

SAYISAL SİNYAL İŞLEME SİSTEMİ İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ RADYASYON SPEKTROSKOPİSİNİN ELDE EDİLMESİ VE KALİBRASYONU

Levent Paralı^{1*}, Faruk Durmaz², Jiri Pechousek³

¹Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 45400, Manisa, TÜRKİYE

²Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 45400, Manisa, TÜRKİYE

³Regional Centre of Advanced Technologies and Materials, Department of Experimental Physics, Faculty of Science, Palacky University, 17. listopadu 12, 77 146 Olomouc, CZECH REPUBLIC

Özet:Bu çalışmada, ¹³⁷Cs radyoaktif kaynağının gama ışın enerji spektrumu, sayısal sinyal işleme sistemi ile yüksek çözünürlüklü olarak elde edilmiştir. Kurulan bilgisayar destekli ölçüm sistemiyle, radyasyon kaynaklarından alınan analog sinyal, 14 bit çözünürlükte, 100MS/s gerçek zamanlı sayısal sinyale dönüştürülerek toplanmıştır. ¹³⁷Cs radyasyon kaynağının yüksek çözünürlüklü spektroskopisi, yazılan Labview™ tabanlı DSP algoritmalar ile geliştirilmiştir. PCI 5122 sayısallaştırıcı kart iki giriş kanalına sahip olduğu için, kalibrasyonsuz sintilasyon detektörü, doğruluğu bilinen kalibrasyonlu sintilasyon detektörü ile karşılaştırılmıştır. Bu kalibrasyon işlemi, kalibrasyonlu sintilasyon detektörünün doğru değerlerine göre kalibrasyonsuz sintilasyon detektörün gösterge değerleri arasındaki sapmayı bulmaya yardımcı olur.

Anahtar Kelimeler: *Sayısal sinyal işleme, radyasyon ışını, sintilasyon detektörü, kalibrasyon*

OBTAINING HIGH-RESOLUTION RADIATION SPECTROSCOPY BY DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEM AND ITS CALIBRATION

Abstract: In this study, the gamma-ray energy spectrum of ¹³⁷Cs radioactive source was obtained as high resolution using digital signal processing system. Obtained analog signals from radiation source were collected converting to digital signal via established computer aided measurement system which both 14-bit resolution and 100MS/s real time sampling rate. The high resolution spectroscopy of ¹³⁷Cs radiation source were improved by Labview™ algorithms. Since the PCI 5122 card has two channels, uncalibrated scintillation detector is compared with precisely known correctness of calibrated scintillation detector. This calibration process helps to find the deviation of the indications relating to uncalibrated scintillation detector with regard to true value of calibrated scintillation detector.

Keyword: *Digital signal processing, radiation ray, scintillation detector, calibration*

* **Levent PARALI**
levent.parali@cbu.edu.tr

1. GİRİŞ

Bilgisayar destekli elektronik ölçüm sistemleri ile doğru ve hassas ölçüm yapabilen güvenilir kontrol ve test sistemleri elde edilebilir. Özellikle sayısal sinyal işleme (DSP:Digital Signal Processing) tabanlı yapılan çalışmalar, nükleer fizik deneylerinde radyasyon ölçümünde kullanıldığı gibi tüm mühendislik alanlarında da kullanılmaktadır. Günümüzde geleneksel analog sistemleri, sayısal sistemlere dönüştürerek, kolay yapılandırılmalar ile ölçüm ve test sistemleri oluşturmak, kullanıcı dostu arabirimlerle karmaşık deneyleri gerçekleştirmek mümkündür.

Sayısal Sinyal işleme sistemlerinin enerji ve zaman çözünürlüklerindeki üstün performansları, nükleer fizik deneylerinde kullanılması için tercih sebebi olmuştur. Farklı programlama teknikleri ile ihtiyaca özel enstrüman çözümleri geliştirilmiş sayısal osiloskoplar, DSP sistemlerinde kullanılmıştır.

DSP sistemleri, puls şekillendirmek, sinyal/gürültü oranını ve puls zaman çözünürlüğünü arttırmak için kullanılır. Nükleer detektörlerde ve yüksek aktiviteli kaynaklarda, uzun puls gecikme zamanları, gerçekte meydana gelen iki veya daha çok olayı üst üste bindirerek tek bir olay gibi kaydedebilir. Birikme durumu, spektroskopi sisteminin enerji zaman çözünürlüğünü ve sayma oranını olumsuz etkiler. Bu nedenle hızlı sintilasyon detektörleri, biriktirme reddi için kullanılsa da aynı zamanda sinyalin yükselme zamanının da ayırt edilebilmesi ve optimal filtrasyon için DSP algoritmaların ve puls doğrulamaların da kullanılması gereklidir. Nükleer DSP sistemleri, Labview™ grafik programlama ortamlarında sanal enstrüman teknikleriyle gerçekleştirilebilmektedir. Kullanılmaya hazır ölçüm fonksiyonlarını içeren DSP algoritmaların sürücüleriyle özel sistemler geliştirmek mümkündür. Labview™ tabanlı program tekniği ile USB-PCI-PXI tabanlı ticari aygıtlar ile kurulan bir sistem, herhangi bir amaç için çalıştırılabilir. Bu uygulamalar, isteğe özel geliştirilmiş hemen

hemen bağımsız donanım platformlarına sahiptir.

