

# KARARLILIĞI YÜKSEK YARI-İLETKEN DAC'IN KUANTUM VOLTMETRE İLE KALİBRASYONU

Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK  
Sarp ERTÜRK  
Ali TANGEL  
Mehedin ARİFOVİÇ

## ÖZET

Bu makalede, UME'de yüksek hızlı akım-elektronikliği ile kurulan Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı, yine yüksek örnekleme hızına sahip ADC ile birlikte kullanılarak oluşturulan Kuantum Voltmetre tanıtılmıştır. Ultra kararlı yarı iletken DAC'ın genliği kurulan Kauntum Voltmetre ile 625 Hz'e kadar kalibre edilmiştir. Bu çalışma ile yükleme etkileri olmadan, kuantum doğruluğunda genlik kalibrasyonlarının yapılabilirdiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim Metrolojisi, Josephson Gerilim Standartları, DAC, ADC Statik Kazanç, Dinamik Kazanç, Kuantum Voltmetre

## ABSTRACT

In this article, the Quantum Voltmeter which is formed by using Programmable Josephson Voltage Standard which is established with high speed current electronics and also with high sampling rated ADC in UME is introduced. The amplitude of the ultra-stable semiconductor DAC is calibrated up to 625 Hz with the established Quantum Voltmeter. It has been shown that with this study, quantum accurate amplitude calibrations can be performed without loading effects.

**Key Words:** Voltage Metrology, Josephson Voltage Standards, DAC, ADC Static Gain, Dynamic Gain Office

## 1. GİRİŞ

1962'de, Brian Josephson, cooper çiftlerinin iki süper iletken arasına yerleştirilmiş ince bir yalıtkan engelin içinden tünellendiğinde, kendine özgü davranışlarını eşitlik (1)'deki gibi öngördü [1] ve 1963'te Josephson'un teorisi kanıtlandı [2], [3]. İlerleyen yıllarda gerilimin, frekansın ve fiziksel sabitlerin bir tamsayı çarpımı ile orantılı olduğu gerilim-frekans ilişkisini kanıtlayan birçok deney [4] yapıldı. Deneyler, denklemin birleşme yerinin geometrisinden ve malzemesinden, mikrodalga ve manyetik alanın gücünden bağımsız olduğunu gösterdi [4]. Bu denklemde  $V_J$ , Şekil 1'de gösterilen JE'i uygun dc ve ac akımlar ile sürüldüğünde (öngerilimlendiğinde) eklem üzerindeki gerilim düşümlüdür.  $f$ ,  $h$  ve  $e$  sırasıyla ; AC akımın frekansı, Plank ve elektron yükü sabitleridir ve  $n$  bir tam sayıdır. Böyle bir denklemin varlığı, frekans büyüklüğünün doğruluğu ve kararlılığında gerilim birliği vaat etmekteydi.

$$V_J = n \cdot f \cdot h / 2e \quad (V) \quad (1)$$

Bu denklemin kanıtı metrologları, Josephson sabiti ( $K_J$ ) olarak bilinen  $2e/h$  sabitini ölçmeye teşvik etti.  $K_J$ 'nin 20 Mayıs 2019 tarihine kadar kullanılan değeri, 1990'da 0,4 ppm belirsizliği olan bir karşılaştırmanın ardından kabul edildi ve  $K_{J-90}$  ile belirtildi [5], [6]. Bu mutlak belirsizliğine rağmen,  $K_{J-90}$

için sabit bir değerin kabul edilmesi ile birlikte, dünyadaki gerilim birliğini ilk önce tek Josephson Eklemleri (JE) ile 0,01 ppm seviyesine, daha sonra seri bağlı JE dizileri ile 0,001 ppm seviyesine çıkarıldı [7].

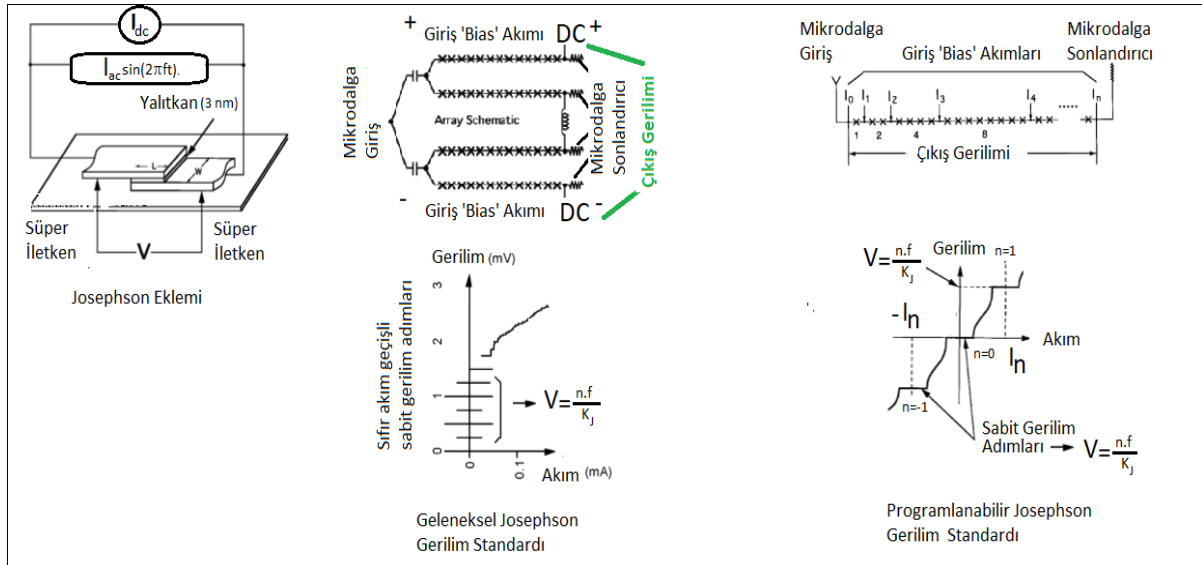
20 Mayıs 2019 tarihi itibarıyla  $K_J$  sabitinin daha düşük belirsizlikle belirlenmiş yeni değeri kullanıma alınmıştır [8]. Bu değer bir dizi ölçüm sonucunda büyüklüğü belirlenen plank sabiti ve elektron yükünün değerleri kullanılarak elde edilmiştir [9]. 20 Mayıs 2019 tarihinde yeni birim sisteminin yürürlüğe girmesi ile birlikte, artık  $K_J$  sabiti SI birim istemini temsil etmek yerine doğrudan gerçekleştirilmek için kullanılmaktadır.

