oluşturulan manyetik alan değeri, RS101 verici anten üzerindeki akımın tespiti yapılarak sadece hesaplama yöntemi ile yapılmaktadır, bu nedenle RS101 verici anteni üzerinden akan akımın hassas ve doğru ölçümü RS101 testleri için önemli hale gelmektedir. Her RS101 testi öncesi test düzeneğinin doğrulanabilmesi için Şekil B.3' te verilen doğrulama işlemi zorunludur.



Şekil B.3. RS101 doğrulama düzeneğindeki halka anten kullanımları [24]

Askeri test uygulamalarına ek olarak, halka antenler yoğun olarak Şekil B.4' te görüldüğü üzere 30 MHz altı frekanslar için ekranlama etkinliği ölçümlerinde kullanılmaktadır [62]. Bu ölçümlerde anten faktörü önemli olmayıp, ölçümü hedeflenen metal duvarın varlığında ve yokluğunda olmak üzere iki ölçümün farkı alınmaktadır.



Şekil B.4. Ekranlama etkinliği ölçümünde halka anten kullanımları [62]

B.2. HALKA ANTEN FAKTÖRÜ

Anten dönüştürme işlemi yapan bir cihazdır. Bir verici anten, girişlerindeki gerilimi (V), EM dalgalara (V/m veya A/m) dönüştürmektedir. Alıcı anten ise bu işlemin tam tersini yapmaktadır. EM dalga ile anten alıcı/verici devresi arasındaki dönüşüm anten faktörü (AF) ile modellenmektedir. Halka antenler için anten faktörü yoğun olarak,

$$AF = H(\mu A / m) / V(\mu V) \quad (B.1)$$

ile dBS/m birimi ile ifade edilmektedir. Manyetik anten faktörünün dBpT/ μ V biriminden dBS/m birimine dönüşümü ve tam zıttı dönüşüm aşağıda gösterildiği şekilde mümkündür;

$$B(Tesla) = \mu_0 H(A/m) = 4\pi 10^{-7} H(A/m)$$

$$B(pT) = 4\pi 10^{-7} H(A/m) \cdot 10^{12} = 4\pi H(A/m) \cdot 10^5$$

$$V(\mu V) = V(V) \cdot 10^6$$

$$\frac{B(pT)}{V(\mu V)} = 1,256 \frac{H(A/m)}{V(V)} = 1,256 \left(\frac{S}{m} \right)$$

Böylece dBpT/ μ V' den dBS/m' e dönüşüm için dBpT/ μ V birimindeki değerden 1,98 dB çıkarılması gerekmektedir. Bazen halka antenler için anten faktörü eşdeğer elektrik alan ile tanımlanmaktadır.

$$AF = E(\mu V / m) / V(\mu V) \quad (B.2)$$

Bu durumda anten faktörünün birimi dBm⁻¹ olacaktır.

B.3. IEEE291 UYARINCA HALKA ANTEN KALİBRASYONU

Bu kalibrasyon metodu iki halka anten kullanımı ile 100 MHz' e kadar halka anten kalibrasyonu tanımlamaktadır. Halka antenlerden biri tek sarımlı verici anten olup diğer anten üzerinde değeri bilinen manyetik alan oluşturmaktadır. Antenler birbirine yakın konumlandırıldığı için zeminden ve yakın objelerden kaynaklanan yansıma etkileri nispeten az olacaktır. Bu metotta yakın alan bileşeni manyetik alan, eşdeğer uzak alan elektrik alan bileşeni E ile ifade edilmektedir. E ve H arasındaki ilişki,

$$E = \eta_o H \quad (B.3)$$

ile tanımlanmaktadır. Tek sarımlı bir verici halka antenin alıcı halka antenin üzerinde oluşturacağı ortalama manyetik alan değeri,

$$E \cong \frac{60AI}{R_o^3} \left[1 + \left(\frac{2\pi R_o}{\lambda^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.4)$$

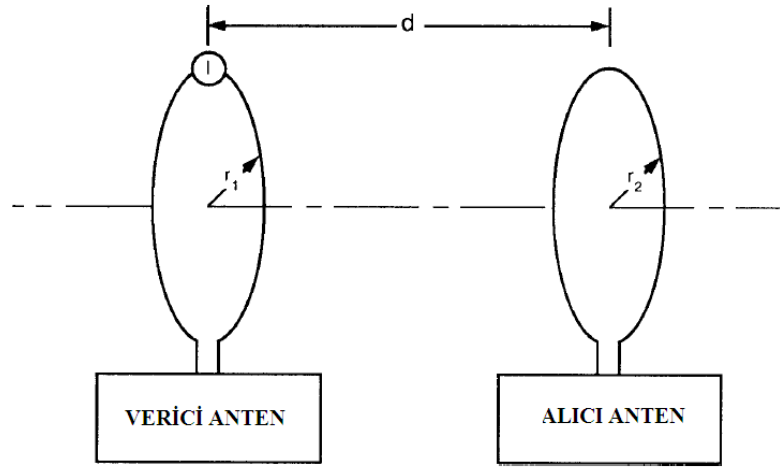
olmaktadır. Burada,

$$R_o = \sqrt{d^2 + r_1^2 + r_2^2} \quad (B.5)$$

olacaktır. Ayrıca E , eşdeğer V/m biriminde RMS elektrik alan şiddeti, A verici antenin m^2 birimindeki alanı, I vericinin üzerinden akan akım Amper birimindeki RMS akım, λ metre biriminde dalga boyu, d metre biriminde alıcı ve verici anten merkezleri arasındaki mesafe, r_1 metre biriminde verici antenin yarıçapı, r_2 metre biriminde alıcı antenin yarıçapıdır. Belirtilen eşitlik verici antenin üzerinden akan akım düzgün bir akım ise geçerlidir. Bu şart için standart,

$$2\pi r_1 < \lambda/8 \quad (B.6)$$

eşitsizliğini önermektedir. Eğer verici antenin sarım sayısı tek değil ise, hesaplanan E veya H ilgili sarım sayısı ile çarpılmalıdır. Standart, verici halka anten üzerinden akan akımın termokupllu akımölçer ile ölçümünü önermektedir, bu sebeble bir termokupl, verici halka antenin üzerine monte edilmesi gerekmektedir. Verici antenin bir termokupl ile birlikte üretilme zorluklarından dolayı SAE-ARP958' de önerilen akım probu metodu termokupl yöntemine alternatif olarak tercih edilebilir. IEEE 291 uyarınca halka anten kalibrasyon düzeneği Şekil B.5' te sunulmuştur.



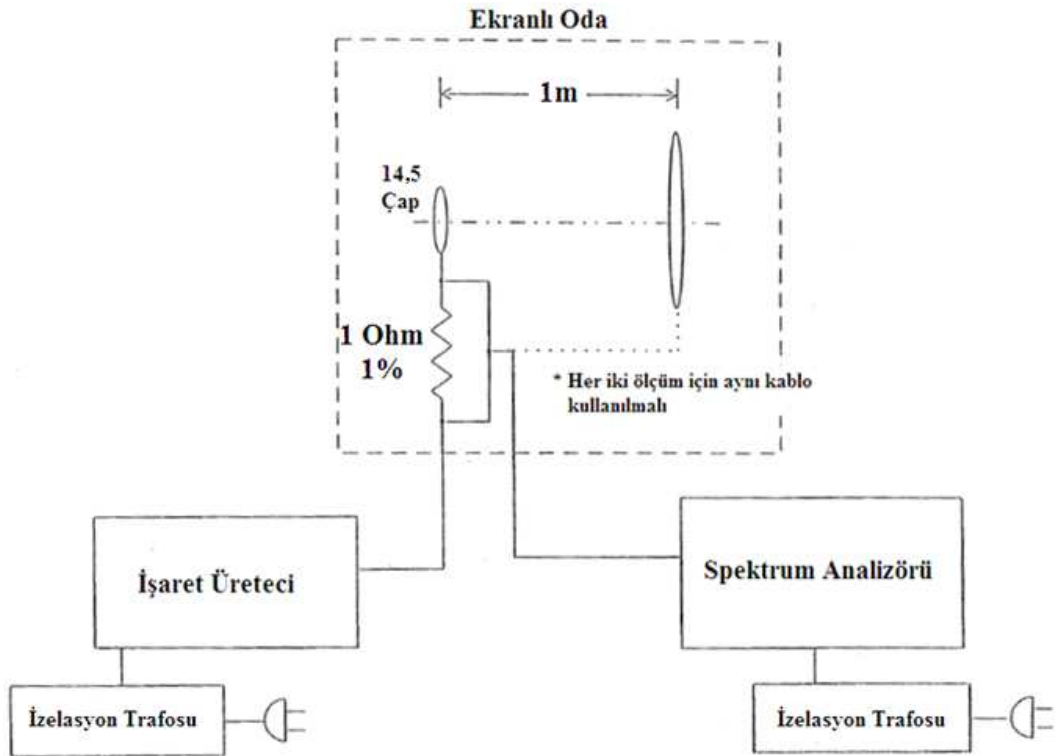
Şekil B.5. IEEE291 halka anten kalibrasyon düzeneği [43]

