



**TARLA TESİSİ İÇİN DEMET POZİSYON MONİTÖRÜ TASARIMI VE
KONTROL ELEKTRONİĞİ SİSTEMİ**

Ayhan AYDIN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2017

Ayhan AYDIN tarafından hazırlanan “TARLA TESİSİ İÇİN DEMET POZİSYON MONİTÖRÜ TASARIMI VE KONTROL ELEKTRONİĞİ SİSTEMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ergün KASAP

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Fizik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Metin YILMAZ

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Avni AKSOY

Hızlandırıcı Teknolojileri, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 30/05/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ayhan AYDIN

30/05/2017

TARLA TESİSİ İÇİN DEMET POZİSYON MONİTÖRÜ TASARIMI VE KONTROL ELEKTRONİĞİ SİSTEMİ

(Doktora Tezi)

Ayhan AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2017

ÖZET

Bu tez çalışmasında, tüm hızlandırıcı temelli ışınım kaynakları için en önemli demet teşhis elemanlarından biri olan, BPM (Demet Pozisyon Monitörleri) ve BPM elektroniği üzerine çalışmalar yürütüldü. Geliştirilen BPM ve ölçüm elektroniği; Kalkınma Bakanlığı Desteği ile Ankara Üniversitesi Gölbaşı Kampüsü'nde kurulan ve Ankara Üniversitesi Koordinatörlüğünde yürütülen TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara) projesinde kullanılacaktır. BPM'ler demet hattı içerisinde hareket eden parçacık demetlerinin pozisyonunu bulmak için kullanılan yüksek hassasiyetli demet hattı elemanlarından biridir. Bu çalışmada öncelikle TARLA elektron demetinin demet hattı içerisindeki kesin yerinin belirlenmesi için BPM'lere ait geometrik özellikler üzerinde çalışmalar yürütüldü. Bunun için TARLA tesisinde bulunan buton tipi BPM'ler kullanıldı. BPM elektroniği için öncelikle benzetim çalışmaları yürütüldü ve ilk örnek elektronik sistem TARLA tesisinde üretildi. Tesis için tüm demet hattı boyunca yaklaşık 35-40 adet kullanılması planlanan bu sistem için yüksek çözünürlüklü ölçümler alınması ve maliyetin düşürülmesine yönelik çalışmalar yapıldı. Bu kapsamda dünyada benzer tesislerde kullanılan sistemler incelendi ve TARLA tesisi için en uygun olanlar referans olarak alındı. Çalışmalar kapsamında ORCAD/PsPice, MATLAB, C#, VIVADO gibi benzetim ve yazılımların yanı sıra ZYNQ-7000 serisi FPGA, Redpitaya isimli ARM tabanlı bir gömülü sistem ve FMC 144 serisi kartlar kullanıldı.

Bilim Kodu : 20207

Anahtar Kelimeler : TARLA, demet pozisyon monitörü, demet teşhis, radyo frekans, sayısal yöntemler, FPGA

Sayfa Adedi : 69

Danışman : Prof. Dr. Ergün KASAP

DESIGN AND CONTROL ELECTRONICS SYSTEMS OF THE BEAM POSITION
MONITOR FOR TARLA FACILITY

(Ph. D. Thesis)

Ayhan AYDIN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2017

ABSTRACT

In this thesis, studies are done on development of BPM (Beam position monitor) and BPM electronics where they are amongst one of the most important diagnostics systems for all kind of accelerator based light sources. This BPM and readout electronics are to be used for TARLA which is under construction at Ankara University Gölbaşı Campus by the support of Ministry of Development and being coordinated by Ankara University. BPMs are high-precision beamline components to find out the position of particle beams travelling along the beamline. In order to obtain exact position of the electron beam in TARLA beamline, geometrical properties of BPMs were considered, and hence, button type BPMs were used for TARLA. Simulation studies for BPM electronics were initially carried out and the prototype electronics system was fabricated in TARLA facility. High-resolution measurements and cost effective optimizations were performed for 35-40 BPMs of entire TARLA beamline. In this respect, systems of similar world-class facilities were investigated and the best options were taken as reference for the TARLA facility. In addition to simulation codes such as ORCAD/PsPice, MATLAB, C#, VIVADO; ZYNQ-7000 series FPGA, ARM-based embedded system Redpitaya and FMC 144 series cards were used as well.

Science Code : 20207

Key Words : TARLA facility, beam position monitor, radio frequency, numerical methods, FPGA

Page Number : 69

Supervisor : Prof. Dr. Ergün KASAP

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu uzun soluklu yolculuğum esnasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan Danışman Hocam Prof. Dr. Sayın Ergün KASAP'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Çalışma esnasında gerekli olan tüm ölçüm aletlerinin ve malzemelerin temininde katkıda bulunan TARLA tesisi ve Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü yönetimine teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora süresi boyunca, görev yaptığım Ankara Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü çalışanlarına ayrıca Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü ve 2011 yılından beri büyük bir onur ile üyesi olduğum TARLA projesi çalışanları, Uzman. Burak KOÇ, Uzman. Çağlar KAYA, Yrd. Doç. Dr. Avni AKSOY, Arş. Gör. Dr. Bora KETENOĞLU Yrd. Doç. Dr. Evrim ÇOLAK, Uzman Umut BOSTANCI ve Elektrik-Elektronik Mühendisi Burak DURSUN'a ve diğer tüm çalışanlara yardımları ve arkadaşlıkları için teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca canım Annem ve Babama kelimeler ile anlatamayacağım desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2. DEMET POZİSYON MONİTÖRLERİ	7
2.1. TARLA Elektron Demeti Zaman Yapısı	7
2.2. Demet Teşhis Yöntemleri	8
2.3. Demet Pozisyon Monitörünün Tasarım Prensipleri	10
3. HESAPLAMA VE ÖLÇÜM METOTLARI.....	19
3.1. Demet Pozisyon Monitörünün Benzetim Çalışması	19
3.2. Demet Pozisyon Monitörü Test Düzeneği	22
3.3. Demet Pozisyon Monitörü Elektroniği	26
3.3.1. TARLA Demet pozisyon monitörü elektronik tasarımı.....	29
3.3.2. Sayısal sinyal işleme yöntemleri.....	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	47
4.1. Pik Yakalayıcı Devreye Yeni Yaklaşım.....	47
4.2. Yapılan Çalışmanın Değerlendirilmesi	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	57

	Sayfa
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	65
DİZİN.....	68

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. TARLA elektron demet parametreleri.....	3
Çizelge 2.1. Demet teşhis elemanları ve ölçebildikleri özellikler	9
Çizelge 3.1. BPM hesaplama aracından elde edilen ekran görüntüleri ve açıklamaları.	20
Çizelge 3.2. Elektronik sinyal işleme yöntemlerinin karşılaştırılması	29
Çizelge 3.3. Redpitaya özellikleri.....	39
Çizelge 3.4. Eğri uydurma işlemi ile elde edilen polinoma ait katsayılar grafiği.....	42
Çizelge 4.1. Kurulan düzenek ile 6 saat süre içerisinde farklı zaman aralıklarında alınan ölçüm sonuçları	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. TARLA enjektör sistemi sürekli ve atmalı demet yapısı.....	7
Şekil 2.2. FWHM şematik gösterim grafiği.....	8
Şekil 2.3. Elektron yüklerinin demet hattı üzerinde görüntü yük oluşturmaları	13
Şekil 2.4. BPM geometrik görünüm	14
Şekil 2.5. BPM anteni için elektriksel eşlenik devre	15
Şekil 3.1. BPM test düzeneği şematik gösterimi	22
Şekil 3.2. Geniş bant sinyal işleme	27
Şekil 3.3. Logaritmik sinyal işleme	27
Şekil 3.4. Dar Bant analog sinyal işleme	28
Şekil 3.5. Genlik Faz dönüşümü	28
Şekil 3.6. BPM sinyal ölçüm düzeneği ve sinyal işleme şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.7. Pik yakalayıcı (Peak detector) devresi şematik gösterimi	31
Şekil 3.8. Direnç kullanılarak oluşturulan pik yakalayıcı devre	31
Şekil 4.1. BPM antenlerinden elde edilen sinyallerin analog bileşenler ile işlenmesi ...	47
Şekil 4.2. Negatif pik yakalayıcı eklenmiş demet pozisyon monitörü elektroniği	49
Şekil 4.3. Sinyal ayırıcı ve birleştirici bileşenlerin kullanımı ile elde edilen sinyal yapısı	50
Şekil 4.4. Demet paket yapısına göre çalışma bölgesi belirleme.....	54

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Yüksek enerjili hızlandırıcıların zamanla gelişimi (Livingston Çizimi)	2
Resim 3.1. Demet pozisyon monitörü hesaplama aracı	20
Resim 3.2. TARLA tesisi buton tipi BPM teknik çizimi	22
Resim 3.3. BPM test düzeneği	23
Resim 3.4. Pulse üretici çıkış sinyali	24
Resim 3.5. BPM antenlerinden elde edilen sinyaller	25
Resim 3.6. Pik yakalayıcı devre benzetim örneği	33
Resim 3.7. Pik yakalayıcı devre ve voltaj izleyici devre benzetimi	34
Resim 3.8. Kendi kendini kompanze eden pik yakalayıcı ve voltaj izleyici devre	35
Resim 3.9. Antenlerden elde edilen sinyallerin pik değerlerinin yakalanması	36
Resim 3.10. BPM elektronik kartının test düzeneğine bağlanması	37
Resim 3.11. Antenlerden alınan sinyal ve elektronik kart çıkışında pik değerinin yakalanmasını gösteren Osiloskop ekran görüntüsü	38
Resim 3.12. Redpitaya mikroişlemci ve FPGA	39
Resim 3.13. Kurulan BPM düzeneği, üretilen elektronik kart ve okuma işlemi sonucu elde edilen çözünürlük grafiği (150 mv/mm)	41
Resim 3.14. Eğri uydurma işlemi sonucu elde edilen grafik	43
Resim 3.15. Eksenlerin yer değiştirilmesi ile elde edilen grafik ve polinom katsayıları	44
Resim 3.16. Eğri uydurma ile elde edilen polinom değerlerinin kullanılması ile demet pozisyonun bulunması	45
Resim 3.17. Demet pozisyonunun yazılan kodlar ile bulunması	45
Resim 3.18. Demet, demet pozisyon merkezinde değil iken konum tespitini gösteren ekran çıktısı	46

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Toplayıcı devre çıkışında antenlerden alınan sinyal karakteristikleri MATLAB programı çıktısı	48
Resim 4.2. Negatif ve pozitif pik yakalayıcı devrelerin birleştirilmesini gösteren benzetim çalışmaları	51
Resim 4.3. Negatif pik yakalayıcı devre sonucunda elde edilen grafik	52
Resim 4.4. Hızlı pik yakalayıcı tasarımı için farklı bir örnek	55
Resim 4.5. İki durumlu pik yakalayıcı devre tasarım örneği	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

f_s	Örnekleme frekansı
f_{acc}	Hızlandırıcı frekansı
f_c	Kesme frekansı
σ	Rms demet uzunluğu
e	Elektron yükü
T	Periyot
I_b	Demet akımı
$\langle I_b \rangle$	Ortalama demet akımı
i_w	Duvar akım yoğunluğu (Wall Current)
A_v	İşlemsel yükselteç (Op-Amp) Kazanç Oranı
S_x	X eksenindeki çözünürlük
S_y	Y eksenindeki çözünürlük
$a_0, \dots, a_8$	Polinom katsayıları
V_f	Diyot iletim voltajı

Kısaltmalar

Açıklamalar

ADC	Analog sayısal çevirici (Analog to Digital Convertor)
Amp	Yükseltici
BPM	Demet Pozisyon Monitörü
CW	Sürekli atmalı demet (Continues Wave)
DC	Doğru akım (Direct Current)
FCT	Hızlı akım dönüştürücüsü
FPGA	Entegre devre (Field Programmable Gate Array)
FWHM	Maksimum yarıısı tam genişlik (Bir sinyal için)
HTE	Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

Kısaltmalar**Açıklamalar****ICT**

Ortalama akım dönüştürücüsü

RF

Radyo frekans

SEL

Serbest Elektron Lazeri

SNR

Sinyal gürültü oranı

TAC

Türk Hızlandırıcı Merkezi

TARLA

Elektron Hızlandırıcısı ve SEL Tesisi

TCP/IP

İletim kontrol protokolü/İnternet protokolü

1. GİRİŞ

Yüksek enerjili hızlandırıcı geliştirme çalışmalarının başlangıcı 1911 yılında Rutherford 'un atomun içerisindeki çekirdeği keşfine dayanır. Rutherford tarafından yapılan deneyde, arkasına film yerleştirilmiş bir altın tabakaya +2 yüklü alfa tanecikleri gönderilmiş ve ışınların levhaya çarptıktan sonra izledikleri yollar gözlemlenmiştir [1]. Deney sonucunda ışınların küçük bir kısmının kırıldığı ve çok küçük bir kısmının yansıdığı görülmektedir.

Temelde iki çeşit hızlandırıcı türü vardır bunlar elektrostatik ve elektrodinamik (ya da elektromanyetik) hızlandırıcılar olarak isimlendirilirler. Elektrostatik hızlandırıcılar statik elektrik alanlarını kullanarak parçacıkları hızlandırırlar. Bununla ilgili bilinen en yaygın tipler Cockroft-Walton ve Van de Graaf jeneratörleridir [2, 3]. Elektrodinamik ya da elektromanyetik hızlandırıcılar ise zamanla değişen elektrik (manyetik indüksiyon ya da salınmalı radyo frekansları) alanları kullanarak parçacıkları hızlandırırlar.

DC (Direct Current) ve RF (Radyo Frekans) hızlandırıcılar ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve özellikle 1950'li yıllar sonrasında bu durum ivmelenerek artmıştır. Hızlandırıcıların etkisi kullanımlarının artması ile birlikte bilim ve teknoloji alanında önemli derecede hissedilmiştir. Hızlandırıcılar kullanılarak parçacık fiziği, nükleer fizik, malzeme fiziği, biyoteknoloji, nanoteknoloji ve endüstriyel uygulamalarda birçok bilimsel çalışma ve keşif gerçekleştirilmiştir.

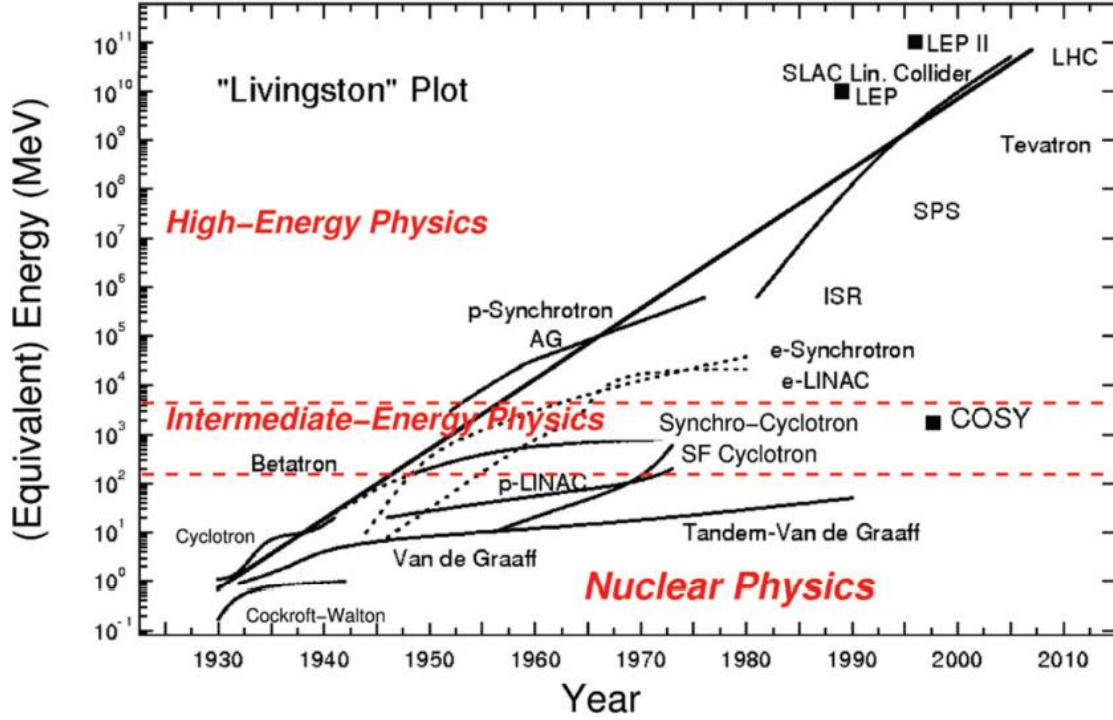
Hızlandırıcılar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- DC Yüksek Gerilim Hızlandırıcıları
- Doğrusal RF Hızlandırıcılar
- Dairesel RF Hızlandırıcılar

Ayrıca dairesel hızlandırıcılar kendi içerisinde aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- Siklotron
- Sinkrotron
- Betatron
- Mikrotron

Hızlandırıcılara dayalı ışınım kaynakları gelişimlerine göre 1., 2., 3. ve 4. nesil ışınım kaynakları olarak isimlendirilmektedir. Livingston'a göre hızlandırıcı dünyasında her 6 yıl içerisinde Resim 1.1'de kesikli çizgiler ile gösterildiği gibi kendini katlayan gelişmeler olmaktadır [4].



Resim 1. 1. Yüksek enerjili hızlandırıcıların zamanla gelişimi (Livingston Çizimi) [5]

Kurulumu Kalkınma Bakanlığı desteği ile Ankara Üniversitesi ve Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü koordinatörlüğünde devam etmekte olan Elektron Hızlandırıcısı ve SEL (Serbest Elektron Lazeri) Tesisi –TARLA, Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesinin (THM) ilk tesisidir. TARLA tesisi infrared (kızılötesi) bölgesinde 3-250 μm dalga boyu aralığında serbest elektron lazeri üretmeyi amaçlayan 4. nesil bir ışınım kaynağı tesisidir.

TARLA tesisi, aralarında Gazi Üniversitesinin de bulunduğu 12 Üniversitenin işbirliği ile 3. aşaması 2006-2015 yılları arasında tamamlanan “Türk Hızlandırıcı Merkezinin Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları” projesi kapsamında kurulumu devam eden ilk tesistir. Bunun dışında proje kapsamında Sinkrotron Işınımı Tesisi, Proton Hızlandırıcı Tesisi, SASE-FEL (Self Amplification of Spontaneous Emission Free Electron Laser) Tesisi, Parçacık Fabrikası (Charm Factory) Tesisinin de teknik tasarım çalışmaları 2016 yılında tamamlanmıştır.

Serbest elektron lazeri, lineer hızlandırıcı veya sinkrotronlardan elde edilen rölativistik elektron demetlerinin çok kutuplu olan ve kutupları arasına sinüsel bir manyetik alanın uygulandığı salındırıcı magnetlerden geçirilmesi yoluyla elde edilen monokromatik, dalga boyu ayarlanabilir, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip 4. nesil ışınım kaynaklarıdır [6].

TARLA tesisi, tamamen normal iletken teknolojiye dayalı enjektör, sürekli modda elektron demeti hızlandırabilen iki adet süper iletken hızlandırıcı modülünden oluşan ana hızlandırma bölümü ve farklı periyotlarda salındırıcı (undulator) magnetleri barındıran iki adet birbirinden bağımsız optik rezonatörden oluşmaktadır (U25 ve U90). Tesiste hızlandırıcıdan elde edilen elektron demeti aynı zamanda frenleme (Bremsstrahlung) ışınımı üretmek için de kullanılacaktır. TARLA tesisi ürettiği yüksek akımlı elektron demeti ve elektromanyetik radyasyonları ile ülkemizde ve bölgemizde ilk kullanıcı laboratuvarı olmayı amaçlamaktadır [7]. Tesise ilişkin detaylara teknik tasarım raporlarından ulaşılabilir.

TARLA tesisi Çizelge 1.1 ile verilen parametrelere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Çizelge 1. 1. TARLA elektron demet parametreleri [7]

Parametre	Birimi	Başlangıç Değeri	Planlanan Değeri
Demet Enerjisi	MeV	15-40	15-40
Ortalama Demet Akımı	mA	1	1,5
Demet Paket Yüğü	pC	77	115
Yatay Emitans	mm.mrad	<15	<16
Dikey Emitans	mm.mrad	<12	<12
Boyuna Emitans	keV.ps	<85	<100
Paket Uzunluğu	ps	0.4-0.6	0.5-0.6
RMS Enerji Aralığı	keV	<100	<100
Paket Tekrarlama Süresi	MHz	13	13,26
Makro Paket Süresi	µs	50→CW	50→CW
Makro Paket Tekrarlama Oranı	Hz	1→CW	1→CW

Demet teşhis işlemi, hızlandırıcıları kontrol etmek ve işletmek için hayati derecede öneme sahiptir [8]. Tüm hızlandırıcılar için parçacık demetinin (elektron, proton), demet hattı içerisindeki davranışları ve özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için demet teşhis elemanları kullanılır. Demet teşhis elemanları olmadan bir hızlandırıcıyı kontrol etmek ve diagnostik işlemlerini uygulamak mümkün değildir. Demetin, demet hattı içerisindeki davranışlarını ve özelliklerini belirlemek adına demet pozisyon monitörleri (BPMs), demet kayıp monitörleri (BLMs), ortalama ve anlık demet akımı ölçüm sistemleri (ICT/FCT), kameralar vb. sistemler kullanılır [9].

Bu tezin kapsamı, TARLA tesisinde kullanılacak olan en önemli demet teşhis elemanlarından biri olan, BPM'lerin mekanik ve geometrik özelliklerini ortaya koymak ve antenlerden elde edilen sinyalleri elektronik devreler ve kontrol sistemlerini kullanarak işlemektir. Bu işlemin sonucu olarak da demet hattı içerisinde ilerleyen demetin pozisyonun bulunmasına yönelik çalışmaların yapılmasıdır.

BPM'ler elektron demetine zarar vermeden ölçüm alabilme yeteneğine sahip demet teşhis elemanlarından bir tanesidir. Bu amaç ile kullanılacak olan elektronik devrenin tasarlanması, sinyal işleme metodlarının kullanımı ile demet pozisyonunun hassas bir şekilde elde edilmesi ve tasarlanan kartların imal edilmesi konularını içermektedir.

BPM'ler demet hattı üzerinde kullanıldıkları yere göre farklı fiziksel yapılarda olabilir. Bunun için farklı geometrilerde üretilmiş olan, Buton (Button), kavite (cavity), şerit (stripline) tipi BPM'ler tüm hızlandırıcı tesislerinde kullanılmaktadır.

Buton tipi BPM'ler basit geometrik yapısı ve maliyetinin düşük olması nedenleri ile tercih edilen demet teşhis elemanlarındanıdır.

Demet hattı üzerine takılı olan BPM içerisinde geçen elektron demeti, BPM antenlerinde bir akının indüklenmesine neden olur. Antenler üzerinde toplanan sinyallerin işlenmesi için bir elektronik devre ve sayısal sinyal işleme tekniklerine ihtiyaç vardır.

Tez kapsamında TARLA tesisinin envanterinde bulunan NTG (Almanya) firmasına ürettirilen buton tipi BPM'ler kullanılarak teşhis, elektronik kart üretimi ve kontrol sistemi ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen sistem, test

düzeneginden alınan sonuçlar ve simülasyon sonuçları açısından karşılaştırıldığında uyumludur.

Ayrıca elektronik karttan alınan sinyaller mikro işlemci temelli FPGA (Field Programmable Gate Array) kartlar ve yüksek seviyeli programlama dilleri programı kullanılarak işlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen elektronik devre ve devre üzerindeki sinyal işleme metotları rahatlıkla diğer tür BPM'ler içinde kullanılabilecek bir şekilde tasarlanmıştır.