Her enstitünün ölçebilme yeteneklerini gösteren CMC'lerdeki (Capability of Measurement Capacity) gerilim büyüklükleri bu değişimden etkilenmeyecektir çünkü, CMC'lerde nadiren  $K_J$ 'nin mutlak değerinin kullanıldığı elektriksel ölçümler vardır [9].

JE'lerini seri bağlamak, osilasyonları sönmülmemiş/zayıfça-sönmülmüş kapasitif JE'lerinin kullanılmasıyla mümkün olmuştur. Bu tür eklemlerle, Şekil 1'deki dc akım sıfır iken eşitlik (1)'deki  $n$ 'nin tam sayı katlarında ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) gerilim adımlarını gözlemlemek mümkündür [10]. 1981'de, aynı elektriksel özelliklere sahip eklemlerin üretilmemesi nedeniyle bu sıfır akım geçişli gerilim adımlarına sahip eklemler (Şekil. 1, eklemin akım-gerilim eğrisi) Josephson Gerilim Standartları (JGS) teknolojisine olanak tanıyordu ve Geleneksel JGS (GJGS) olarak adlandırılıyordu. Geleneksel JGS'nin doğal ancak istenmeyen iki etkisi vardı. Bunlar: 1) Farklı adımlar arasında hızlı bir şekilde değişiklik yapmak mümkün değildi ve 2) gürültü adımları rastgele değiştirmekteydi [7].

1995 yılında, Programlanabilir JGS (PJGS) olarak adlandırılan Şekil 1'deki eklemin dc akımı değiştirerek farklı gerilim adımları elde edilen kararlı başka bir JVS türü önerilmiştir [7]. Bu standartta, JE'lerinin osilasyonları sönmülmüştür ve eşitlik (1)'deki  $n$ , 0 ya da  $\pm 1$  olabilmektedir. JE dizilerinin gruplanmasıyla ve dc akımının gruplanan bölümlerde bağımsız olarak uygulanabilmesi ile farklı kuantum gerilimleri üretilebilmiştir. 1995'te eklem üretiminde ve mikrodalga güç dağıtım teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle, PJGS teknolojisi mümkün olmuştur [7].

Bu yeni standart, GJGS'nin istenmeyen ancak bu standardın doğal özelliği olan iki problemini çözmektedir. PJGS'nin bir kuantum adımından diğerine hızlı geçme yeteneği nedeniyle adım basamak yaklaşımıyla kuantum dalgalar da sentezlenebilmektedir. Kuantum dalgalar sentezleyebilme yeteneği nedeniyle PJGS elektrik metrolojisinin temelini oluşturmaktadır [11], [12].



**Şekil 1.** Josephson Ekleminin Yapısı, Sürülmesi ve Mikrodalga Güç Uygulandığında DC Akım-Gerilim Eğrileri [5]

Kurulu AC gerilim metrolojisi DC gerilim Metrolojisi kadar Kuantum doğruluktan yararlanamamaktadır. AC-DC transfer standartları en düşük 3  $\mu\text{V/V}$  belirsizlikle kalibre edilebilmelerine rağmen AC gerilim kaynakları en düşük 11  $\mu\text{V/V}$  belirsizlikle kalibre edilmektedir [13]. AC-DC transfer standartlarının izlenebilirliğini AC gerilim büyüklüğüne aktarma işleminden kaynaklanan ilave belirsizlik kaynakları AC gerilim kaynaklarının belirsizliğini arttırmaktadır. Belirsizlik kaynaklarından biri de yüklenme etkileridir.

Yüklenme etkilerini PJGS ile birlikte örnekleme hızı yüksek bir ADC'nin birleşiminden oluşan kuantum voltmetre ile ihmal edilebilecek düzeye indiren ve ayrıca doğrudan AC gerilimi yeni SI [9] sistemine bağlayan sistem [14]'de önerilmiş ve [15,16,17]'de gerçekleştirilmiştir. Bu bildiri öncelikle, [14]'deki ile aynı prensipte çalışan ve TÜBİTAK UME'de kurulan sistem tanıtılmış ve bu sistemle kalibre edilen kararlı DAC'ın ölçüm sonuçları sunulmuştur.

## 2. SİSTEM BİLEŞENLERİ

Kuantum Voltmetre, PJGS Sistemi ile onunla eşzamanlı çalıştırılan yüksek örnekleme hızına sahip bir ADC'den oluşmaktadır. Şekil 2'de Kuantum voltmetrenin bir DAC kalibrasyonu esnasındaki bağlantı şeması, Şekil 3'de ise aynı kalibrasyon esnasında çekilen resmi verilmiştir. Aşağıda kısaca tanıtılan PJGS sistemi ayrıntılarıyla [18]'de anlatılmıştır.

PJGS'nin kalbi, aşırı sönmülmüş JE'leri, çip üstü kapasiteler ve mikrodalga dağıtım mimarisinden oluşan Süper-iletken Tüm-Devredir (STD) [19]. Entegre devre Q-Wave ve QuADC [20] projelerindeki iş-birliği içinde PTB'den (Almanya Metroloji Enstitüsü) ödünç alınmıştır. Tümdevrede, süper iletken olarak Neobyum (Nb) kullanılmıştır. Nb'nin süper iletkenlik sıcaklığı 9.2 K'dır. 9.2 K'ın altındaki sıcaklık ortamı, bir Dewar'daki sıvı helyum tarafından sağlanmıştır. Dewar, bir dış vakum katman ve içi sıvı helyum olan bir diğer katman olmak üzere iç içe kaplardan oluşan sıcaklık yalıtımlı bir kaptır. Helyum gazının sıvılaştığı sıcaklık 4.2 K'dır.