B.4. SAE-ARP958 UYARINCA HALKA ANTEN KALİBRASYONU

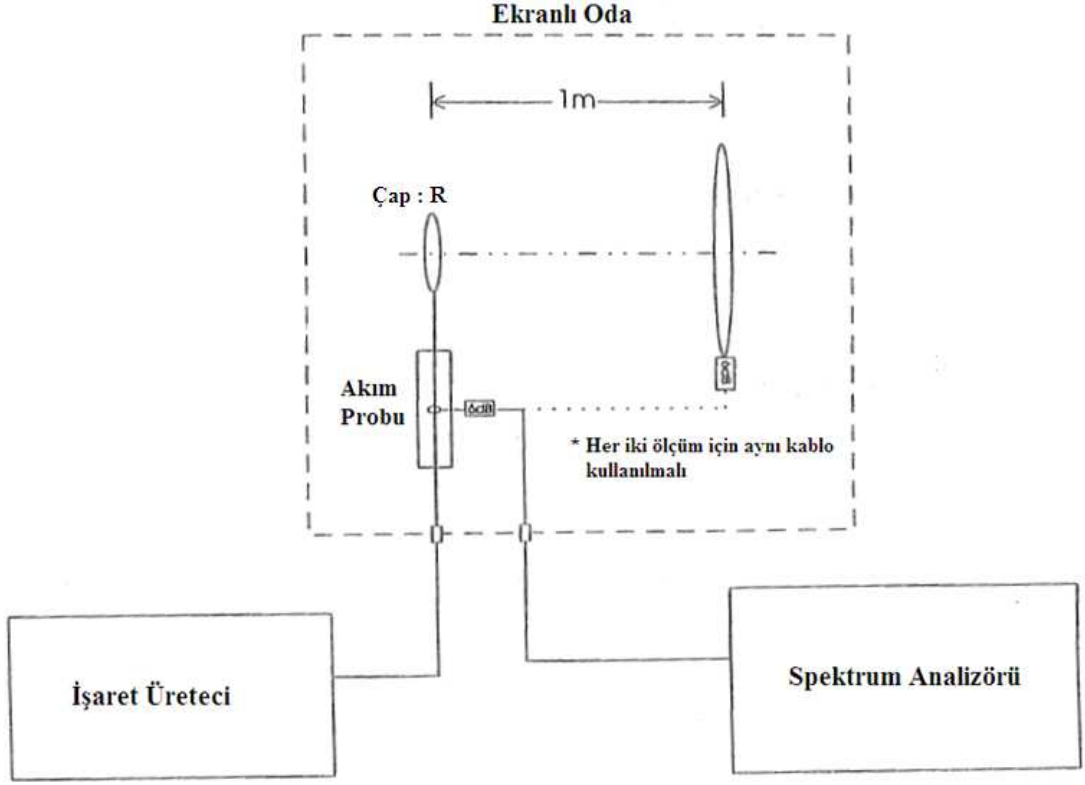
SAE-ARP958 standardı hem askeri hemde ticari EMC standartlarında kullanılan halka antenlerin kalibrasyon yöntemlerini içermektedir. Bu nedenle halka anten kalibrasyonu bu bölümde iki alt başlıkta incelenecektir. İlk metot genel metot olarak isimlendirilecektir ve ileriki bölümlerde deneysel olarak gösterileceği gibi bu metot IEEE291 standardında anlatılan metoda karşı gelmektedir. Ayrıca bu bölümde RE101 ve RS101 alıcı antenlerin kalibrasyonları da incelenecektir. Diğer halka antenlerden farklı olarak SAE-ARP958 standardı, RE101 ve RS101 alıcı antenler için özel bir kalibrasyon metodu sunmaktadır. Bu özel metot 12 cm' de ve 5 cm' de frekanstan bağımsız bir formülün kullanımını gerektirmektedir. Ek olarak bu özel metot, verici anten olarak RS101 verici antenin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

B.4. 1. SAE-ARP958 Genel Kalibrasyon Metodu (GKM)

IEEE291 standardından farklı olarak SAE-ARP958 standardı verici antenden 1 m mesafede kalibrasyon gerektirmektedir ve ayrıca verici anten üzerindeki akımın okuma işlemi içinde direnç ve akım probu metotlarını önermektedir. Ölçüm metotları Şekil B.6 ve Şekil B.7' de gösterilmiştir.



Şekil B.6. SAE-ARP958 kalibrasyon düzeneği (10 kHz' den düşük frekanslar için) [44]



Şekil B.7. SAE-ARP958 kalibrasyon düzeneği (10 kHz-10 MHz için R: 14,5 cm, 10 MHz üstü için R: 5 cm) [44]

Alıcı anten üzerindeki ortalama manyetik alan değeri,

$$H = \frac{1}{2} \frac{d_{xmt}^2}{4} I n_{xmt} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \left[L^2 + \left(\frac{d_{xmt}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{rcv}}{2}\right)^2 \right]}}{\left[L^2 + \left(\frac{d_{xmt}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{rcv}}{2}\right)^2 \right]^{3/2}} \quad (B.7)$$

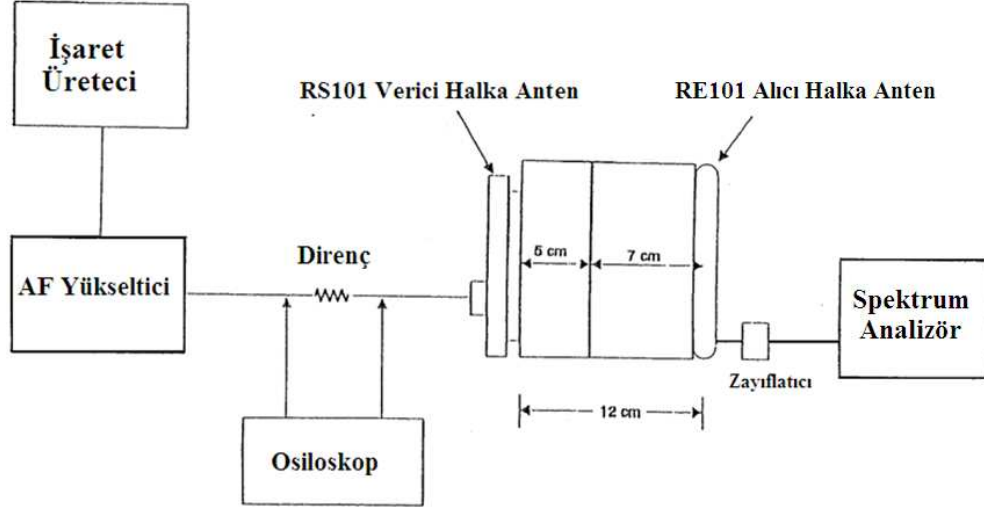
olarak tanımlanır. Burada, H manyetik alan değeri (A/m), d_{xmt} verici halka antenin çapı (m), d_{rcv} alıcı halka antenin çapı (m), L halka antenlerin merkezleri arası mesafe (m), I verici anten üzerinden akıtılan akım (A), n_{xmt} verici antenin sarım sayısı, f kalibrasyon frekansı (Hz) ve c ışık hızıdır (m/s). Halka antenin faktörü AF_H , dBS/m biriminde,

$$AF_H = 20 \log \left(\frac{H}{V} \right) \quad (B.8)$$

ile hesaplanır. Burada H manyetik alan (A/m), V alıcı antende endüklenen gerilim (V)' dir.

