

# Josephson Gerilim Standardı Sistemi İçin Milimetre Dalga Sentezleyici Millimeter Wave Synthesizer for Josephson Voltage Standard System

İlhami Ünal<sup>1</sup>, Mustafa Tekbaş<sup>2</sup>, Adem Kaya<sup>1</sup>, Tezgül Coşkun Öztürk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Milimetre Dalga ve Terahertz Teknolojileri Araştırma Laboratuvarları (MİLTAL)  
TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü  
ilhamsi.unal@tubitak.gov.tr, adem.kaya@tubitak.gov.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi  
mustafatekbas@kmu.edu.tr

<sup>3</sup>Gerilim Laboratuvarı  
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)  
tezgul.ozturk@tubitak.gov.tr

## Özet

*Bu çalışmada, milli imkânlarla TÜBİTAK MAM tarafından, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Gerilim Laboratuvarı'nda Josephson Gerilim Standardı (JGS) Sistemi'nde yer alacak olan ve 69-71 GHz frekans aralığında çalışan milimetre dalga sentezleyici geliştirilmiştir. Sentezleyicinin JGS'de kullanılabilmesi için belirlenen teknik özellikler ve geliştirilen sentezleyici sunulmuştur. Milimetre dalga sentezleyici modülü; PLL kontrollü VCO ile kontrol ve güç birimi, x8'li frekans katlayıcı, filtre, ayarlı zayıflatıcı, izolatör, güç yükseltici, PIN zayıflatıcı ve gerekli dalgakılavuzu bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Yazılan bir bilgisayar arayüzü üzerinden milimetre dalga sentezleyici modülünün, WR-12 dalgakılavuzu standardındaki çıkışının gücü ve frekansı kontrol edilip ayarlanabilmektedir.*

## Abstract

*In this study, a millimeter wave synthesizer operating between 69-71 GHz has been developed by TUBITAK Marmara Research Center using national sources for Josephson voltage standard (JGS) systems which is already developed at TUBITAK National Metrology Institute (NMI) Voltage Laboratory. Technical specifications of the synthesizer to be used in JGS and the developed synthesizer has been presented. Millimeter wave synthesizer module includes; PLL controlled VCO with control and power unit, x8 solid state multiplier, band pass filter, variable attenuator, isolators, power amplifier, PIN attenuator and waveguides required. The output power and frequency of the millimeter wave synthesizer module in WR-12 waveguide standard is controlled using a computer interface.*

## 1. Giriş

Süper iletkenliği açıklayan BCS teorisi süper akımın elektron çiftleri ile taşındığını öngörür. 1962 yılında Brian Josephson süperakımın yalıtkan bir engel üzerinden nasıl tünelleneceğini açıklayan ünlü Josephson denklemini geliştirir. Bu denklem süper iletken yalıtkan ve süperiletken oluşun bir eklem DC gerilim ile uyarıldığında eklem DC doğal frekansı ile salınan bir osilatör olarak davranacağını öngörür. Eklem, DC doğal frekansının birkaç katındaki **milimetre dalga ile modüle edilmiş bir DC akım** ile uyarıldığında ise, eklem üzerinde (1) eşitliği ile ifade edilen sabit gerilim adımları gözlemlenir. Bu etki AC Josephson Etkisi olarak anılmaktadır. Burada;  $n$  bir tam sayı,  $h$  plank sabiti,  $e$  ise elektron yüküdür. Başka bir deyişle AC Josephson etkisi, temel fiziksel sabitler aracılığıyla gerilimi frekansa bağlayan doğal bir etkidir

$$VJ = n \cdot f_c \cdot h / 2e \quad (1)$$

AC Josephson etkisinin keşfi ve dünya genelinde metroloji enstitüleri tarafından kullanımı ile gerilim büyüklüğünün ölçümündeki birlik çığır atlamıştır. Bu nedenle Josephson Gerilim Standardı dünya genelinde gerilimi **temsil** eden birincil standart olarak kullanılmaktadır.