Şekil 2'de gösterilen bir taşıyıcı üzerindeki entegre devre, prop adı verilen bir aygıt ile sıvı helyum içine daldırılır. Bu prop [18]'de anlatıldığı gibi UME'de üretilmiştir. Proben görevi, STD'yi sıvı helyum içine batırmanın yanı sıra, Şekil 1'de gösterilen ac ve dc akımları STD'ye iletmektir. Süperiletkenliğin dış manyetik alanlardan etkilenmesini önlemek için, STD manyetik bir kalkan ile çevrelenir.

Mikrodalga kaynak, Şekil 1'de gösterilen yüksek frekanslı ac işaretleri uygular. Adımların kararlı çalışması için STD antenine ulaşması gereken mikrodalga güç, yaklaşık 50 mW civarındadır. Mikrodalga kaynağının fazını kilitlemek ve böylece frekans doğruluğunu arttırmak için kararlılığı yüksek olan bir rubidyum veya sezyum osilatör kullanılır. Şekil 3'deki resimde görülen mikrodalga kaynak [18]'de anlatıldığı gibi TÜBİTAK bünyesinde üretilmiştir.

Şekil 1'de gösterilen dc akım, her bir JE dizisi için ön-gerilimleme ('bias') elektroniği tarafından sağlanır.

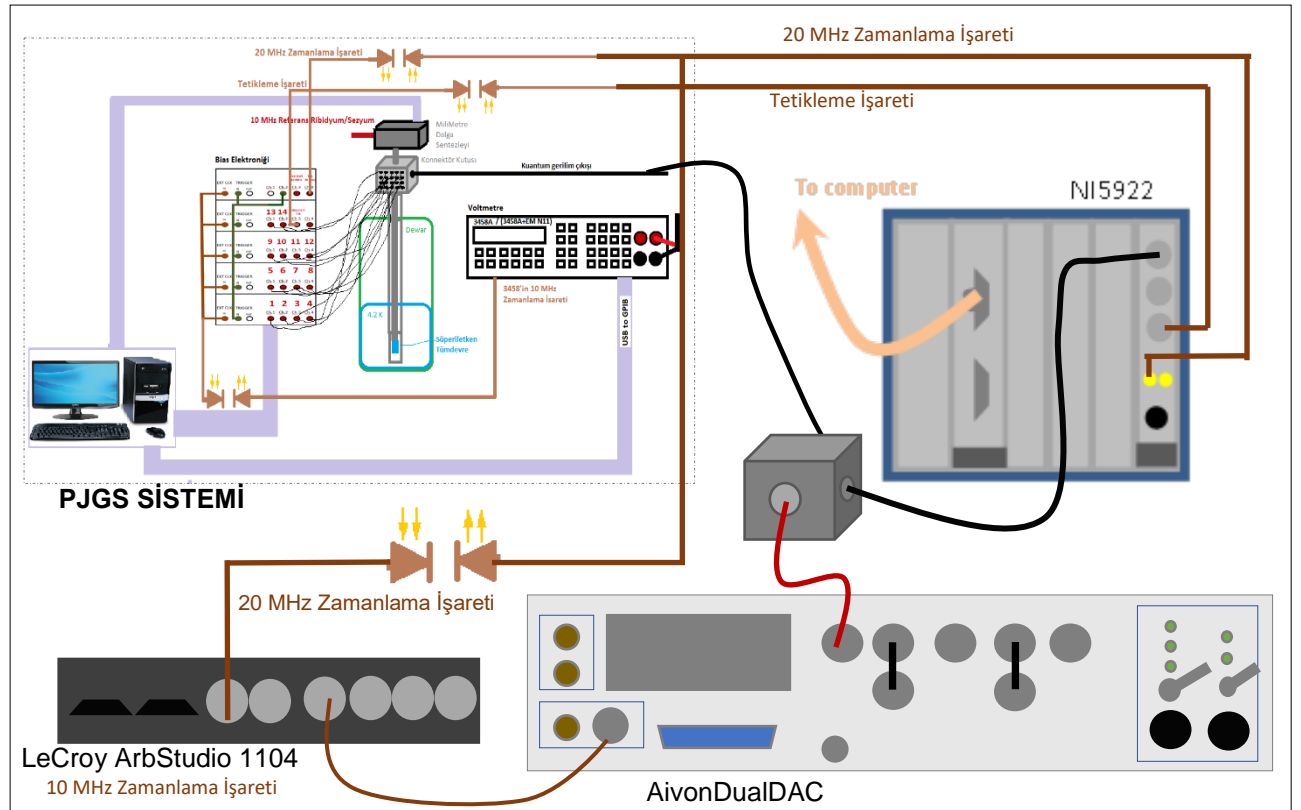
Kullanılan STD'de 14 bağımsız JE dizisi vardır. Akım-elektroniği de 14 adet farklı kanala sahiptir. Her bir kanal, kısa dönem kararlılığı 30  $\mu\text{V/V}$  olan DAC'lar ve DAC'lara seri bağlı 50  $\Omega$  değerindeki dahili dirençlerden oluşur ve [18]'de ayrıntılarıyla anlatıldığı gibi kalibre edilir. Bu akım elektroniği içinde yer alan her bir kanala ayrılmış özel hafızalar kullanılarak, aynı anda herhangi bir şekle sahip olan işaretler üretilebilir. Her kanal 50  $\Omega$  yükte 12 V tepe tepe gerilimi sağlayabilmektedir. DAC'lar, her kanal için en az 1 GS / s örnekleme hızıyla en az 16 bit çözünürlükte işaret üretebilmektedir. Kanallar birbirleriyle eş zamanlı olarak ve harici zamanlama ve tetikleme işaretleriyle çalıştırılabilmektedir. Kanallar arasındaki senkronizasyon (gecikme), 50 GHz Modüllü örnekleme osiloskop Agilent 86100B kullanılarak 3 ns'den küçük olarak ölçülmüştür. Elektroniğin yazılım aracılığıyla kontrolü, Şekil 2'de gösterildiği gibi optik olarak izole edilmiş bilgisayar bağlantısı üzerinden sağlanmaktadır. PJGS kontrol yazılımı, LabView uygulama geliştirme programı kullanılarak UME'de yazılmıştır. [18]'de yazılımın kullandığı formüller verilmiştir ve aynı zamanda STD ve akım-elektroniğinden oluşan devre üzerinden bu formüllerin nasıl elde edildiği anlatılmıştır.