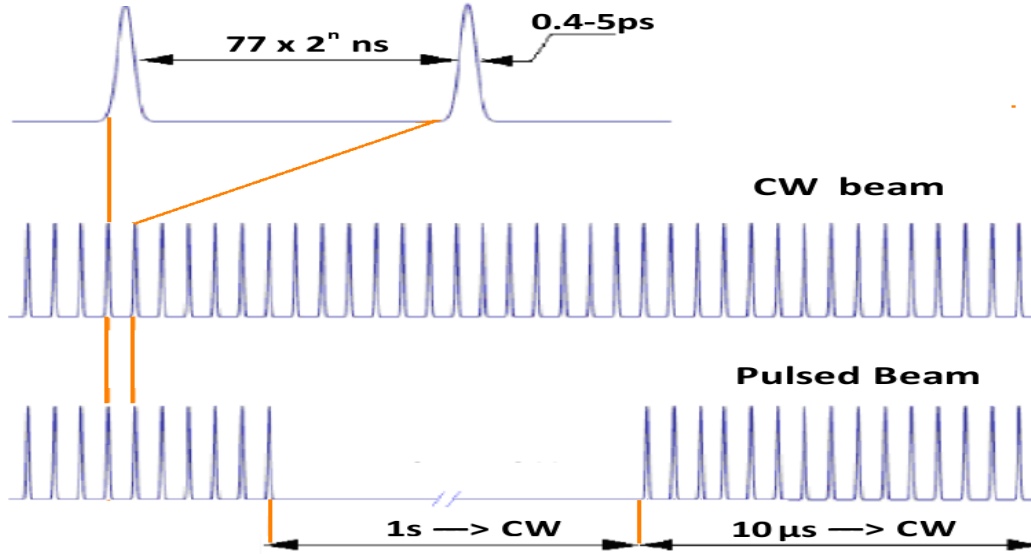
Yapılan çalışma ayrıca hızlandırıcıların en önemli konularından biri olan diagnostik (demet teşhis) ile ilgilidir. Bu çalışmanın sonuçları ve elektronik devre tasarımları kullanılarak farklı diagnostik sistemleri üzerine çalışmalar yürütülebilir ve böylelikle ülkenin bu konudaki dışa bağımlılığı azaltılabilir.

Tek bir BPM'in kontrolü için Libera (Slovenya) firmasından temin edilen sistemin maliyetinin ~10,000 Avro olduğu ve TARLA tesisinde 40 adet BPM kullanılacağı hesaplandığında sadece BPM kontrol sistemi için 400,000 Avro'luk bir bütçeye ihtiyaç vardır. Bu tez çalışması kapsamında üretilen sistemin maliyeti ise ~600 Avro'dur. Toplamda bu tutar 24,000 Avro civarında olacaktır. Böylelikle yaklaşık 350,000 Avroluk bir tasarruf yapılması planlanmaktadır.

2. DEMET POZİSYON MONİTÖRLERİ

2.1. TARLA Elektron Demeti Zaman Yapısı

TARLA tesisi için tasarlanan termiyonik yapıdaki elektron tabancası (e-Gun) Şekil 2.1. de gösterildiği gibi gausiyen yapıda bir demet oluşumuna izin verir.

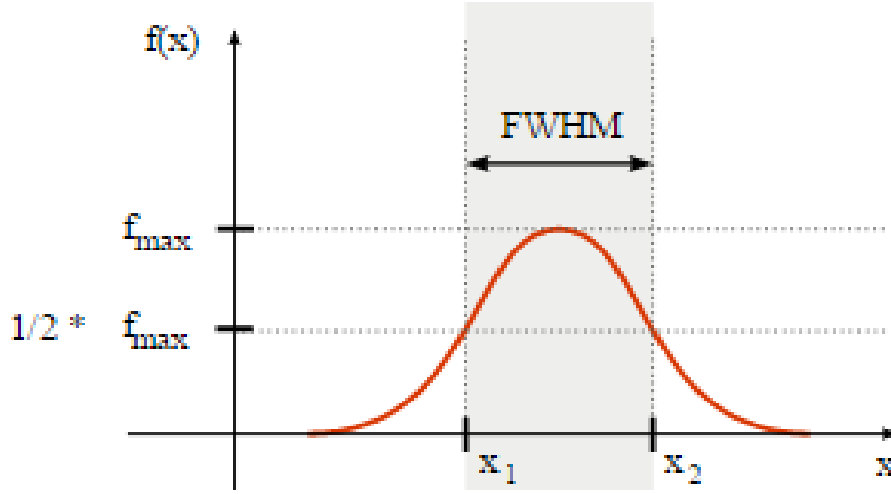


Şekil 2. 1. TARLA enjektör sistemi sürekli ve atmalı demet yapısı

Şekil 2.1’den de görüleceği gibi TARLA tesisi, atmalı (Pulsed Beam) ve sürekli (Continuous Wave-CW) olmak üzere iki farklı demet yapısına sahiptir. Atmalı yapıdaki demet paketçikleri $10 \mu\text{s}$ ’den sürekli yapıya kadar değişebilmektedir. Farklı uygulamalar için bu demet yapılarının tamamı TARLA tesisinde kullanılacak ve böylece malzeme, nükleer fizik, biyoteknoloji vb. alanlarda çalışmalar gerçekleştirilecektir.

TARLA tesisinde üretilen elektron demetin iki sinyal (atma) arası mesafesi 77 ns (13 MHz) dir. Her bir sinyalin FWHM (Full Width at Half Maksimum) değeri ise $0,4 \text{ ps}$ ile 500 ps arasında değişebilmektedir. Elektron tabancası çıkışında bu sinyalin bant genişliği yaklaşık 500 ps mertebesindedir.

“FWHM, genellikle bir eğri ya da fonksiyonun ... bant genişliğini ... tanımlamak için kullanılan bir parametredir” [10]. Bir eğri ya da sinyal için FWHM, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi bulunabilir.



Şekil 2. 2. FWHM şematik gösterim grafiği

Sinyalin bu özelliği kullanılacak elektronik için önemlidir. Analog bir sinyali sayısal bir sinyale dönüştürürken analog sinyal üzerinden örnekler almak gerekmektedir. Olshausen göre, “ Nyquist örnekleme teoremi nominal örnekleme için bir reçete sunar ... ve örnekleme frekansı en az sinyalin kendi frekansından iki kat büyük olmalıdır” [11].

Bir sinyalin zaman yapısı hakkında bilgi almak için teoride o sinyalin en az iki noktasında örneklenmesi gerekmektedir ve bu durum aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$f_s \geq 2f_c \quad (2.1)$$

Burada f_s örnekleme frekansı, f_c ise örneklenecek olan sinyaldir.

Bir çok uygulamada bant limitlerinden dolayı Nyquist teoremi etkili değildir [12]. Bu gibi durumlar için yeni yaklaşımlarda bulunulmalıdır. Örnek sayısı artırılarak sinyal davranışları hakkında daha çok bilgi sahibi olunabilir. FWHM’u 500 ps olan bir sinyal üzerinden 10 örnek alınmak istenirse, bunu yapabilecek bir ADC hızının en az 20 GHz olması gerekmektedir.

2.2. Demet Teşhis Yöntemleri

Bir hızlandırıcıyı başarılı bir şekilde işletmek için, demetin konumu, akımı, yayılımı vb. parametrelerinin ölçülmesi gerekmektedir. Demet teşhis yöntemleri, demete ait parametreler ve demetin davranışları açısından düşünüldüğünde tüm hızlandırıcılar için oldukça

önemlidir. Demet teşhis yöntemleri ne kadar gelişmiş ise bir hızlandırıcıdan elde edilecek lazerin kalitesi, enerjisi vb. özellikleri o kadar hassas ve kesin olacaktır. Temel fizik kanunları referans alınarak birçok farklı türde ve özellikte demet teşhis metotları geliştirmek mümkündür. Demet teşhisi için kullanılabilecek bazı diagnostik elemanları ve ölçüm yeteneklerini Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi verilmektedir.

Çizelge 2. 1. Demet teşhis elemanları ve ölçebildikleri özellikler [13]

Demet Teşhis Elemanları	Yoğunluk/Yük	Transverse (Enine)			Longitudinal (Boyuna)		Kalite Faktörü+ dQ	Enerji + dE	Kutuplanma	Demet Üzerindeki Etkisi			
		Pozisyon	Boyut/Şekil	Yayınım	Boyut/Şekil	Yayınım				N	-	+	D
Demet Transformatörleri	●				●	●				X			
Duvar-Akım Monitörleri	●	●			●	●				X			
Demet Pozisyon Monitörleri (BPMs)	●	●	●		●	●				X			
Faraday Kafesi	●												X
Tel Tarayıcılar		●	●	●							X		
İyonizasyon Odaları	●										X	X	
Demet Kayıp Monitörleri		■	■	■			■			X			
Laser-Compton Saçılmaları			●	●					●	X			
Demet üzerindeki etkisi						● : Birinci Amacı							
N : Yok - : Az önemsiz + : bozucu etki D : zararlı						■ : Dolaylı Amacı							

Tabloda verilen demet teşhis elemanlarının birçoğu bir hızlandırıcı hattının farklı noktalarında farklı amaçlar ile kullanılabilir. Tabloda bu ölçüm yöntemlerinin doğrudan ve dolaylı olarak ölçüm yapabildikleri özellikler ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Bunun dışında faraday kafesi, iyonizasyon odası gibi bazı ölçüm metotlarının, ölçüm esnasında demet yapısına etkileri gözlenmektedir.

Çizelge 2.1 ile verilen bilgiler ışığında, demet pozisyonu ölçmek için kullanılan en etkili yollardan biri BPM'leri kullanmaktır. BPM'ler kullanıldıkları yerlere ve demet özelliklerine bağlı olarak farklı geometrik yapılarda olabilir. Ancak tüm BPM'ler elektrik yükünü ölçme temelindedir. Çünkü demet elektrik alanı zamana bağlıdır ve bu nedenle antenler üzerinde bir alternatif akım oluşturur. Oluşan bu akım antenler kullanılarak toplanır. Eğer demet, demet hattı içerisinde yer değiştirir ise buna bağlı olarak antenlerden toplanan sinyallerde değişecektir. Antenlerden elde edilen sinyaller ise bir takım elektronik devreler kullanılarak bilgisayar ve mikroişlemci temelli FPGA'lerde işlenebilir hale dönüştürülebilirler.

Lorenz, “Çoğu demet pozisyon monitörünün, demet hattı üzerinde farklı noktalarda yüklü parçacıkların meydana getirdiği elektrik ya da manyetik alanı algıladığını belirtmektedir” [14].

Magne ve Wendt, “her demet pozisyon monitörünün bir sinyal toplama haznesi ve bir elektronik okuma ünitesinden meydana geldiğini belirtmektedir” [15].

Demet pozisyonunu ölçmek için BPM'lerin dışında kullanılabilecek birçok yöntem vardır. Shafer, bu yöntemleri “wire scanner, optik geçiş ışınlamaları, ... , bremsstrahlung (frenleme ışınlamaları) vb. yöntemlerdir şeklinde ifade etmektedir” [16].

Röjssel, “Demet pozisyonunu yüksek hassasiyetler ile tespit etmek için quadrupole magnetlerin kullanılabileceğini belirtmektedir” [17].

Ayrıca Shafer, “Antenler genelde DC elektrik ya da manyetik alanları algılayamaz. Bu duruma istisna Hall propların ve flux-gate magnetometer kullanımlarıdır demektedir” [16].

2.3. Demet Pozisyon Monitörünün Tasarım Prensipleri

TARLA tesisi için yapılan çalışmada buton tipi BPM'ler kullanılarak çalışmalar yürütülmüştür. Buton tipi BPM'ler basit geometrik yapıları dolayısı en çok tercih edilen BPM türlerinden birisidir. Bu basit yapı sayesinde üretimleri de kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Demet pozisyonunu belirlemek için bir sistem tasarlanırken, demete ait bir takım parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler tasarımı gerçekleştirilen BPM sistemini nasıl etkiler ya da sistem tarafından nasıl etkilenir öncelikle bunun değerlendirilmesi gerekir. Bu parametreler ve etkileri bilinmeden bir ölçüm düzeneği

oluşturmak ve buradan doğru ölçümler alınamaz. Bu parametreler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Doğruluk (Accuracy)

BPM'in mekanik olarak ne kadar hassas üretildiği ile ilgilidir. Mekanik sisteme ait toleranslar biliniyorsa sinyal işleme ile buradaki eksiklikler giderilebilir.

Çözünürlük (Resolution)

BPM üzerinde kullanılan RF antenlerin ne kadar hassasiyet ile sinyalleri toplayabildiği ile ilgilidir. Demet hattı içerisinde hareket eden demetin küçük yer değişimlerini ifade eder. Mümkün olan en küçük yer değiştirmeleri saptayabilecek bir sistem tasarlanmalıdır.

Bant Genişliği (BandWidth)

Hangi bant genişliğine sahip demet pozisyon değişimlerinin ölçülebileceği ile ilgilidir. Bazı durumlarda demet hızlı bir şekilde enine değişimler gösterebilir (jitter) bunu ortaya konulması gerekir. Yine bazı durumlarda demet atmaları çok küçük olabilir (ps gibi) bu gibi durumlarda da sistemin ölçüm yapabilmesi istenir.

Demet Akımı (Beam Current)

BPM'lerde elektron demeti üretimi esnasında demet akımı bilinmesi gereken en önemli parametrelerden biridir. Bu parametre sinyal-gürültü oranının ortaya konulması ile çözünürlüğün ne kadar hassas olacağı hakkında bilgi verir.

Sinyal-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio):

Ölçülmesi istenen sinyalin istenmeyen (gürültü) sinyale karşı orantısal büyüklüğünü verir. Bu gürültüler çevresel etkilerden meydana gelebilir (Sıcaklık, yükseltici, elektromanyetik vb.).

Yukarıda tanımları verilen BPM'lere ait mekanik ve ölçüm ile ilgili parametreler ışığında gerekli hesaplamalar yapılmalı ve bunun neticesi olarak da üretim aşamalarına geçilmelidir.

Smith, “Demet pozisyon monitörü tasarımı genellikle zorlu sistem tasarımları gerektirir ... Çünkü BPM’ler sağlam, doğru ve demet yapısına zarar vermeden ölçüm sinyalleri ... alabilmedir demektir” [18].

Shafer, “Silindirik bir yapı içerisinde 180° derece açılı ile birbirlerine karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki RF anten düşünelim. Demet yapısının gausiye olduğu düşünülerek, elektron demet paketinin akımını bulmak için Eşitlik 2.2’deki formülün kullanılabileceğini belirtmektedir” [16].

$$I_b(t) = \frac{eN}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.2)$$

Ortalama demet akımını veren bu fonksiyon normalize bir fonksiyon olduğu için toplam şarj eN , rms paket uzunluğundan bağımsızdır. Burada e elektron yükü, N toplam parçacık sayısı, σ rms demet uzunluğudur. Demetin simetrik olduğunu, $t = 0$ anında demet hattı içerisinde merkezde olduğunu ve T periyoduna sahip paketlerden meydana geldiğini düşünürsek yukarıdaki denklem $\omega_0 = 2\pi/T$ alınarak kosinüs serisi olarak açılırsa:

$$I_b(t) = \frac{eN}{T} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\omega_0 t) \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir. Burada;

$$I_m = (2eN/T) \exp([m^2\omega_0^2\sigma^2]/2) \quad (2.4)$$

dir.

Bu denklem farklı bir gösterimle aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_b(t) = \langle I_b \rangle + 2\langle I_b \rangle \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m\omega_0 t) \quad (2.5)$$

Burada tek bir elektron için (pencil beam) ortalama demet akımı $\langle I_b \rangle$ aşağıdaki şekilde bulunur

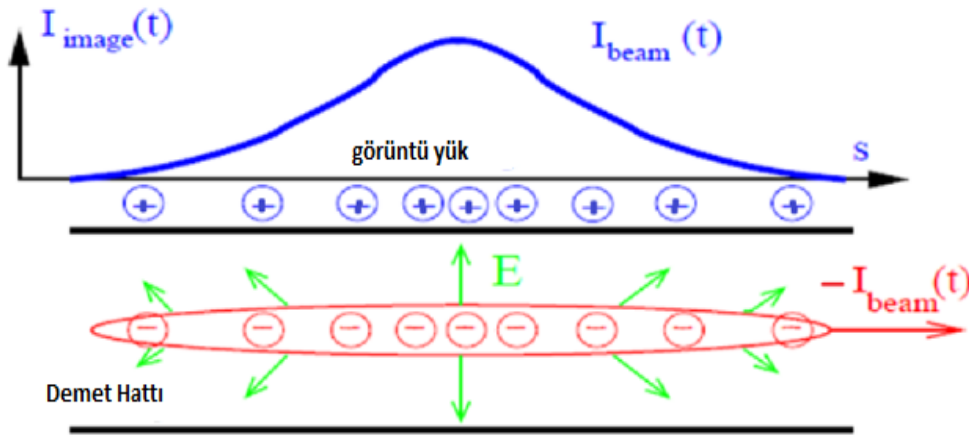
$$\langle I_b \rangle = \frac{eN}{T} \quad (2.6)$$

$m\omega_0$ için harmonik genlik faktörü A_m ise;

$$A_m = \exp\left[\frac{-m^2\omega_0^2\sigma^2}{2}\right] \quad (2.7)$$

olur.

Tüm denklemler normalize olduğu için, simetrik demet şekilleri için $Am = 1$ ve $\omega_0=0$ olur. Eğer demet, yarıçapı b olan silindirik ve iletken bir yapı içerisinde tam merkezde ise ve $v_b = \beta_b c$ (c ışık hızı) gibi bir hıza sahip ise, demete elektromanyetik bir alan eşlik eder. Demete eşlik eden EM alanın etkisi ile demet hattı üzerinde demet ile aynı büyüklükte fakat Şekil 2.3.'de gösterildiği gibi ters polariteye sahip bir duvar akımı indüklenir



Şekil 2. 3. Elektron yüklerinin demet hattı üzerinde görüntü yük oluşturmaları [19]

Sonsuz iletken bir demet hattı içerisinde merkezde bulunan bir demet için duvar akım yoğunluğu demet akımının, demet hattı çevresine bölünmesi ile elde edilir:

$$i_w(t) = \left[\frac{-I_b(t)}{2\pi b}\right] \quad (2.8)$$

Demetin merkezde değil de silindirik yapı içerisinde herhangi bir yerde olduğunu düşünürsek demetin meydana getireceği duvar akım yoğunluğu Laplace denklemlerinin iki boyutta çözümüyle bulunabilir [20].

$$i_w(b, \phi_w, t) = \frac{-I_b(t)}{2\pi b} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{b}\right)^n \cos n(\phi_w - \theta)\right] \quad (2.9)$$

Burada i_w duvar akım yoğunluğu olmak üzere diğer ifadeler iki boyutlu düzlemde Şekil 2.4.'de gösterilmiştir.

burada $R = I_R(t)$ ve $L = I_L(t)$ dir.

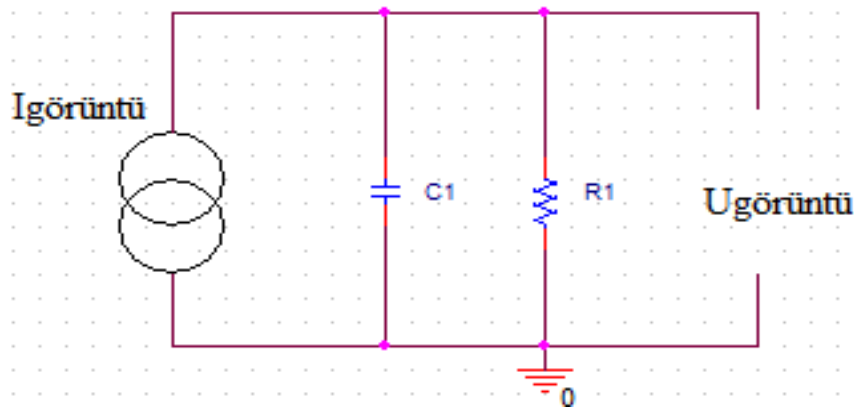
Demet hattı içerisinde elektron demetinin yerini bulmak için BPM antenlerinden elde edilen sinyaller birçok farklı yöntem kullanılarak işlenebilir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları, sinyallerin farklarının toplamalarına oranı $(\frac{\Delta}{\Sigma})$, genlik-faz modülasyonu (AM/PM) ve logaritmik oran metotlarıdır. Bu tez kapsamında sinyal farklarının toplamalarına oranı metodu kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemde bir ekseninde (x), elektron demetinin demet hattı içerisindeki yer değiştirmesi sinyal farklarının toplamalarına oranı olarak

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{I_R - I_L}{I_R + I_L} \quad (2.14)$$

ile verilir.

Antenlerin yerleşimleri ve boyutları kapasitif etkilerini belirler. Elde edilen akım değeri yükseltici devre girişinden önce bir direnç üzerinden toprağa akıtılır ve direnç üzerinden elde edilen voltaj değeri yükseltici devreye verilir. Bu durumda bir anten üzerinde meydana gelen etkinin elektrik devresi eşleniği Şekil 2.5.'de olduğu gibi gösterilebilir.



Şekil 2. 5. BPM anteni için elektriksel eşlenik devre [19]

Konumun bulunabilmesi için elektron demetinin, demet hattı merkezinden, hangi ekseninde ve ne kadar uzakta olduğunun tespit edilmesi gerekir.

$x - y$ ekseninde karşılıklı olarak yerleştirilmiş olan 4 adet antenden elde edilecek sinyalleri matematiksel olarak Eşitlik 2.15 ve Eşitlik 2.16'da gösterildiği gibi yazabiliriz.

$$\Delta U_x = U_{sağ} - U_{sol} \quad \text{ve} \quad \Delta U_y = U_{alt} - U_{üst} \quad (2.15)$$

şeklinde farkları,

$$\sum U_x = U_{sağ} + U_{sol} \quad \text{ve} \quad \sum U_y = U_{alt} + U_{üst} \quad (2.16)$$

şeklinde toplamaları ifade edebiliriz.

Elektron demeti hangi antene daha yakınsa o anten üzerinde daha büyük bir akım oluşturacaktır. Karşılıklı antenlerden elde edilen sinyallerin farklarının toplamalarına $\left(\frac{\Delta U}{\sum U}\right)$ oranı ise x ve y eksenlerinde elektron demetinin bulunduğu yeri verecektir. Bu durumda demet pozisyonunu

$$x = \frac{1}{S_x} \frac{\Delta U_x}{\sum U_x} + \delta x \quad (2.17)$$

ve

$$y = \frac{1}{S_y} \frac{\Delta U_y}{\sum U_y} + \delta y \quad (2.18)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Burada S_x ve S_y değerleri sabittir ve çözünürlüğü ifade eder. Genellikle demet hattının yarıçap değerinin ikiye bölünmesi ($b/2$) ile elde edilen değer olarak hesaba katılır.

Çözünürlük BPM'lerin mekanik üretim toleransları ve demet hattı üzerinde ne kadar hassas olarak yerleştirildikleri ile orantılı olarak artabilir ya da azalabilir. Bunun yanında demet pozisyonunu ölçmek için oluşturulan elektronik devrenin hassasiyeti de çözünürlüğü etkileyen başka bir etkidir.

Demet hattı içerisinde bulunan demetin pozisyonu da çözünürlüğü etkileyen diğer bir önemli faktördür. Yani demet, demet hattı içerisinde merkeze yakın noktalarda yüksek çözünürlükler ile bulunabilirken, merkezden uzaklaştıkça çözünürlük lineer olmayan bir şekilde değişecektir.

δx ve δy değerleri ise dengeleme (offset) değerleridir. Kullanılan elektronik devrenin tolerans farklılıklarından meydana gelen hatalar bu dengeleme değerleri kullanılarak eşitlenebilir.