Geleneksel Josephson Gerilim Standardı olarak adlandırılan ve sadece DC'de kullanılan 1998'den beri TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarında çalıştırılmakta olan sistemde bütün  $n$  adımları (Shapiro adımları) milimetre dalgayı modüle etmekte kullanılan DC akımın  $0 \mu A$  değerinden geçmektedir. Josephson eklemının türü ile ilgili olan bu durum homojen eklem üretmemeye probleminde bir çözüm olarak bulunmuş ve yaygınlaşmıştır.

Geleneksel Josephson Gerilim Standardı (GJGS) sistemi, Josephson eklem dizisi, dizinin monte edildiği ve sıvı helyuma daldırıldığı prob, diziyeye mikrodalga güç uygulayan

bir gunn osilatör, gunn osilatör ile birlikte kullanılan bir mikrodalga zayıflatıcı, mikrodalga frekansı harici PLL döngüsü kurarak 10 MHz değerindeki referans frekansa kilitleyen bir sayıcı, istenen adım sayısını uyarıcı DC akım kaynağı, uygun çalışma noktasını gözlemek için kullanılan bir osiloskop, ve opsiyonel olarak, seçilen adımı tespit etmek için sisteme eklenen bir gerilim ölçerden oluşmaktadır.

Homojen eklem üretme teknolojisinin gelişmesiyle aynı kritik akıma sahip ve seri bağlı bir çok eklem üretilebilmiştir. Eklem üretme teknolojisindeki bu gelişme ile, milimetre dalgayı modüle etmekte kullanılan DC akım değiştirilerek,  $n=-1,0,1$  VJ (shapiro) adımlarını uyaraabilen standartlar geliştirilmiştir. Daha kolay kontrol edilen ve bir Josephson gerilim adımından diğerine daha hızlı geçmeyi sağlayan yeni nesil standartlar Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı (PJGS) olarak adlandırılmıştır. Bir Shapiro adımından diğerine geçişin hızlı olması nedeniyle bu standart ile DC - kHz frekanslarına sahip AC gerilimler sentezlemek de mümkün olmuştur.

PJGS standardı da metroloji enstitüleri arasında hızlıca yaygınlaşmakta ve elektriksel metrolojinin diğer dallarının yanı sıra, çok önemli olan ADC'lerin dinamik kalibrasyonlarında kullanılmaktadır. Kuantum empedans köprülerinde ise iki adet PJGS standardı aynı anda kullanılmaktadır.

TÜBİTAK UME'de GJGS sisteminde kullanılan akım kaynağı ve eklem dizilerinden oluşan süper iletken tümdevre değiştirilerek PJGS sistemi çalıştırılmıştır. Tümdevre üzerinde, bağımsız çalıştırılan eklem grubu sayısı arttıkça ( Bit sayısındaki artış ile) sistemin kararlı çalıştığı (DC akımın değişmesi ile VJ adımının sabit kaldığı) akım aralığı azalmaktadır. Bu akım aralığına dizinin marjinerleri denilmektedir ve [1]'de tarif edildiği gibi sistem, marjinerlerin orta noktasında çalıştırılmalıdır.

[1]'de gösterildiği ve [2]'de (7) numaralı eşitlikle tanımlandığı gibi marjinerler çipe iletilen mikrodalga güçten etkilenmektedir. Çipe iletilen mikrodalga güç, probun yapısına, süperiletkenlik sıcaklığını sağlayan helyumun seviyesine bağlıdır ayrıca da çipin helyuma daldırılışı ile de değişmektedir.

Prop üzerinde oluşmakta olan ve akım marjinerlerini azaltan rezonanslar, probun helyuma her daldırılışında 10 MHz'lik çözünürlükle optimum frekansın taranmasını ve akım marjinerlerinin ölçülmesini gerektirmektedir.