B.4. 2. SAE-ARP958 Askeri Kalibrasyon Metodu (AKM)

Askeri deneylerde kullanılan en ünlü halka antenler RE101 ve RS101 deneylerinde kullanılan halka antenlerdir. SAE-ARP958 standardı, bu halka antenlere özel Şekil B.8’ de sunulan kalibrasyon düzeneğini sunmaktadır.



Şekil B.8. SAE-ARP958 RE101 kalibrasyon düzeneği [44]

SAE-ARP 958 standardı RE101 antenleri için verici antenden 12 cm mesafede kalibrasyon gerektirmektedir. Kalibrasyon sırasında verici anten olarak RS101 anteni kullanılmaktadır. MIL-STD461 RE101 alıcı anteni 13,3 çaplı ve 36 sarımlı ekranlı bir halka antendir. RS101 verici anteni ise 12 cm çaplı, 20 sarımlı ekransız bir antendir. Bu RS101 anteni 5 cm mesafede $9,510^7$ pT/A manyetik akı yoğunluğu oluşturmaktadır. Kalibrasyon sırasında manyetik akı yoğunluğu,

$$B = \mu H = \frac{\mu I N R^2}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}} \quad (B.9)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Dikkat edilirse (B.9) formülü frekans ve alıcı çapından bağımsız iken (B.7) formülü bunlara bağımlıdır. Bu nedenle (B.7) ve (B.9) formülleri farklı faktörler üretecektir. Eşitlik (B.9) uyarınca 20 sarımlı RS101 anteni 12 cm mesafede $18,310^{-6}$ T veya eşdeğer olarak 145,4 dBpT üretecektir. Bu değer RE101 anten kalibrasyonlarında kullanılacaktır. Benzer şekilde RS101 verici anteni 5 cm mesafede $9,510^{-5}$ T veya eşdeğer olarak 159,6 dBpT üretecektir. Bu değerde 5 cm mesafede RS101 alıcı halka sensörünün kalibrasyonunda kullanılacaktır.

B.5. ÖRNEK HALKA ANTEN KALİBRASYONLARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, bahsedilen klasik metotlarla 2 farklı halka antenin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunlardan biri ticari diğeri ise TÜBİTAK UME bünyesinde tasarımı yapılan kendi antenimizdir. Ticari anten Solar Electronics üreticili, 7334-1 model numaralı ve 011121 seri numaralı RE101 antenidir. Normalde bu anten daima SAE-ARP958 uyarınca RS101 verici anteni kullanılarak kalibre edilmelidir, fakat karşılaştırma amacıyla farklı kalibrasyon metotları uygulanacaktır. Bu anten Şekil B.9' da solda görülmektedir. Şekil B.9' da sağda ise 30 cm çaplı ve 30 sarımlı ekransız TÜBİTAK UME bünyesinde tasarlanan halka anten görülmektedir. Bu tasarlanan halka anten sarımları taşıyan tahta bir yapıdan ve BNC konnektörünü destekleyen metal bir tabandan oluşmaktadır. Sarımlar BNC konnektöre herhangi bir ekstra komponent olmaksızın direkt olarak bağlıdır.



Şekil B.9. RE101 anteni (sağda) ve tasarlanan anten (solda)

Ölçümler sırasında aşağıdaki sınırlamalar uygulanmıştır,

- IEEE 291 standardı 100 MHz' e kadar tek sarımlı bir verici anteni tavsiye etmesine rağmen ölçümlerimizde 3 sarımlı verici anten kullanılmıştır. Bu nedenle ölçümlerimizin üst frekansı 3 MHz' e sınırlandırılmıştır. Sarım sayısı ayrıca hesaba katılmıştır.

- SAE-ARP958 GKM metodu 1 m kalibrasyon gerektirmesine karşın maksimum kalibrasyon mesafesi 0,7 m olarak seçilmiştir, böylece çevre objelerden kaynaklanabilecek yansımalar minimum yapılmış ve alıcı tarafta gürültü seviyesinden yeterli seviyede yukarıda işaret seviyesi elde edilmiştir.

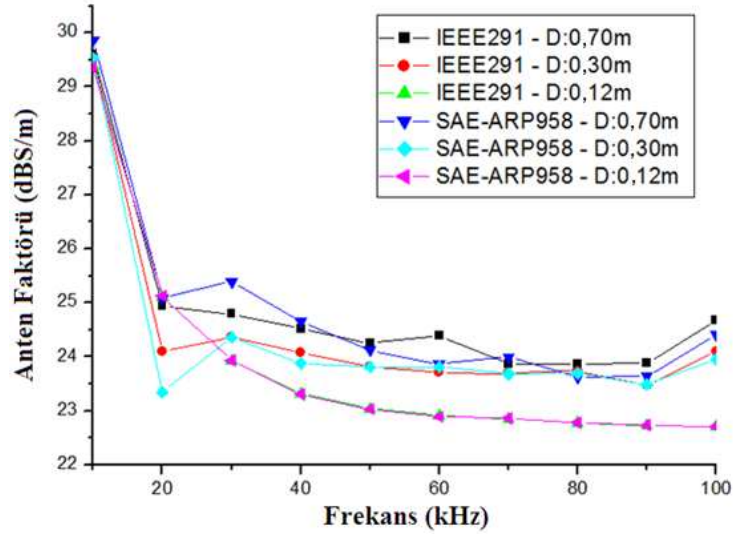
- SAE-ARP958 standardı akımın verici anten üzerinde düzgün tutulması için 10 MHz' e kadar 14,5 cm çaplı bir anten önermesine karşın, SAE-ARP958 genel metot uygulamasında verici anten olarak 30 cm çapında Schwarzbeck anten kullanılmıştır.

Hesaplamalar ve üretici spekleri şunu göstermektedir ki 3 MHz' e kadar anten üzerindeki akım hala düzgündür.

B.5. 1. SOLAR RE101 Antenin Kalibrasyon Sonuçları

B.5.1.1. IEEE291 ve SAE-ARP958 Genel Kalibrasyon Metodu (GKM)

Hedef RE101 anteni Schwarzbeck verici halka anteni (Model: 5154-011) kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu verici anten 3 sarımlı bir anten olup besleme ve monitör portlarını kullanarak sabit bir mesafede hesaplanabilir manyetik alan üretmek için tasarlanmıştır. Kalibrasyon işlemi, RE101 anteni vericiden çeşitli uzaklıklarda yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Verici anten üzerinden akan akım verici antene tümleşik bir 20 ohm direnç üzerinden tespit edilmektedir. IEEE 291 ve SAE-ARP958 standartları için düzenek sabit aynı olup, kullanılan formüller farklıdır. Ölçüm düzeneği Şekil B.13' te, ölçüm sonuçları Şekil B.10' da sunulmuştur.



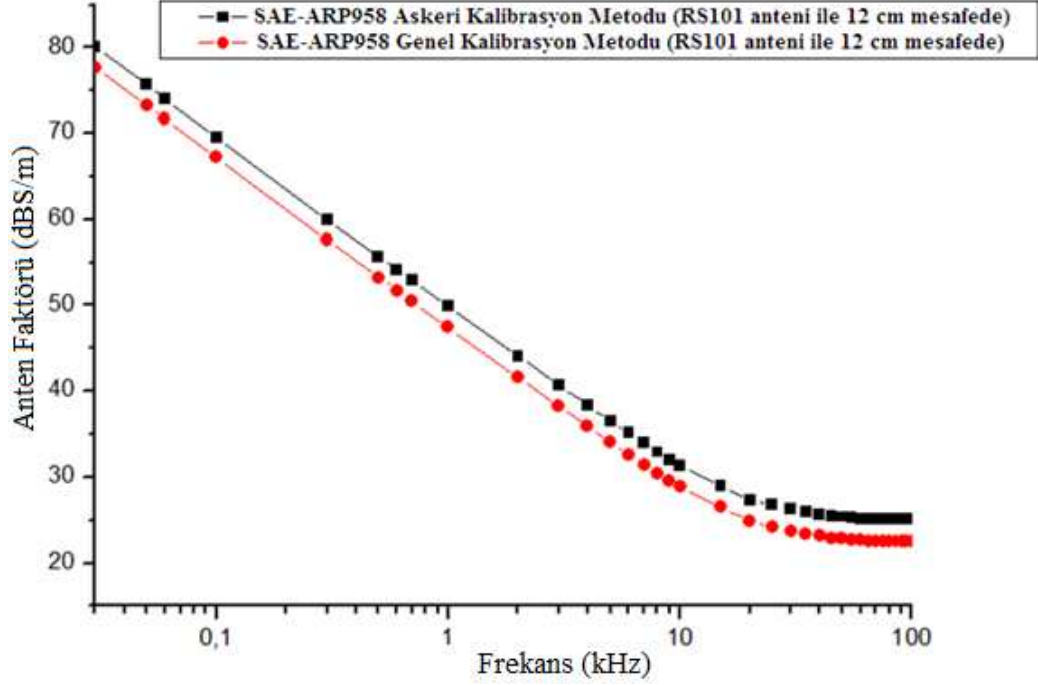
Şekil B.10. RE101 antenin IEEE291 ve SAE-ARP958 GKM sonuçları