PJGS geriliminin, kuantum doğruluğundan yararlanabilmek için, topraktan bağımsız üretilmesi gerekir: Bu nedenle, senkronizasyon işaretleri optik "verici" üzerinden optik işaretlere ve daha sonra optik "alıcı" üzerinden tekrar elektrik işaretlere dönüştürülerek iletilmektedir. Bu işlem, UME'de üretilen ve [18]'de anlatılan optik alıcı-verici sistemleri ile gerçekleştirilir.

Üretilen Josephson geriliminin kuantum adımda olup olmadığını kontrol eden 28 bitlik bir multimetre (voltmetre) de sistemin bir parçası olarak kullanılır. Bilgisayardaki yazılım DAC'ların gerilimini hesaplar ve hesaplanan gerilim bilgilerini DAC'lardan oluşan ön-gerilimleme (akım) elektronikğine yükler, multimetre ise ölçüm verilerini alır. Bilgisayar, akım-elektroniği ve multimetre arasındaki iletişim, uzun mesafeli bilgisayar iletişimi için üretilmiş olan optik 'hub'lar kullanılarak gerçekleştirilir. Sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.

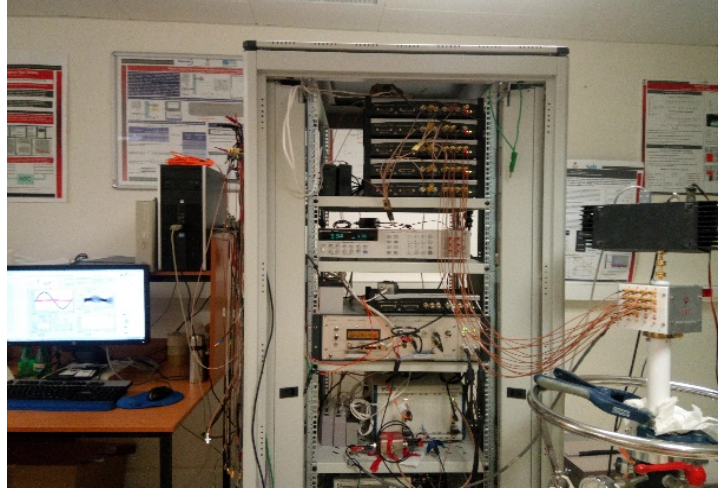
PJGS Sistemi kuantum voltmeriyi gerçekleştirebilmek için iki adet ilave işaret üretmektedir. Bu işaretler 20 MHz frekansındaki zamanlama (Clock) ve ölçümleri başlatmak için tetikleme işaretidir. Sistemdeki ADC ve DAC'ların hepsi cihazlar arasındaki akım döngülerinden kaynaklanan gürültüleri önlemek için bağımsız akülerle çalıştırılmıştır.

Fark ölçümlerinde kullanılan hızlı ADC, PJGS elektronikği tarafından sağlanan 20 MHz harici zamanlama işareti ile çalıştırılmaktadır. Üretilen kuantum adımı ile, ADC ile alınan fark ölçümlerini eşleştirebilmek için ölçümleri başlatma işaretine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iki işaret de optik alıcı verici sistemi ile PJGS sisteminden ADC'ye iletilmektedir.



Şekil 2. Kurulan Kuantum Voltmetre ile DAC'ın Bağlantı Şeması

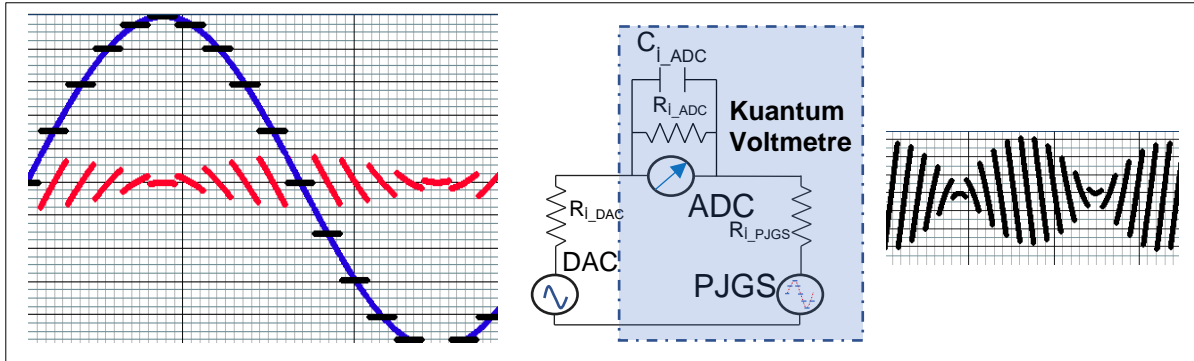
Kuantum Voltmetreyle kalibre edilen kararlılığı yüksek DAC [21]'de anlatıldığı gibi DDS (Direct Digital Synthesis, Doğrudan Sayısal Sentez) prensibi ile çalışmaktadır. Bu DAC da harici zamanlama işareti ile çalıştırılabilmektedir ancak harici frekansı 10 MHz'dir. PJGS ile kalibre edilen DAC arasındaki faz farkı ve ölçüm esnasında oluşan faz kaymaları ölçüm belirsizliğini etkilemektedir. Düşük ölçüm belirsizliği için, bu DAC da ilave işaret üretici kullanılarak PJGS ile eş zamanlı çalıştırılmıştır. İlave işaret üreticisine zamanlama işareti, cihazların ekranları arasındaki akım döngülerinden kaynaklanacak gürültüleri bertaraf edebilmek için yine optik alıcı verici kullanılarak aktarılmıştır.