3. HESAPLAMA VE ÖLÇÜM METOTLARI

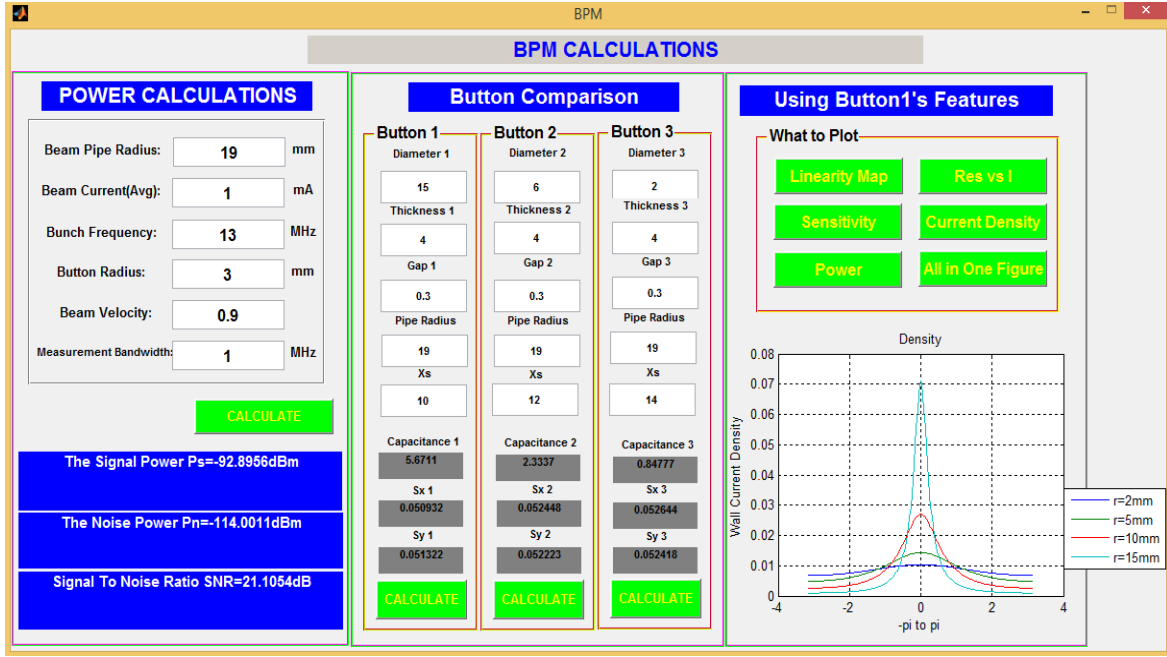
3.1. Demet Pozisyon Monitörünün Benzetim Çalışması

Elektronik devre ve sinyal işleme çalışmalarına başlamadan önce TARLA tesisi için kullanılacak olan BPM'e ait özelliklerin ne olması gerektiğinin ortaya konulması amacı ile çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile TARLA tesisinde kullanılacak olan BPM'lere ait BPM çapı, anten çapı, BPM uzunluğu gibi parametreler hesaplatılarak çözünürlük, doğrusallık vb özelliklerinin ne olması gerektiği belirlenmiştir. Bu aşamada MATLAB programı kullanılmıştır. MATLAB (Matrix Laboratory) çok paradigmatlı sayısal hesaplama yazılımı ve dördüncü nesil programlama dilidir [21].

Yazılımın geliştirilmesi esnasında ALBA tesisi için geliştirilen benzer bir program referans olarak alınmış ve TARLA tesisi için yeniden düzenlenmiştir. Bu yazılım demetin akımı, gücü, çözünürlüğü gibi parametrelerinin yanı sıra anten çapının ne olması gerektiği, demet hattının çapı gibi bir takım özelliklerinin belirlenmesi için kullanılmıştır (Şekil 3.1).

Yazılımın geliştirilme amacı, BPM üretimine başlamadan önce kullanılacak olan buton tipi BPM için tüm özelliklerin hesaplatılması ve mekanik üretimde karşılaşılabilecek sorunları minimize etmektir.

Yazılım ekran görüntüsünden de görülebileceği gibi program; sinyal-gürültü oranı, farklı buton geometrileri için kapasitif etki ve çözünürlük, doğrusallık grafiği, duvar akım yoğunluğu vb. parametreleri hesaplayabilmektedir. Yine ekran görüntüsünde duvar akım yoğunluğu hesaplamaları için farklı yarıçaplara sahip antenler için hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ekran görüntüsü üzerindeki grafik bölümünden de görülebileceği gibi anten yarıçapı arttıkça duvar akım yoğunluğu artmaktadır, bu durum demet sinyalinin daha kolay algılanması anlamı taşımakla birlikte, demet hattının çapı BPM çapını da belirlemektedir. Dolayısı ile kullanılabilecek anten büyüklükleri fiziksel olarak sınırlanmıştır. Bu durumda en uygun anten çapı seçiminde çözünürlük gibi daha farklı parametreler de göz önünde bulundurularak karar verilmelidir. Bu programa ait bir takım hesaplama sonuçları Çizelge 3.1'de açıklamalı olarak gösterilmiştir.

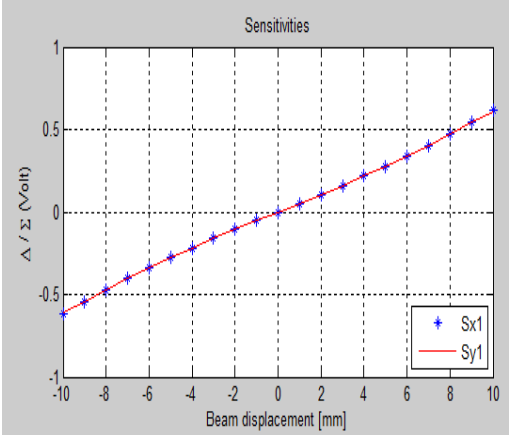
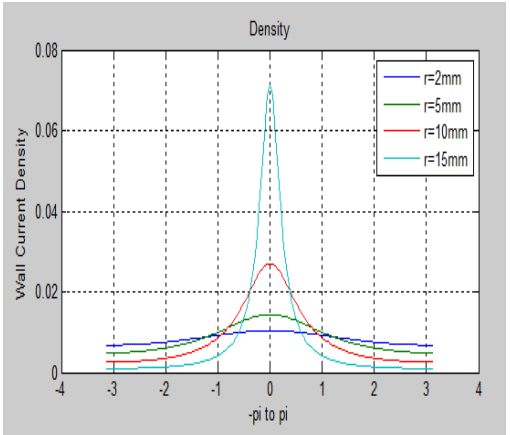


Resim 3. 1. Demet pozisyon monitörü hesaplama aracı [22, 23]

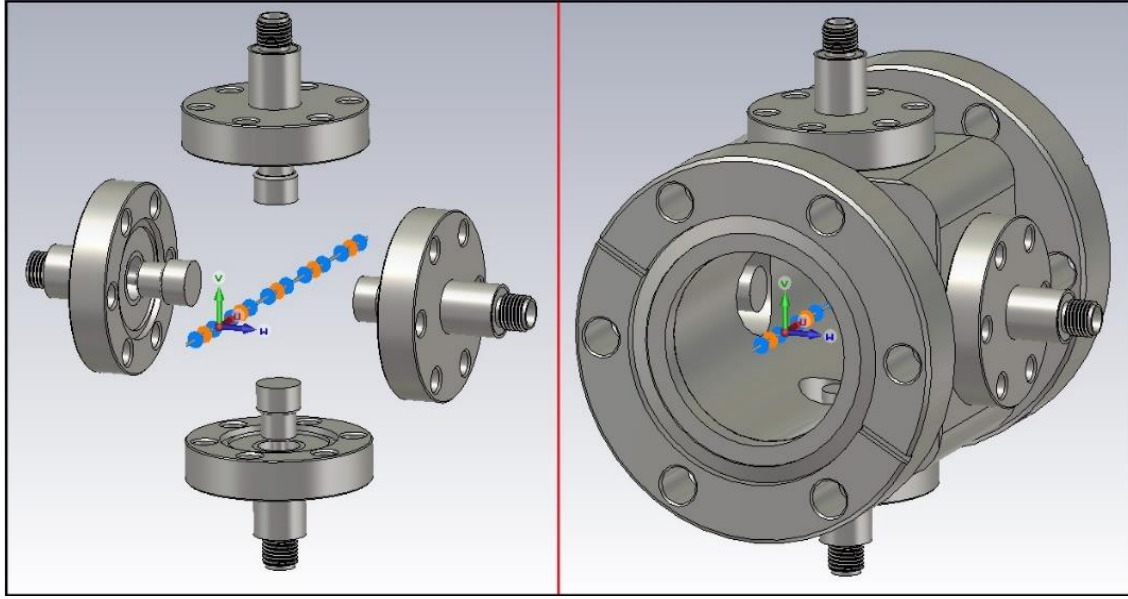
Çizelge 3. 1. BPM hesaplama aracından elde edilen ekran görüntüleri ve açıklamaları

Hesaplanan Nicelik	Ekran Görüntüsü	Açıklama
Doğrusallık Haritası (Linearity MAP)		Doğrusallık (çözünürlük) haritası üretilen/kullanılan BPM için en önemli özelliklerden biridir. Yandaki grafikten de rahatlıkla görülebileceği gibi demet hattı merkezinde ve merkeze yakın bölgelerde dağılım oldukça lineerdir. Merkezden uzaklaştıkça doğrusallık azalmaktadır. Bu durum ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Doğrusallığı artırmak için daha büyük antenler kullanılabilir.

Çizelge 3.1. (devam) BPM hesaplama aracından elde edilen ekran görüntüleri ve açıklamaları

Eksen boyunca tek bir noktada çözünürlük		Doğrusallık haritasının bir eksen boyunca aynı hat üzerinde birçok noktasında alınan ölçümlerine karşılık gelir. X ve Y eksenleri için çözünürlüğün aynı olması beklenir. Sx1 ve Sy1 sırası ile x eksenindeki ve y eksenindeki çözünürlüğü ifade eder ve milimetre başına kaç voltluk değişim olduğunu gösterir.
Duvar Akım Yoğunluğu		Farklı anten büyüklükleri için hesaplanan duvar akım yoğunluklarını gösterir. Grafikten de rahatlıkla görülebileceği gibi anten çapı büyüdükçe duvar akım yoğunluğu artmaktadır.

Yapılan çalışma sonucunda TARLA tesisi için kullanılabilecek BPM'in iç çapının 38 mm ve anten çapının 7 mm olması durumunda en uygun sonuçların alınabileceği görülmüştür. TARLA projesi kapsamında tamamlanan başka bir doktora tezi kapsamında (Müge Tural Gündoğan, Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü) bu özelliklere sahip buton tipi BPM'in tasarım, üretim ve test çalışmaları devam etmektedir. Üretilen BPM'e ait teknik çizim Şekil.3.2' de verilmiştir [24].

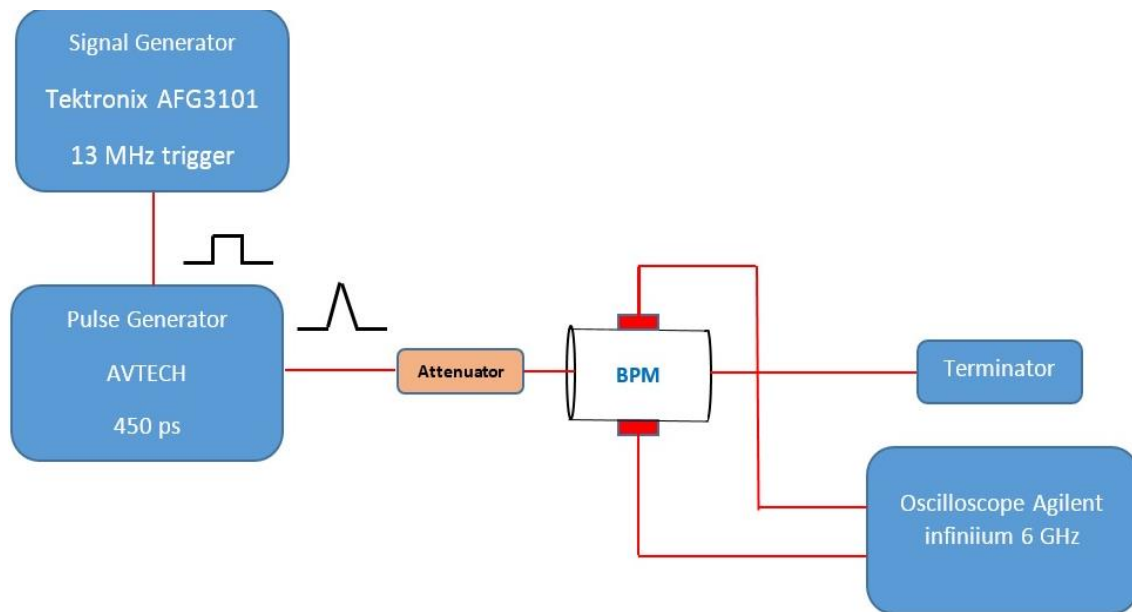


Resim 3. 2. TARLA tesisi buton tipi BPM teknik çizimi

Bu nedenle çalışma esnasında TARLA tesisi envanterinde bulunan, NTG firmasına üretimi yaptırılan ve iç çapı 28 mm olan BPM'ler kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir.

3.2. Demet Pozisyon Monitörü Test Düzeneği

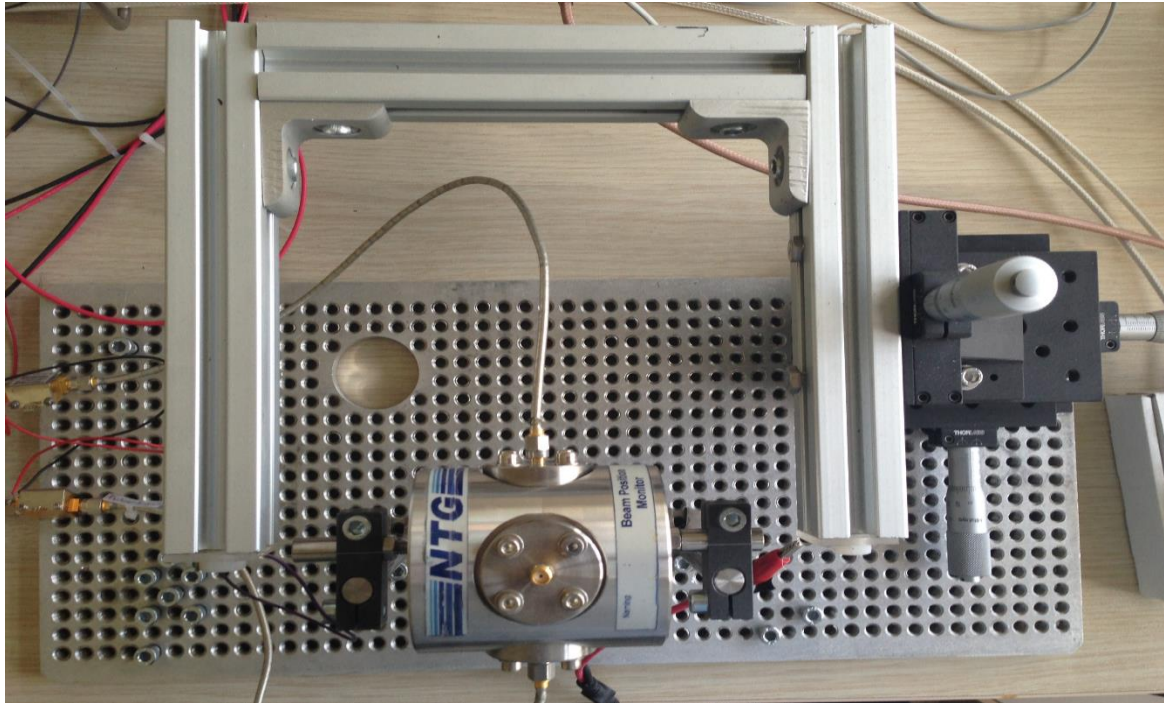
NTG firmasından temin edilen buton tipi BPM kullanılarak Şekil 3.1'deki gibi bir test düzeneği kurulmuştur.



Şekil 3. 1. BPM test düzeneği şematik gösterimi

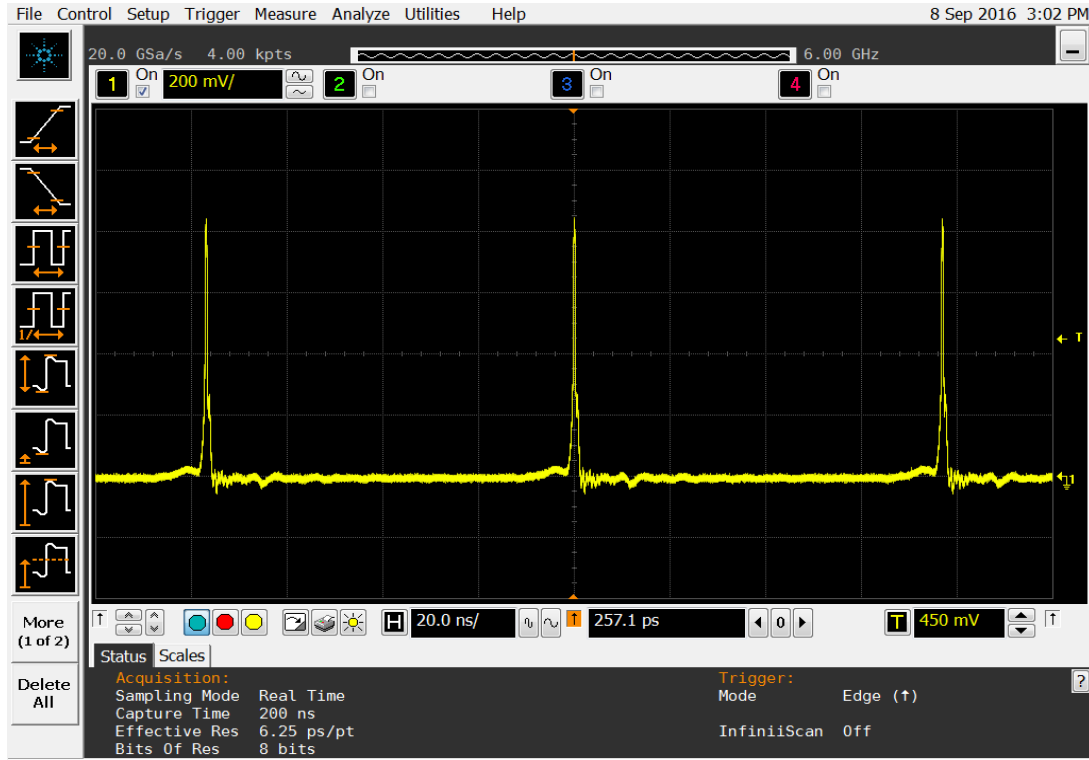
Şematik gösterimi verilen düzenekte bir sinyal üretici kullanılarak pulser 13 MHz sinyal ile tetiklenmiştir. Pulser çıkışında yine yaklaşık 70 V genliğinde, 13 MHz (77 ns) periyodunda, 450 ps bant genişliği olan gaussiyen bir sinyal elde edilmiştir. Bu sinyal elektron tabancasının çıkışında elde edilen sinyal ile aynı karakteristiklere sahiptir. Pulser ile üretilen sinyal BPM içerisinden geçirilen ince bir tele uygulanmıştır. Düzenek üzerinde farklı değerlerde dirençler kullanılarak tel üzerinden geçirilen akım değeri değiştirilmiş ve bu akım değerleri için çalışmalar yapılmıştır. TARLA elektron demet parametrelerinde (Bkz. Çizelge 1.1) demet akımı 1 mA olarak verildiği için bu değerde atmalı yapıda bir akım tel üzerinden geçirilmiştir.

Test düzeneği, Resim 3.3’de gösterildiği gibi hassas bir masaüstü hizalama aparatı ve 3 eksenli 10 μm hassasiyetli bir optik tutucu kullanılarak hazırlanmıştır. BPM içerisinden ince bir bakır tel geçirilerek elektron demeti temsil edilmiştir. Düzenek dış ortam gürültülerinden etkilenmemesi için 50 Ω empedans değerine sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Sistem kendi içerisinde birçok noktadan topraklanmıştır. Optik tutucu BPM içerisinden geçirilen bakır telin 10 μm hassasiyet ile $x - y$ ekseninde hareket ettirilmesi amacı ile kullanılmıştır.

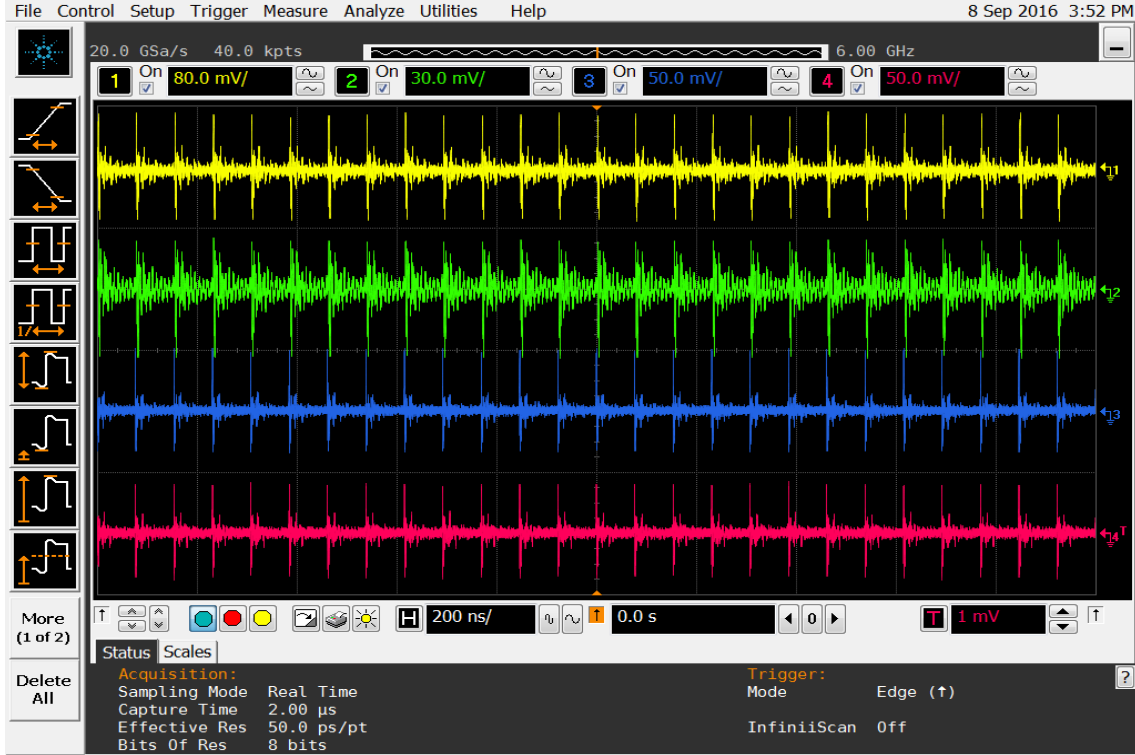


Resim 3. 3. BPM test düzeneği

BPM içerisinde geçirilen tele uygulanan sinyalin (pulse) Osiloskop görüntüsü Resim 3.4’de verilmiştir. Pulse üretici çıkışındaki sinyal genliği Osiloskop girişi için çok yüksek olduğundan girişte 40 dB’lik bir sinyal zayıflatıcı (attenuator) kullanılmıştır. Tel BPM’in içerisinde herhangi bir noktada iken karşılıklı antenlerden elde edilen sinyaller Resim 3.5’de gösterildiği gibi sinüzoidal bir yapıdadır. Ortam etkilerinden dolayı sinyaller üzerinde bir takım gürültüler vardır. Bu durum aynı zamanda geri yansıyan sinyallerden de kaynaklanabilir. Ancak BPM demet hattı üzerine yerleştirildiğinde bu dış ortam gürültüleri minimize edilebilir. Bununla birlikte kullanılan elektronik devrenin özelliği gereği ortamdaki gürültüler demet pozisyonunun belirlenmesinde olumsuz bir etki göstermemiştir.



Resim 3. 4. Pulse üretici çıkış sinyali



Resim 3. 5. BPM antenlerinden elde edilen sinyaller

BPM antenlerinden alınacak olan sinyalin, sinyal işleme kartlarına taşınması işleminde eşit uzunluklarda ve aynı özelliklerde RF kabloların kullanılması bir gerekliliktir. Resim 3.5’de verilen ekran görüntüsünde sarı ve yeşil ile gösterilen x eksenindeki iki sinyal ile mavi ve kırmızı ile gösterilen y eksenindeki sinyaller arasında küçük bir faz farkı gözlenmektedir. Bunun nedeni antenlerden alınan sinyallerin eşit uzunluktaki kablolar ile taşınmamış olmasıdır.

Elde edilen sinyaller TARLA tesisi envanterinde bulunan Agilent firmasına ait 6 GHz’lik Osiloskop yardımı ile rahatlıkla gözlenebilmektedir. Bu noktadan sonra karşılıklı antenlerden elde edilen sinyallerin değerleri ve Eş.2.17 ve Eş.2.18 kullanılarak BPM içerisindeki demet pozisyonu hesaplanabilir.

Ancak, kurulan tesiste yaklaşık 40 adet BPM kullanılacağı düşünüldüğünde her bir BPM için birer adet Osiloskop kullanılması ekonomik ve işletilebilir olmayacaktır. Aynı zamanda Osiloskop ekranlarından okunan değerlerin çok hızlı bir şekilde hesaplanıp eğer demet, demet hattına çarpıyorsa gerekli önlemlerin alınması oldukça uzun zaman alınacaktır. Bunun neticesi olarak elektron demetinin birkaç milisaniye içerisinde demet hattını tahrip etmesi

durumu ile karşılaşılabacaktır. Bu durum sistemin tamamen devre dışı kalmasına neden olacaktır.

Yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı TARLA tesisi için, BPM antenlerinden elde edilen sinyaller ve bu sinyallere ait karakteristikler göz önünde bulundurularak tez kapsamında bir elektronik kart tasarımı ve üretimi çalışmalarına başlanmıştır.