Şimdiye kadar nükleer fizik deneyleriyle ilişkili, birçok bilimsel çalışma yapılmış ve bu çalışmaların birçoğunda Labview™ yazılım ortamı, başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Bilgisayar destekli nükleer deteksiyonu ve çeşitli aygıtların karışık deneysel kurulumlarının gösterildiği enstrümantasyon laboratuvar öğretim sisteminin geliştirilmesi, ilk olarak 1993 yılında Ellis ve He [1] tarafından dile getirilmiştir.

Labview™ kullanılarak nükleer enstrümanların analizi ve simülasyonu ise 1993 yılında Abdel-Aal [2] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yüksek enerji ve nükleer fizik detektör enstrümanları için yüksek performanslı sayısallaştırıcı sistem üzerindeki çalışmalar, 2001 yılında Kirichenco [3] tarafından yapılmıştır. Nükleer puls deteksiyonu FPGA (Field-Programmable Gate Array: Programlanabilir Kapı Dizi Alanı) tabanlı sayısal ve detaylı sistem kurulumu ise 2007 yılında Esposito ve arkadaşları [4] tarafından, nükleer detektörlerdeki hızlı pulsaların doğrudan örneklemeleri için kullanılmıştır.

2005 yılında Tlaczala [5] tarafından, fizikteki sanal enstrümanlar, gama ışın yoğunluklarının data analizleri ve gösterim uygulamaları için geliştirilmiştir. İleri nükleer fizik deneyleri ve ölçüm modelleri, 2008 yılında yine Tlaczala [6] tarafından simüle edilmiş, nükleer fizik deneyleriyle sanal laboratuvar olarak gösterilmiştir. 2008 yılında Belli ve arkadaşları, [7] sayısal puls sinyal işleme için sayısal toplama sistemini, n-γ gamma detektörlerden data toplamak için uygulamışlardır. Bu sistem FPGA tabanlıdır. Çok yönlü bilgisayar tabanlı gama ışın monitörü ise 2008 yılında Drndarevic ve Jevtic [8] tarafından gösterilmiş ve 2008 yılında Drndarevic [9] tarafından Labview™ tabanlı programıyla alfa parçacık spektroskopisi kullanılarak benzer kavramlar gösterilmiştir.

Bir sayıcı/zamanlayıcı modülü ile otomatik zamanlama sayıcı sanal enstrüman sistemi, 2009 yılında Yan ve arkadaşları [10] tarafından

gösterilmiştir. Kararlı floresan ölçümlerini yapan otomatik spektro-fluorometrenin geliştirilmesi 2011 yılında Moreno ve arkadaşları [11] tarafından açıklanmıştır. Sistem uygulaması ve program kontrollü monokromatör, Labview™ tabanlıdır ve ölçülen zaman, sayısal osiloskop ve detektör tarafından okunur.

Sintilatör detektöründen elde edilen sayısallaştırılmış dalga formları için hızlı puls deteksiyon algoritmaları, 2011 yılında Krasilnikov ve arkadaşları tarafından, n-γ puls şekil diskriminasyon uygulaması için yapılmıştır [12].

2011 yılında Pechousek ve arkadaşları [13], DSP sisteminde Labview™ tabanlı program tekniğini kullanarak, genlik ve zaman sinyal analizleri gibi nükleer spektroskopi ölçümlerini sağlayan bir sistem geliştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Kurdukları sistem, yüksek hızlı sayısallaştırıcı tabanlıdır ve eş-zamanlı olarak iki örneklenmiş kanaldan bilgi pulslarını toplamak ve nükleer detektörlerin farklı tiplerinden pulsları yakalamak için yeterli hıza sahiptir. Sistemin içeriğinde, başlangıç ve durma nükleer olayların kayıtları için iki kanalın kullanılmasıyla birlikte zaman çakıştırma (coincidence) ölçüm uygulamaları da bulunmaktadır.