Şekil 3. Kurulan Kuantum Voltmetre ile DAC'in Ölçüm Esnasındaki Fotoğrafi

## 2. ÖLÇÜMLERİN ALINMASI

Şekil 2'de bağlantı şeması ve Şekil 3'de fotoğrafı görülen sistemin elektrik devresi şeması Şekil 4'deki gibi basitleştirilebilir. Üretilen kuantum işaret, ölçülecek işaretin değerine ve fazına ne kadar yakınsa bir fark ölçer olarak kullanılan ADC'nin ölçtüğü gerilim o kadar küçük olur. ADC'nin ölçtüğü gerilim ne kadar düşük ise fark ölçerin kazanç hatası ve kararlılığının ölçüm belirsizliğine etkisi o ölçüde düşük olur. Her iki gerilim üreticinin değerlerinin yakın olmasının getirdiği bir diğer fayda da ölçüm sisteminin kalibre edilen cihazdan akım çekmemesidir. Bu durum yüklem hatalarını ihmal edilebilecek düzeylere indirmektedir.



Şekil 4. Ölçüm Sisteminin Elektrik Devre Şeması ve İşaretleri

Ölçümlerin alınmasının ilk adımı PJGS sistemini hazırlamaktır. Bu hazırlık işlemleri ayrıntılarıyla [18]'de verilmiştir ve 'bias' elektronüğünün kalibrasyonu, çipin soğutulması, her soğutmaya özgü olabilen uygun mikrodalga frekans ve gücün bulunması, bulunan optimum mikrodalga frekansına ve gücüne bağlı olarak değişen her bir eklem grubunun (segmentin) öngerilimleme ('bias') akımlarının bulunması ve bu akımların yazılıma girilmesinden oluşmaktadır.

PJGS Sistemi hazırlandıktan sonra kalibre edilecek DAC'ın genlik ve frekans bilgisinin yanı sıra kaç adımda kuantum referans işaretinin üretileceği PJGS yazılımına girilir. Adım sayısının artması fark ölçerin ölçeceği fark işaretini küçültürken daha çok gerilim adımın kuantum durumunda olup olmadığını kontrol etmeyi gerektirir. Bu bildirideki ölçümlerde adım sayısı 20 veya 32 olarak seçilmiştir.

Hazırlanan PJGS yazılımının 'ADC Lineerite' adlı segmesinden sistemin bir parçası olan multimetrenin doğrusallık ölçümleri [22]'deki gibi gerçekleştirilir. Bu işlemle her bir adımın kuantum olup olmadığı yine [22]'de anlatıldığı gibi kontrol edilir. Statik koşullarda gerçekleştirilen bu ölçümlerde [20]'deki tümdevrenin, her bir adım için en az 400  $\mu\text{A}$  akım aralığı olup olmadığı kontrol edilir.

Daha sonra PJGS sistemi AC gerilim üretecek şekilde çalıştırılır. Bu çalıştırma için PJGS sistemi içindeki dahili tetikleme işareti (PJGS elektronikğinde gösterilen yeşil hat) bağlanır. Yüksek hızlı ADC'ye PJGS'den dağıtılan zamanlama ve tetikleme işaretleri bağlanır. PJGS'nin çıkışı 28 bitlik voltmetreden sökülerek doğrudan yüksek hızlı ADC'nin girişine bağlanır. Yüksek hızlı ADC'nin de kazancı dinamik koşullarda belirlenir. Bu kazanç belirleme işlemi esnasında ölçümün dinamik akım aralıklarının en az 100  $\mu\text{A}$  olup olmadığı da kontrol edilir.

Daha sonra kalibre edilen DAC ile PJGS'nin, Şekil 2'de gösterilen diferansiyel kutusu aracılığıyla, düşük potansiyelleri kısa devre edilir, yüksek potansiyelleri ise yüksek hızlı ADC'nin birinci kanalına uygulanır. Bütün bağlantılar öncesinde STD üzerinde manyetik akı tuzaklamalarını önlemek için mikrodalga güç kapatılır, bias elektroniği önce sıfır akıma ayarlanır sonra kapatılır.

Bütün bağlantılar tamamlandıktan sonra PJGS çalıştırılır. Kalibre edilen DAC'ın fazı, fark ölçer minimum tepe-tepe gerilimini okuyuncaya kadar, ilave işaret üretici aracılığıyla kaydırılır. PJGS'nin bir kuantum adımdan diğerine geçişi esnasında, adımların sağında ve solunda kuantum olmayan geçici dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu dalgalanmalar esnasında alınan örnekler, ölçüm sonucu hesaplanırken değerlendirmeye alınmamalıdır. Değerlendirmeye alınmayacak olan adımların sağdan ve soldan toplam süresi 40  $\mu\text{s}$  civarındadır. Kuantum adımların sağından ve soldan silinecek örneklerin sayısına, bu süre ve ADC'nin örnekleme frekansı dikkate alınarak karar verilir ve bu sayı yazılıma girilerek ölçüm başlatılır.