Dizinin 0. ve +/-1. adımlarının marjinerleri mikrodalga güce bağlı olarak değişmektedir ve aralarında doğrusal bir ilişki yoktur. Josephson denkleminin besel fonksiyonlarıyla çözümü ile açıklanan bu durumda da yine yüksek çözünürlükle mikrodalga güç değiştirilerek akım marjinerlerinin ölçülmesi ile optimum güç bulunur. Geleneksel GJGS sistemindeki gibi mikrodalga güç uygulayan bir gunn osilatör ve sayıcı merkezli bir PLL döngüsü PJGS sisteminin uygun marjinerlerde çalıştırılabilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerle birçok enstitü hem GJGS hem de PJGS sistemlerinde [3]'deki gibi Milimetre Dalga Sentezleyiciler (MMDS) tercih etmektedirler.

PJGS sistemleri, ısıl çeviricilerin düşük frekanslarda kalibrasyonunda kullanılmaktadır. Bu kalibrasyon için

Josephson gerilimi çok hassas ayarlanabilmelidir. Bu ayarlama işlemi (1) eşitliğinde verilen denklemdeki fc frekansı değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. AC/DC farkın yüksek doğrulukta belirlenebilmesi için frekansın 4 kHz çözünürlüğe sahip olması gerektiği öngörülmüştür.

TÜBİTAK UME tarafından yurt dışından satın alınan Milimetre Dalga Sentezleyicide, sevkiyat kaynaklı bir arıza yaşanmış bu arızanın giderilmesi esnasında gecikmeler olmuş sorunlar yaşanmıştır. Yurt dışından satın alınan MMDS'nin bilgisayar ile kontrolü esnasında toprağa doğru kaçakları olduğu görülmüştür. Ayrıca sistemi tamamen şebeke toprağından yalıtılmak için MMDS'nin batarya ile beslenebilmesinin iyi olacağı da ortaya çıkmıştır.

Kullanımı daha kolay bir MMDS, TÜBİTAK UME'nin ihtiyaçları doğrultusunda kurulacak PJGS sistemlerinde kullanılmak üzere, TÜBİTAK MAM tarafından yerli imkânlarla tasarlanıp geliştirilmiş olup, sistemde kullanılabilir halde paketlenmiştir. Bu çalışmayla daha hızlı teknik destek alabilmek ve yurt dışı bağımlılığını azaltmak hedeflenmiştir. Aşağıda tasarlanan MMDS'nin teknik özellikleri verilmiştir.

#### Teknik gereklilikler:

Merkez frekansı : 70 GHz

Frekans Aralığı : (70 ± 1) GHz, minimum

Frekans çözünürlüğü : 4 kHz

Çıkış flanjı : WR-12

10 MHz referans frekansa BNC konektör aracılığıyla kilitlenebilmeli

Faz gürültüsü : -50 dBc/Hz@100 kHz'den küçük olmalı

Çıkış frekansı ve gücü yazılım ile değiştirilebilmeli

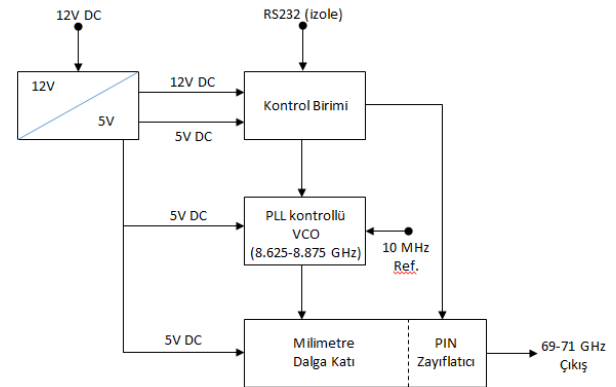
Cihaz WR-12 flanjı üzerinde yere dik konumda monte edilebilmeli

Bilgisayar ile kontrolü optik olarak yalıtılmalı.

Hem şebeke hem batarya ile beslenebilmeli.