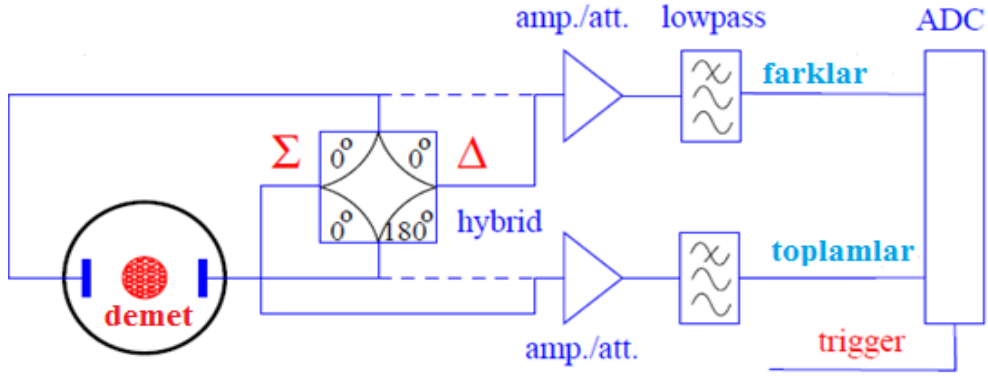
3.3. Demet Pozisyon Monitörü Elektronik

Üretilen elektronik kart BPM'in demet teşhisindeki önemi düşünülerek kararlı, hızlı, yüksek çözünürlüklü olmalıdır. Teknik gerekliliklerin yanı sıra BPM'ler en fazla kullanılan demet teşhis elemanları olduğu için maliyetin düşürülmesi hem ülke hem de proje bütçesine büyük katkılar sağlayacaktır. Bu işlem için öncelikle bilinen yöntemler araştırılmış ve bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Elde edilen bilgiler sentezlenerek TARLA tesisinin kendi dinamikleri içerisinde özgün bir elektronik kart ve sinyal işleme yöntemi kullanılmıştır.

Sinyal işleme için gerekli elektronik kart için temelde kullanılabilecek yöntemlerden bazıları aşağıdaki verilmiştir:

Geniş bant (Broadband) Sinyal İşleme

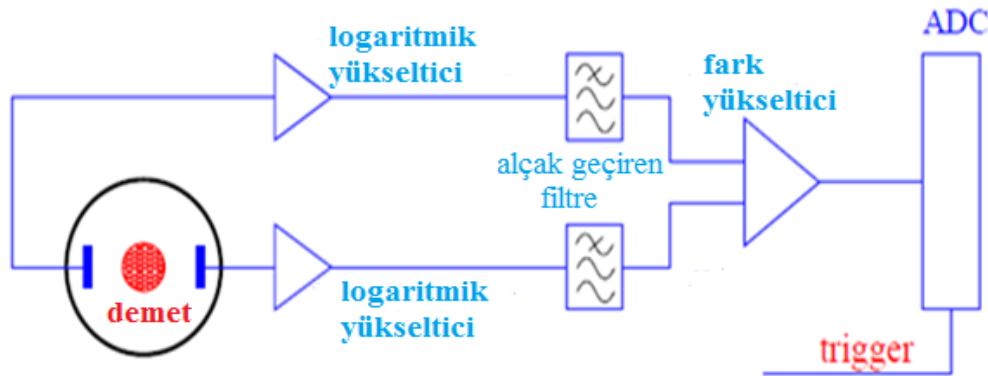
En çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Geniş frekans aralığında çalışabilen yükselteçler kullanılır. Böylelikle çalışma frekansını da kapsayacak şekilde geniş bir frekans aralığı için elektronik kart tasarlanabilir. Demet sinyal yapısı korunur ve demete ait tüm özellikler incelenebilir. Genellikle sinkrotron gibi daha düşük hızlandırma frekansına sahip yapılarda tercih edilir. Pozisyon çözünürlüğü düşüktür.



Şekil 3. 2. Geniş bant sinyal işleme [19]

Logaritmik Oransal Sinyal İşleme

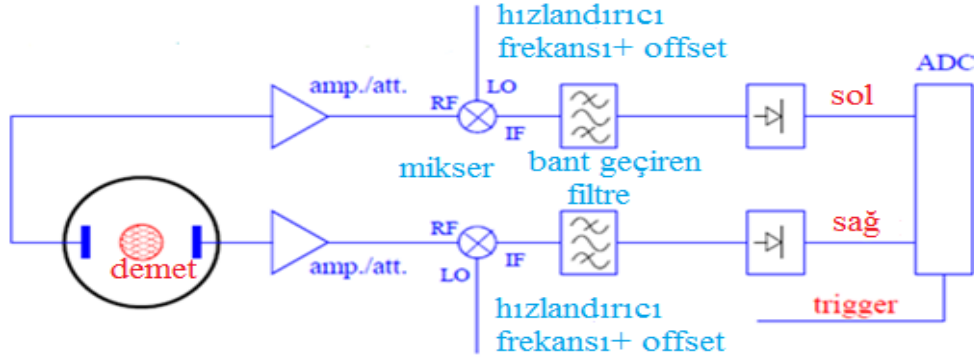
Çok yüksek dinamik aralıklara erişmek mümkündür. Logaritmik yükselteçler kullanılır. Böylelikle düşük sinyaller için daha yüksek kazançlar elde edilebilir. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak sinyalde meydana gelebilecek küçük değişiklikler nedeni ile çıkışta büyük hatalar yapılabilir.



Şekil 3. 3. Logaritmik sinyal işleme [19]

Analog Dar Bant (Narrowband) Sinyal İşleme

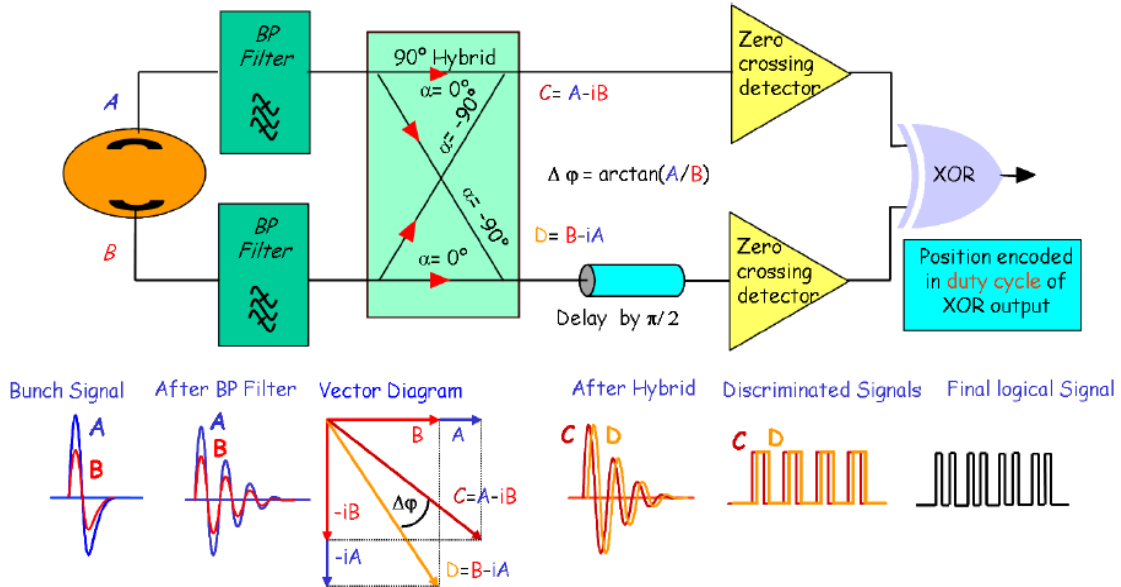
Çalışma frekansını da içine alan dar bir aralıktaki frekanslarda çalışabilen yükselteçler kullanılır. Genellikle uzun tekrarlama karakteristiğine sahip olan sinyaller için tercih edilir(>10ms). İstenilen çalışma frekansı dışındaki tüm etkilerin yok edilmesi için filtrelerin kullanılması gerekir. Çözünürlüğü çok yüksektir. Yüksek maliyetlidir.



Şekil 3. 4. Dar Bant analog sinyal işleme [19]

Genlik Faz Dönüşümü(AM/PM)

Sinyal genliklerini mantıksal sinyallere dönüştüren analog bir yöntemdir. Kablo uzunluklarının etkileri göz önüne alındığında BPM'lere yakın bir noktaya yerleştirilmelidir. Bu durum elektro manyetik etkileri artıracaktır. Karmaşık ve pahalı bir yöntemdir.



Şekil 3. 5. Genlik Faz dönüşümü [25]

Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.2. ile verilmiştir.

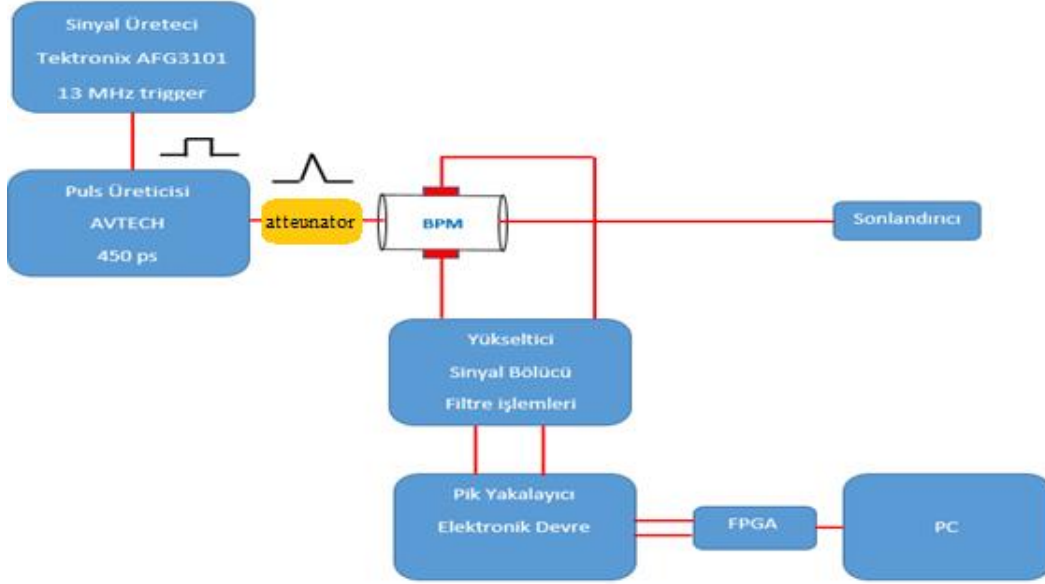
Çizelge 3. 2. Elektronik sinyal işleme yöntemlerinin karşılaştırılması [19]

Yöntem	Kullanım Yeri	Limitleri	Avantaj	Dezavantaj
Geniş Bant (Broadband)	Proton hızlandırıcıları	$f_{acc} < 300 \text{ MHz}$	Demet yapısı izlenebilir.	Çözünürlük kullanılan donanımların meydana getirdiği gürültülerden dolayı düşüktür.
Dar Bant (Narrowband)	Tüm hızlandırıcılarda kullanılabilir.	Kararlı demet yapıları $> 10 \mu s$	Yüksek çözünürlük ve küçük sinyalleri yakalayabilme	Kompleks ve pahalı elektronik
Oransal (Log Ratio)	Tüm hızlandırıcılarda kullanılabilir.	Demet paket boyu $\geq 1 \mu s$	Sağlam ve kolay elektronik, Çok yüksek dinamik oran, ucuz, kolay	Sınırlı çözünürlük ve termal etkilerden dolayı hassasiyetin kaybolması
Genlik-Faz (AM/PM)	Tüm hızlandırıcılarda kullanılabilir.	Limitlenmiş hızlandırıcı frekansları	Sadece iki antenden alınan bilgi yeterli olacaktır	Özel analog devreler gerektirir ve sabit hızlandırıcı frekanslarında çalışabilir.

3.3.1. TARLA Demet pozisyon monitörü elektronik tasarımı

Yapılan araştırmalar ve benzetim çalışmalarının ardından TARLA tesisi için yüksek çözünürlüklü, kararlı, ucuz ve tesisin kendi imkanları ile üretebileceği bir kart geliştirmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda geniş bant (broadband) sinyal işleme teknikleri ve pik yakalayıcı temelli bir çalışma yürütülmüştür. Yapılan çalışmada Çizelge 1.1' de verilen makro demet paket süresi $50 \mu s$ 'lik yapıdan sürekli moda kadar uzanmaktadır. Makro paketlerinin $50 \mu s$ 'lik olduğu durum göz önünde bulundurularak çalışmalar yürütülmüştür. Elektron demet pozisyonun, demetin demet hattına zarar vermeden belirlenmesi bir zorunluluktur. Zira demet pozisyonun bu süre içerisinde belirlenebilmesi üretimi gerçekleştirilen elektronik kartın diğer demet yapılarında da kullanılabilir olmasını sağlayacaktır.

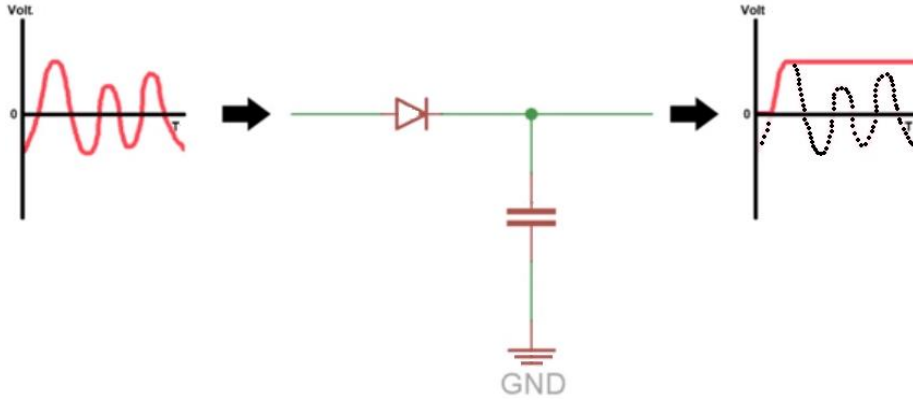
Yapılan çalışmada bir eksen üzerinde (x ya da y) karşılıklı antenlerden alınan sinyaller Şekil 3.6’de gösterildiği gibi yükseltici devreler kullanılarak yükseltilmiştir.



Şekil 3. 6. BPM sinyal ölçüm düzeneği ve sinyal işleme şematik gösterimi

Bu aşamada sinyal üzerinde filtreleme işlemleri gerçekleştirilerek sinyal ortam gürültülerinden olabildiğince arındırılmıştır. Daha sonra antenlerden gelen sinyallerin yakalanabilmesi için bir pik yakalayıcı devre tasarlanmıştır. Pik yakalayıcı en genel anlamda “ genlik ölçümlerinde, otomatik kazanç kontrolünde, veri oluşturma işlemlerinde kullanılan bir elektronik devredir” şeklinde tanımlanır [26].

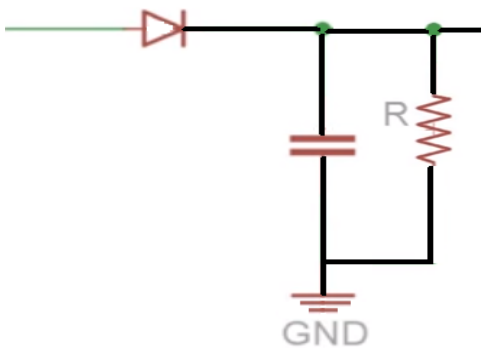
Pik yakalayıcı devre bir diyot ve kondansatörün birbirine seri olarak bağlanması ile elde edilen AC sinyalin yaklaşık genlik değerini DC sinyal olarak veren Şekil 3.7’de gösterildiği gibi basit bir devredir. Elde edilen bu DC sinyal artık çok basit multimetreler kullanılarak bile tespit edilebilir durumdadır ve demetin pozisyonunun matematiksel olarak hesaplanması mümkündür. Burada devreye uygulanan AC sinyalin sadece pozitif değerleri diyot tarafından iletilecektir. Bu esnada devreye bağlanan kondansatör AC sinyalin pik değerine kadar şarj olacaktır. Teorik olarak devrenin çıkışında ise en yüksek pik değerini gösteren DC bir sinyal gözlenecektir.



Şekil 3. 7. Pik yakalayıcı (Peak detector) devresi şematik gösterimi

Uygulamada ise diyotun iletim voltajı (V_f) karakteristiği yüzünden kullanılan diyotun V_f değerleri kadar bir kayıp ile karşılaşılacaktır. Dolayısı ile ölçülen sinyal diyotun V_f değeri kadar daha küçük olacaktır. İkinci bir problem ise zaman içerisinde kondansatör üzerindeki yük boşalacaktır. Bu nedenle bir sonraki demet sinyali pik yakalayıcı devreye ulaşmadan önce kondansatörün boşalması engellenmelidir. Bunun çözümü yine oldukça basittir. Devreye Şekil 3.8’de gösterildiği gibi bir direnç bağlanarak kondansatörün boşalma süresi belirlenebilir.

VanKeuren ve Watras, “istenilen bir pik değeri yakalandıktan sonra, aktif bir anahtarlama kullanılarak kondansatör üzerindeki yükün boşaltılabileceğini ve yeni sinyal değerinin okunması için hazır hale getirilebileceğini söylemektedirler” [27].



Şekil 3. 8. Direnç kullanılarak oluşturulan pik yakalayıcı devre

Bir kondansatörün tam olarak şarj ya da deşarj olması “ elektriksel potansiyel altında bulunan negatif yüklü elektronların, plakalar üzerinde farklı miktarlarda elektrik yükleri oluşturacak şekilde hareketleriyle oluşur. Elektronların bu hareketi aynı anda

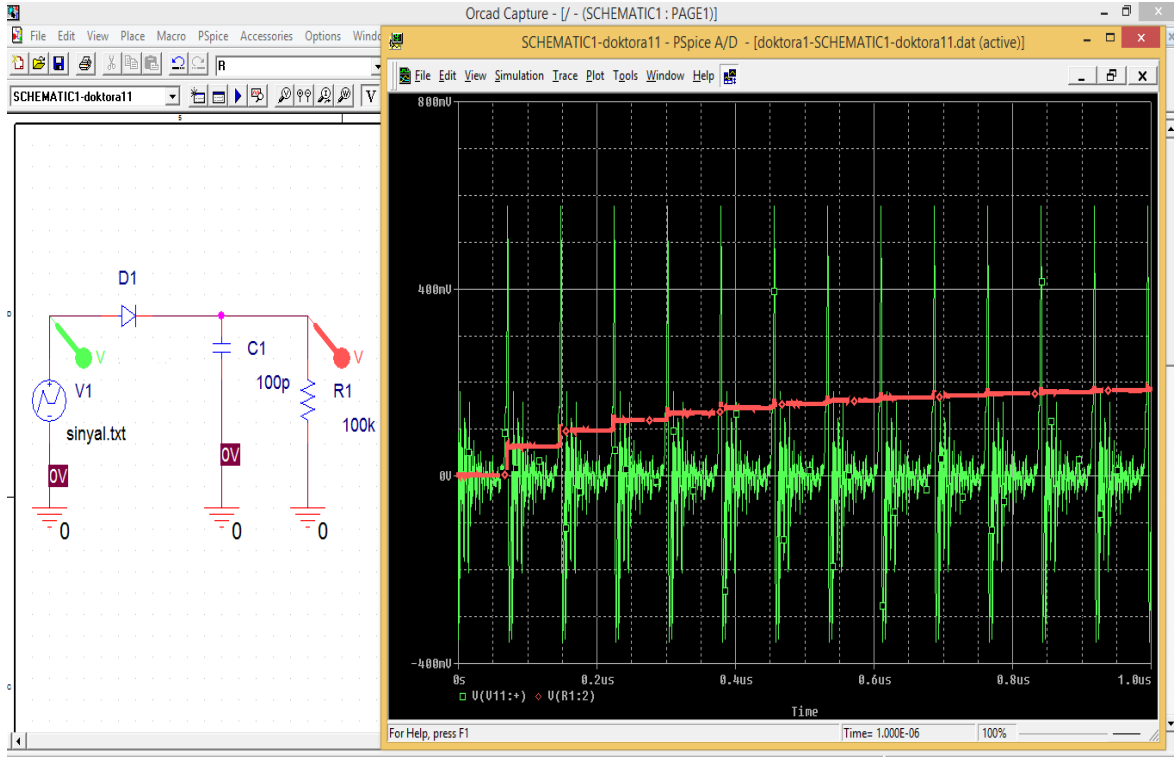
tamamlanamaz. Bu işlemlerin oluşabilmesi belirli bir sürenin geçmesi gerekmektedir” şeklinde tanımlanabilir [28].

Bir kondansatörün tam olarak boşalması için gerekli süre

$$T_{discharge} = 5 \times R \times C \quad (3.1)$$

ile hesaplanabilir. Burada R direnç ve birimi *Ohm* , C kondansatör kapasitesidir ve birimi *Farad*’dır.

Bu aşamada yaşanabilecek başka bir problem ise BPM antenlerinden alınan sinyalin bant genişliğinin çok düşük ($0,4 \text{ ps} \geq \text{sinyal bant genişliği} \leq 500 \text{ ps}$) olmasından dolayı kondansatörün bir pik süresince dolamayacak olmasıdır. Bu aşamada OrCAD elektronik devre tasarım programı kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır (Resim 3.6.). OrCAD bir elektronik devre tasarım ve benzetim programıdır [29]. Burada yeşil renk ile gösterilen sinyal, kurulan düzenden BPM antenlerinden elde edilen sinyaldir. Bu sinyal kullanılan osiloskop’un özellikleri kullanılarak bir veri dosyası haline çevrilmiş ve OrCAD - PsPICE sinyal kaynaklarına giriş sinyali olarak verilmiştir. Böylelikle benzetim çalışmalarında antenlerden elde edilen sinyalin aynısının kullanılması sağlanmıştır. Aynı zamanda devre geliştirilirken piyasada temini kolay analog devre eleman değerlerinin kullanılmasına özen gösterilmiştir.



Resim 3. 6. Pik yakalayıcı devre benzetim örneği

Resim 3.6'dan kırmızı renk ile gösterildiği gibi sinyal bant genişliğinin çok düşük olması nedeni ile kondansatör tam olarak şarj olamamaktadır. Bu duruma yol açan başka bir etki ise diyotların iletim voltajlarıdır. Devre tasarlanırken hızlı ve iletim voltaj değerleri düşük olan schottky diyotlar kullanılarak diyot kaynaklı kayıplar minimize edilmeye çalışılmıştır.

Bilinmesi gereken başka bir önemli nokta ise antenlerden elde edilecek en küçük sinyal değerinin, diyotların V_f değerlerinden daha yüksek olması gerekliliğidir. Bu değer TARLA tesisi için üretilen elektronik kartta kullanılan diyotlar için yaklaşık 0.25 V'dur. Bu nedenle pik yakalayıcı devre öncesinde gerekli yükseltme işlemleri yapılmalıdır. Aksi halde demet pozisyonu ölçümü özellikle demet, demet pozisyon monitörünün merkezine yakın noktalarda iken sağlıklı olarak yapılamayacaktır. Bu nedenle antenlerden elde edilen sinyaller ön yükselticiler (pre-amp) kullanılarak diyot iletim voltajlarının üzerine çıkarılmıştır.

Burada ilk problemimiz elde edilen DC sinyalin, antenlerden elde edilen sinyal genlik değerlerinden çok daha küçük olmasıdır. Yani pik değerleri yakalanamamaktadır. Kurulan devrenin anten sinyallerinin pik değerlerine kadar tepki verememesinin nedeni yukarıda bahsedilen diyotların V_f karakteristikleridir.