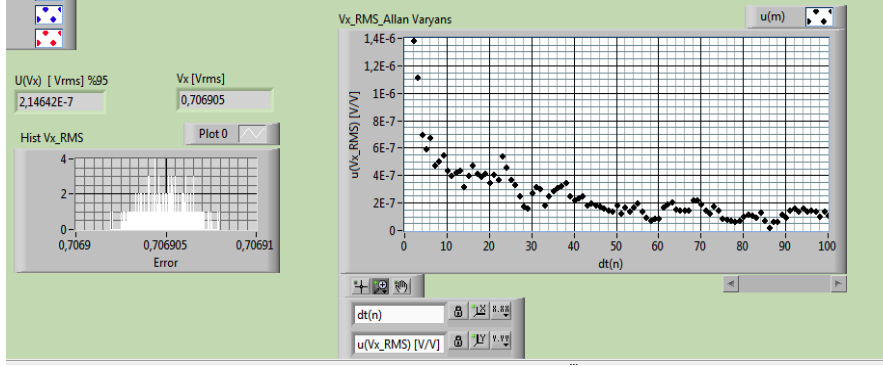
Kuantum olmayan örnekler yazılım tarafından silinir. Kalan örneklerin kazanç hataları düzeltilir. Kuantum voltmetre yazılımı, ölçülen işaretin etkin (RMS) değerini ve periyot sayısına bağlı olarak ölçülen RMS değerinin istatistiklerini Şekil 5'deki gibi ekranında göstermektedir. Bu çıktıların yanı sıra yazılım, zaman ve o zamana karşılık kuantum doğrulukla ölçülen işaretin örneğini çıktı dosyası olarak üretmektedir. Bu çıktı dosyası kullanılarak sayısallaştırılan işaretin, etkin değerinin yanı sıra, fazı ve harmoniği gibi başka dalga parametreleri de değerlendirilebilmektedir.

### 3. ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 4'de mavi ile gösterilen sinüzoidal işaret DAC çıkışının kuantum voltmetre ile ölçülen değeridir. Bu işaret, her bir noktada kırmızı ile gösterilen ADC işareti ile siyah ile gösterilen kuantum işaretler toplanarak elde edilmiştir. Şekil 4'ün en sağında ADC ile elde edilen işaretin zamana bağlı oluşan deseni görülmektedir. Bu desenin tepe değeri DAC'ın ürettiği işaretin eğiminin en büyük olduğu sıfır geçişlerinde oluşmaktadır. Bu desenin genliği PJGS'nin adım sayısı artırılarak, DAC'ın ürettiği işaretle PJGS'nin ürettiği işaret arasındaki faz ve genlik farkı azaltılarak düşürülebilir. ADC ile ölçülen işaretin genliğinin azalması, yükleme hatalarını, ADC'nin kazancı ve kazancının kararlılığından kaynaklanan belirsizlikleri ihmal edilebilir seviyelere düşürmektedir.

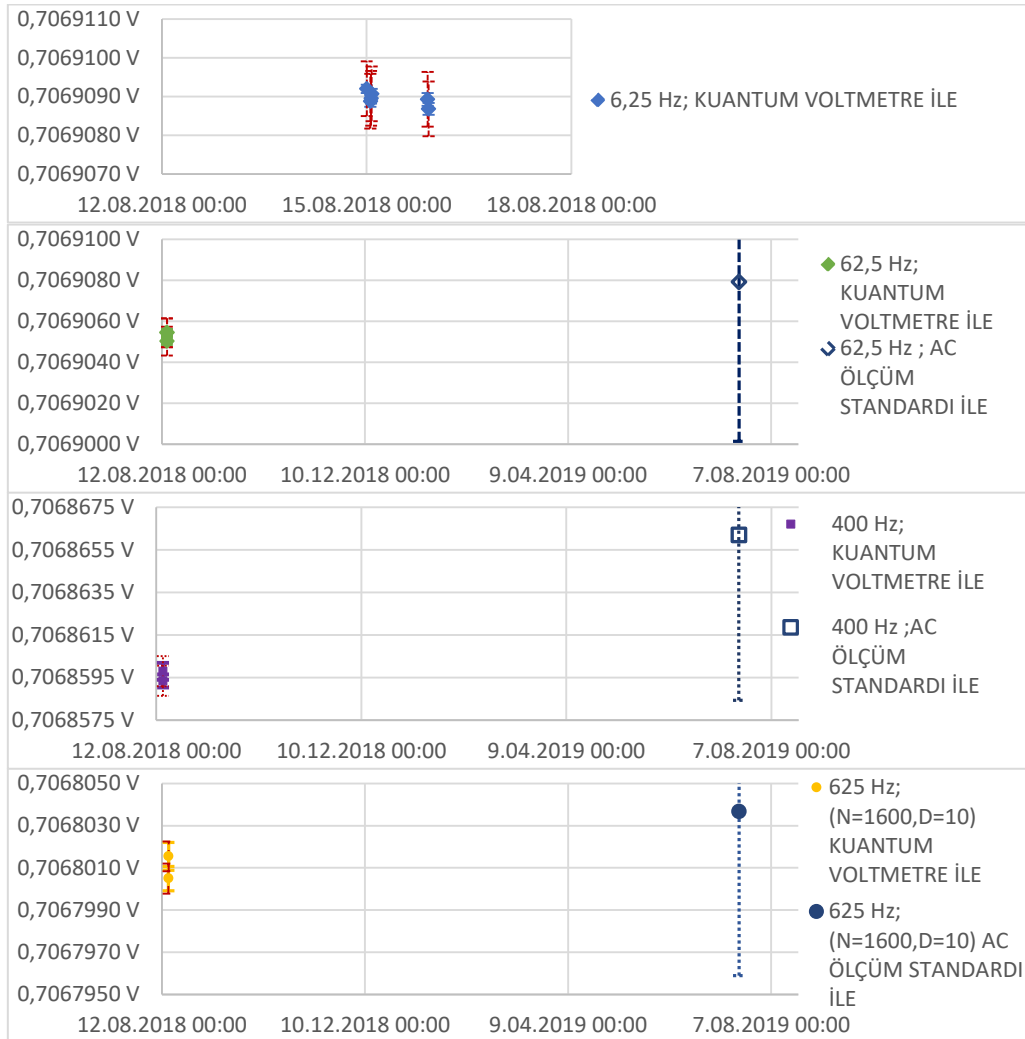
Kuantum Voltmetre ile DAC'ın, 6,25 Hz, 62,5 Hz, 400 Hz ve 625 Hz frekanslarında, referansının 0,141136 değerine ayarlandığı 0,707 Vrms anma genliğine sahip gerilimleri ölçülmüştür. Ölçümlerde kullanılan ile aynı modeldeki bir diğer DAC, [23]'de raporlanan karşılaştırmada kullanılmıştır. Karşılaştırma esnasında DAC'ın kısa dönem kararlılığı 1  $\mu\text{V/V}$ , uzun dönem kararlılığı ise (6 aylık) sırasıyla yukarıdaki ilk üç frekans için 2  $\mu\text{V/V}$ , 2  $\mu\text{V/V}$  ve 4  $\mu\text{V/V}$  olarak ölçülmüştür [23].