## 2. Milimetre Dalga Sentezleyici

Milimetre dalga sentezleyici modülü; PLL kontrollü VCO ile kontrol ve güç birimi ile milimetre dalga katı birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: Milimetre dalga sentezleyicinin blok şeması

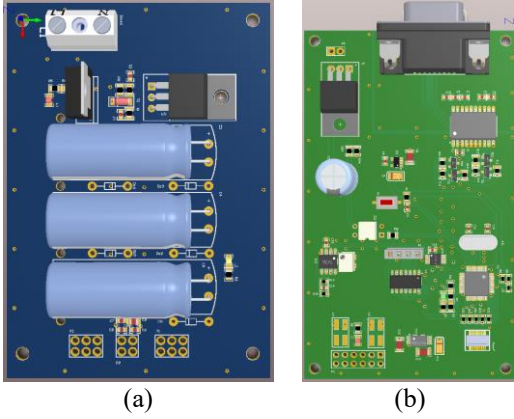
Sistemin, hazır temin edilen Analog Devices ADF5355 model PLL kontrollü VCO kartının [1] dışındaki, elektronik kısmı özgün geliştirilen güç ve kontrol biriminden/kartından oluşmaktadır.

## 2.1. Güç Birimi

Gürültünün en aza indirilmesi için sistemde anahtarlamalı regülatör kullanılmamıştır. 12 volt DC girişten 5 volt DC regüle ederek 25 Watt güç çıkışı sağlayacak şekilde dizayn edilen güç kartı milimetre dalga katındaki x8'li çarpıcı ve güç yükseltici ile diğer gerekli komponentlerin güç ihtiyacını rahatça karşılayabilmektedir.

## 2.2. Kontrol Birimi

Kontrol birimi, kullanılan PLL kontrollü VCO'yu ve milimetre dalga katındaki PIN zayıflatıcıyı kontrol eder. Bunun yanında PLL kontrollü VCO ile kontrol sisteminin sıralı bir şekilde devreye alınmasını sağlar. RS232 standardı vasıtasıyla izole bir şekilde bilgisayara bağlanabilir. Kullanılan protokol ile hem sentezleyici için yazılan arayüz ile hem de seri terminal üzerinden kontrol edilebilir. Sadece 5 tane kontrol komutu vardır. Bu komutlar yardımıyla sistemin gücü, frekans ve zayıflatma ayarları kontrol edilebilir.

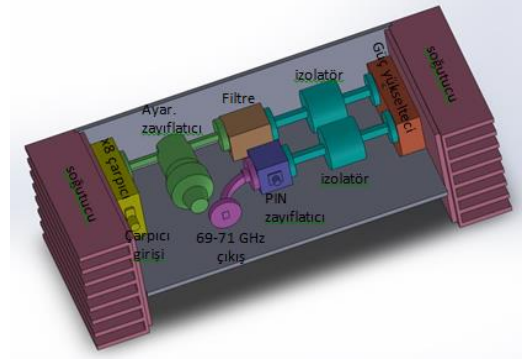


Şekil 2: (a) Güç ve (b) Kontrol kartı

## 2.3. Milimetre Dalga Katı

PLL kontrollü VCO çıkışından 8.625-8.875 GHz frekans aralığında +4 dBm civarında çıkış alınmaktadır. PLL kontrollü VCO kartı ile çarpıcı arasında çarpıcı için gerekli giriş gücünü sağlamak için RF kuvvetlendirici kullanılmıştır. Bu çıkış x8'li frekans katlayıcının SMA girişine uygulanmakta ve Şekil 3(a)'daki gibi sırasıyla, WR-12 dalgakılavuzu standartlarında giriş-çıkışı olan ayarlı zayıflatıcı, band geçiren filtre, izolatör, güç yükseltici, PIN zayıflatıcı ve gerekli dalgakılavuzu bağlantı elemanları monte edilmiştir.

