

YÜKSEK DOĞRULUĞA SAHİP KALİBRATÖRÜN AC İŞARET KAYNAĞININ DOĞRUDAN SAYISAL SENTEZ TEKNİĞİYLE ÜRETİLMESİ

Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK¹ Hasan DİNÇER² Naylan KANATOĞLU³

^{1,3}TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü

Marmara Araştırma Merkezi Yerleşkesi, Gebze/Kocaeli

²Elektronik ve Haberleşme Müh.Bölümü

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İzmit/Kocaeli

¹e-posta:tezgulc@ume.tubitak.gov.tr

²e-posta:hdincer@kou.edu.tr

³e-posta: naylan@ume.tubitak.gov.tr

Anahtar sözcükler: Doğrudan Sayısal Sentez, Kalibratör, Yüksek Doğruluklu Kalibratörlerin AC İşaret Kaynakları, RC Osilatörler

Özet: Yüksek doğruluklu kalibratörlerin ac işaret kaynakları RC osilatörlerdir. RC osilatörlerle karşılaştırıldığında Doğrudan Sayısal Sentez (DDS) yapısı çok daha basittir. Bunun yanında DDS yüksek frekans çözünürlüğü ve kararlılığına sahiptir. Bu çalışmada kalibratörün ac işaret kaynağının DDS prensibiyle üretilmesi fikri araştırılmıştır. Bu amaçla DDS'nin temel elemanları olan NCO (Numerically Controlled Oscillator, Sayısal Kontrollü Osilatör) ve DAC'tan oluşan temel devre kurulmuş, kurulan bu devre üzerinde DDS'nin kalibratör için gerekli özellikleri incelenerek elde edilen sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur.

BÖLÜM I. GİRİŞ

UME-Gerilim Standartları Laboratuvarı (GSL), DC gerilim ölçümlerinde referans standart olarak kullanılan zener gerilim standardı yapımından sonra, gerilim kalibratörü yapmayı planlamış ve çalışma programına almıştır.

Kalibratör için seçilen doğruluk hedefleri, yüksek doğruluklu FLUKE 57XXA serisi kalibratörlere denktir. Bu doğrulukta kalibratörlerin mimarisinde AC işaret üretici, RC osilatörlerle üretilmiş olmasına karşın, UME'de daha iyi frekans karakteristiği ve RC osilatörlerle karşılaştırıldığında daha basit bir mimarisi olan Doğrudan Sayısal Sentez (DDS-Direct Digital Synthesis) tekniğiyle üretme fikri doğmuştur. Bu noktada akla ilk gelen soru, bu kalibratörlerin doğruluğunda AC gerilim genliği, AC işaret kaynağı DDS tekniğiyle üretildiğinde de elde edilebilir mi olmaktadır.

BÖLÜM II. KALİBRATÖRÜN METROLOJİDEKİ ÖNEMİ

Kalibratörler diğer metroloji laboratuvarlarında olduğu gibi UME-Gerilim Standartları Laboratuvarında da etkin bir yere sahiptirler.

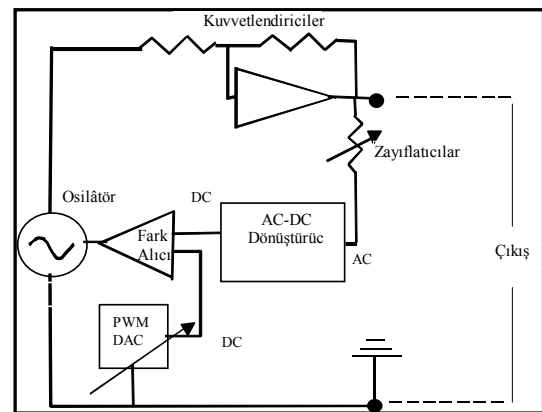
Bir kalibratör yüksek doğruluğa ve kararlılığa sahip gerilim, akım ve direnç gibi fiziksel büyüklükleri çıkış terminallerinden uygulayabilmektedir [2]. Doğruluğu yüksek bir kalibratör (FLUKE 57X0 A, Datron 4808) ticari çoğu ölçü aletini kalibre edebilecek doğruluğa sahiptir.