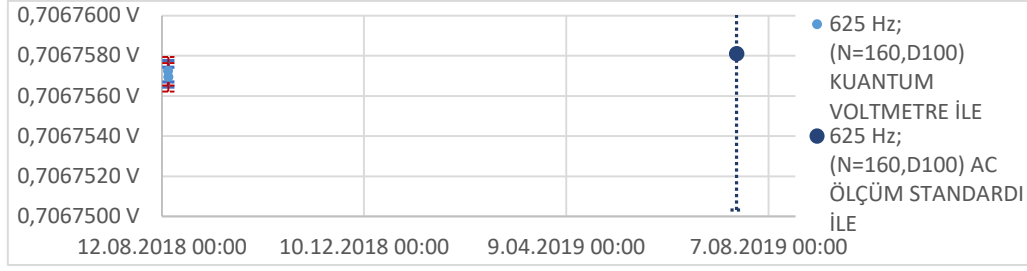
Önceden belirlenen periyot sayısı kadar ölçüm alındıktan sonra yazılım, periyot sayısına bağlı olarak RMS formülü kullanılarak hesaplanan RMS değerinin Allan Varians'ını Şekil 5'deki gibi ekranında göstermektedir. Ölçümün 1  $\mu\text{V/V}$  altındaki bu A tipi belirsizliği kuantum voltmetrenin çalıştırılabilirliğinin göstergelerinden biridir.



**Şekil 5.** Kuantum Voltmetre Yazılımının 62,5 Hz Ölçümü Esnasında Ürettiği İstatistik Sonuçlar

Şekil 6'da Kuantum voltmetreyle farklı frekanslarda ve farklı tarihlerde alınan ölçümler özetlenmiştir. Alınan ölçümler, ölçüm sonuçlarının AC kaynağın kısa dönem kararlılığı içinde olduğunu göstermektedir. Ölçüm sonuçlarıyla aynı renkteki hata çubukları ölçüme ait A tipi belirsizliği göstermektedir. Kırmızı renkli hata çubukları ise DAC'ın üretici tarafından beyan edilen kısa dönem kararlılığını göstermektedir. 10 Hz üzerindeki işaretler aynı zamanda AC Ölçüm Standardı ile ölçülmüştür ve Şekil 6'daki grafiklerde lacivert renkli işaretçilerle gösterilmiştir. Lacivert renkli hata çubuklarıyla UME'nin CMC'lerde beyan edilen belirsizlikleri gösterilmiştir.





**Şekil 6.** Kuantum Voltmetre ile Alınan Ölçümler ve Bu Ölçümlerin Kurulu AC Gerilim Ölçüm Teknikleriyle Karşılaştırılması

## SONUÇ

Bu bildiriye AC gerilim ölçümlerini doğrudan yeni SI'ya izlenebilir kılan UME'de kurulan kuantum voltmetre tanıtılmıştır. Kauntum voltmetrenin ölçüm devresi verilerek, fark ölçerin kazanç ve iç empedansının ölçüm sonucunu ve kaynağı nasıl etkilemediği gösterilmiştir. Kurulan kauntum voltmetre ile ölçüm alma prosedürü ayrıntılarıyla anlatılmıştır. Kauntum voltmetreyle kararlılığı yüksek, başka bir deyişle A tipi ölçüm belirsizliği düşük ölçümlerin alınabileceği gösterilmiştir. Ultra kararlı yarı iletken DAC'ın genliği, kurulan Kauntum Voltmetre ile 625 Hz'e kadar kalibre edilmiştir. Ölçümler AC Ölçüm Standardı ile de tekrarlanmıştır. Alınan ölçümler sunularak ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçta ultra kararlı DAC'ların, kuantum voltmetreyle, daha düşük belirsizliklerle kalibre edilebileceği gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling," *Phys. Letters*, vol. 1, no. 7, pp. 251-253, 1962.
- [2] Anderson P. and R. J. M., "Probable observation of the Josephson superconducting effect," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 230-232, 1963.
- [3] S. Shapiro, "Josephson currents in superconducting tunneling: The effect of microwaves and other observations," *Phys. Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 80-82, July, 1963.
- [4] P Pöpel and R., "The Josephson effect and voltage standards," *Metrologia*, vol. 29, no. 2, pp. 153-174, 1992.
- [5] V. Sienknecht and T. Funck, "Realization of the SI unit volt by means of a voltage balance," *Metrologia*, vol. 22, no. 3, pp. 209-212, 1986.
- [6] B. N. Taylor, T. J. Witt, "New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects" *Metrologia*, vol. 26, no. 1, pp. 47-62, 1989
- [7] B. N. Taylor, T. J. Witt, "New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects" *Metrologia*, vol. 26, no. 1, pp. 47-62, 1989
- [8] CCEM, "Guidelines for Implementation of the 'Revised SI' ", Version 1.0, 08.12.2017
- [9] N. Fletcher, G.Rietveld, J. Olthoff, I. Budovsky, M. Milton "Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values", *NCSLI Measure*, Vol. 9, Iss. 3, 2014
- [10]R. L. Kautz, "On a proposed Josephson effect voltage standard at zero current bias," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 36, no. 5, pp. 386-388, 1980.
- [11]R. Behr, O. Kieler, J. Kohlmann, F. Müller, L. Palafox, "Development and metrological applications of Josephson arrays at PTB," *Meas. Sci. Technol.*, vol.23 , no. 12, pp. 124002 (19 pp) , 2012.
- [12] J. Lee, R. Behr, B. Schumacher, L. Palafox, M. Starkloff, A. C. Böck, and P. M. Fleischmann, "From AC quantum voltmeter to quantum calibrator," presented at Conf. on Precision Electromagnetic Measurements, Ottawa Canada, 10-15 July, 2016.
- [13] <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/laboratuvar-altyapisi-7>