Burada kullanılan milimetre dalga modüller Quinstar marka olup; x8'li çarpıcı ve güç yükseltici aktif bileşenler olup 5V DC ile beslenmektedirler ve her ikisi de, gerekli olan fanlı soğutuculara monte edilmişlerdir. Çarpıcı ile güç yükseltici arasında, güç yükselticinin giriş gücünü ayarlamak için ayarlı zayıflatıcı ve çarpıcıda oluşan harmonikleri engellemek için band geçiren filtre kullanılmıştır. Milimetre dalga katının uygulanmış halinin resmi Şekil 3(b)'de üst bölümde gösterilmiştir. Şekil 3(b)'deki alt bölüm ise Analog Devices ADF5355 model PLL kontrollü VCO, gerekli güç ve kontrol kartları için ayrılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3: Sentezleyicinin milimetre dalga katının (a) şematik çizimi ve (b) uygulanmış hali

Milimetre dalga sentezleyicinin kutulanmış ve paketlenmiş hali ise Şekil 4'de görülmektedir. Pasif milimetre dalga dalgakılavuzu bağlantı elemanları, kutulama ve tasarım çalışmaları MİLTAL'da gerçekleştirilmiştir.



(a)

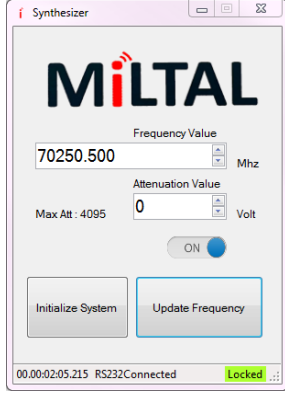


(b)

Şekil 4: Milimetre Dalga Frekans Sentezleyici.

## 2.4. Bilgisayar Arayüzü

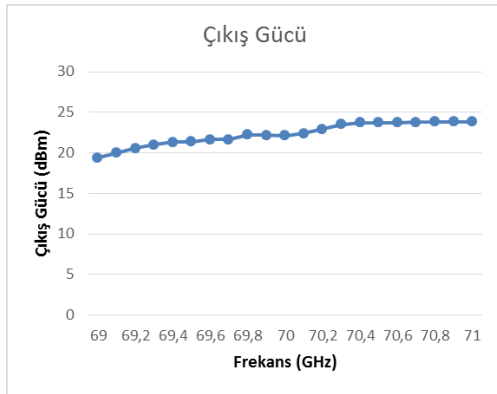
Kullanıcı arayüzünde güç zayıflatma ve frekans değişkenleri bulunmaktadır. Sistem gücü verildikten sonra ilk kullanım komutu gönderilerek kullanıma hazır hale getirilir. Bu arayüz yanında herhangi bir terminal programı vasıtası ile gerekli komutlar gönderilerek sistemin kontrolü sağlanabilir. Sentezleyici çıkışı 69-71 GHz frekans aralığında, 4 kHz'lik adımlarla ayarlanabilmektedir.



Şekil 5: Kullanıcı Arayüzü.

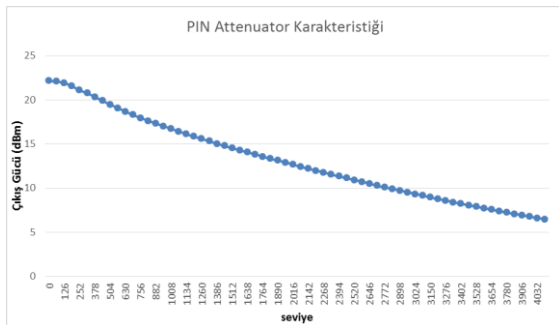
## 2.5. Ölçüm Sonuçları

Milimetre dalga sentezleyicinin frekansa bağlı çıkış gücü ölçüm sonucu Şekil 6.'da sunulmuştur. 69-71 GHz frekans aralığında 19.38-23.83 dBm çıkış güçleri aralığında değişim göstermektedir ve bu güç seviyeleri Josephson gerilim standardı sisteminde kullanılabilmesi için yeterli seviyelerdedir.



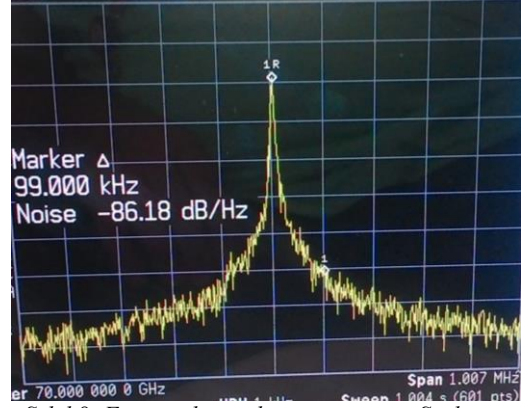
Şekil 6: Milimetre dalga sentezleyicinin frekansa bağlı çıkış gücü eğrisi.