Bu çalışmada, sayısal elektronik tabanlı radyasyon ölçüm sisteminin elde edilmesi ve gama ışını yayan ¹³⁷Cs radyasyon kaynağına ait spektral ölçümler için, iki sintilasyon detektöründen eş zamanlı elde edilen sinyallerin karşılaştırılması ile metroloji tabanlı kalibrasyon aktivitelerinin oluşturulması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, sintilasyon detektörlerinden elde edilen analog sinyalleri sayısal sinyallere dönüştüren National Instrument firmasına ait olan ve şekil 1’de görülen PCI 5122 radyasyon azaltımı için topraklanmış fotoçoğaltıcı tabanlı 2 adet NKG 552

sayısallaştırıcı kart kullanılmıştır. PCI sayısallaştırıcı kart, PCI arabirim alt yapısına sahip anakartlı bilgisayarın PCI slotuna monte edilmiş, gerekli sürücü yazılımları yüklenerek, işletim sistemine tanıtılması yapılmıştır.



Şekil 1. PCI Tabanlı National Instrument 5122 Sayısal Sinyal İşleme Kartı

Sayısallaştırıcı kartın teknik özellikleri çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. PCI 5122 Sayısallaştırıcı kartın teknik özellikleri

NI PCI 5122 Kart Teknik Özellikleri
14 bit çözünürlükte 2 kanalın eş zamanlı olarak örneklenebilmesi
100 MS/s gerçek zamanlı, 2 GS/s rastgele dağıtımli örnekleme.
100 MHz Band Genişliği
50 Ohm ve 1 MOhm giriş empedansı
200 mV-20 Volt Giriş Voltaj Aralığı
7 dBc Sahte Serbest Dinamik Aralığı, 62 dB Sinyal/Gürültü Oranı
8MB dan 512 MB aralığında Bellek Opsiyonu (32MB Bellek Opsiyonunu seçilmiştir)

Radyasyon kaynağı olarak, Caesium-137 (¹³⁷Cs) gama ışını yayan, 7,998 kBq aktivasyon enerjisine ve 11019 günlük yarım ömre sahip disk şeklinde kaynak kullanılmıştır.

Gama ışın spektroskopisinin analog kısmı, yüksek enerjili NaI(Tl) sintilasyon kristalli (Kristal çapı 40x40 mm, 0,8 mm’lik duraluminyum pencereler) background sintilasyon detektörlerinden, harici yüksek voltaj güç kaynağından (C4720, Hamamatsu)

ve tek kanal analizör içine entegre edilmiş yükseltme ünitesinden (SCA-JKA1102 TEMA) oluşmaktadır.

2.1. Radyasyon Ölçüm Sisteminin Kurulması

Radyasyon spektroskopisinin; gama ışını, X-ışını, şarjlı parçacıkların (alpha, elektron, proton) spektroskopisi, nötron, kütle, zaman gibi bir kaç tipi vardır. Günümüzde bu spektroskopi ölçümlerinin her biri, DSP teknik tabanlıdır. Kullanılan detektör tiplerine göre data analiz işlemi boyunca farklılıklar meydana gelir. Diğer taraftan sinyal ve puls analizleri için düşük seviyeli birbirine benzer DSP algoritma ve metotları vardır. DSP gama ışın spektroskopi sisteminin ölçüm kurulumu, şekil 2’de gösterilmiştir. DSP algoritmalar, analog modüllerin çoğunu işleyerek sayısal sistemlere dönüştürür.

Her bir DSP sistemi, analog sinyali sayısallaştıran bir donanım kullanmak zorundadır. Hızlı bir sayısal osilaskop olarak işlev gören sayısallaştırıcı donanım, radyasyon detektöründen gelen işlenmemiş sinyali veya sinyal ön yükselteç/yükselteç katından gelen sinyal pulslerini çıkış sinyali olarak kayıt eder. Toplanmış sinyallerdeki pulsler, nükleer olay kaydını gösterir ve burada meydana gelen piklerin genliği, genelde detekte edilen enerjiye bağlıdır. Ön yükselteçler, düşük sinyal seviyesini yükseltmek ve detektörle harici devrenin empedansını uygunlaştırmak için kullanılır.

DSP sisteminin iki kanala sahip olması, aynı tip iki sintilasyon detektöründen elde edilecek olan gama spektroskopilerin sayma-kanal-enerji kapsamında birbirleriyle karşılaştırabilmelerini sağlar.