- [14] "R.Behr, et al. "Direct Comparison of Josephson Waveforms Using an AC Quantum Voltmeter", IEEE Trans. Instrum. Meas., Issue 56, p. 235-6,2007
- [15] A. Rufenacht, C. J. Burroughs, and S.P.Benz 2008, "Precision Sampling Measurements Using Programmable Josephson Voltage Standard", Rev. Sci. Instrum., 044704 (79)
- [16] J. Lee et al., " An ac quantum voltmeter based on a 10 V Programmable Josephson Array", Metrologia, Issue 50, p. 612-622, 2013
- [17] M. S. Kim et al., "Analog to digital conversion for low frequency waveforms based on the Josephson Voltage Standard" Meas.Sci.Technology,115102(21),2010
- [18] Coskun Ozturk, T., Erturk, S., Tangel, A., Gedik, A., Yogun, M., Celep, M. "Establishing Programmable Josephson Voltage Standard and Maintaining its Quantum Accuracy", International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications, 8:1 (2019) : 19-25
- [19] F. Mueller, R. Behr, T. Weimann, L. Palafox, D. Olaya, P. D. Dresselhaus, and S. P. Benz, "1 V and 10 V SNS programmable voltage standards for 70 GHz," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, no. 3, pp. 981-986, Jun. 2009.
- [20] EMPIR (2015). "QuADC: Waveform metrology based on spectrally pure Josephson voltages." [Online] Available: <https://www.ptb.de/empir/quadc-project.html>
- [21] Nissila, J. and et al., "Stable Arbitrary Waveform Generator as a Transfer Standard for ADC Calibration" Conf. on Prec. Electromagnetic Meas, (CPEM 2016) Ottawa, 10-15.07.2016,
- [22] Coskun Ozturk, T., Erturk, S., Tangel, A., Arifovic, M., Turhan, S. "Metrological Measurements Using Programmable Josephson Voltage Standard ", IEEE Xplore, 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2017 , -:- (2018) : 1117-1121
- [23] M. Sira,, J.D.d Aguiler,, T. Coskun Ozturk, J.Lee, R. Behr, , J.Nissila, "Comparison of Sampling Voltage Measurements of Multi-Tone Signals", 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), -:-Article number 8501071 (2018) : 2 s

## ÖZGEÇMİŞ

### Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK

Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisansını Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Müh. ABD'da 2004 yılında tamamlamıştır.

2002 yılında TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda göreve başlamıştır. Burada "Yüksek Doğruluklu Kalibratörlerin AC İşaret Kaynağının Doğrudan Sayısal Sentez Tekniği ile Gerçekleştirilmesi" konulu yüksek lisans çalışmasını tamamlamıştır. Halen UME Gerilim Laboratuvarı'nda birincil seviyede DC oran, gerilim ve akım standartlarının oluşturulması, muhafazası ve kalibrasyonu konularında çalışmaktadır. Uzmanlık alanı DC ve düşük frekans gerilim, akım ve direnç ölçüm/kalibrasyonları ve belirsizlik hesaplamalarıdır. Endüstriye eğitim, kalibrasyon ve test hizmetlerinin verilmesinde, ulusal ve uluslararası karşılaştırmalarda görev almaktadır.

2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Müh. ABD'da doktora öğrenimine başlamıştır. Şu anki ilgi alanları AC Josephson Gerilim Standartlarının Kurulumu ve bu standartların kullanıldığı elektriksel ölçümlerdir.

### Sarp ERTÜRK

1995 yılında Ankara, Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden Elektrik-Elektronik Mühendisliği derecesini aldı. 1996 ve 1999 yıllarında Essex Üniversitesi'nden Elektronik Sistemler Yüksek lisans ve doktora dereceleri aldı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi'ne Yrd. Doç. Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde 2008 yılında aynı bölümde Profesör Dr. derecesini aldı.

Başlıca uzmanlığı: Görüntü İşleme, Sinyal İşleme, Uzaktan Algılama, Gömülü Sistemler. İlgili alanları Bilgisayar Görme, Dijital İletişim, Bilgi Sistemleri ve Devreler ve Sistemlerdir.

**Ali TANGEL**

1986'da Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nden Elektronik Mühendisliği dalında lisans derecesi aldı. 1991 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektronik Mühendisliği alanında yüksek lisans derecesi aldı. Amerika Birleşik Devletleri'nden 1999'da Pennstate Üniversitesi'nden doktora derecesini aldı. 1987-1993 yılları arasında Ankara Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. 1993 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümüne katıldı ve 2011 yılında doçent oldu. Halen aynı bölümde profesör olarak çalışmaktadır. Ana uzmanlık alanları Analog ve Karışık Sinyal Elektronik Devre Tasarımları, VLSI Tasarımı, Alan Programlanabilir Kapı Dizileri ve Uygulamaları ve Yarı İletken Elektroniklerdir.

**Mehedin ARİFOVİÇ**

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisans eğitimini Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Elektronik alanında tamamlamıştır.

1997 yılında TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. Birincil seviyede AC/DC gerilim ve akım ölçümleri, referans cihazların yapımı, ölçüm otomasyonu ve ISO 17025 Kalite Sistemi konularında çalışmaktadır. Halen UME Gerilim Laboratuvarı sorumlusu olarak görev yapmaktadır.