Sonuçlar şunu göstermektedir ki frekans bağımlı (B.4) ve (B.7) formülleri her iki standartta en azından görüntüde farklı olmasına karşın aynı sonucu vermektedirler. Aslında her iki eşitlik temelde aynı ama görüntüde farklıdır. İhmal edilebilir fark ölçüm belirsizliğinden kaynaklanmaktadır.

B.5.1.2. SAE-ARP958 Askeri Kalibrasyon Metodu (AKM)

Hedef RE101 alıcı halka anteni SAE-ARP958 Askeri Kalibrasyon Metodu (AKM) uyarınca 12 cm' de verici olarak hesaplanabilir RS101 verici halka anten (Solar Electronics, Type: 9230-1, SN: 031609) kullanılarak kalibre edilmiştir. Ayrıca, aynı RE101 alıcı anteni aynı düzenek ile SAE-ARP958 Genel Kalibrasyon Metodu (GKM) ile kalibre edilerek her iki metot arasındaki fark gösterilmiştir.

Ölçüm sonuçları arasındaki fark Şekil B.11’ de sunulmuştur. SAE-ARP AKM metodu Eşitlik (B.9)’ daki frekandan bağımsız eşitliği kullanmaktadır bu nedenle iki SAE-ARP958 metodunun sonuçları hissedilir şekilde farklı çıkmıştır (yaklaşık 2 dB).



Şekil B.11. RE101 antenin, RS101 verici anteni ile 12 cm’ de SAE-ARP958 GKM ve AKM uyarınca kalibrasyon sonuçları

B.5.1.3. TEM hücresi içerisinde kalibrasyon

Dikdörtgenel TEM hücreleri halka anten kalibrasyonlarında kullanılabilir [31]. TEM hücresi içerisinde orta ve üst metal levha arasında oluşturulan manyetik alan,

$$E = \frac{V}{b} = \frac{\sqrt{P_{net} Z_o}}{b} ; H = \frac{E}{377} \quad (B.10)$$

ile hesaplanır. Burada E ve H sırasıyla elektrik ve manyetik alanlardır. V hücrenin levhaları arası gerilim, Z_o hücrenin karakteristik empedansıdır. P_{net} hücre girişindeki net güç, b levhalar arası mesafedir. Kalibrasyon düzeneği Şekil B.13’ te sunulmaktadır. TEM hücreleri düşük frekans bölgesinde yeterli manyetik alan seviyesi için büyük RF güçler gerektirdiğinden dolayı düşük frekans bölgesinde halka anten kalibrasyonları için pek uygun olmazlar. Ayrıca düşük frekanslarda, TEM hücresinin merkezindeki manyetik alanı hesaplamak için kullanılacak güç değeri direkt olarak TEM hücresinin çıkış portundan okunmaktadır, çünkü düşük frekans bölgesinde ticari olarak bir yönlü kuplör mevcut değildir.

B.5.1.4 Helmholtz halkası içerisinde kalibrasyon

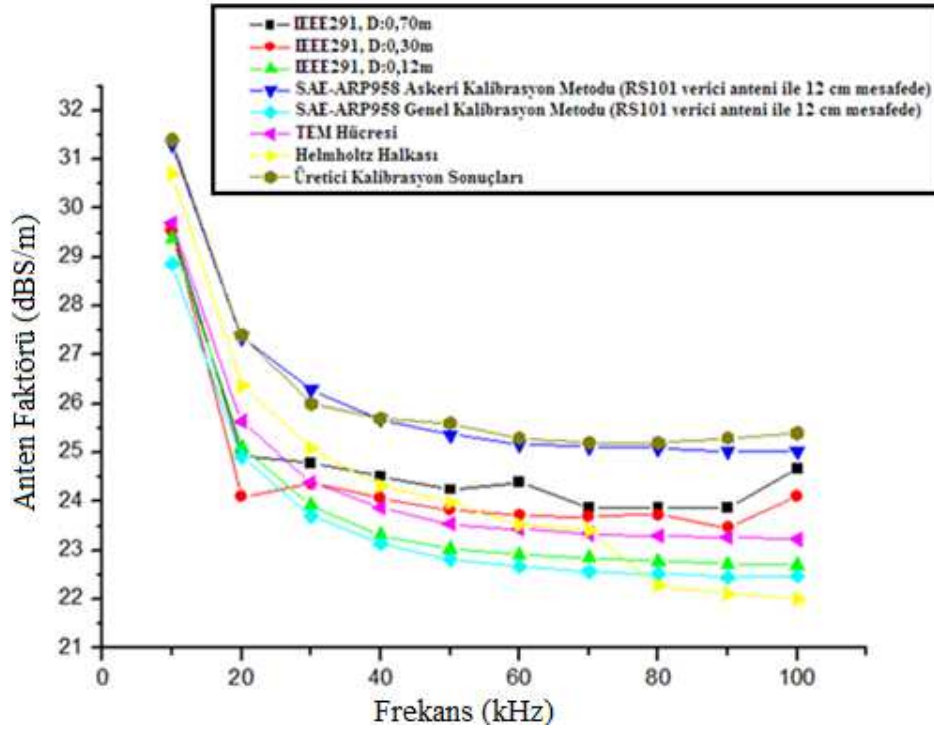
Helmholtz halkaları halka anten kalibrasyonları için diğer bir alternatif kalibrasyon metodu olabilmektedir. Kalibrasyon düzeneği Şekil B.13' te sunulmaktadır. Helmholtz halkası içindeki eksenel manyetik alan şiddeti H_x , A/m birimi ile,

$$H_x = \frac{N_1 I r_1^2}{2(r_1^2 + a_1^2)^{3/2}} + \frac{N_2 I r_2^2}{2(r_2^2 + a_2^2)^{3/2}} \quad (\text{B.11})$$

ile ifade edilir. Burada H_x eksenel manyetik alan değeri, N her halkadaki sarım sayısı, r her bir halkanın yarıçapı, I halkalardan akan akım, a_1 birinci halkanın merkeze uzaklığı, a_2 ikinci halkanın merkeze uzaklığıdır. Helmholtz halkası tanımı gereği $r_1 = r_2 = r$, $N_1 = N_2 = N$ ve $2a_1 = 2a_2 = s = r$ olmaktadır. Helmholtz halkası içerisinde bulunan akım Helmholtz halkasının besleme kollarından birine yerleştirilen $0,5 \Omega$ hassas bir direnç üzerinden ölçülmektedir.