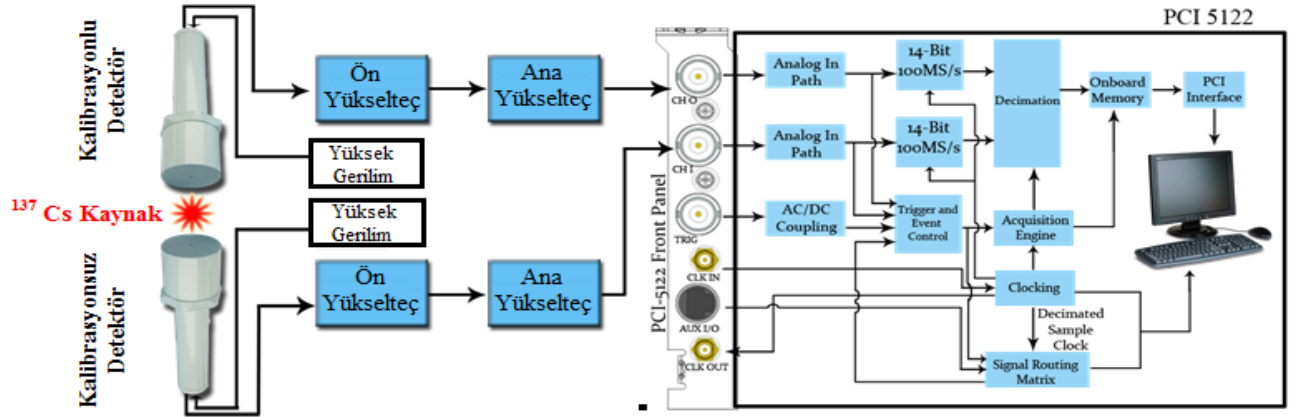
2.2. Metroloji Tabanlı Kalibrasyon Ölçüm Sistemi

Kalibrasyon işlemi, tüm ölçüm alanlarında ISO-9000 kalite sistemleri çerçevesinde büyük bir öneme sahiptir. Kurulan bir ölçüm sisteminde kalibrasyon işlemi, kalibrasyonu akredite olmuş laboratuvarlarda yapılan, izlenebilirliği-belirsizliği bilinen ve referans alınan bir cihaz ile diğer cihazların sergiledikleri ölçümlerin karşılaştırılmasıyla yapılır [14]. Şekil.2’de kurulan ölçüm sistemi iki kanala sahiptir. Kalibrasyonlu sintilasyon detektörü sayısallaştırıcı kartın bir kanalına, kalibrasyonlu olmayan diğer sintilasyon detektörü sayısallaştırıcı kartın diğer kanalına bağlanmıştır. ¹³⁷Cs radyasyon kaynağı iki sintilasyon detektörü arasında şekil 3’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.

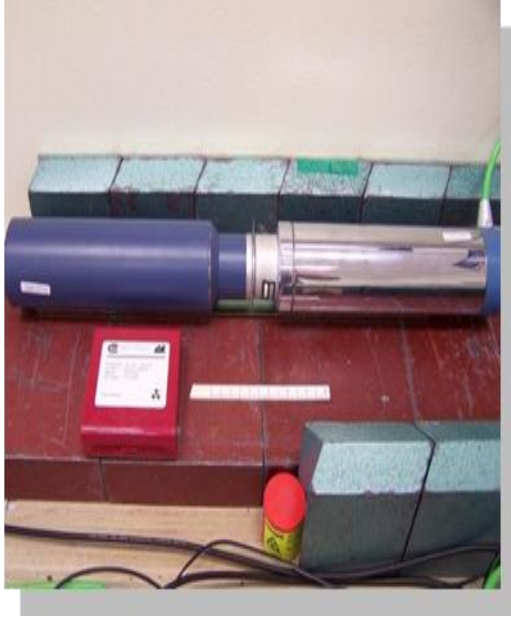
Kalibrasyonlu ve kalibrasyonsuz detektörlerden alınan her iki sinyal, sayısallaştırıcı kart tarafından analog bilgiden dijital bilgiye dönüştürülmüş, ¹³⁷Cs kaynağına ait elde edilen spektrumlar, radyasyon kaynağı ile detektörler arasındaki mesafe 0 cm iken karşılaştırılmıştır. Deneysel kurulumdan bir görünüş şekil 4’de verilmiştir.

2.3. Labview™ Tabanlı Yazılım Geliştirilmesi

Ölçüm sistemindeki bilgi toplama (DAQ: Data Acquisition) işlemleri, sayısal olarak gerçekleşir. Bu işlem için iki yöntem vardır. Bunlardan bir tanesi, dataların sayısal osilaskop (sayısallaştırıcı) tarafından transfer edilerek örnekleme ve DSP programlama koduyla toplanmasıdır.