Bu problemin çözümü olarak Resim 3.7’de gösterildiği gibi bir voltaj izleyici devre geliştirilmiş ve pik yakalayıcı devrenin çıkışı bu voltaj izleyici devrenin girişi olarak düzenlenmiştir. Ancak bu durumda da çalışma ortamının sıcaklığı, diyotların iletim voltaj değerlerini değiştirebileceğinden bir takım sorunlar ile karşılaşılabilir. Resim 3.7 ile verilen devrenin matematiksel olarak ifadesi

$$V_{çıkış} = (V_{giriş} - V_f) * (1 + \frac{R_f}{R_L}) \quad (3.2)$$

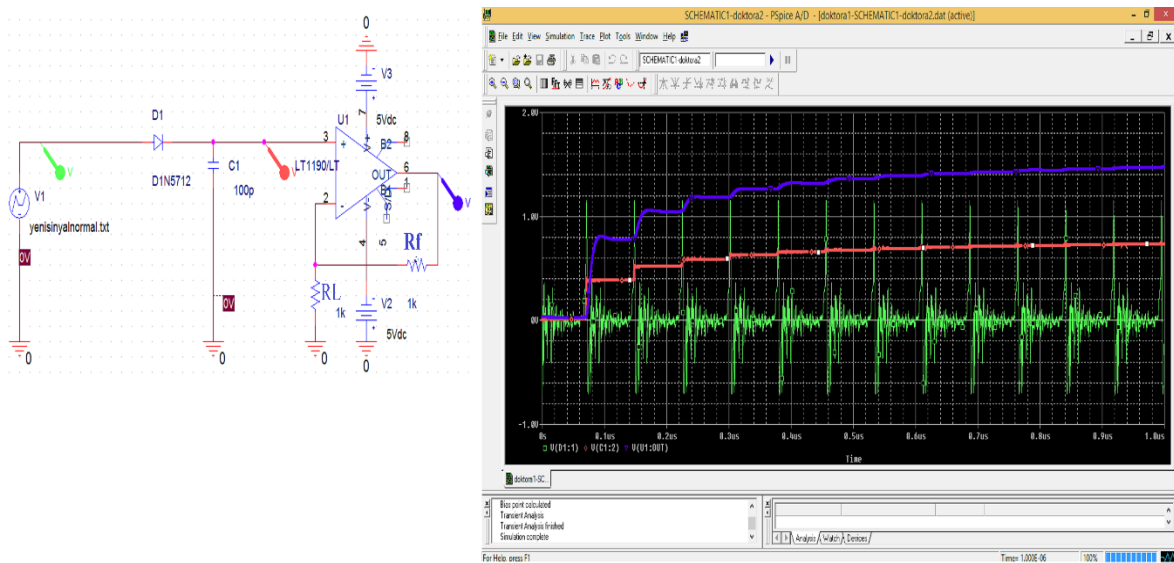
olarak yazılabilir.

Bu devrenin kazancı ise;

$$Av = 1 + \frac{R_f}{R_L} \quad (3.3)$$

ile verilir.

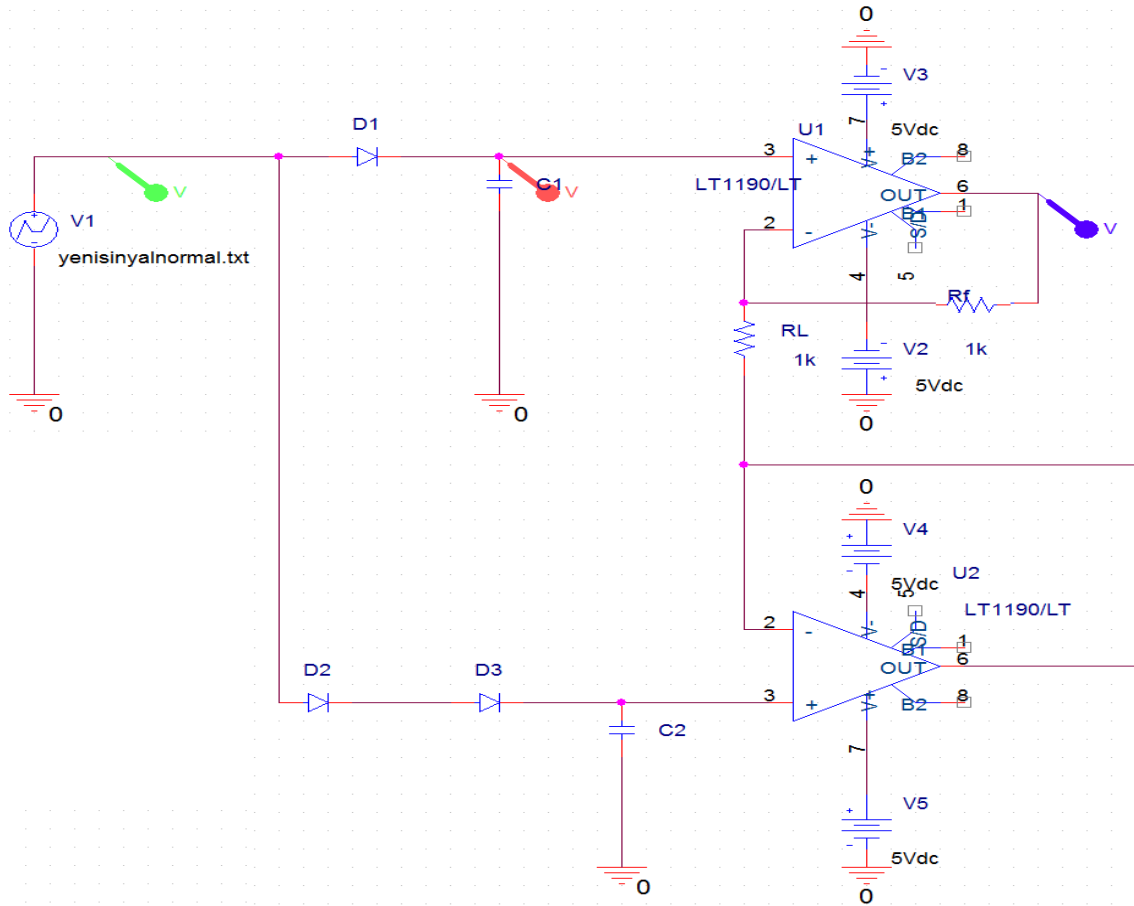
Bu durumda da Resim 3.7’den görülebileceği gibi voltaj izleyici devrenin çıkışında mavi renk ile gösterilen sinyal değeri anten sinyal genlik değerlerinin de üzerine çıkmıştır. Bu sinyal değeri, kırmızı renk ile gösterilen voltaj izleyici devre öncesindeki durumun tam iki katına eşittir. Bunun nedeni kullanılan yükseltici (op-amp) devresinin kazancıdır. Bu devrede kullanılan R_f ve R_L değerlerinden ($1\text{ k}\Omega$) dolayı devrenin kazancı 2’dir.



Resim 3. 7. Pik yakalayıcı devre ve voltaj izleyici devre benzetimi

Amacımız antenlerden elde edilen sinyal genliklerinin pik değerlerinde bir DC sinyal elde etmek. Bu durum demet pozisyonun belirlenmesinde hatalara yol açabileceğinden devre üzerinde Resim 3.8’de gösterildiği gibi bir değişiklik yapılarak devre kendi kendini kompanze edebilecek şekilde düzenlenmiştir.

Pik değerleri birkaç yüz mV’den daha büyük olan sinyaller için diyotların lineer olmayan iletim voltajlarının kompanzasyonu bu durumu düzeltebilir [30]. 2 adet pik yakalayıcı devre kullanarak, devrelerden birisinin tek diyotlu diğerinin çift diyotlu kullanımı diyotların lineer olmayan iletim voltajlarını kompanze eder (Resim 3.8).



Resim 3. 8. Kendi kendini kompanze eden pik yakalayıcı ve voltaj izleyici devre [30]

Devrede yapılan değişiklikte anten sinyalleri iki kola ayrılmıştır. Buradaki yaklaşım yükseltici devrenin kazancı belirlenirken, hesaplamaların referans olarak toprak değil, giriş sinyalinin belirli bir değerine göre yapılması esasına dayanmaktadır. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilebilir.

$$V_{\text{çıkış}} = V_1 * A_v - V_2 \quad (3.4)$$

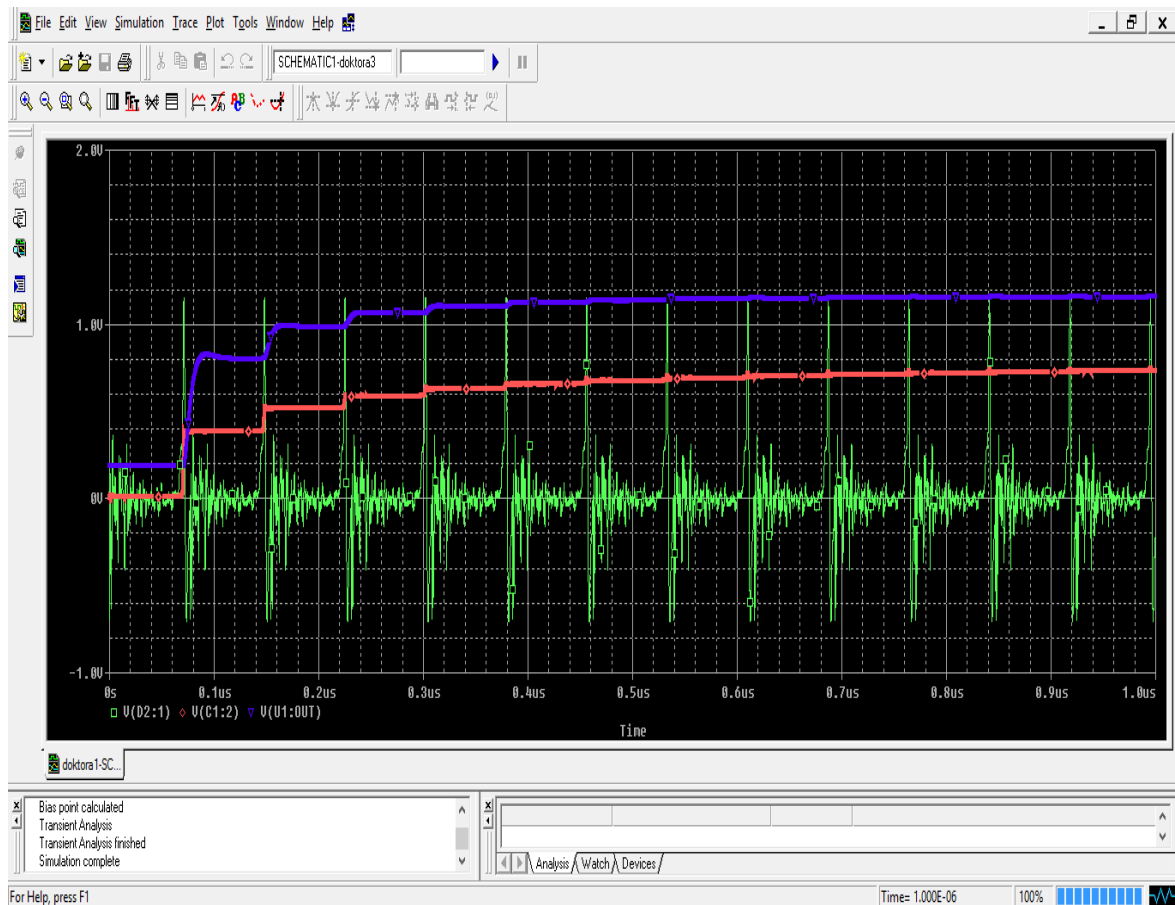
$$V_1 = V_i - V_f \quad (3.5)$$

$$V_2 = V_i - 2V_f \quad (3.6)$$

Devrenin kazancı 2 olduğu için, Eş.3.5 ve Eş.3.6, Eş.3.4'de yerine yazılır ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa

$$V_{\text{çıkış}} = V_{\text{giriş}} \quad (3.7)$$

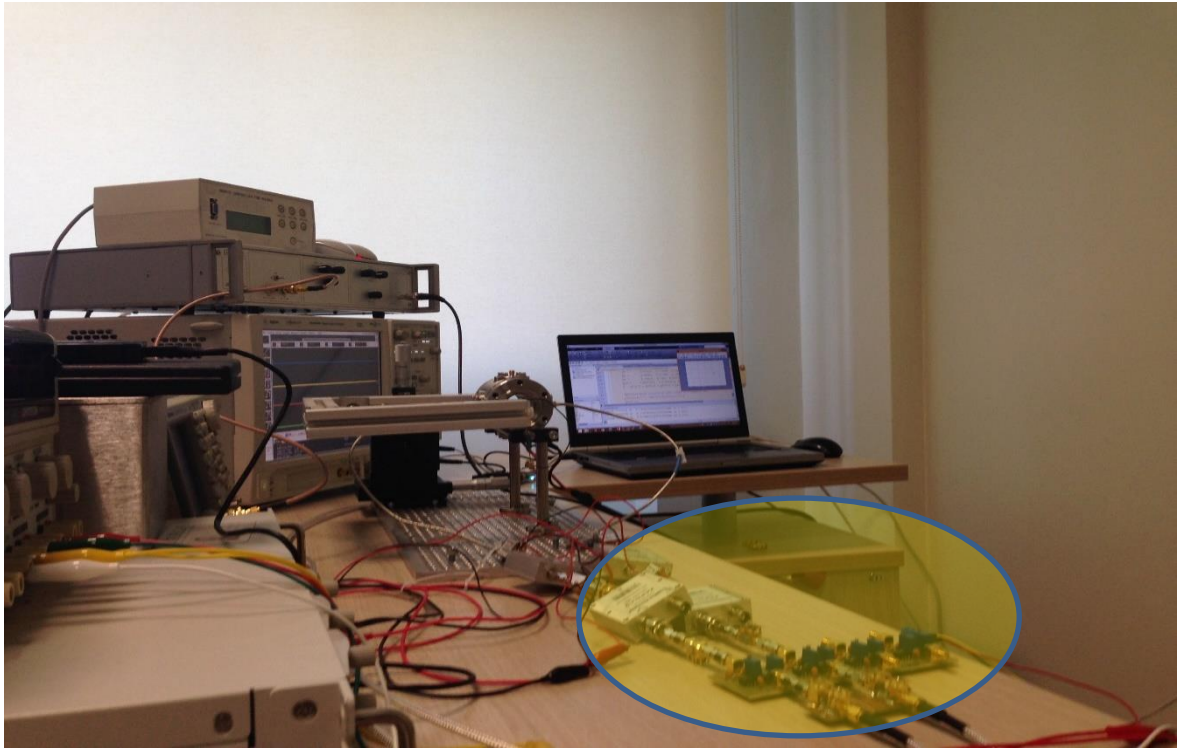
olur. Bu eşitlik giriş sinyalinin genlik değerinin çıkış sinyalinde yakalandığını ifade etmektedir. Bu durum başka bir ifade ile antenlerden elde edilen sinyal genlik pik değerlerinin devrenin çıkışında DC sinyal olarak yakalandığını söylemektedir (Resim.3.9).



Resim 3. 9. Antenlerden elde edilen sinyallerin pik değerlerinin yakalanması

Resim 3.9'dan görülebileceği gibi yaklaşık 0.3 μ s sonunda anten sinyallerinin tepe noktalarını işaret eden bir DC sinyal elde edilmektedir. Bu durum kabul edilebilir bir aralıktadır ve demet, demet hattı merkezinden uzaklaşırsa bu zaman diliminde tespit edilebileceğini ve gerekli düzeltme işlemlerine başlanabileceğini ifade eder. Ayrıca daha küçük demet yükleri için devrede kullanılan kondansatör değerleri değiştirilerek devre istenilen şekilde düzenlenebilir.

Yapılan benzetim çalışmaları sonunda istenilen değerler elde edildikten sonra elektronik kart üretim aşamalarına geçilmiştir. Bu aşamada benzetim çalışmalarında elde edilen sinyallerin gerçek devre üzerinde de sağlanması için çalışmalar titizlikle yürütülmüştür. Yapılan çalışmalar sonrasında Resim 3.10'da gösterilen elektronik kart TARLA tesisi Elektronik Laboratuvarlarında üretilmiştir.



Resim 3. 10. BPM elektronik kartının test düzeneğine bağlanması

Üretilen elektronik kart test düzeneğine bağlanarak gerekli ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarının benzetim çalışmaları ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Yani sinyallerin pik değerleri hızlı bir şekilde yakalanmaktadır. Tek bir anten için alınan ölçüm Resim 3.11'de verilmiştir. Burada yeşil renk ile gösterilen sinyal

elektronik kartın çıkışından elde edilen sinyaldir. Başka bir ifade ile anten çıkışlarının pik değerleri yakalanmıştır.

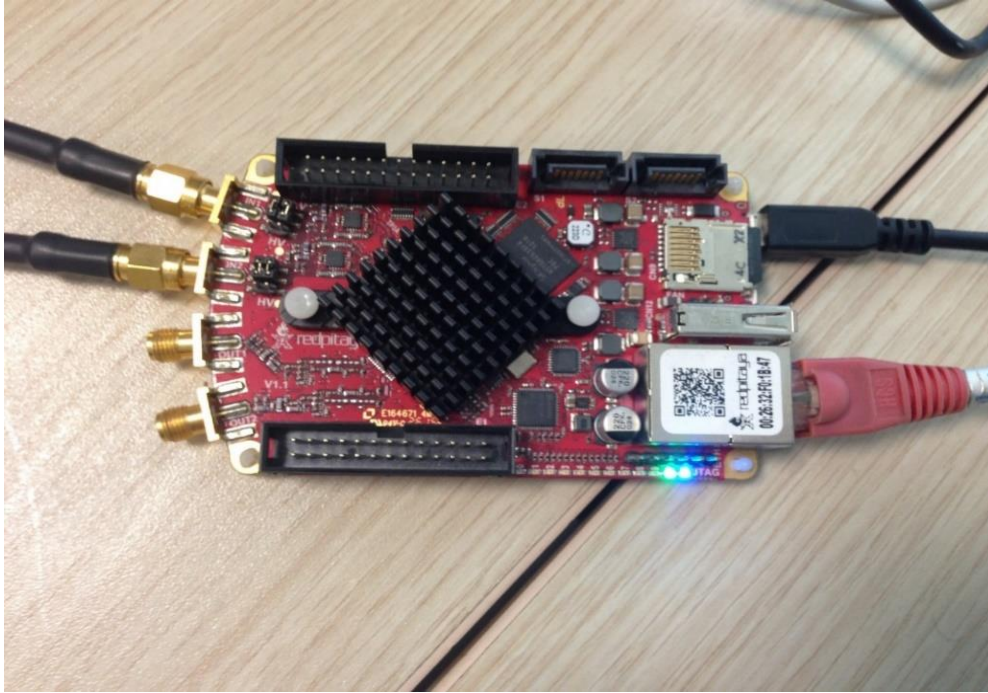


Resim 3.11. Antenlerden alınan sinyal ve elektronik kart çıkışında pik değerinin yakalanmasını gösteren Osiloskop ekran görüntüsü

3.3.2. Sayısal sinyal işleme yöntemleri

Elektronik kart üretim aşamalarının başarı ile gerçekleştirilmesinden sonra elde edilen sinyallerin hızlı ve güvenilir bir şekilde işlenebilmesi için gerekli çalışmalara başlanmıştır. Bu aşamada farklı marka ve modellere ait birçok FPGA kart ve FPGA tabanlı mikro denetleyiciler test edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonrasında Resim 3.12’de görüntüsü ve Çizelge 3.2’de özellikleri verilen Redpitaya isimli ARM tabanlı işlemci + FPGA’den meydana gelen kartın kullanılmasına karar verilmiştir. Yine TARLA tesisinin imkanları ile bu kart temin edilmiştir. Redpitaya MATLAB, LABVIEW ve PHYTON gibi yüksek seviyeli programlama dilleri ile kontrol edilebilir bir yapıya sahiptir. Bu özellik redpitaya’nın seçilmesinde belirleyici olmuştur.



Resim 3. 12. Redpitaya mikroişlemci ve FPGA

Çizelge 3. 3. Redpitaya özellikleri [31]

İşlemci	Dual Core ARM Cortex A9 + FPGA
FPGA	Xilinx Zynq 7010 SoC
RAM	DDR3 RAM 512 MB (4GB)
Sistem Hafızası	32 GB'a kadar microSD
Network Bağlantısı	1000Base-T Ethernet bağlantısı
USB	USB 2.0
Konsol Bağlantısı	Micro USB
Senkronizasyon Portu	Daisy chain connector (500 Mbps'a kadar)
Güç Konnektörü	Micro USB
Enerji limitleri	5V, 2A maksimum
RF giriş kanal sayısı (hızlı analog)	2, 125 MS/s, 14 Bit
RF çıkış kanal sayısı (hızlı analog)	2, 125 MS/s, 14 Bit
Yavaş Analog Giriş	4, 100 kS/s, 12 Bit
Bandwidth	50 MHz (DC coupled, 3 dB)
Örnekleme Hızı	125 MS/s
ADC çözünürlüğü	14 bit (LTC ADC)
Giriş empedansı	1 MOhm/10 pF
Ön tanımlı tam voltaj aralığı	+/-20 V
Maksimum mutlak giriş Voltajı	30 V
Aşırı Yük Koruması	Diyot korumalı

Redpitaya'nın girişinde, pik yakalayıcı ve voltaj izleyici devre sonrası DC'ye çevrilen sinyal, kartı en efektif hali ile kullanabilmek için ± 1 V'a sınırlandırılmıştır. Bu işlem devrenin çıkışına bağlanan basit bir gerilim bölücü ile gerçekleştirilmiştir. Böylelikle 14 bit ile taranacak olan bu bölgede daha hassas ölçümler yapılabilecektir.

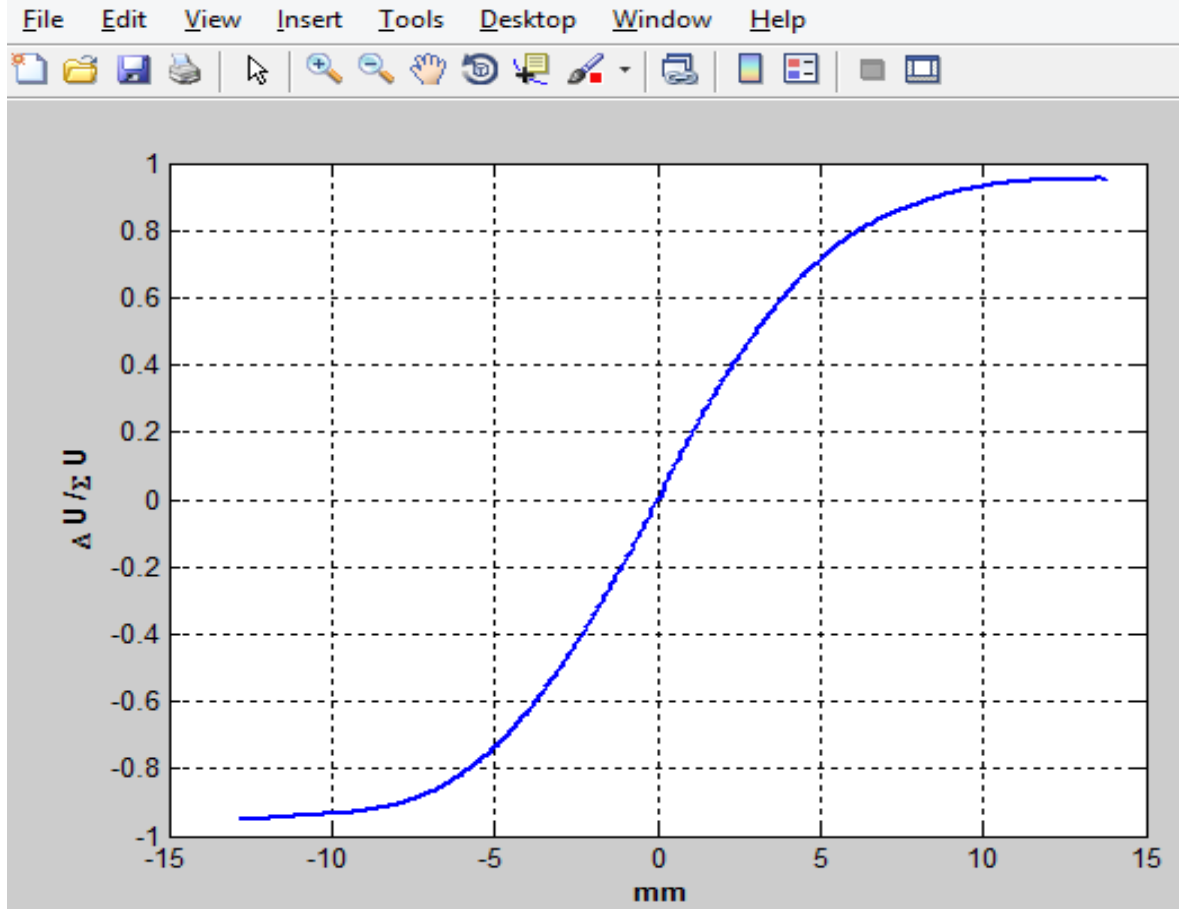
Redpitaya, ethernet ara yüzü sayesinde aynı ağ üzerinde bulunan herhangi bir PC ile haberleşebilmektedir. Kullanılan kartın iki adet hızlı RF girişi olduğu için çalışmalar bir eksende yürütülmüştür. DC sinyal bu RF girişlerden karta alınmış ve MATLAB programı kullanılarak sinyal işleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mikro denetleyici kart saniyede 125 milyon adet örnek alabilmektedir. Yazılan MATLAB programında öncelikle kart tarafından örneklenen sinyal, kart ile MATLAB arasında kurulan bir TCP/IP bağlantısı ile bilgisayara aktarılmıştır. Sinyal işleme aşamasına geçilmeden önce karttan alınan sinyaller bir tampon bellek (16384*32 bit) üzerinde tutulmuştur.