B.5.1.5 Nihai sonuç analizi

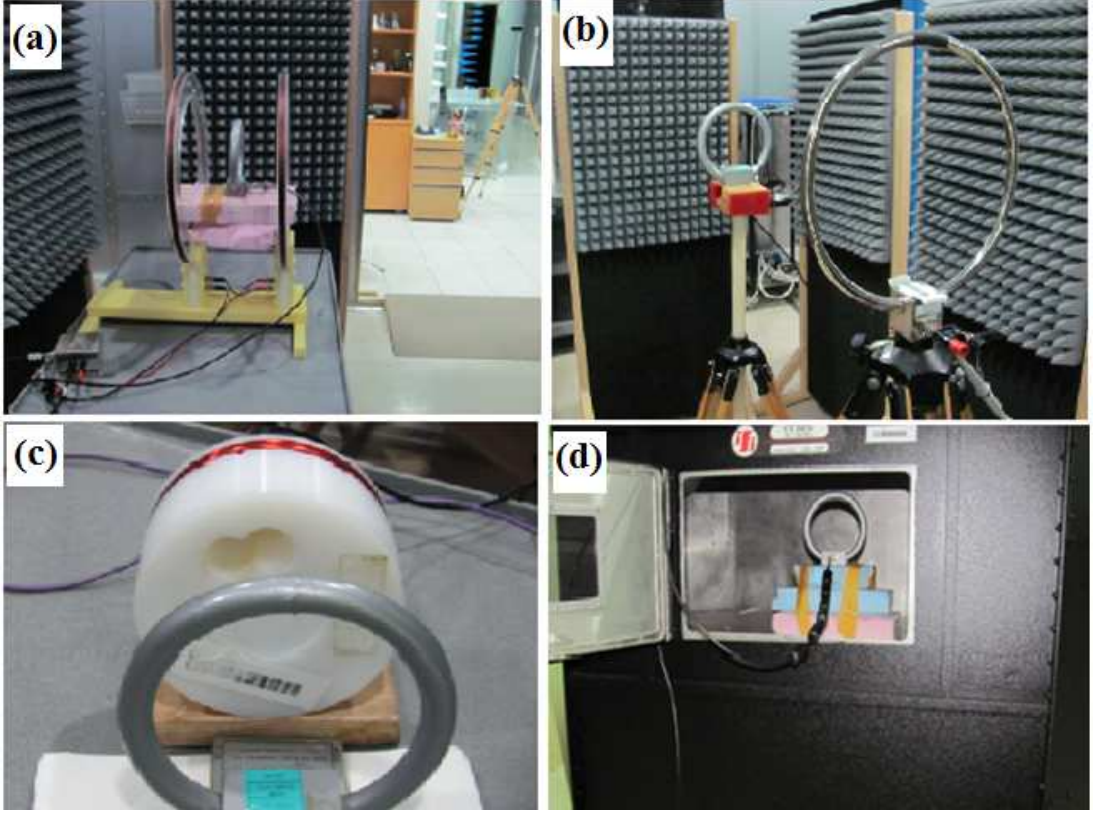
Tüm metotlardan elde edilen sonuçlar, tüm metotlar için ortak frekans bölgesi olan 10 kHz – 100 kHz frekans aralığı için Şekil B.12' de sunulmaktadır. Tüm kalibrasyon düzenekleri ise hepsi birlikte Şekil B.13' te verilmiştir.



Şekil B.12. RE101 antenin kalibrasyon sonuçları

Ayrıca, IEEE291 ve SAE-ARP958 GKM aynı sonuçları verdiği için grafikte sadece bir tanesi sunulmuştur. SAE-ARP958 AKM metodunun diğer metotlardan daha yüksek anten faktörü üretmesi gerçeğine ek olarak, sonuçlar diğer önemli bir gerçeği

de işaret etmektedir. Düşük frekans bölgesinde tüm metotların sonuçları birbirine yakın iken, frekans arttıkça kalibrasyon mesafesi etkili olmaya başlamaktadır. Daha uzun mesafelerde, anten faktörü az miktarlarda artma eğilimi göstermektedir. Ayrıca üreticinin spekleri ile SAE-ARP958 AKM metodunun sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir, çünkü her iki metotta SAE-ARP958 askeri metodu ve RS101 verici anteni kullanılmaktadır. İki sonuç arasındaki fark maksimum 0,4 dB olup ölçüm belirsizliği içinde kalmaktadır.

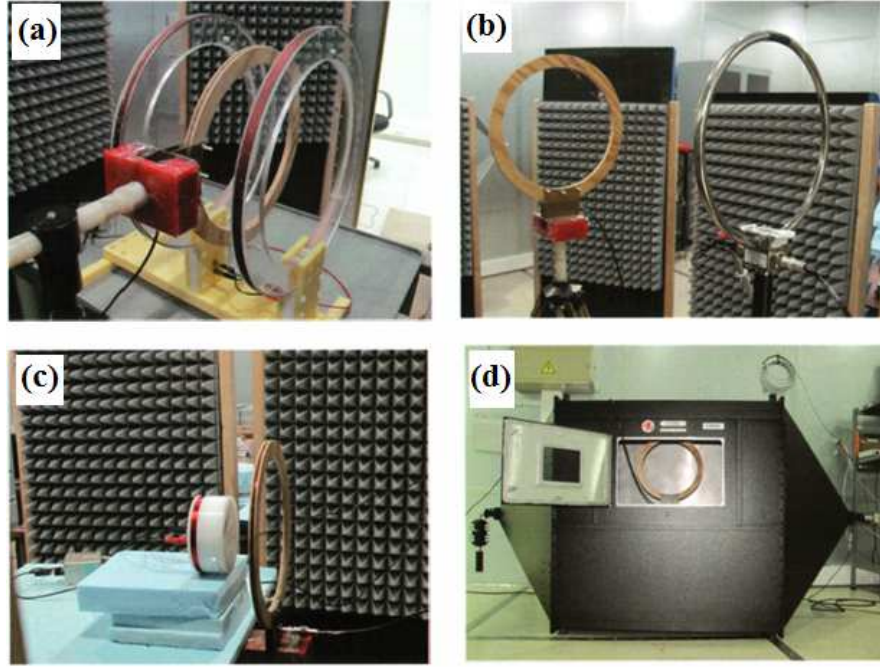


Şekil B.13. RE101 anteninin kalibrasyon düzenekleri, (a) Helmholtz halkası, (b) IEEE291 ve SAE-ARP958 GKM, (c) SAE-ARP958 AKM, (d) TEM hücresi

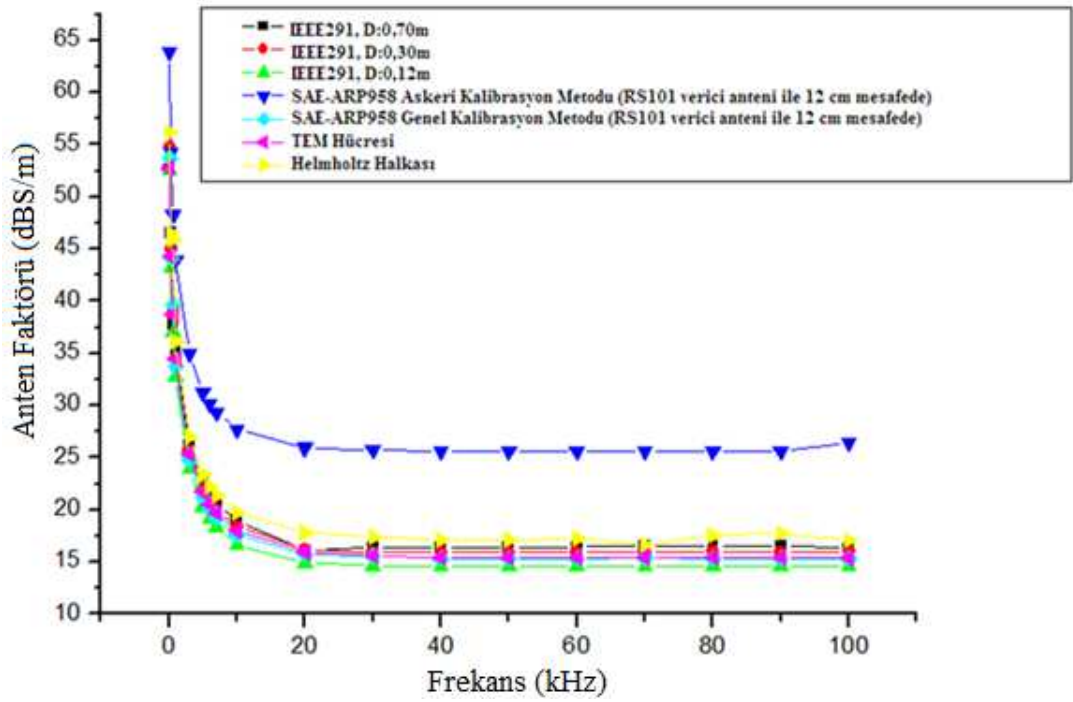
B.5. 2 Tasarlanan Antenin Kalibrasyon Sonuçları

Farklı metotlarla kalibrasyon işlemi ayrıca bizim tasarlanan antene de uygulanmıştır. Tasarlanan antene uygulanan kalibrasyon düzenekleri ve sonuçları sırasıyla Şekil B.14 ve Şekil B.15' te sunulmuştur.