Şekil 2. DSP Gama ışın spektroskopisi için DSP ölçüm sisteminin kurulması



Şekil 3. Radyasyon kaynağının iki sintilasyon dedektör arasında yerleştirilmesi

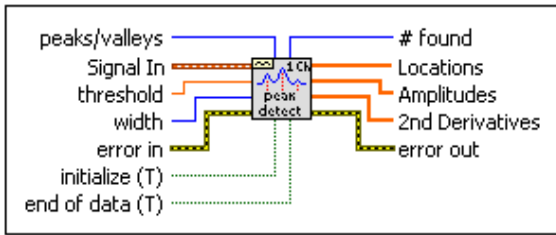


Şekil 4. Deneysel kurulumdan genel bir görünümü

Diğer ikinci yöntem ise bilgilerin FPGA donanımı ile toplanması ve DSP tekniğiyle örneklenmesidir. Yüksek çözünürlüklü (14 bit) ve yüksek örnekleme aralığına sahip (100MS/s) PCI 5122 sayısallaştırıcı kartın, çok ileri seviyeli yazılım komutlarıyla birçok yazılım algoritmalar kullanarak, enerji ve zaman çözünürlüklerini arttırmak mümkündür. Bu çalışma için NI (National Instrument) firmasının sunduğu NI-Scope adlı programlanabilir enstrüman araç kitinden faydalanılmıştır NI-Scope araç kitinde, sayısal kontrol ve bilgi toplama için tüm alt paletleri içeren fonksiyonlar bulunmaktadır. Enstrüman ile iletişim kurmak, sürücü ve sayısallaştırıcının durumunu bilmek için

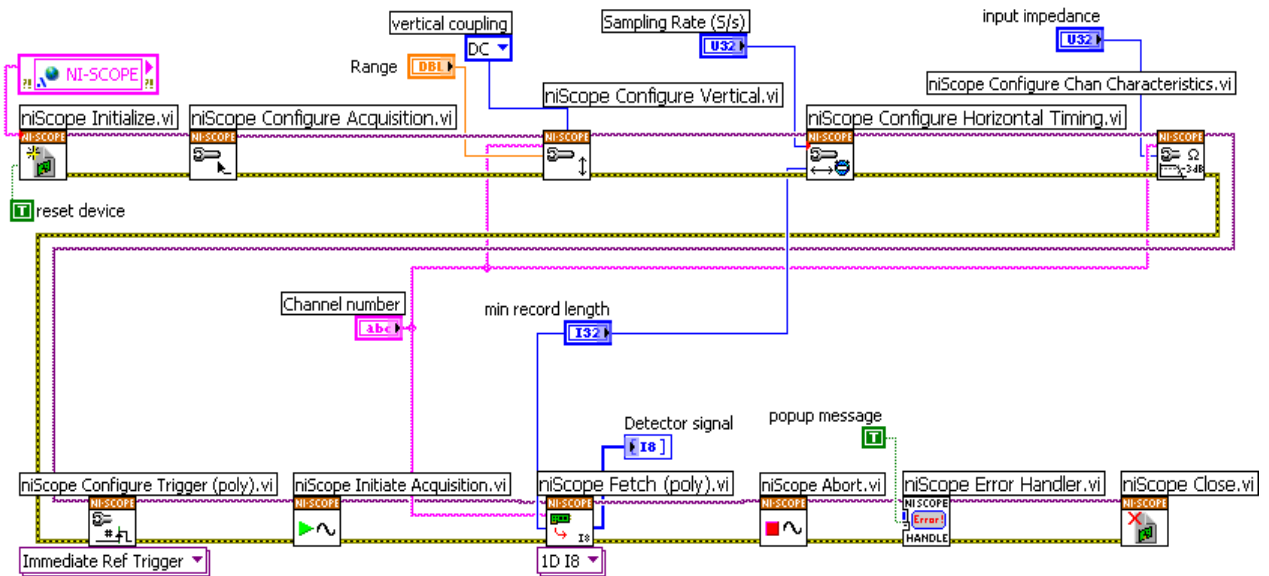
başlatma (Initialize) fonksiyonu kurulur. Bu aşamadan sonra enstrümanın düşey (vertical) skala, yatay (Horizontal) skala, tetikleme (Trigger) opsiyonları ve yapılandırma (Configuration) fonksiyonlarından ayarlanarak, bilgi toplama işlemi başlatılır. Daha sonra toplanan bilgiler, DSP algoritmalarına transfer edilir. Program tamamlandığında, bilgi toplama (DAQ) işlemi kesilir, oturum kapat (Close) fonksiyonu ile kapatılır.

Yazılım içinde önemli bir etkiye sahip olan DSP tabanlı sinyalin genlik analizi, Labview™ programlama ortamında bulunan Dalga Form Pik Dedeksiyonu (Waveform Peak Dedection VI:WPkD) ile yapılır. Burada sinyalin genlik işlemi, WPkD fonksiyonunun birkaç giriş parametresinin ayarlanmasıyla kontrol edilir (şekil 5).



Şekil 5. Waveform Peak Dedeksiyon Labview™ tabanlı program ikonu

Bu kontrol sistemiyle, detekte edilen piklerin, istenilen genlik ve puls yükseklik analizleri yapılmıştır.