BPM test düzeneği içerisinde geçiren telin pozisyonu $10\ \mu\text{m}$ aralıklar ile değiştirilerek, her bir yer değiştirmeye karşılık okunan voltaj değerleri 2×280 'lik bir dizi (vektör) içerisine alınmıştır. Okuma işlemi karşılıklı antenlerden alınan sinyallerin farklarının toplamalarına olan oranı olarak ifade edilmiştir (Bkz. Eş.2.17). Bu dizinin birinci satırı konum bilgisini, ikinci satırı ise o konuma karşılık voltaj değerinde meydana gelen değişikliği göstermektedir. Elde edilen değerler aslında BPM'in çözünürlüğünü veren değerlerdir ve NTG firmasından temin edilen bu BPM'in çözünürlüğü Resim 3.13'de verilmiştir.

Grafiğe bakıldığında $-5\ \text{mm}$ ile $+5\ \text{mm}$ arasında olan bölgede lineer bir değişim gözlenmektedir. Bu bölgenin dışında kalan alanlarda ise lineerlik bozulmaktadır. Elde edilen grafikten bu lineer bölge için çözünürlük aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$S_x = 0.75V - (-0.75V) / 5\text{mm} - (-5\text{mm}) = 1.5V / 10\text{mm} = 150\text{mV/mm} \quad (3.8)$$

Eş.3.8 ile verilen bu sonuç lineer bölgede milimetre başına $150\ \text{mV}$ 'luk değişimleri algılayabildiğimiz anlamına gelmektedir. Bu bölgenin dışında demet pozisyonu belirlenirken lineerlik bozulduğu için kararlı ölçümler almak mümkün değildir. Aynı zamanda, diagnostik işlemi yapmaktaki amacın elektron demetini, demet hattı merkezinde tutmak olduğu hatırlanmalıdır.



Resim 3. 13. Kurulan BPM düzeneği, üretilen elektronik kart ve okuma işlemi sonucu elde edilen çözünürlük grafiği (150 mv/mm)

Tez çalışması kapsamında, elektron demetinin sadece lineer bölgede değil, bu lineer bölge dışında da yerinin hassas bir şekilde bulunması adına sayısal sinyal işleme yöntemleri kullanılmış ve sistemin hassasiyeti ve kararlılığı artırılmıştır. Bu işlem için eğri uydurma (curve fitting) denilen bir yöntem kullanılmıştır.

Chapra ve Canale, “veriler genellikle sürekli bir durumu göstermek için ayrık değerler şeklinde verilir. Bununla birlikte iki değer arasındaki bir noktanın değeri tahmin edilmek istenebilir. İlave olarak karmaşık bir fonksiyonu basitleştirmek için bu yöntem kullanılabileceğini belirtmektedirler” [32].

MATLAB programının eğri uydurma aracı kullanılarak, Resim 3.13 ile verilen grafiği meydana getiren veriler alınmıştır. Bu veriler kullanılarak grafiği ifade eden, Eş.3.9’ da gösterildiği gibi 8. dereceden bir polinom elde edilmiştir. Resim 3.13 ile verilen grafiğin daha küçük dereceli polinomlar ile fit edilmesi mümkündür. Ancak yüksek dereceli polinomlar kullanılarak hassasiyetin artırılması amaçlanmıştır. Resim 3.14’de ise bir eksen

boyunca elektron demetini temsil eden telin hareket ettirilmesi ile elde edilen grafik siyah renk, bu grafiği elde etmek için kullanılan polinomdan elde edilen grafik ise mavi renk ile gösterilmektedir. Grafikten verilen uyum içerisinde olduğu ve üst üste bindiği gözlenebilir.

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7 + a_8x^8 \quad (3.9)$$

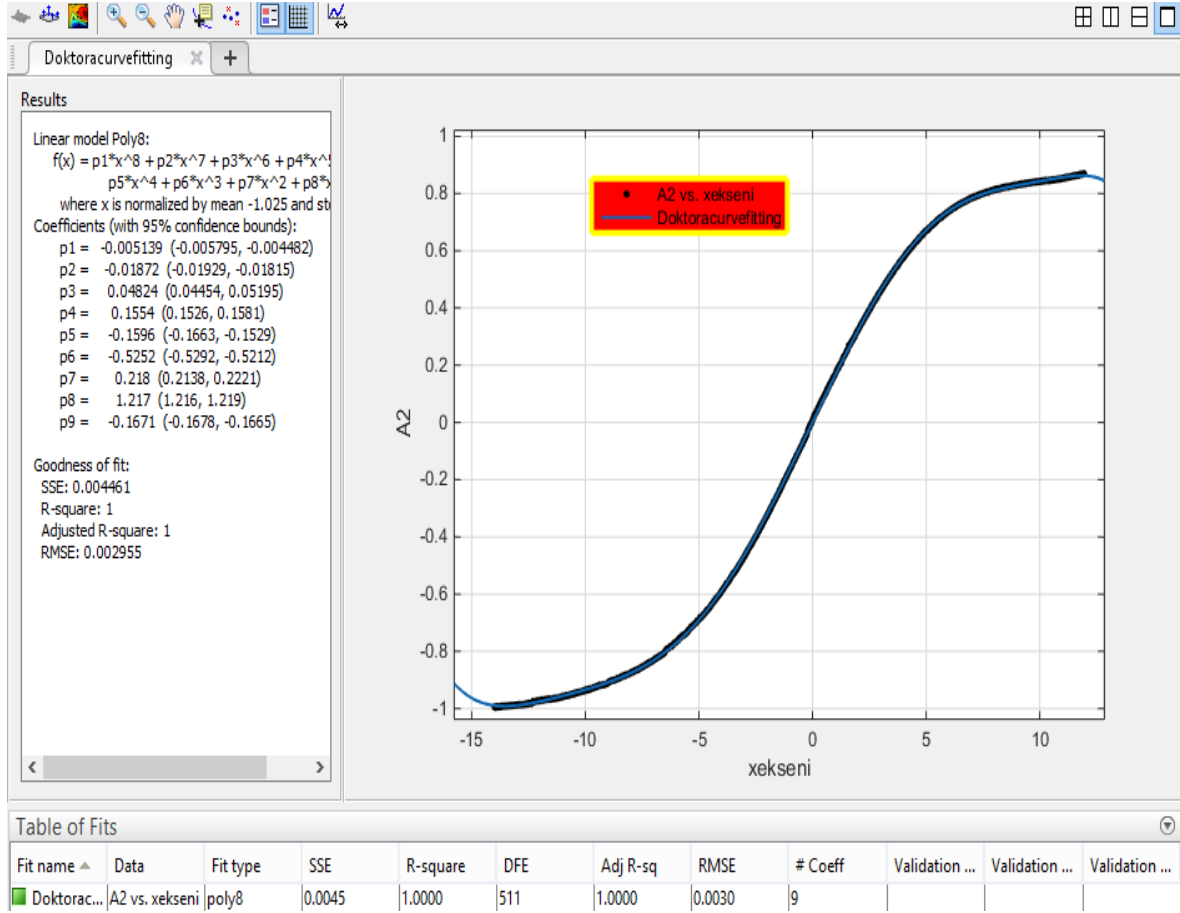
burada polinom katsayıları Çizelge 3.4’de verildiği gibidir.

Çizelge 3. 4. Eğri uydurma işlemi ile elde edilen polinoma ait katsayılar grafiği

$a_0 = -0.1671$
$a_1 = 1.217$
$a_2 = 0.218$
$a_3 = -0.5252$
$a_4 = -0.1596$
$a_5 = 0.1554$
$a_6 = 0.04824$
$a_7 = -0.01872$
$a_8 = -0.005139$

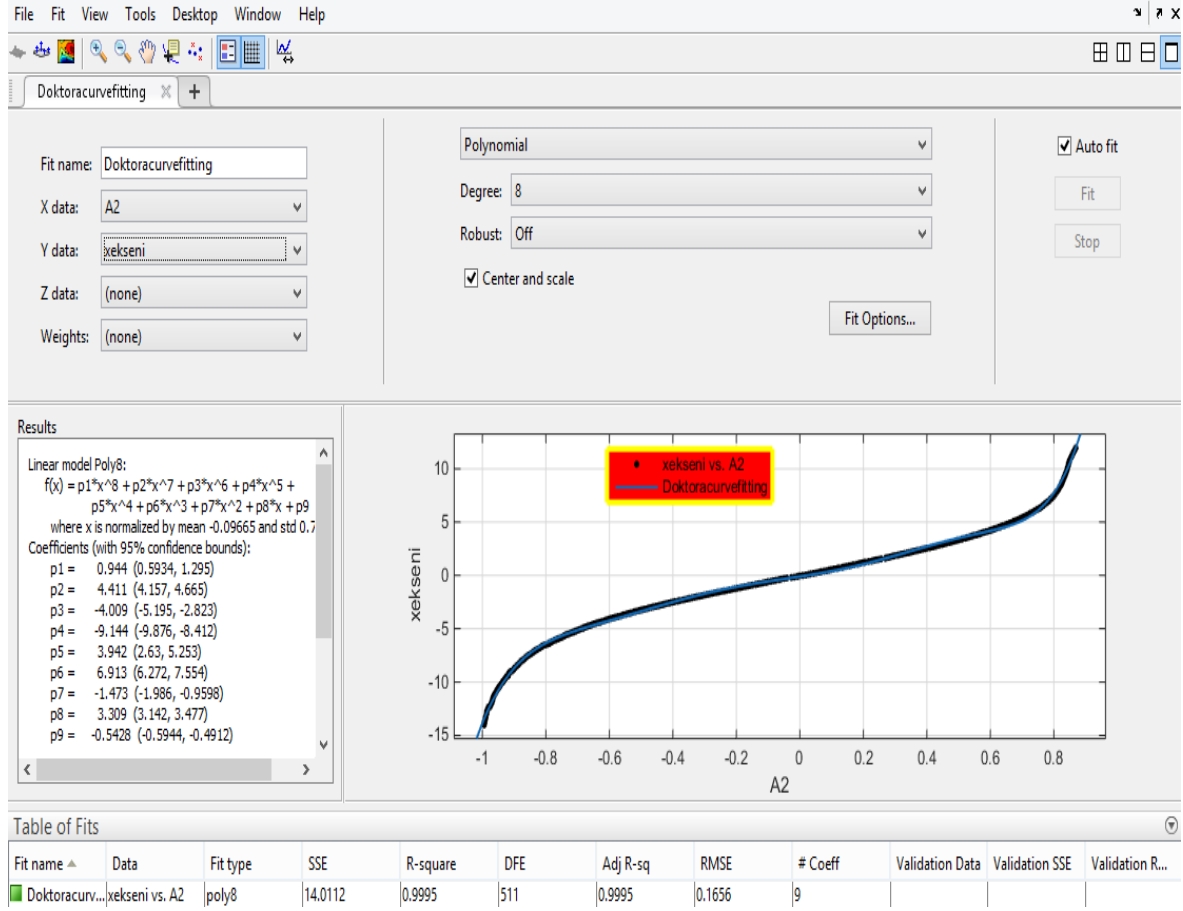
Demet pozisyonunu belirlemek için yazılan MATLAB programında öncelikle elde edilen polinomun kökleri bulunarak bir çalışma yapılmış fakat bu işlemin programı yavaşlattığı ve program adımlarını uzattığı görülmüştür.

Karşılıklı antenlerden alınan sinyaller geliştirilen elektronik kart ile sinyallerin tepe noktasını işaret edecek şekilde DC’ye çevrilmiştir. Daha sonra bu sinyaller kullanılan FPGA tabanlı mikro denetleyiciye kadar alınmıştır (Bkz. Resim 3.12). Yazılan MATLAB programında bu karşılıklı antenlerden alınan sinyaller, Eş.2.17 ve Eş.2.18’de gösterildiği gibi farkların toplamlara oranı olarak işlenmiş ve bir voltaj değeri elde edilmiştir.



Resim 3. 14. Eğri uydurma işlemi sonucu elde edilen grafik

Bu voltaj değeri aslında demetin BPM içerisindeki yerini göstermektedir. Dolayısı ile polinomun köklerini bulmak için yapılacak karmaşık işlemler yerine, Resim 3.15’de gösterildiği gibi, konum ve voltaj eksenleri yer değiştirilerek bilinen voltaj değerlerine karşılık gelen konumun (x ya da y) hesaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 3. 15. Eksenlerin yer değiştirilmesi ile elde edilen grafik ve polinom katsayıları

Bu durumda bilinen voltaj değerleri polinomun x değerleri olarak kabul edilmiş ve bu değere karşılık gelen y değerleri (konum bilgisi) yani polinom değerleri hesaplatılmıştır. Bu hesaplamayı gösteren kod parçacığı Resim 3.16 de verilmiştir.

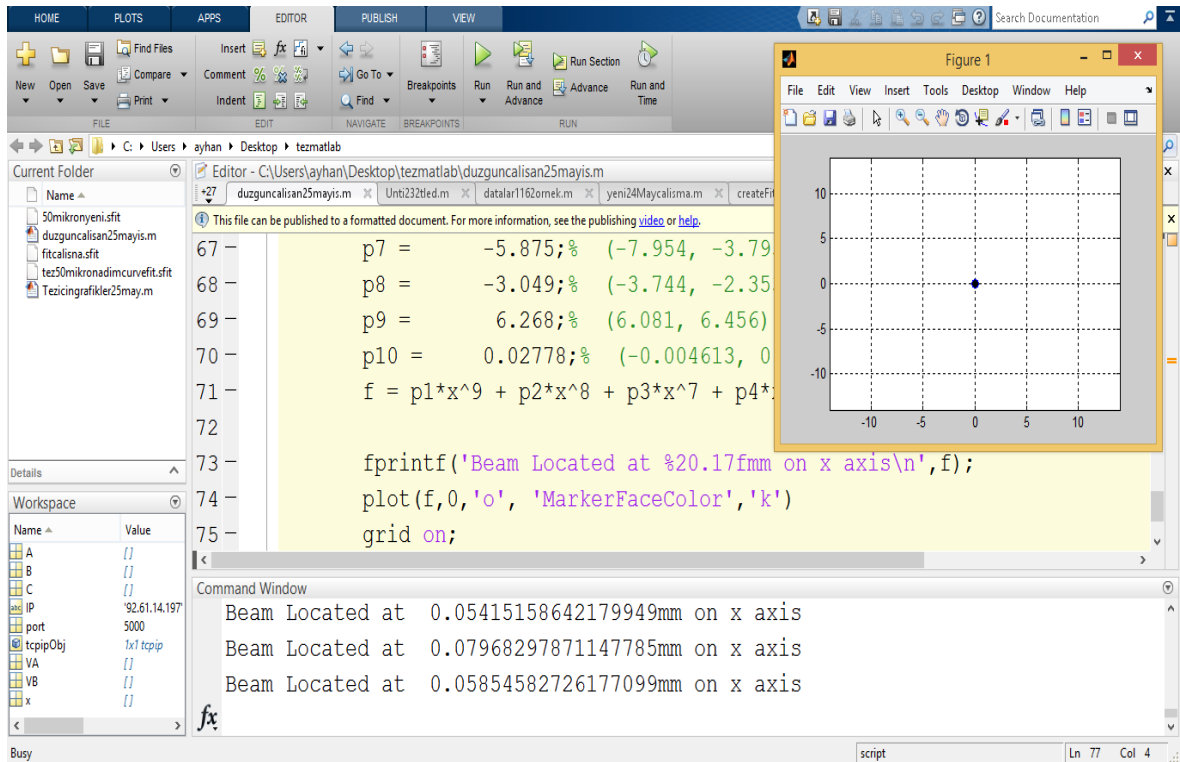
```

61 - volts0= query(tcpipObj,'ACQ:SOUR1:DATA?');
62 - volts1= query(tcpipObj,'ACQ:SOUR2:DATA?');
63 - antennaA=max(str2num(volts0(1,2:length(volts0)-3)));
64 - antennaB=max(str2num(volts1(1,2:length(volts1)-3)));
65 - x=(antennaA-antennaB)/((antennaA+antennaB));
66 - p1 = 0.944 %(0.5934, 1.295)
67 - p2 = 4.411 %(4.157, 4.665)
68 - p3 = -4.009 %(-5.195, -2.823)
69 - p4 = -9.144 %(-9.876, -8.412)
70 - p5 = 3.942 %(2.63, 5.253)
71 - p6 = 6.913 %(6.272, 7.554)
72 - p7 = -1.473 %(-1.986, -0.9598)
73 - p8 = 3.309 %(3.142, 3.477)
74 - p9 = -0.5428 %(-0.5944, -0.4912)
75 - f = p1*x^9 + p2*x^8 + p3*x^7 + p4*x^6 + p5*x^5 + p6*x^4 + p7*x^3 + p8*x^2 + p9*x + p10;
76
77 - fprintf('Beam Located at %20.17fmm on x axis\n',f);

```

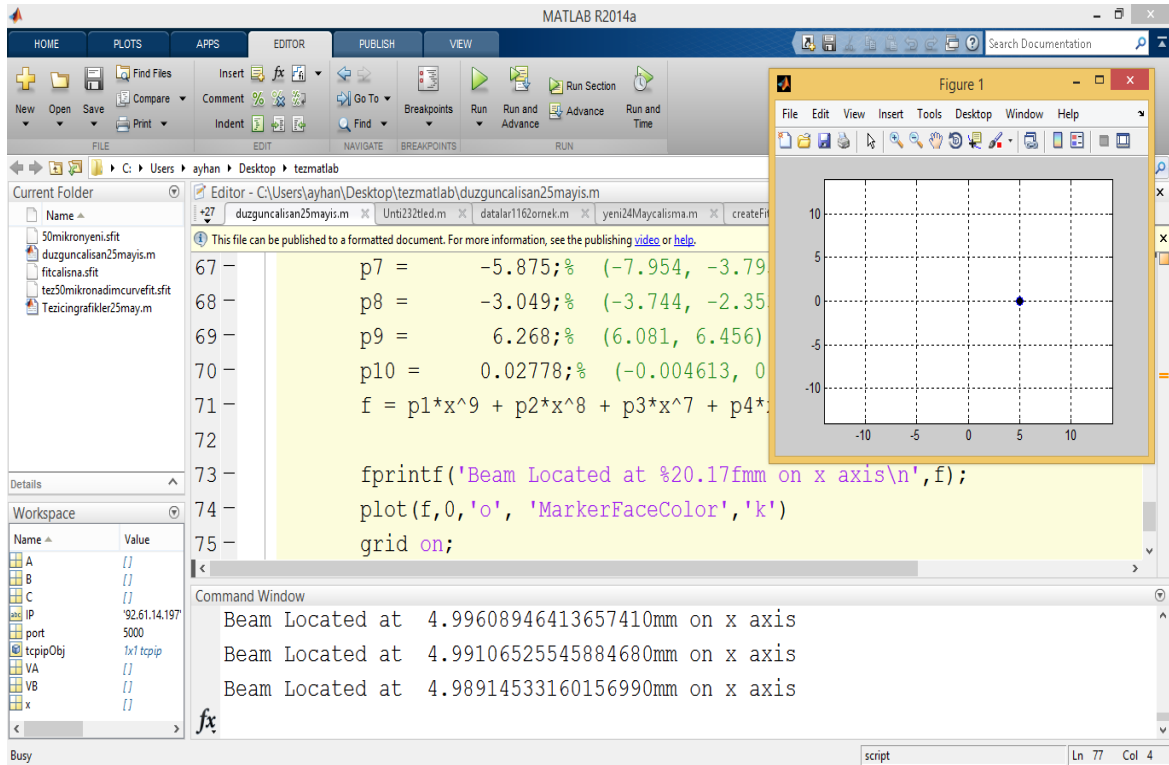
Resim 3. 16. Eğri uydurma ile elde edilen polinom değerlerinin kullanılması ile demet pozisyonunun bulunması

Resim 3.16’da bir kısmı verilen kodların çalıştırılması ile elde edilen ekran görüntüsü Resim 3.17’de gösterilmiştir.



Resim 3. 17. Demet pozisyonunun yazılan kodlar ile bulunması

Resim 3.17'den görülebileceği gibi demet pozisyonu, kurulan düzenekte elektron demetini temsil eden tel, düzeneğin orta noktasında iken 0.05 mm olarak ölçülmüştür. Yapılan tüm ölçümler, test düzeneği ile bilinen pozisyonlar ile karşılaştırılmıştır. Burada çözünürlük yaklaşık olarak 50 μm mertebesinde dir. Demet, demet pozisyon monitörü merkezinden uzaklaştıkça da (Resim 3.18) 50 μm ve daha düşük çözünürlük değerleri ile demet pozisyonu belirlenebilmiştir.



Resim 3. 18. Demet, demet pozisyon merkezinde değil iken konum tespitini gösteren ekran çıktısı

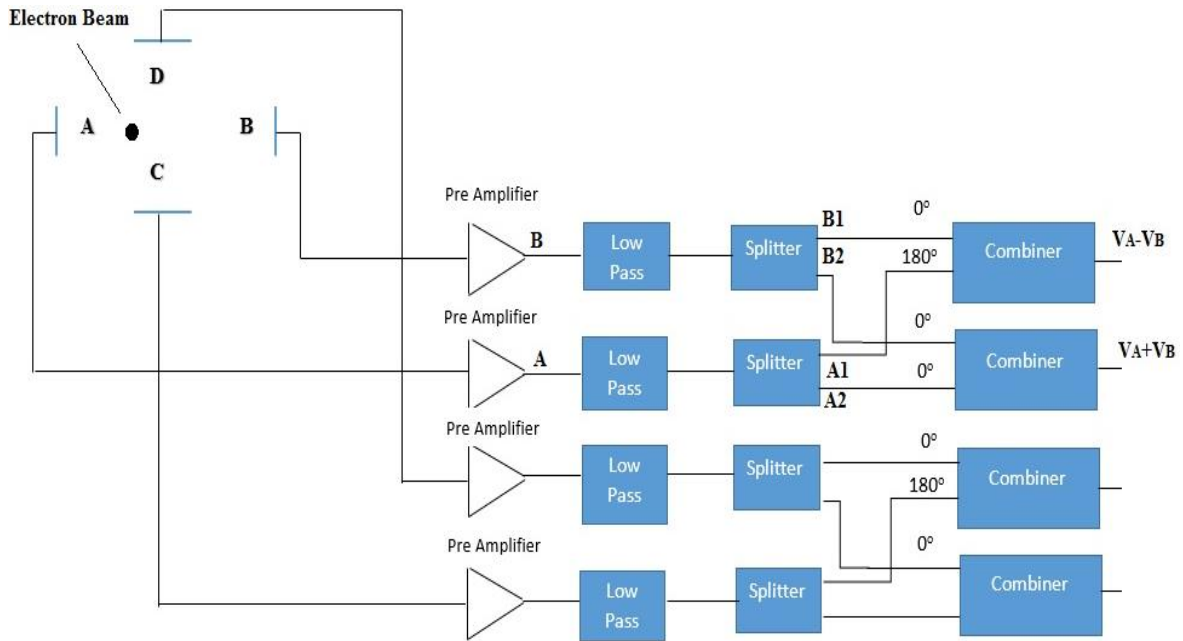
Kullanılan ARM tabanlı FPGA kartının hızlı RF girişlerinin 2 adet olmasından dolayı çalışmalar x ve y ekseninde birbirinden bağımsız olarak yürütülmüştür. İstenilen değerler her iki eksen de elde edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Pik Yakalayıcı Devreye Yeni Yaklaşım

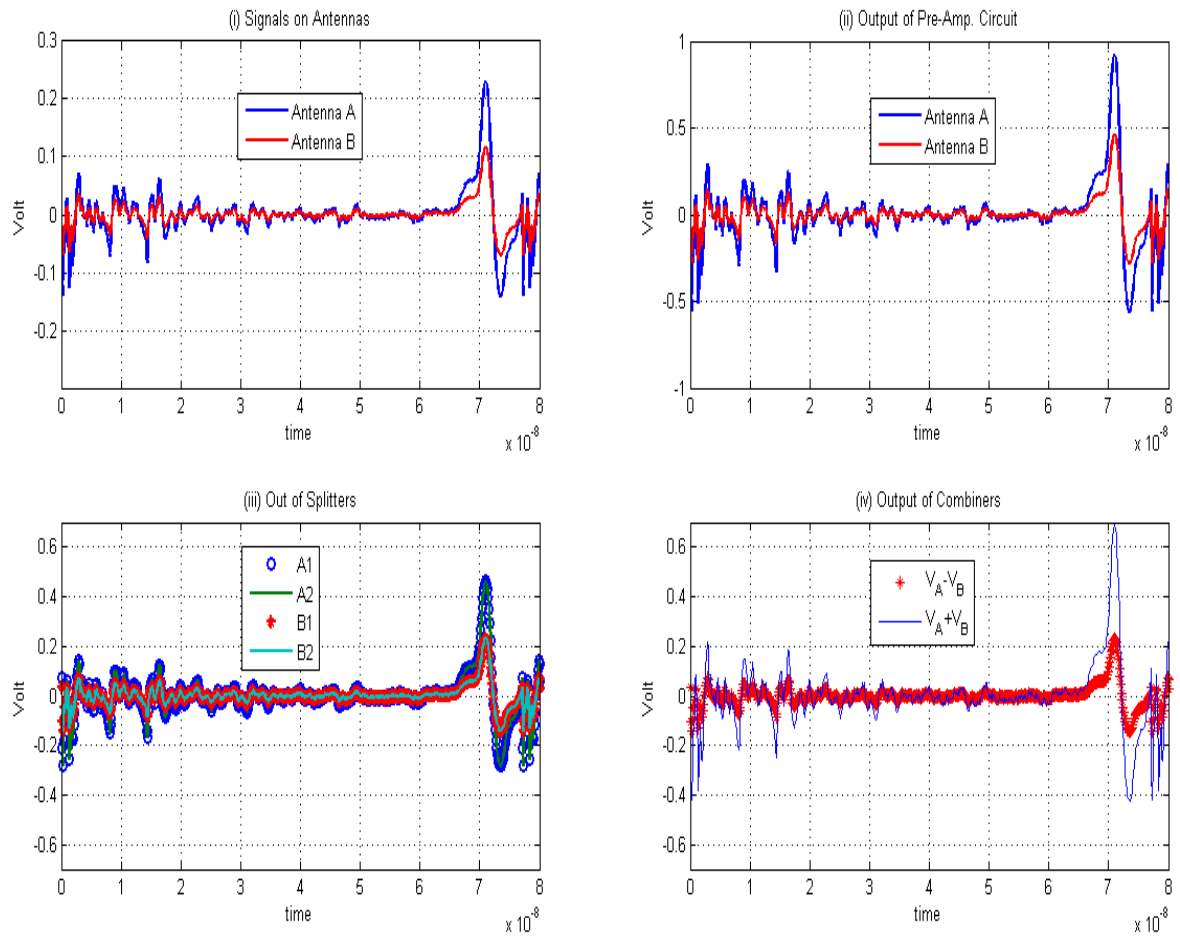
Pik yakalayıcı devre ve sayısal sinyal işleme teknikleri ile elde edilen sonuçlar ile TARLA tesisi için kullanılabilecek bir kart üretilmiş ve sayısal sinyal işleme teknikleri kullanılarak demet pozisyonu başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Ancak yapılan çalışmayı daha özgün kılmak adına yürütülen çalışmalar sonucunda benzetim sonuçları başarıya ulaşan fakat elektronik kartı henüz üretilmeyen yeni bir teknik geliştirilmiştir.