Sonuçlar dikkatli incelendiğinde IEEE291 uyarınca yapılan kalibrasyon işleminde her frekans için kalibrasyon mesafesi azaldıkça anten faktörünün azaldığı gözlenmektedir. TEM hücresi içerisinde yapılan kalibrasyon sonuçları, antenin ekransız olması gerçeğine rağmen IEEE 291 ile benzer sonuçlar vermektedir.



Şekil B.14. Tasarlanan antenin kalibrasyon düzenekleri, (a) Helmholtz halkası, (b) IEEE291 ve SAE-ARP958 GKM, (c) SAE-ARP958 AKM, (d) TEM hücresi



Şekil B.15. Tasarlanan antenin kalibrasyon sonuçları

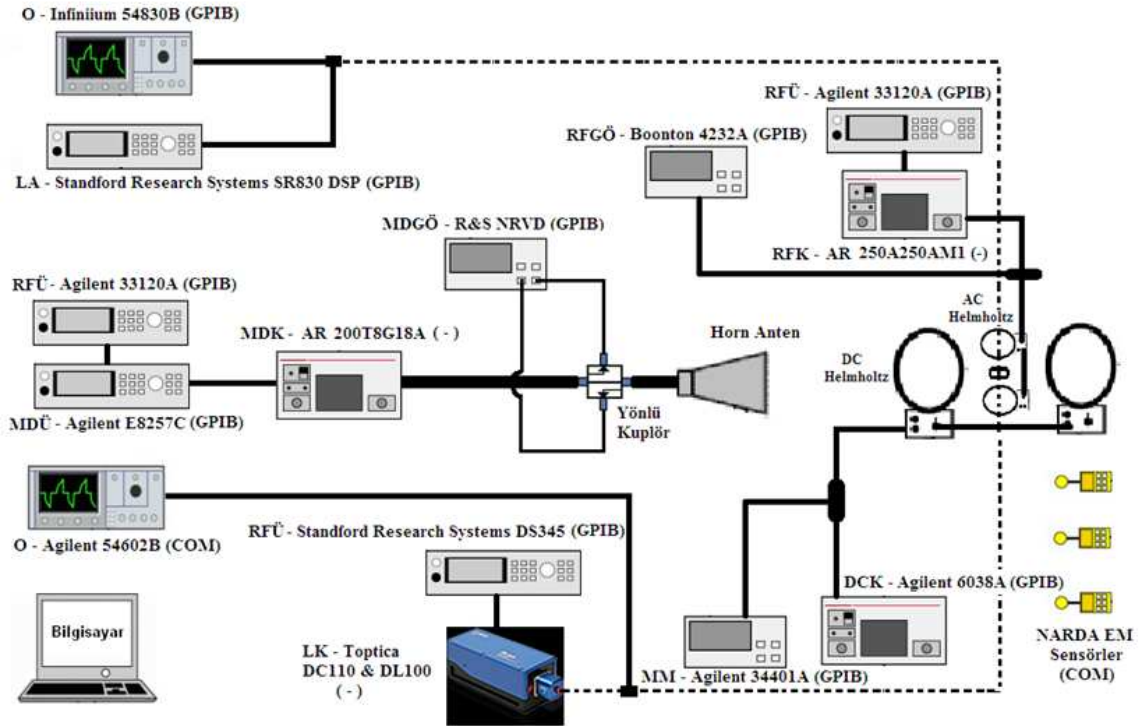
Diğer metotlardan farklı olarak antenimiz ekransız bir halka anten olduğundan dolayı TEM hücresi içerisindeki kalibrasyon, elektrik alandan kaynaklanan bir negatif etki içerebilmektedir. Fakat en azından 100 kHz' e kadar bu etki hissedilmemiştir. RS101 verici anteni ile yapılan SAE-ARP958 GKM sonuçları ile IEEE291 0,12 m' de

yapılan kalibrasyon sonuçları beklendiği üzere tutarlı çıkmıştır. Fakat RS101 verici anteni ile yapılan SAE-ARP958 AKM sonuçları diğer tüm sonuçlardan farklı şekilde sapmıştır, çünkü RE101 antenleri hariç bu metot tamamen gereksiz bir metottur. Helmholtz halkası içerisindeki kalibrasyondaki ufak sapmalar tasarlanan antenimizin boyutlarının Helmholtz halkası boyutlarına yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