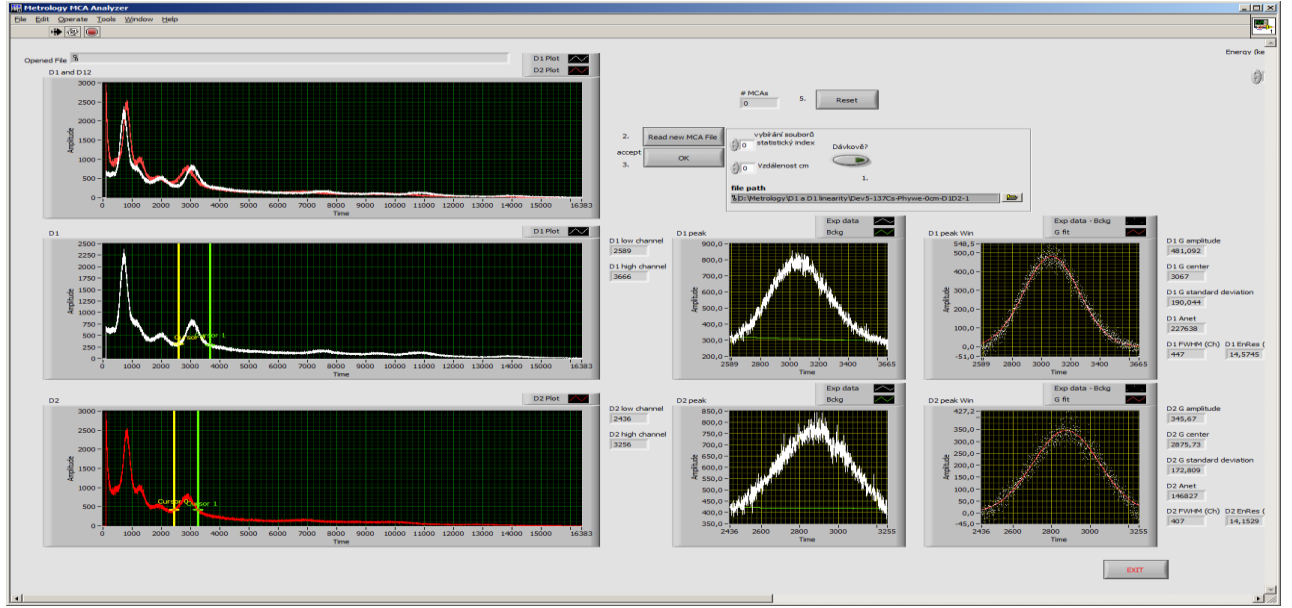


Şekil 6. NI-Scope sürücü fonksiyonlarının Labview™ yazılım kod örneği

NI-Scope sürücü fonksiyonları kullanılarak Labview™ yazılım ortamında geliştirilmiş DSP yazılım algoritmasının bir kısmı şekil 6'da gösterilmiştir. Burada bir detektörden gelen yükseltilmiş sinyaller, gidip-getirme (Fetch) fonksiyonu ile toplanmıştır. Sayısallaştırıcı, bilgileri, 8 bitlik ikilik formatta bir boyutlu (1D) döndürerek alır.

Böylece, çeşitli tip detektörlerden elde edilen detektör sinyalinin optimal davranışı, DSP tarafından kontrol edilerek gerçekleştirilir. Yazılım sonucunda gerçekleştirilen kullanıcı izleme ve kontrol arayüzü şekil 7'de gösterilmiştir. Burada her iki detektörden alınan sinyaller ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak bir ekranda görülebilmektedir.

Elde edilen ölçüm spektral bilgileri, text uzantılı dosyalara aktararak bilgisayar ortamında kayıt edilmiştir.