Milimetre dalga sentezleyicinin frekansa bağlı çıkış gücünün PIN zayıflatıcı ile kontrolüne ilişkin ölçüm sonucu Şekil 7.'de sunulmuştur. PIN zayıflatıcı, 0-10 V gerilimi ile kontrol edilebilmektedir ve 10V'luk bu aralık 4096 seviyeye bölünmüştür.



Şekil 7: PIN zayıflatıcı karakteristiği.

Ayrıca milimetre dalga sentezleyicinin 70 GHz merkez frekansındaki faz gürültüsü ölçüm sonucu Şekil 8.'de sunulmuştur. Ölçüm Spektrum Analizörü kullanılarak RBW:1 kHz ve VBW: 100 Hz'de gerçekleştirilmiş olup, 100 kHz'deki faz gürültüsü -86.18 dBc/Hz olarak ölçülmüştür. Bu değer de yine, milimetre dalga sentezleyicinin Josephson gerilim standardı sisteminde kullanılabilmesi için yeterli bir seviyedir. Faz gürültüsü ölçümlerinde rubidyum kristalli referans 10 MHz osilatör kullanılmıştır.



Şekil 8: Faz gürültüsü ölçüm sonucunun Spektrum Analizörü'ndeki ekran görüntüsü.

## 3. Sonuçlar

TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda kurulmuş olan programlanabilir Josephson gerilim standardı sistemine entegre edilecek olan ve 69-71 GHz frekans aralığında çalışan milimetre dalga sentezleyici, milli imkanlarla TÜBİTAK MAM tarafından tasarlanıp geliştirilmiştir. Milimetre dalga sentezleyici modülünün çıkış gücü ve frekansı (4 kHz'lik adımlarla) bilgisayar arayüzü üzerinden kontrol edilebilmektedir. Bu geliştirilen sentezleyici modül, TÜBİTAK UME'deki Josephson gerilim standardı sistemine entegre edilerek standart ölçümlerde kullanılmaya başlanacaktır. Bu çalışma; TÜBİTAK UME tarafından fonlanarak dış destekli olarak Ar-Ge projesi çerçevesinde TÜBİTAK MAM tarafından gerçekleştirilmiştir.

## 4. Teşekkürler

Yazarlardan T. COŞKUN ÖZTÜRK, o zaman laboratuvar sorumlusu olan Saliha TURHAN'a 2012 yılında doktora çalışmasının PJGS olması konusundaki önerisi için, Hüseyin ÇAYCI'ya bu konudaki EMRP projesini 2011 yılında duyurduğu ve EMRP 2012 çerçevesindeki Q-Wave projesini aldığı için, Laboratuvar sorumlusu Mehedin ARİFOVIÇ'e bu konuda çalışmaya izin verdiği için, UME yönetimine yerli imkanlarla üretmek konusundaki desteği ve teşviki için teşekkür etmektedir. Milimetre dalga katının paketlenmesinde görev alan MİLTAL grubu üyesi uzman teknisyen Mustafa KILIÇ'a da teşekkür etmekteyiz.

## 5. Kaynaklar

- [1] Jinni Lee, Ralf Behr, Alexander S. Katkov, Luis Palafox, "Modeling and Measuring Error Contributions in Stepwise Synthesized Josephson Sine Waves", IEEE

Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 4 , April 2009

- [2] Aldo Godone, and Domenico Andreone, “Microwave Phase –Noise Influence on Josephson Junction Array Voltage Standards” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, No. 2 , April 1997
- [3] Ralf Behr, Marco Schubert, Torsten May, “Accuracy of Cryocooler Based Programmable Josephson Voltage Standard” , IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 3 , June 2004
- [4] Data Sheet, Analog Devices, ADF5355, Microwave Wideband Synthesizer with Integrated VCO.