2.1 Genel Kalibratör Mimarisi

Bir ac kalibratörün temel fonksiyonu geniş bir frekans ve genlik bandında genlik doğruluğu yüksek ac gerilim üretmektir.

Şekil 1'de gösterilen osilatör bloğu kalibratörün ac işaret kaynağıdır. Klasik kalibratör mimarisinde bu blok Çift İntegratörlü RC osilatördür. Osilatör çıkışı daha sonra kuvvetlendiricilerin girişine sürülür. Bu kuvvetlendiriciler osilatör çıkışını kuvvetlendirir ve/veya daha düşük kademeleri oluşturacak bölücüler besler [2], [3].

Kalibratör çıkışının doğruluğunu arttırmak için bir geri besleme çevrimi çalışır. Bu çevrimin çalışması şu şekildedir: Çıkış işareti örneklenerek, seçilen kademeye bağlı olarak zayıflatılır ve AC-DC dönüştürücüye uygulanır. AC-DC dönüştürücü, çıkış işaretini giriş olarak alarak, çıkış işaretinin rms değeriyle orantılı DC işaretini çıkışında oluşturur. DC'ye dönüştürülen geri besleme işaretinin, PWM DAC (Pulse Width Modulated DAC) tarafından üretilen referans gerilimden farkı alınır. Bu fark osilatör çıkışının genliğini istenen değere ayarlamak için kullanılır[2],[3]. Bu şekilde çıkış genliği kontrol edilmiş olur. Buradaki PWM DAC çözünürlüğü ve doğruluğu yüksek bir DC gerilim üreticidir. Çıkış gerilimi değiştirilmek istendiğinde PWM DAC genliği istenen değere ayarlanır ve yukarıda anlatılan çevrim sayesinde çıkış istenen değere ulaşır [3].



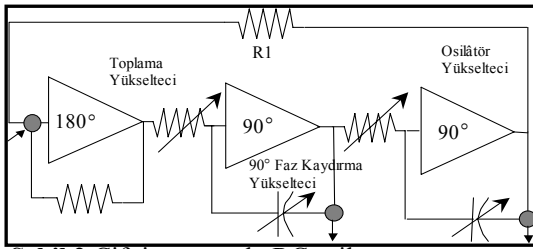
Şekil 1 Genel kalibratör mimarisi

2.2 Çift İntegratörlü RC Osilatör

Çift integratörlü RC osilatör Şekil 2'de görüldüğü gibi üç katlı bir yükselteçtir. 90° Faz Kaydırma

Yükselteci ve Osilatör Yükselteci, 90°'ar faz kayması sağlayan bir çift integratörü oluştururlar ve toplam 180° faz kayması sağlarlar. Toplama yükselteciyle birlikte bu üç yükselteç Şekil 2'deki gibi birlikte çalıştırıldığında geri-beslemenin toplam faz farkı 360° olmaktadır [3].

Osilasyon frekansı R ve C elemanlarının kombinasyonlarıyla belirlenir. Bu kombinasyonların bulunması karmaşık hesapların yapılmasını gerektirir. Direnç ve kapasite seçimi FET anahtarlar ve rölelerle yapılır [3]. R ve C elemanı kombinasyonlarını oluşturmada kullanılan anahtar ve röleler bu elemanların değerlerini etkilemektedir. Bu parametreleri kontrol etmek karmaşık devre tasarımlarını gerektirir. Ayrıca devrenin PCB çizimi de osilatörün performansını etkilemektedir.



Şekil 2 Çift integratörlü RC osilatör

Geniş frekans bandına sahip bir RC osilatörü tasarlamak bütün bu bileşenler nedeniyle karmaşıktır ve tecrübe gerektirir.