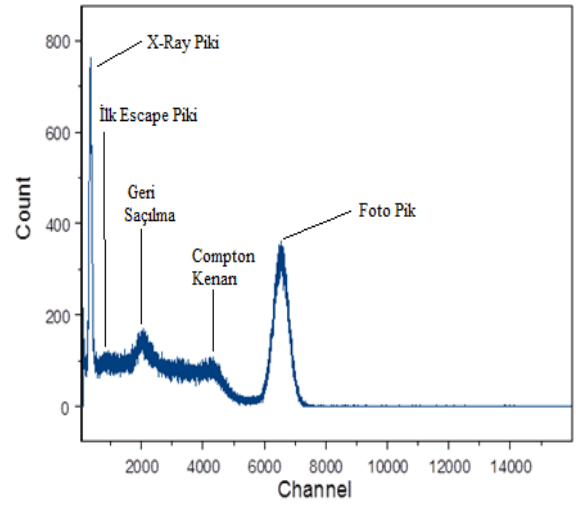


Şekil 7. Radyasyon ölçüm sisteminin kullanıcı ve kontrol arayüzü

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

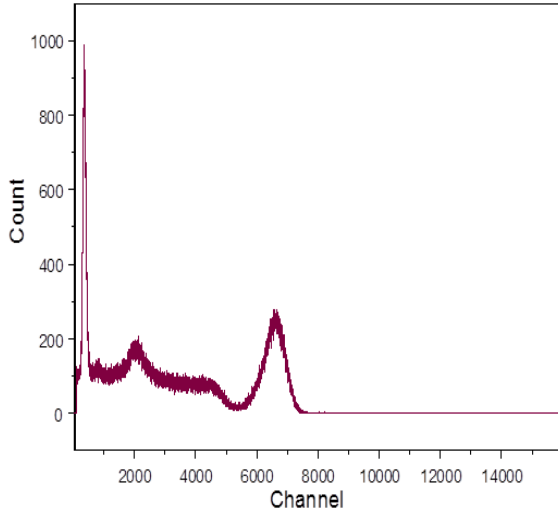
Detektörlerden elde edilen analog sinyal, yükseltme devresiyle yükseltilerek NI PCI 5122 sayısallaştırıcı karta gönderilir. Bu sayısallaştırıcı kart, her iki giriş kanallarından gelen analog sinyalini, eş zamanlı olarak 100 MS/s yüksek örnekleme değerine kadar örnekleyerek, 14 bitlik çözünürlükteki sayısal değere dönüştürür. Genel olarak MCA spektrasi, 16.384 kanal sayısı içinde toplanmıştır.

^{137}Cs kaynağı için kalibrasyonlu sintilasyon detektöründen gelen analog sinyalin sayısal işlenmesi sonucunda elde edilen radyasyon spektrasi şekil 8’de gösterilmiştir. Kanal 297 de 30 keV’lık X ışın piki, kanal 2036 da 200 keV’lık geri saçılma piki ve kanal 6528 de ^{137}Cs kaynağına ait 662 keV’lık karakteristik bir foto pik gözlenmiştir.



Şekil 8. ^{137}Cs Radyasyon kaynağı için kalibrasyonlu detektöre ait ham grafik

^{137}Cs kaynağı için kalibrasyonsuz sintilasyon detektöründen gelen analog sinyalin sayısal işlenmesi sonucunda elde edilen radyasyon spektrasi ise şekil 9’da gösterilmiştir. Bu detektör için kanal 399’da 30 keV’lık X ışın piki, kanal 2093 de 200 keV’lık geri saçılma piki ve kanal 6596’da ^{137}Cs kaynağına ait 662 keV’lık karakteristik bir foto pik gözlenmiştir.



Şekil 9. ¹³⁷Cs Radyasyon kaynağı için kalibrasyonsuz detektöre ait ham grafik

Kanal başına düşen enerji oranının hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

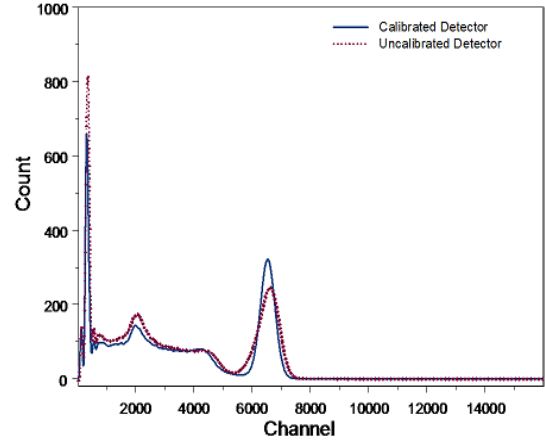
$$d = \frac{E_2 - E_1}{Ch_2 - Ch_1}$$

Burada, E_1 ve E_2 spektrumdaki pik değeridir. Ch_1 ve Ch_2 ise E_1 ve E_2 ile ilişkili kanal sayısıdır. Ölçüm sonuçları çizelge 2'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 2. ¹³⁷Cs Radyasyon kaynağının enerji değerleri.

Dedektör	Kalibrasyonlu	Kalibrasyonsuz
Radyasyon Kaynağı	¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs
E_1 (keV)-Ch	200-2036	200-2093
E_2 (keV)-Ch	662-6528	662-6596
d (keV/Ch)	0.103	0.102
E_{comp} (keV)	477	477
E_{back} (keV)	184	184
Xray(keV) - Ch	30-297	30-399

¹³⁷Cs radyasyon kaynağı için kalibrasyonlu ve kalibrasyonsuz sintilasyon detektörlerinden elde edilen sinyallerin karşılaştırmaları şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. ¹³⁷Cs Radyasyon kaynağı için kalibrasyonlu-kalibrasyonsuz detektöre ait yumuşatma işlevi uygulanmış grafikler

Bu ölçümlerden elde edilen değerlere göre, kalibrasyonlu sintilasyon detektörü referans alınarak, kalibrasyonlu detektörden elde edilen ölçümler ile kalibrasyonsuz detektörden elde edilen ölçümler karşılaştırılmıştır. İleriki çalışmalar için kalibrasyonlu detektöre göre, kalibrasyonsuz detektöre ait ölçüm hassasiyeti, ölçüm sapması, ölçüm kararlılığı ve ölçüm belirsizliği gibi değerler istatistikî hesaplamalarla tespit edilebilir ve ISO-9000 kalite sistemine göre kalibrasyonsuz detektörün kalibrasyonu yapılabilir.