Bu çalışmada antenlerden alınan sinyaller, sinyal ayırıcı (splitter) ve sinyal birleştirici (combiner) gibi bir takım elektronik bileşenler kullanılarak yeniden düzenlenmiştir. Böylelikle sayısal sinyal işleme bölümüne geçmeden önce her iki eksen de toplam sinyal değeri elde edilebilmiştir. Bu yeni yaklaşımın şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



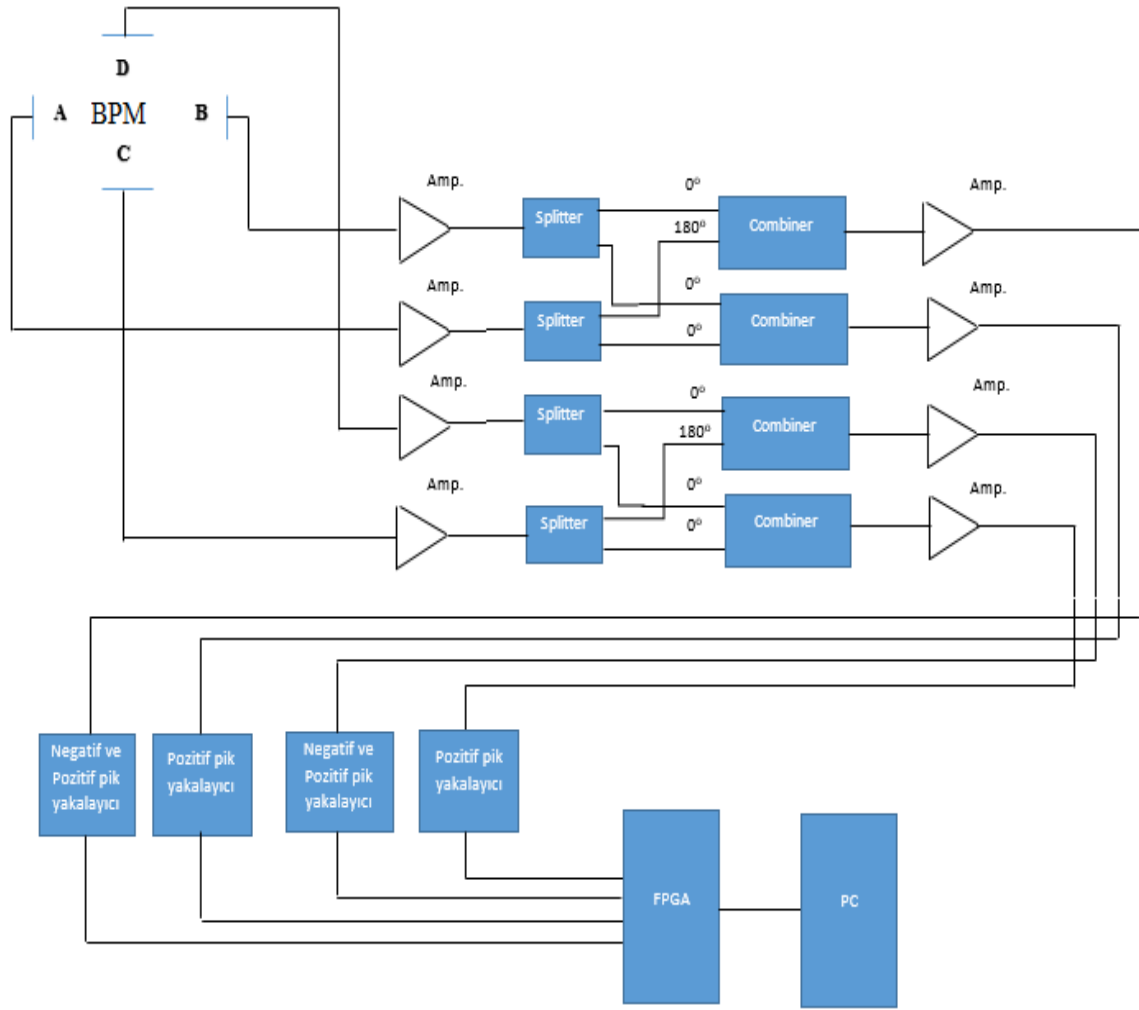
Şekil 4. 1. BPM antenlerinden elde edilen sinyallerin analog bileşenler ile işlenmesi

Karşılıklı iki antenden alınan sinyaller için yazılan MATLAB programı ile elde edilen simülasyon sonuçları ise Resim 4.1 de gösterilmiştir.



Resim 4. 1. Toplayıcı devre çıkışında antenlerden alınan sinyal karakteristikleri MATLAB program çıktısı

Resim 4.1 ile verilen simülasyon çalışmalarının sonuçlarından da görülebileceği gibi elde edilen sinyaller artık pik yakalayıcı devreler aracılığı ile işlenebilecek durumdadır. Bu işlem için Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, Şekil 4.1 ile verilen devrenin çıkışları pik yakalayıcı devrelere bağlanmıştır.



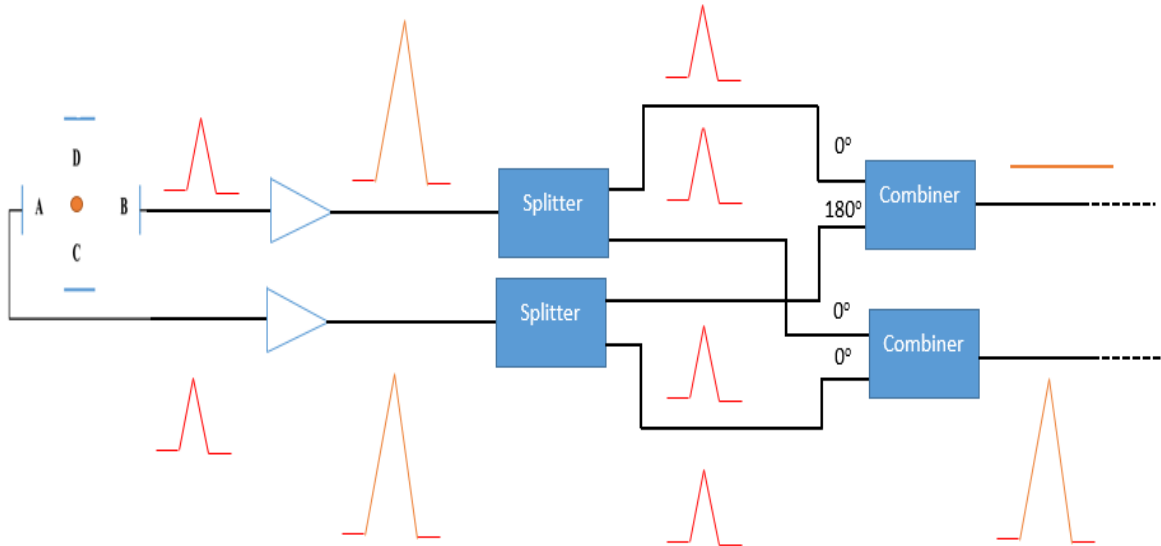
Şekil 4. 2. Negatif pik yakalayıcı eklenmiş demet pozisyon monitörü elektronigi

Bu devrede antenlerden alınan sinyaller öncelikle diyotların iletim voltajlarının (V_f) üzerine çıkarılmak için yükseltilmektedir. Yükseltilen bu sinyaller sinyal ayırıcılar kullanılarak 2 kola ayrılmaktadır. Bu esnada sinyal genliği yarıya düşmektedir. Sinyal ayırıcı çıkışından alınan sinyallerden (karşılıklı antenler için) biri 180° çeviren diğeri ise çevirmeyen (0°) sinyal birleştirici elektronik bileşene giriş olarak verilmiştir. Buradaki amaç bir eksen üzerinde karşılıklı antenlerden alınan sinyalleri hem toplamak hem de farklarını almaktır.

Örneğin demet, BPM içerisinde tam merkezde bulunuyorsa karşılıklı antenlerden alınan sinyaller birbiri ile eşit olacaktır. Sinyal birleştirici devre girişinde, sinyallerden biri 180° çevrildiği için iki sinyalin toplanması, iki sinyalin birbirinden çıkarıldığı anlamına gelmektedir. Böylelikle demetin merkezde olduğu kanısına varılır.

Diğer taraftan birleştirme işlemlerinden biri 0° sinyal birleştirici kullanılarak yapılmaktadır. Bu durumda da karşılıklı antenlerden alınan iki sinyal birbiri ile toplanmış olacaktır. Demet

pozisyonu belirlenirken sinyal farklarının sinyal toplamalarına oranı formülü kullanıldığı için (Eş.2.17 ve Eş.2.18) sayısal sinyal işleme öncesi demet hakkında bir takım bilgilere sahip olunmaktadır. Bu durum Şekil 4.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. Sinyal ayırıcı ve birleştirici bileşenlerin kullanımı ile elde edilen sinyal yapısı

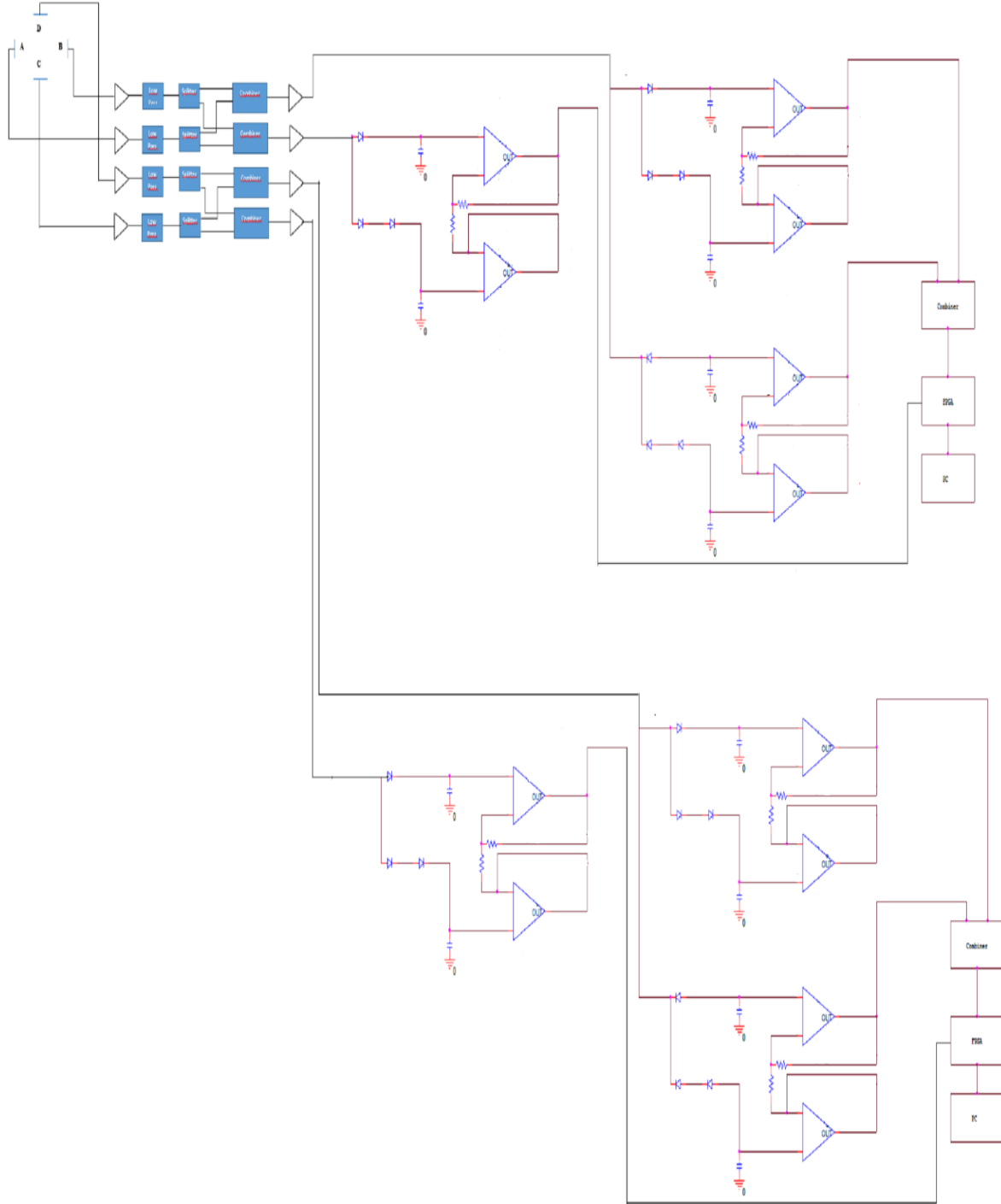
Burada en önemli nokta kullanılacak olan RF kabloların uzunluğudur. Her bir kablonun aynı uzunlukta olması ve konnektör bağlantılarının düzgün yapılması gerekmektedir. Aksi halde RF kablolardan taşınan sinyaller arasında meydana gelebilecek olan faz kaymaları sonuçları doğrudan etkileyecektir.

Bu noktadan sonra elde edilen sinyaller yeniden yükseltilerek sinyal ayırıcı devrenin etkileri yok edilmekte ve pik yakalayıcı devrenin çalışma voltajı aralıklarına çekilmektedirler.

Sinyal birleştirici devrenin çıkışında sinyalin işareti, demetin hangi antene yakın olduğuna bağlı olarak negatif ya da pozitif olabilir. Bu esnada Resim 3.8 ile verilen devrede sadece pozitif değere sahip olan sinyaller yakalanacağından bu devrenin kullanılması imkansız olacaktır.

Bu durumu engellemek için Resim 4.2 ile verilen elektronik devre geliştirilmiş ve başarılı bir şekilde benzetim çalışmaları tamamlanmıştır. Geliştirilen devrede, sinyalin işaretine bağlı olarak pozitif ya da negatif pikleri yakalayan bölüm devreye girmektedir.

Olası gürültülerin (pozitif ya da negatif yönde) voltaj izleyici devre tarafından algılanıp işlem yapılmasını engellemek için belirli bir eşik değerin altında kalan sinyaller filtrelenmiştir. Filtreleme işlemi Resim 3.1’de verilen program ekran görüntüsündeki, güç hesaplamaları (power calculations) bölümünde verilen SNR (Signal-to-Noise Ratio) oranları göz önünde bulundurularak yapılmıştır.



Resim 4. 2. Negatif ve pozitif pik yakalayıcı devrelerin birleştirilmesini gösteren benzetim çalışmaları

Resim 4.2’ de verilen devrenin negatif pik yakalayıcı kısmının benzetim sonuçları Resim 4.3’de verilmiştir. Sonuçların Resim 3.9 ile verilen ekran görüntüsünde verilen pozitif pik yakalayıcı devre ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiş ve yaklaşık 0.3 μ s sonunda pik değerlerinin yakalandığı gözlemlenmiştir.



Resim 4. 3. Negatif pik yakalayıcı devre sonucunda elde edilen grafik

4.2. Yapılan Çalışmanın Değerlendirilmesi

Yapılan çalışma ile pahalı ve karmaşık elektronik kart tasarımları yerine daha yalın, kendi kendini kompanze eden ve ucuz bir elektronik kart tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kart 1 aydan daha uzun süre ile test edilmiştir.

GASIOR ve STEINHAGEN, tarafından geliştirilen kendi kendini kompanze edebilen pik yakalayıcı devre Resim 4.1, Resim 4.2 ve Şekil 4.1’da gösterilen yeni geliştirmeler eklenerek kullanılan bileşen sayısı azaltılmış ve daha etkili olması sağlanmıştır.

Test aşamasında test düzeneği içerisinde geçirilen telin merkezde (0 mm) olması sağlandıktan sonra 6 saat boyunca ölçümler alınmıştır. Bu test süresinin ilk 1 saatinde 10'ar dakikalık aralıklar ile sonuçlar kaydedilmiş, sonrasında ise her 30 dakika boyunca ölçümlere devam edilmiştir. Bu test sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

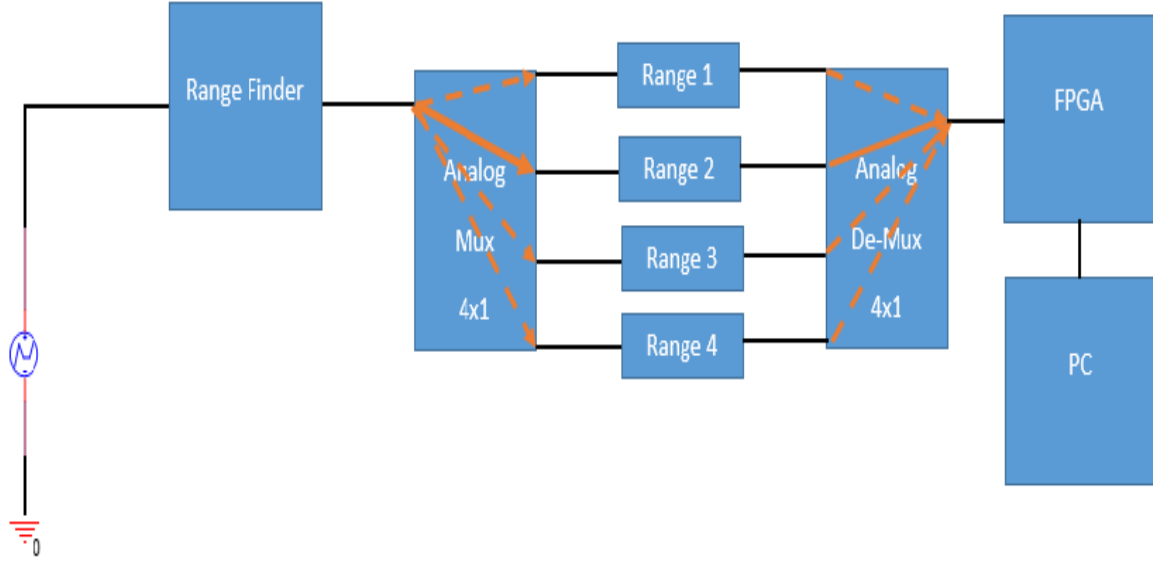
Çizelge 4. 1. Kurulan düzenek ile 6 saat süre içerisinde farklı zaman aralıklarında alınan ölçüm sonuçları

Saat	Konum Bilgisi
1. Dakika	0.0079 mm
10. Dakika	0.0080 mm
20. Dakika	0.0079 mm
30. Dakika	0.0080 mm
40. Dakika	0.0080 mm
50. Dakika	0.0080 mm
60. Dakika	0.0081 mm
90. Dakika	0.0081 mm
120. Dakika	0.0081 mm
150. Dakika	0.0081 mm
180. Dakika	0.0080 mm
210. Dakika	0.0081 mm
240. Dakika	0.0081 mm
270. Dakika	0.0084 mm
300. Dakika	0.0080 mm
330. Dakika	0.0081 mm
360. Dakika	0.0081 mm

Yapılan ölçüm sonuçlarına bakıldığında konum bilgisinin farklı zaman aralıklarında küçük değişimler gösterdiği gözlenmektedir. Bunun nedeni elektronik devrenin belirli bir çalışma süresi sonunda ısınması ve ölçüm almak için kurulan düzeneğin yanına yaklaşıldığında ortaya çıkan etkiler olarak değerlendirilebilir. Sistem için bir soğutma ünitesinin kurulması daha kesin sonuçların elde edilebilmesi adına faydalı olacaktır. Aynı zamanda mekanik olarak kurulan düzeneğin hassasiyetinin de 10 µm olduğu gözönünde bulundurulmalıdır.

Pik yakalayıcı devrede kullanılan kondansatör ve direnç değerlerinin farklı paket yapıları için farklı değerlerde olması kaçınılmazdır. Bu durumda olası tüm paket yapıları için farklı

değerlere sahip pik yakalayıcı devreler oluşturulmalı ve bu devreler Şekil 4.5’de gösterildiği gibi bir anahtarlama mantığı ile devreye alınmalıdır. Bu noktada çalışma aralığının belirlenebilmesi için Şekil 4.5’de “Range Finder” adı ile belirtilen bölüm kullanılır. Burada yine mikrodenetleyiciler kullanılarak paket yapısı tahmin edilebilir ve en uygun pik yakalayıcı bölgesinin seçilmesi sağlanabilir.