BÖLÜM III. DOĞRUDAN SAYISAL SENTEZ TEKNİĞİ

3.1 Çalışma Prensibi

Tek bir referans frekanstan, sayısal kontrol altında, analog frekans kaynağı elde etme tekniğine Doğrudan Sayısal Sentez (Direct Digital Synthesis) denir. Doğrudan sayısal sentezleyici, N bit frekans kontrol bitini ve f_{ref} referans frekansını giriş olarak alır f_{analog} frekansına sahip analog işareti üretir. Çıkış işaretinin frekansı; sıcaklık değişimlerinden etkilenmeme, zamanla kararlı ve geniş bantlı olma özelliklerine sahiptir.

DDS'nin basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi DDS tekniği dört blok halinde incelenebilir. Bu bloklar faz-adım-biriktirici/toplayıcı, faz-sinüs dönüştürücü, DAC ve alçak geçiren filtredir.

Faz adımı-toplayıcı, faz adımlarını toplayan bir toplayıcıdır. Bu faz adımlarının uzunluğu N sayısal kelimesiyle programlanır. Her tetikleme çevriminde faz toplayıcının çıkışı sinüsün o anki fazını temsil etmektedir. Faz toplayıcının çıkışı sayısal bir rampadır ve bu rampanın periyodu çıkış işaretinin periyoduna eşittir.

Faz-sinüs dönüştürücü blok, faz toplayıcının M yüksek anlamlı bitlerini alarak DAC'a girecek sayısal genlik bilgisini oluşturur. Faz-sinüs dönüştürücü blok M bit adrese sahip bir hafıza birimidir. Bu hafızada DAC girişine uygulanacak sayısal bilgi bulunmaktadır.

Faz-toplayıcı ve faz-sinüs dönüştürücü blokları birlikte DDS sisteminin sayısal kısmını oluştururlar. Bu iki blok Sayısal Kontrollü Osilatör (Numerically Controlled Oscillator - NCO) olarak adlandırılır.

NCO çıkışını analog işarete dönüştürme işlemini Şekil 3'deki Sayısal Sinüs - Analog Sinüs Dönüştürücü blok yapmaktadır. Bu blok, DAC olarak bilinen yapıdır ve DDS'nin performansını belirlemede anahtar elemanlardan biridir.

Şekil 3'deki şemada görülen son eleman, Alçak Geçiren Süzgeçtir (AGS). Bu süzgecin kullanılmasındaki amaç, örnekleme işlemi sonucunda oluşan tekrarlanma gürültüsünü çıkış işaretinden süzmektir.

3.2 Teorik Frekans Spektrumu

Fourier dönüşümü bilinen fonksiyonları ve Fourier dönüşümü özelliklerini kullanarak, DDS ile üretilmiş bir sinüs işaretinin teorik spektrumu bulunmuştur. Bunda amaç DDS tekniği ile üretilen işareti sayısal verilere dayanarak incelemek ve teoriden gelen etkileri araştırmaktır.

Şekil 3'de verilen Faz-Sinüs Dönüştürücü çıkışındaki işaretin kuantalama hatalarını ihmal ettiğimizde ve Sayısal Sinüsü Analog Sinüse dönüştüren DAC'ın ideal olduğunu düşündüğümüzde DAC çıkışında beklenen işaretin spektrumu Şekil 4'de görülmektedir. Bu işareti (1) eşitliğiyle temsil edebiliriz [5].

Örnekleme oranı, örnekleme frekansının temel işarete oranı olarak (2) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

$2 \geq R$ olması durumunda filtrelenmek istenen işaret, (f_0 frekanslı işaret) f_s frekansının harmonikleri çevresinde oluşan frekans tekrarlarıyla karışacaktır (katlanma gürültüsü). Bu durumda bir AGS kullanılarak, örneklenmiş işaret spektrumundan temel işaretin spektrumu süzölemeyecektir.

(1) eşitliğinde (2) eşitliğini yazarak DAC çıkışındaki işaretin spektrumu için genel bir ifadeyi (3) eşitliği elde edilebilir.