4. SONUÇLAR

Sayısal sinyal işleme sistemi ile yüksek çözünürlüklü radyasyon spektroskopisinin elde edilebilmesi için elektronik aygıt olarak yüksek performanslı sayısallaştırıcı kartın kullanılması yanında, uygun algoritmalara sahip yazılım geliştirme işlemlerinin de önemi çok büyüktür. Ayrıca donanım olarak kullanılan sayısallaştırıcı kartın iki giriş kanalına sahip olması, iki farklı detektörden elde edilen radyasyon spektrumlarının karşılaştırılmalarına imkan sağlamıştır. Bunun yanında yapılan bu çalışmayla, ileriye dönük olarak, radyasyon spektroskopi ölçüm alanında, metroloji tabanlı kalibrasyon uygulamalarının istatistiksel değerlendirmeleri eklenebilir. Geliştirilen ölçüm sistemi, aynı

zamanda, elektronik devrelerindeki ekipmanlar üzerinde meydana gelen sinyal davranışlarının anlık tepkimelerini izlemek için bilgisayar destekli sayısal osilaskop olarak da kullanılabilir.

Teşekkür

Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine, 2012-14 Nolu bilimsel araştırma projemize yaptığı katkı için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

[1] Ellis, W.H. & He, Q. Computer-Based Nuclear Radiation Detection and Instrumentation Teaching Laboratory System. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 40, No. 4, pp. 675-679, ISSN 0018-9499 (1993).

[2] Abdel-Aal, R.E. Simulation and analysis of nuclear physics instrumentation using the LabVIEW graphical programming environment. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 18, No. 3, (July 1993), pp. 365-382, ISSN 1319-8025 (1993).

[3] Kirichenko, A.F., Sarwana, S., Mukhanov O.A., Vernik I.V., Zhang, Y., Kang, J. & Vogt, J.M. RSFQ Time Digitizing System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 22, No. 1, pp. 978-981, ISSN 1051-8223 (2001).

[4] Esposito, B., Riva, M., Marocco D. & Kaschuck Y. A Digital Acquisition and Elaboration System for Nuclear Fast Pulse Detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 572, pp. 355-357, ISSN 0168-9002 (2007).

[5] Tłaczala, W. Virtual instrumentation in physics, In: *Handbook of Measuring System Design*, P. Sydeman & R. Thorn, (Eds.), 695-701, Wiley, ISBN 0-470-02143-8, Hoboken, NJ, USA (2005).

[6] Tłaczala, W., Grajner, G. & Zaremba, M. Virtual Laboratory with Simulated Nuclear Experiments. *IEEE Transactions on*

Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 8, pp. 1766-1770, ISSN 0018-9456 (2008).

[7] Belli, F., Esposito, B., Marocco, D., Riva, M., Kaschuk, Y., Bonheure, G. & JET EFDA contributors A method for digital processing of pile-up events in organic scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 595, pp. 512-519, ISSN 0168-9002 (2008).

[8] Drndarevic, V. & Jevtic, N. A versatile, PC-based gamma ray monitor. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 129, No. 4, pp. 478-480, ISSN 1742-3406 (2008).

[9] Drndarević, V. A very low-cost alpha-particle spectrometer. *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 057007, 5pp, ISSN 0957-0233 (2008).

[10] Yan, J., Liu, R., Li, Ch., Jiang, L., Lu, X., Zhu, T., Wang, M., Wen, Z. & Lin, J. LabVIEW-based auto timing counts virtual instrument system with ORTEC 974 Counter/Timer. *Nuclear Science and Techniques*, Vol. 20, pp. 307-311, ISSN 1001-8042 (2009).

[11] Moreno, E., Reyes, P. & de la Rosa, J.M. Time-resolved fluorescence spectroscopy with LabView, In: *LabVIEW - Modeling, Programming and Simulations*, Riccardo de Asmundis, ISBN 978-953-307-521-1, InTech, Rijeka, Croatia (2011).

[12] Krasilnikov, V., Marocco, D., Esposito, B., Riva, M. & Kaschuck, Y. Fast pulse detection algorithms for digitized waveforms from scintillators. *Computer Physics Communications*, Vol. 182, pp. 735-738, ISSN 0010-4655 (2011).

[13] Pechousek, J., Prochazka, R., Prochazka, V. & Frydrych, J. Virtual instrumentation technique used in the nuclear digital signal processing system design: Energy and time measurement test. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 637, pp. 200-205, ISSN 0168-9002 (2011).

[14] General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO/IEC 17025, Second Edition (2005).

Geliş Tarihi: 23.10.2014

Kabul Tarihi: 18.12.2014