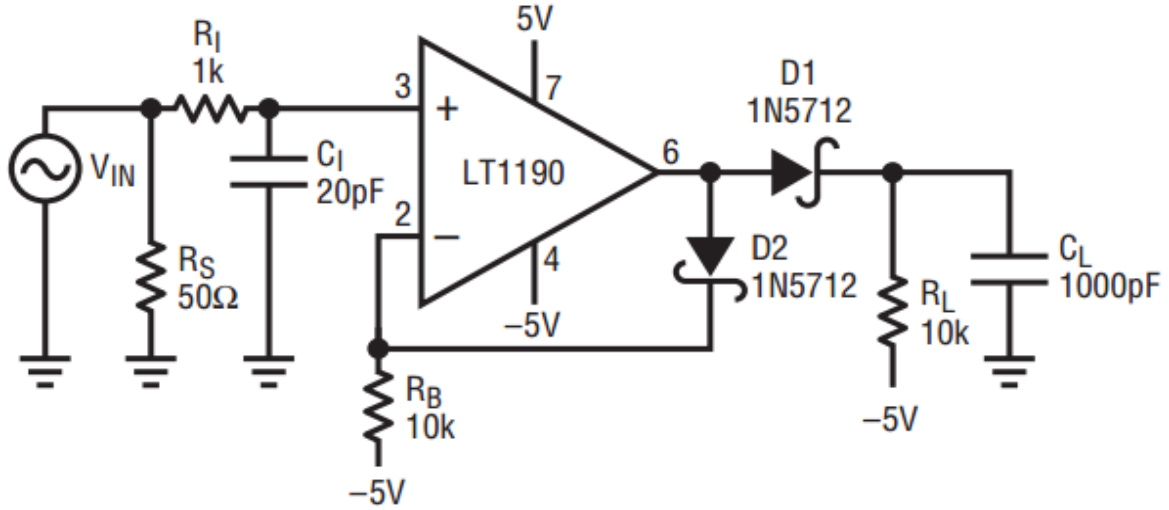


Şekil 4. 4. Demet paket yapısına göre çalışma bölgesi belirleme [33]

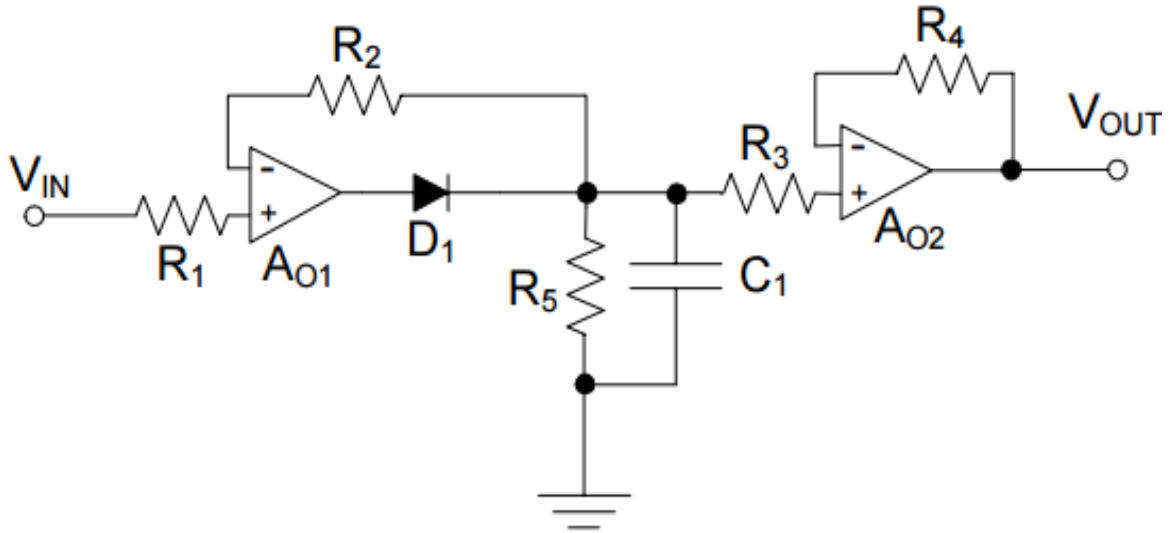
Demet paket yapısı değiştirildiğinde elektronik devre paket yapısına göre çalışacağı bölgeyi belirleyebilir.

Pik yakalayıcı devre sonrasında elde edilen DC sinyal çok basit multimetreler kullanılarak bile ölçülebilir durumdadır ve böylelikle demet pozisyonu hakkında bilgi sahibi olunabilir. Pik yakalayıcı devreler bir çok analog sinyalin sayısal sinyale dönüştürülmesinde kullanılabilecek pratik ve ucuz bir çözüm sunmaktadır. Geliştirilen devre TARLA tesisindeki, analog çıkışa sahip bir çok algılayıcı için kolayca adapte edilebilir niteliktedir.

Diyotların iletim voltajlarının yaratmış olduğu etkilerin yok edilmesi için Resim 4.4 ve Resim 4.5’de gösterildiği gibi farklı voltaj izleyici ve pik yakalayıcı devrelerin tasarlanması ve kullanılması mümkündür.



Resim 4. 4. Hızlı pik yakalayıcı tasarımı için farklı bir örnek [34]



Resim 4. 5. İki durumlu pik yakalayıcı devre tasarım örneği [35]

Kullanılan sinyal işleme yöntemlerinde eğri uydurma işlemleri üzerinde durulmuştur. Eğri uydurma işlemi istenilen sonuçları vermesine rağmen çoklu lineer regresyon, lineer olmayan regresyon, lagrange interpolating polinomları gibi bir çok farklı teknik kullanılarak sinyalin ayrıştırılmasının zor olduğu bölgeler için özel çalışmalar yürütülebilir.

Pik yakalayıcı devre tasarımına geçilmeden önce bir çok farklı teknik ve yöntem araştırılmış ve bu teknik ve yöntemlerin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Pik yakalayıcı devre üzerine yapılacak çalışmalar ile daha hassa sonuçların elde edilmesi mümkündür. Aynı zamanda bu yöntemin maliyetinin düşük olması bir tercih sebebidir ve TARLA tesisi elektronik laboratuvarı imkanları kullanılarak geliştirilmesi ve üretilmesi mümkündür.

Ayrıca test ve benzetim çalışmaları devam ettirilen yeni kart ile daha başarılı sonuçların alınması beklenmektedir ve yapılan bu çalışmalar yayın olarak değerlendirilebilecektir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Demet pozisyon monitörleri, demet yapısına zarar vermeden demet hakkında bilgi sahibi olmayı sağlayan, önemli demet teşhis (diagnostik) elemanlarıdır. Bu nedenle tüm hızlandırıcı sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Kullanıldıkları yerlere göre ve demet karakteristiklerine bağlı olarak farklı tiplerde demet pozisyon monitörlerinin kullanılması gerekebilir.

Buton tipi BPM'ler basit geometrik yapıları ve maliyetlerinin düşük olmasından dolayı yaygın olarak kullanılırlar. Bu tez kapsamında buton tipi BPM'ler için elektronik kontrol kartı tasarım çalışmaları yürütülmüştür.

Çalışma kapsamında öncelikle ölçüm işlerinin hassasiyetle yürütülebilmesi için 10 μm mekanik hassasiyete sahip bir test düzeneği kurulmuştur. Bu düzenek ile BPM içerisinden geçirilen telin pozisyonu hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir.

Tel üzerine uygulanan sinyal elektron demet yapısı ile birebir aynıdır. BPM içerisinden geçirilen tele uygulanan sinyal neticesinde antenlerden alınan sinyaller öncelikle osiloskoplar kullanılarak incelenmiş ve ortam gürültülerinin etkileri gözlenmiştir. Bu etkileri minimize etmek için birtakım filtreler kullanılarak sinyal gürültülerden arındırılmıştır. Bu işlem sonrasında antenlerden alınan sinyallerin pik (tepe) noktalarını tespit edebilen bir pik yakalayıcı elektronik kart geliştirilmiştir. Bu kart kullanılarak antenlerden elde edilen sinyallerin pik değerlerinde bir DC gerilim elde edilmiştir. Pik değerlerinin tam olarak yakalanması işlemi yaklaşık olarak 0,3-0,5 μs mertebesinde gerçekleşmektedir. Bu sonuç Çizelge 1.1 ile verilen TARLA tesisi elektron parametreleri göz önünde bulundurulduğunda kabul edilebilir bir aralıktadır. Ancak devre üzerinde kullanılan kondansatörler değiştirilerek bu zaman yapısı istenildiği şekilde ayarlanabilir.

Aynı zamanda elde edilen sinyaller çok basit multimetreler kullanılarak bile okunabilecek seviyededir ve demet pozisyonu hakkında bilgi sahibi olunabilir. Ancak, sinyal işleme teknikleri, mikro denetleyiciler ve bilgisayarlar kullanılarak daha hassas ve hızlı sonuçlara ulaşmak mümkündür. Bu nedenle elde edilen DC sinyal, mikro denetleyiciler üzerinden MATLAB programı ve MATLAB programına ait bir eğri uydurma aracı kullanılarak işlenmiştir. Yazılan program ile demet pozisyonu hızlı ve doğru bir şekilde belirlenebilmekte

ve sonuçlar bir grafik ekranı üzerinden gözlenebilmektedir. TARLA tesisi demet hattı boyunca yaklaşık 35-40 civarında BPM'in kullanılması planlanmaktadır, bu nedenle tüm BPM'lere ait bilgilerin birlikte gösterilebileceği bir grafik arayüzü tasarlanabilir.

Yapılan çalışma neticesinde başlangıçta hedeflenen sonuçlara ulaşılmış ve elektron demeti, demet pozisyon monitörü içerisinde herhangi bir bölgede 100 μm 'den daha düşük çözünürlükler ile tespit edilmiştir. Ancak, sistemin gerçek demet hattı üzerinde denenerek gerekli kalibrasyon işlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem esnasında TARLA tesisi envanterine kayıtlı olan Libera isimli demet pozisyon ölçüm cihazı ile kalibrasyon çalışmaları yapmak faydalı olacaktır.

Geliştirilen elektronik kartın farklı tiplerdeki BPM'ler (stripline, shoesbox vb.) ile kullanılabilmesi mümkündür. Bu işlem için yeni test düzenekleri kurularak çalışmalar yapılması önemlidir.

Sayısal sinyal işleme metotları geliştirmeye açıktır. Sayısal sinyal işleme ile ilgili birçok farklı teknik program üzerinde rahatlıkla denenebilecek durumdadır. Bu sinyal işleme metotları karşılaştırmalı olarak ele alınmalıdır. Böylelikle hız ve doğruluk ile ilgili iyileştirmelerin yapılması mümkün olacaktır.

Demet hattı üzerinde kullanılacak BPM'lerden elde edilecek sonuçlara göre elektron demetinin merkezde olmasını sağlamak adına sapırtıcı-düzeltici (steerer) magnetler kullanılacaktır. Bu nedenle düzeneğe bir geri besleme (feedback) sistemi eklenmeli ve yazılan programında bu doğrultuda geliştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle demet merkezden uzak bir noktada bulunuyorsa bu magnetler kullanılarak yeniden merkeze alınabilir. Aynı zamanda bir BPM'den alınan konum bilgisi sonraki BPM sistemine gönderilerek sistemin kendi içerisinde haberleşmesi sağlanabilir.

Tez kapsamında sadece demet pozisyonunun bulunmasına yönelik çalışmalar yürütülmüş olmasına rağmen BPM'ler kullanılarak demet akımı, demet yayılımı, güç gibi parametrelerin de ölçülmesi mümkündür. Özellikle 4 antenden elde edilen toplam voltaj ve empedans bilindiği için demet akımı rahatlıkla hesaplanabilir.

Demet pozisyonu belirlenmesinde sadece BPM'lerin kullanılması yeterli olmayabilir bu nedenle farklı ölçüm metotları üzerine çalışmaların yapılması gerekmektedir. Böylelikle BPM sistemleri ile diğer ölçüm metotları arasında kalibrasyon yapmakta mümkün olacaktır. Geliştirilen elektronik kartın yapılacak küçük değişiklikler ile farklı ölçüm metotları ile kullanılabilmesi mümkündür.

Demet teşhis işleminin TARLA tesisinin imkanlarının kullanılarak yapılması ve burada oluşacak bilgi birikimi ülkemizin gelecekte kurmayı planladığı diğer tesisler içinde faydalı olacaktır. Bu nedenle TARLA tesisinde gerekli elektronik kartların geliştirilmesi için altyapının kurulması gerekmektedir ve bu yönde çalışmalar başlatılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(125), 669-688.
2. Cockcroft, J. D., and Walton, E. T. S. (1930). Experiments with high velocity positive ions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 129(811), 477-489.
3. Van De Graaff, R. J. (1931). A 1,500,000 volt electrostatic generator. *Phys. Rev*, 38, 1919.
4. Livingston, M. S. (1954). *High-Energy Accelerations*, New York: Interscience Publishers.
5. Schieck, H. P., (2015). *Key Nuclear Reaction Experiments*, IOP Publishing.
6. Yavaş, Ö. (2001). 4. Nesil Işınım Kaynağı Olarak Serbest Elektron Lazeri. I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, Ankara.
7. Aksoy, A., Karşı, Ö., Kaya, Ç., Kazancı, E., Aydın, A., Koç, B., Başaran, A., Karakılıç, V., Dursun, B. ve Korkmaz, G. (2015). *TARLA Design Report*. Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, Ankara.
8. Aydın, A. and Kasap, E. (2017). Design studies for beam position monitor (BPM) front-end electronics of Turkish accelerator and radiation laboratory in Ankara (TARLA). *Turkish Journal of Physics*, 41:269-276. doi:10.3906/fiz-1702-13.
9. İnternet: Forck, P. Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww-bd.gsi.de%2Fconf%2Fjuas%2Fjuas_script.pdf&date=2017-06-02, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
10. İnternet: Full width at half maximum. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.wikiwand.com%2Fen%2FFull_width_at_half_maximum&date=2017-06-03, Son Erişim Tarihi: 03.06.2017.
11. Olshausen, B. A. (2000). Aliasing. *PSC 129–Sensory Processes*, 3-4.
12. Tropp, J. A., Laska, J. N., Duarte, M. F., Romberg, J. K. and Baraniuk, R. G. (2010). Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse bandlimited signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, 56(1), 520-544.
13. İnternet: Koziol, H. Beam Diagnostics for Accelerators. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcds.cern.ch%2Frecord%2F499098&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.

14. Lorenz, R. (1998, December). Cavity beam position monitors. *AIP Conference Proceedings*, 451(1), 53-73.
15. İnternet: Magne, C. and Wendt, M.. Beam position monitors for the TESLA accelerator complex. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fflash.desy.de%2Fsites%2Fsite_vuvfel%2Fcontent%2F403%2F1644%2F1446%2F1448%2FinfoboxContent1692%2Ftesla2000-41.pdf&date=2017-06-02, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
16. Shafer, R. E. (1992, March). Beam position monitoring. *In AIP Conference Proceedings*. 249(1), 601-636.
17. Röjssel, P. (1994). A beam position measurement system using quadrupole magnets magnetic centra as the position reference. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 343(2), 374-382.
18. Smith, S. R. (1997, January). Beam position monitor engineering. *In AIP Conference Proceedings*, 390(1), 50-65.
19. İnternet: Forck, P., Kowina, P. and Liakin, D. Beam position monitors. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcds.cern.ch%2Frecord%2F1213277%2Ffiles%2Fp187.pdf&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
20. Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics* (Third Edition). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
21. İnternet: Fit curves and surfaces to data using regression, interpolation, and smoothing. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.mathworks.com%2Fproducts%2Fcurvefitting.html&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
22. Aydın, A., Kaya Ç. ve Kasap, E. (2014). TARLA Demet Pozisyon Monitörü Tasarım Prensipleri. *Turkish Physical Society 31th International Physics Congress*.
23. Olmos, A., Pérez, F., & Rehm, G. (2007). Matlab code for BPM button geometry computation. *In Proceedings of DIPAC*, 186-188.
24. Gundogan, M. T., Yavas, O., Aydın, A., Kasap, E. and Kaya, C. (2016). Design, Production and Tests of Button Type BPM for TAC-TARLA IR FEL Facility. *Proceedings of IBIC*, 27-30.
25. Vismara, G. (2000, November). Signal processing for beam position monitors. *In AIP Conference Proceedings*, 546(1), 36-60.
26. Bhagat, S. and Gopalakrishnan, M. (2015). High Speed Peak Detection. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(6), 442-446.

27. İnternet: VanKeuren, M. and Watras, S. (2014). Beam Position Monitor for the CSU Accelerator Laboratory. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fprojects-web.engr.colostate.edu%2Fece-sr-design%2FAY13%2Fbeam%2FDocuments%2FFinalReport.pdf&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
28. İnternet: Özkaraca, O. Dalga Şekillendiriciler. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fw3.gazi.edu.tr%2F%7Eozkaraca%2FElektronik%2Fbolum_2.pdf&date=2017-06-02, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
29. Mitzner, K. (2009). *Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor*. China: Newnes.
30. Gasior, M., and Steinhagen, R. J. (2010, May). *High resolution beam orbit measurement electronics based on compensated diode detectors*. 14th Beam Instrumentation Workshop, Santa Fe, New Mexico, United States of America.
31. İnternet: STEMLab boards. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fredpitaya.com%2Fboards%2Fstemlab-boards%2F&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
32. Chapra, S. C., and Canale, R. P. (1998). *Numerical methods for engineers* (Sixth Edition). New York: McGraw-Hill.
33. Aydın, A. (2004). *Smart Sensors*. Unpublished Master's Thesis, University of Çankaya, Ankara.
34. İnternet: Wright, J. Peak Detectors Gain in Speed and Performance. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcds.linear.com%2Fdocs%2Fen%2Fdesign-note%2Fdn61f.pdf&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.
35. İnternet: Ducu, D. Op Amp Rectifiers, Peak Detectors and Clamps. MicroChip. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fww1.microchip.com%2Fdownloads%2Fen%2FAppNotes%2F01353A.pdf&date=2017-06-02>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2017.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : AYDIN, Ayhan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 15.08.1974, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 485 37 45
 Faks : 0 (312) 484 74 56
 e-mail : ayaydin@ankara.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü	2017
Yüksek lisans	Çankaya Üniversitesi / Bilgisayar Mühendisliği	2004
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi/ Fizik	2000
Önlisans	Afyon Kocatepe Üni. Bolvadin MYO/Elektrik	1997
Lise	Nallıhan Fettah Güngör EML/Elektrik	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-Halen	Ankara Üniversitesi Bilgisayar Müh. Böl.	Okutman
2000-2004	Çankaya Üniversitesi Bilgisayar Müh. Böl	Araştırma Görevlisi

İdari Görevler

Yıl	Yer	Görev
2009-2010	Ankara Üniversitesi Enformatik Bölümü	Böl. Başk.Yrd
2011-2013	Ankara Üniversitesi Nallıhan MYO	Müdür Yrd.

Verdiği Dersler

Programlama (C++, C#, ASP.NET, MATLAB)

Sayısal Yöntemler

Elektronik I

İşletim Sistemleri

Görsel Programlama

Yabancı Dil

İngilizce - İyi

Yayınlar

1. Aydın, A. and Kasap, E. (2017). Design studies for beam position monitor (BPM) front-end electronics of Turkish accelerator and radiation laboratory in Ankara (TARLA). *Turkish Journal of Physics*, 41:269-276. doi:10.3906/fiz-1702-13.
2. Aksoy, A., Aydın, A., Kaya, Ç., YAVAŞ, Ö., and Ketenoğlu, B. (2017). TARLA: The first facility of Turkish Accelerator Center (TAC). *IPAC 2017*, Copenhagen.
3. Gundogan, M. T., Yavas, O., Aydin, A., Kasap, E., and Kaya, C. (2016). Design, Production and Tests of Button Type BPM for TAC-TARLA IR FEL Facility. *Proceedings of IBIC*, 27-30.
4. Aydın, A., Aksoy, A., Başaran, A., Kaya, Ç., Kazancı, E., and Yavaş, Ö. (2016). Control and Network Systems of TARLA Facility, *4th ARD ST3 Workshop-Matter and Technology*, Berlin.
5. Kaya, Ç., Aksoy, A., Aydın, A., Karakılıç, V. Karşlı, Ö., Kazancı, E., Koç, B. İ., Tural, M., and Yavaş Ö. (2016). Electron Beam Diagnostics of TARLA Facility. *4th ARD ST3 Workshop-Matter and Technology*, Berlin.
6. Kazancı, E., Aksoy, A., Aydın, A., Kaya, Ç., Tonga, B., Yavaş, Ö., and Özkorucuklu, S. (2014). Current Status of TARLA Control System. *IPAC 2014*, Dresden.
7. Aydın, A., Aksoy, A., and Kasap, E. (2015). Simulation Studies on Beam Diagnostics for TAC-TARLA Facility. *9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union*, İstanbul.
8. Aydın, A., Aksoy, A., Kaya, Ç., Karşlı, Ö., Yavaş, Ö., and Arıkan, P. (2015). Free Electron Lasers for Nanotechnology. *11th Nanoscience and Nanotechnology Conference*, Ankara.
9. Umul, Y. Z., Yengel, E., and Aydın, A. (2003, December). Comparison of physical optics integral and exact solution for cylinder problem. *In Proceedings of the International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa.

10. Ketenoğlu, B., Aksoy, A., Aydın, A., Karşlı, Ö. Kaya, Ç., and Yavaş, Ö. (2016). Built-Up of a Magnetic Measurements Laboratory for Undulators and Beamline Magnetic Components in TARLA Facility. *6th Internationally Participated Congress on Particle Accelerators and Applications*, Bodrum.

Kitaplar

1. Koyuncu, B., Numanoğlu, M., Karataş, M., Bağcı, E., Aydın, A., Sevindik, M., Tuğrul, B. (2006). *Temel Bilgisayar Eğitimi*. Türkiye: Bıçaklar Kitabevi.
2. Aydın, A. (2009). *Programlama I*. Ankara Üniversitesi Uzaktan Eğitim Dersleri Kitapları.
3. Aydın, A. (2009). *Teknolojinin Bilimsel İlkeleri*. Ankara Üniversitesi Uzaktan Eğitim Dersleri Kitapları.

Başarılar/Ödüller

Afyon Kocatepe üniversitesi Bolvadin MYO/Elektrik Programı Bölüm Birincisi

DİZİN

A

ADC · 8, 36
 AM/PM · 14, 25, 26
 Ankara Üniversitesi · iv, vi, 2
 anten · 11, 14, 15, 17, 18, 19,
 30, 32, 33, 34
 ARM · iv, 35, 36, 42
 atmalı
 PW · 7, 21

B

benzetim · iv, 26, 29, 33, 34,
 43, 46, 47, 52
 BPM · iv, 4, 9, 10, 11, 14, 15,
 17, 18, 19, 20, 21, 23, 25,
 29, 37, 40, 45, 53, 54
 BPM'e · 17, 19
 Broadband · 24, 26
 buton · iv, 4, 10, 17, 18, 20,
 53

C

CW · 3, 7

Ç

Çözünürlük · 11, 15, 26

D

DC · 1, 27, 30, 31, 32, 33, 36,
 37, 40, 50, 53
 Demet · iv, 3, 4, 8, 9, 10, 11,
 14, 15, 17, 20, 23, 24, 26,
 40, 42, 45, 50, 53, 54, 55
 demet akımı · 4, 11, 21, 54
 demet pozisyonu · 9, 23, 30,
 37, 42, 43, 50, 53
 demet sinyali · 28
 Demet teşhis · 4, 8, 9, 55
 demet yapısı · 53
 dengeleme · 16
 diagnostik · 5, 37, 53
 direnç · 14, 28, 49
 diyot · 27, 30

E

eGUN · 7
 eğri uydurma
 curve fitting · 38, 51, 53
 elektrik yükleri · 28
 Elektrodinamik · 1
 Elektron · 2, 15
 elektron demeti · iv, 14, 15,
 23, 38, 54
 Elektrostatik · 1
 empedans · 21, 54

F

Filtreleme
 Filtre · 46

FPGA · iv, 5, 10, 35, 36, 40,
 42

FWHM · 7, 8

G

gerilim bölücü · 37

gürültü · 11, 18

K

kararlı · 23, 26, 37
 kompanze · 31, 48
 kontrol · 35

L

Laplace · 13
 lineer · 3, 16, 37, 38, 51
 logaritmik · 14
 Logaritmik Oransal · 24

M

MATLAB · iv, 17, 35, 37, 38,
 40, 53

N

Narrowband · 24, 26
 negatif · 28, 46, 47

O

offset · 16
 Optik · 21
 ortalama demet akımı · 12
 Osiloskop · 21, 23

Ö

örnekleme frekansı · 8

P

parçacık · 1, 11
 Pik yakalayıcı · 27, 43, 49, 50, 51
 polinom · 39, 41
 potansiyel · 28
 pozisyon · 4, 10, 11, 26, 30, 42, 53, 54

pozitif · 27, 46, 47
 Pulse · 21

R

Range Finder · 49
 RF · 1, 11, 23, 36, 37, 42, 46, 55

S

schottky · 30
 Serbest elektron lazeri · 3
 shoesbox · 54
 sinyal · 4, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 43, 45, 46, 50, 51, 53, 54
 sinyal ayırıcı · 43, 46

sinyal işleme · 4, 5, 10, 17, 23, 24, 25, 26, 35, 37, 38, 43, 46, 51, 53, 54

sinyal-gürültü oranı · 18
 stripline · 4, 54
 sürekli · 3, 7, 26, 38

T

tahrip · 23
 tampon bellek · 37
 TARLA · iv, vi, 2, 3, 4, 7, 10, 17, 19, 21, 23, 26, 30, 33, 35, 43, 50, 51, 53, 54, 55

V

voltaj · 14, 30, 36, 37, 40, 41, 46, 50, 54



GAZİ GELECEKTİR..