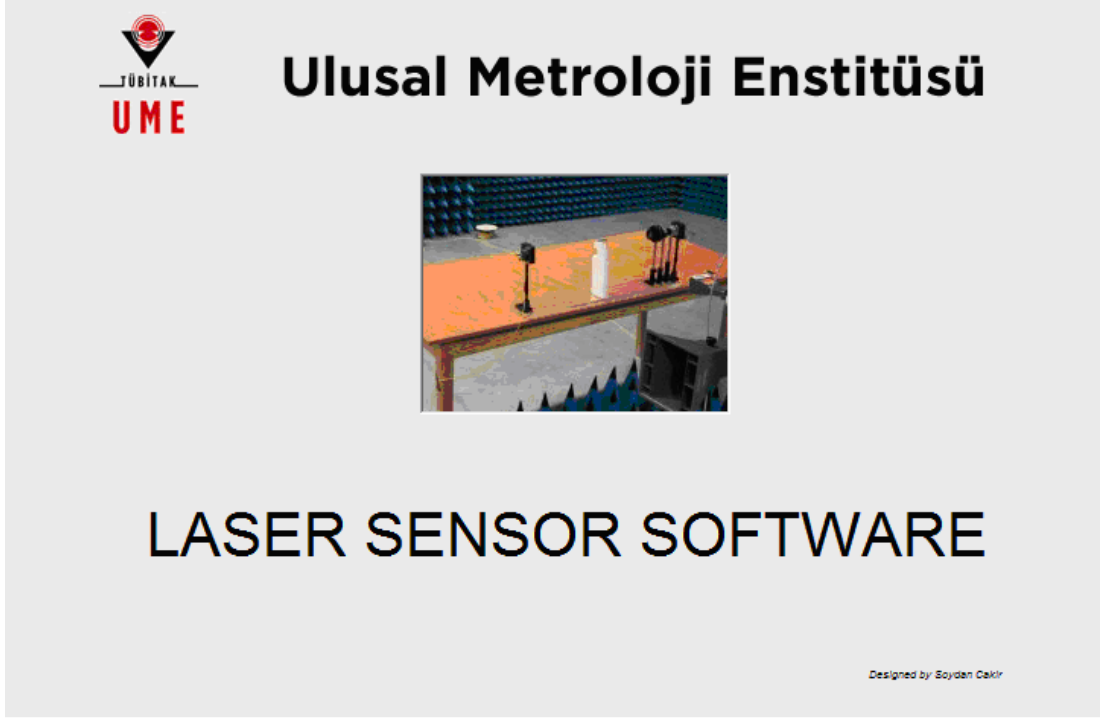
EK-C

C.1. TEZ KAPSAMINDA TASARLANAN YAZILIM

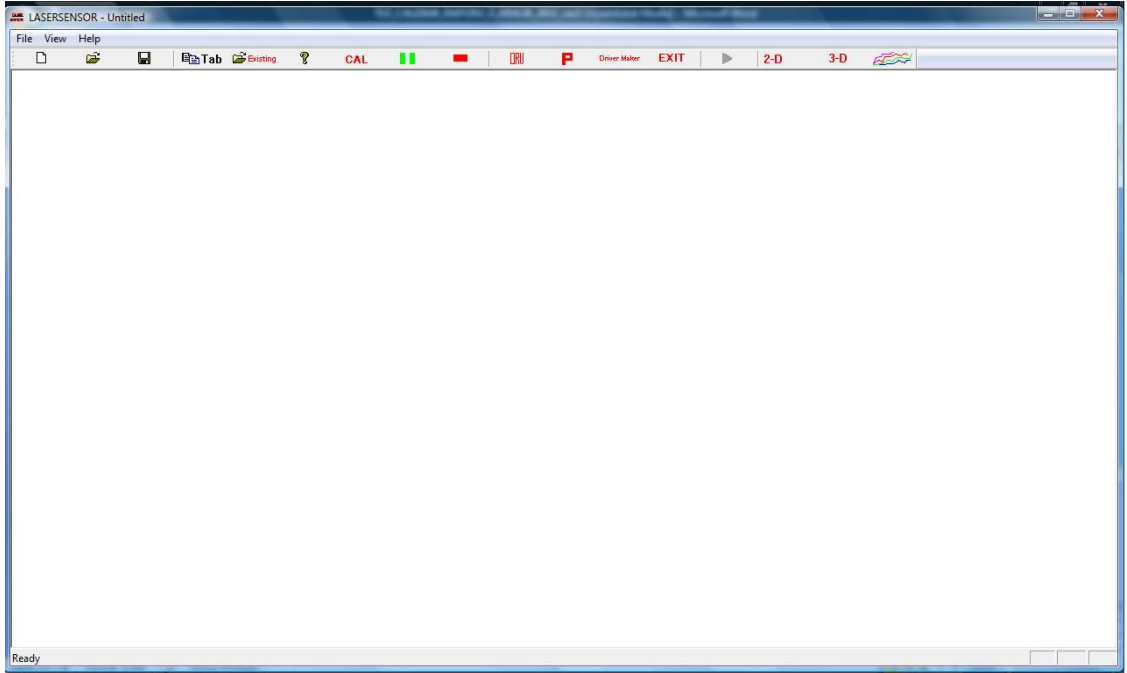
Tez çalışması, birçok karma laboratuvar cihazının eş zamanlı kullanımını gerektirmesinden dolayı yapılan çalışmaları destekleyecek ve ölçümleri tam bilgisayar kontrollü hale getirecek şekilde Visual C++ ve MFC kütüphanesi ile tasarlanan yazılımın görüntüleri Şekil C.2 - Şekil C.8’ de verilmiştir. Yazılımın görünüm dili, uluslararası olması amacıyla İngilizce olarak seçilmiştir. Yazılımın kontrol ettiği cihazlar ve haberleşme portları ise Şekil C.1’ de verilmiştir. Şekil C.1’ de kullanılan isimlendirme formatı “Cihaz Tip – Üretci Model (Haberleşme Portu)” şeklindedir. Cihaz tipi için kullanılan terimler O – Osiloskop, LA – Lock-In Amplifier, RFÜ – RF Üretci, MDÜ – Mikrodalga Üretci, RFK – RF Kuvvetlendirici, MDK – Mikrodalga Kuvvetlendirici, LK – Lazer Kaynağı, MM – Multi Metre, DCK – DC Kaynak, RFGÖ – RF Güç Ölçer, MDGÖ – Mikrodalga Güç Ölçer şeklindedir. Haberleşme portu ise GPIB veya COM şeklindedir. Haberleşme portunun olmaması ve manual kullanımlar “-“ şeklinde gösterilecektir. Ayrıca lazer hatları kesikli çizgilerle gösterilirken, koaksiyel hatlar düz çizgilerle belirtilmiştir.



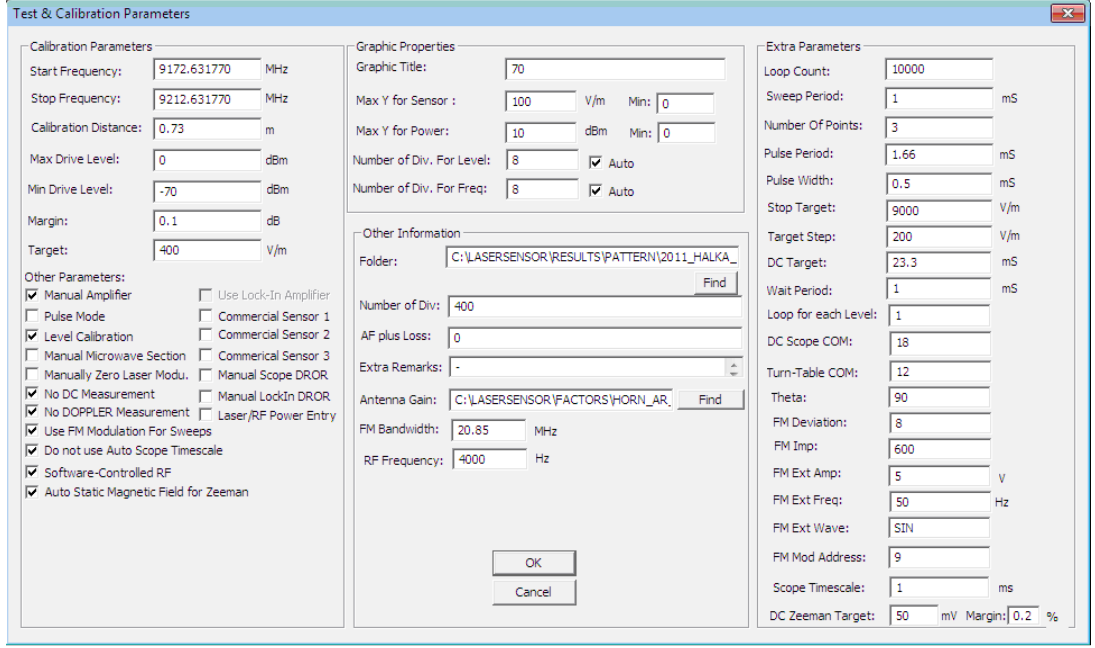
Şekil C.1. Yazılımın kontrol ettiği cihazlar ve haberleşme detayları



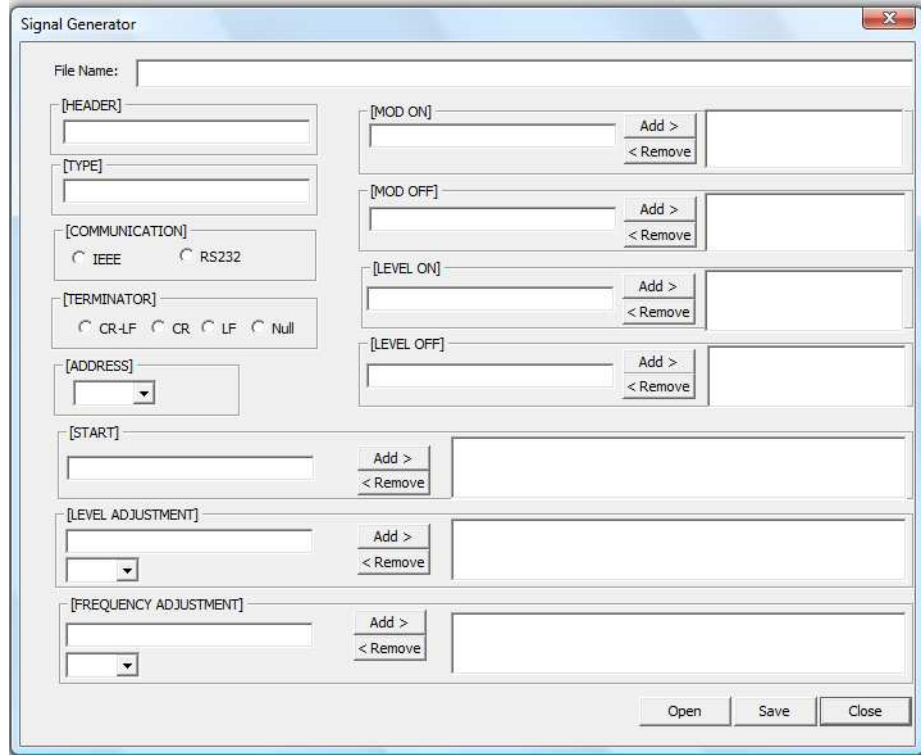
Şekil C.2. Yazılımın açılış ekranı



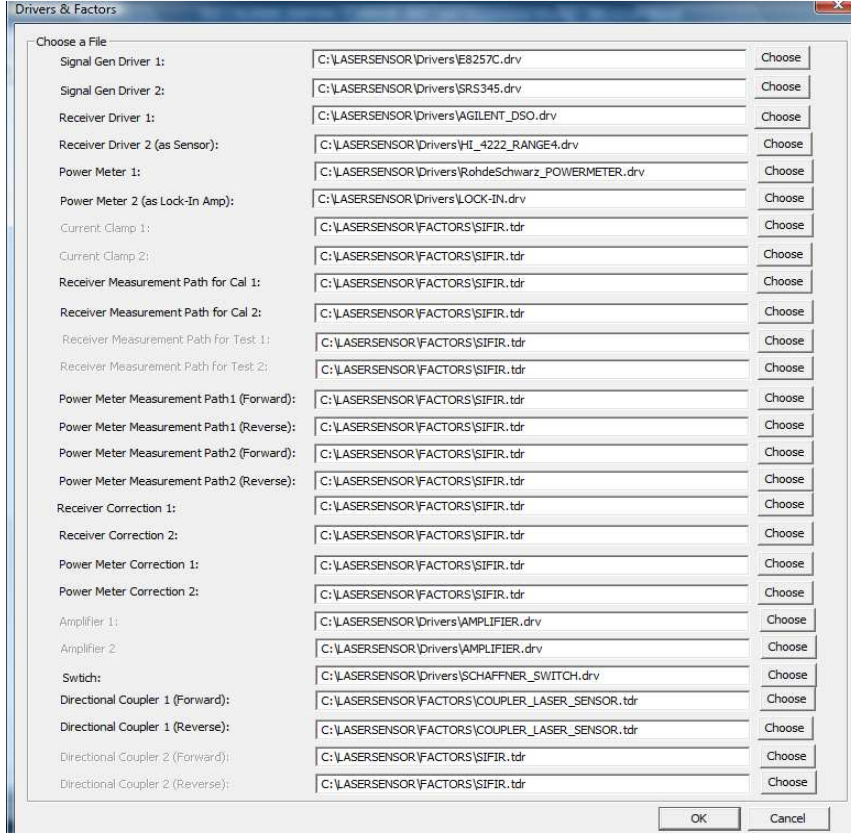
Şekil C.3. Yazılımın ana ekranı



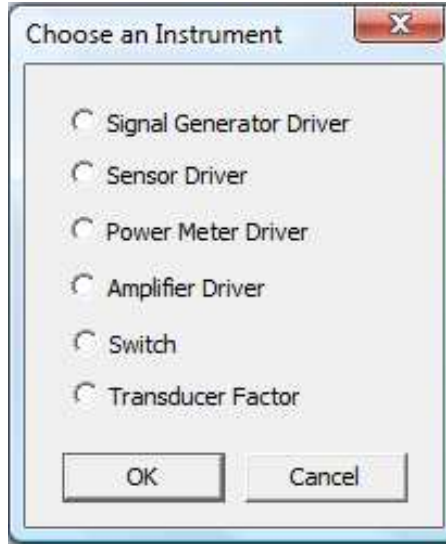
Şekil C.4. Yazılımın ölçüm parametrelerinin belirlendiği bölüm



Şekil C.5. Yazılımın cihaz sürücülerinin tasarlandığı bölüm



Şekil C.6. Yazılımın cihaz sürücülerinin seçildiği bölüm



Şekil C.7. Tasarlanacak cihaz sürücüsü seçim ekranı

Frequency [MHz]	Drive Level [dBm]	Target E [V/m]	Current E [V/m]	Target Power [dBm]	Current Power [dB]
9192.6317700000	-20.76	100.00	15.38	38.08	18.09
9192.6317700000	-20.76	100.00	15.38	38.16	18.22
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.00	17.98
9192.6317700000	-20.70	100.00	15.38	38.21	18.29
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.10	18.14
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.11	18.12
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.09	18.09
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.10	18.11
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.08	18.09
9192.6317700000	-20.81	100.00	15.38	38.13	18.17
9192.6317700000	-15.23	200.00	15.38	44.15	26.88
9192.6317700000	-15.23	200.00	15.38	44.14	26.83
9192.6317700000	-15.23	200.00	15.38	44.10	26.80
9192.6317700000	-15.23	200.00	15.38	44.10	26.80
9192.6317700000	-15.23	200.00	15.38	44.09	26.75
9192.6317700000	-15.13	200.00	15.38	44.20	26.90
9192.6317700000	-15.16	200.00	15.38	44.18	26.81
9192.6317700000	-15.16	200.00	15.38	44.11	26.75
9192.6317700000	-15.16	200.00	15.38	44.15	26.80
9192.6317700000	-15.16	200.00	15.38	44.13	26.78
9192.6317700000	-11.66	300.00	15.38	47.68	31.35
9192.6317700000	-11.69	300.00	15.38	47.76	31.58
9192.6317700000	-11.74	300.00	15.38	47.75	31.63
9192.6317700000	-11.77	300.00	15.38	47.75	31.66
9192.6317700000	-11.82	300.00	15.38	47.71	31.60
9192.6317700000	-11.82	300.00	15.38	47.70	31.59
9192.6317700000	-11.82	300.00	15.38	47.67	31.56
9192.6317700000	-11.82	300.00	15.38	47.71	31.59
9192.6317700000	-11.82	300.00	15.38	47.69	31.60
9192.6317700000	-11.82	300.00	15.38	47.72	31.62
9192.6317700000	-9.02	400.00	15.38	50.23	34.67

Şekil C.8. Ölçümler sonrası örnek sonuç ekranı

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Çakır S.**, Hamid R., Cetintas M., Cakir G., Sen O., Sensing of RF Magnetic Fields Using Zeeman Splitting of Double Radiooptical Resonance and a New Approach to Helmholtz Coil Calibrations, *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**, 2465-2473.
- [2] **Çakır S.**, Hamid R., Sevgi L., Loop Antenna Calibration, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2011, **53**, 243-254.
- [3] **Çakır S.**, Hamid R., Çetintaş M., Çakır G., Şen O., Çift Radyo Optik Rezonansın Zeeman Ayrışması ile RF Manyetik Alanların Tespiti, *1'nci Ulusal EMC Konferansı*, Doğu Üniversitesi, İstanbul, 14-16 Eylül 2011.
- [4] Çetintaş M., **Çakır S.**, Hamid R., Şen O., Towards absolute measurements of far-field microwave magnetic field by atomic sensor based on Double Radiooptical Resonance, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, **54**, 225-227.
- [5] Çetintaş M., Hamid R., Şen O., **Çakır S.**, Characterization of A Far-Field Microwave Magnetic Field Sensor Based on Double Radiooptical Resonance, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, **52**, 21-31.
- [6] Sevgi L., **Çakır S.**, Çakır G., Antenna Calibration for EMC Tests and Measurements, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2008, **50**, 215-224.
- [7] Şen O., **Çakır S.**, Çetintaş M., Acak S., Hamid R., Elektromanyetik Prob Kalibrasyonları, *1'nci Ulusal EMC Konferansı*, Doğu Üniversitesi, İstanbul, 14-16 Eylül 2011.
- [8] Çetintaş M., Hamid R., **Çakır S.**, Şen O., Çift Radyo Optik ile Çalışan Atomik Sensörü Kullanarak Mikrodalga Manyetik Alan Ölçümleri, *1'nci Ulusal EMC Konferansı*, Doğu Üniversitesi, İstanbul, 14-16 Eylül 2011.
- [9] Hamid R., Çetintaş M., **Çakır S.**, Şen O., Acak S., TÜBİTAK UME EMC Deney ve Ölçüm Kabiliyetleri, *1'nci Ulusal EMC Konferansı*, Doğu Üniversitesi, İstanbul, 14-16 Eylül 2011.
- [10] Şen O., Hamid R., Çetintaş M., Öztürk M., Ayaydın A., Acak S., **Çakır S.**, Işımla Yayınım Testlerinde Masa Etkisi, *1'nci Ulusal EMC Konferansı*, Doğu Üniversitesi, İstanbul, 14-16 Eylül 2011.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Çorlu' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Lüleburgaz' da tamamladı. 1994 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu, yüksek lisans öğrenimini ise 2006-2008 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. 1999-2005 yılları arasında sırasıyla Esim Test Hizmetleri A.Ş ve Vestel ARGE' de EMC Mühendisi olarak çalıştı ve 2005 yılından itibaren TÜBİTAK UME EMC laboratuvarında uzman araştırmacı olarak görev yapmakta olup, evli ve bir çocuk babasıdır.