Şekil 5'te, (3) eşitliği kullanılarak 0Hz çevresindeki temel işaretin genliğinin, R örnekleme oranının değişmesiyle nasıl değiştiği gösterilmektedir. Bu durum istenmeyen iki etkiye sebep olmaktadır: 1- Örnekleme frekansı sabit tutulduğunda DDS çıkışında elde edilen işaretin genliği frekansa bağlı olur (Örnekleme oranı azaldıkça genlik azalır). 2- Örnekleme frekansı sabit tutulduğunda kuantalama gürültüsünün çıkış işareti gücüne oranı (SN_R) değişecektir. DDS tekniğiyle çalışan ve örnekleme frekansı 30MHz, en büyük çıkış frekansı 1MHz olan bir sinüs üreticinin minimum örnekleme oranı $R=30$ 'dur.

Bu üreticinin frekansa bağlı genlik düzgünlüğü (flatness) bağlı olarak:

$$F = \frac{V_{f,ref} - V_{f,maks}}{V_{f,ref}} = \frac{0.50000 - 0.4992}{0.50000} \cdot 10^6 \approx 1600ppm$$

olmaktadır. Frekansa bağlı genlik düzgünlüğü parametresinin bu kadar büyük olması istenmeyen

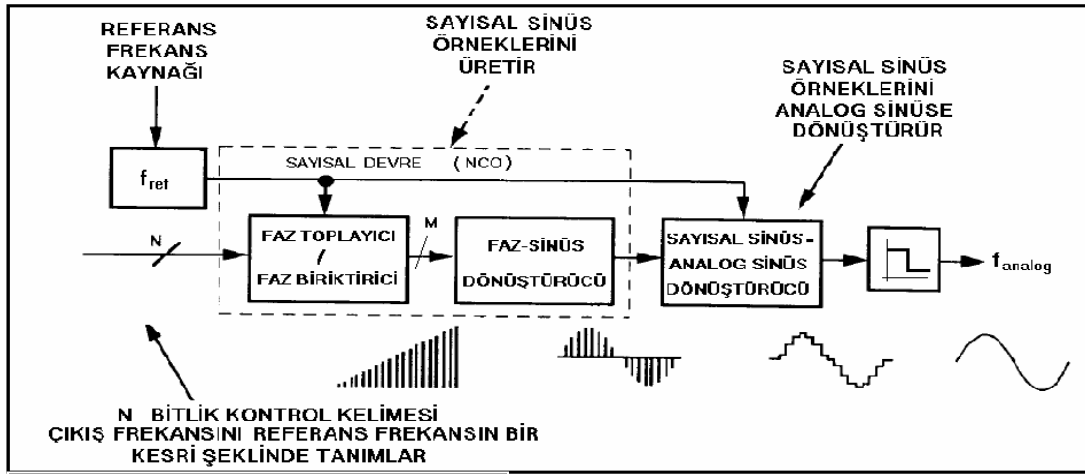
bir durumdur, ancak yüksek frekanslarda kaçak kapasiteler nedeniyle oluşan kaçaklar çok daha fazladır. Yine de bu istenmeyen etki DDS DAC'nın referansı değiştirilerek düzeltilebilir.

Sinüs işaretinin genlikte ayrık hale getirilmesi kuantalama gürültüsü adı verilen bir hataya neden olur. Bu gürültünün sebebi, iki kuanta basamağı arasında bir değere sahip olan ideal işaretin, bu iki kuanta basamağından biriyle temsil edilmesidir. Kuantalama gürültüsünün hangi sinüs basamağında ve hangi büyüklükte olduğunu teorik olarak kestirmek imkansız olduğu için, kuantalama gürültüsü en kötü durum için bütün frekanslara yayılarak gösterilir ve kuantalama gürültüsünün büyüklüğü istatistiksel yöntemlerle hesaplanarak bulunur. İdeal bir sayısal-analog dönüştürücüde

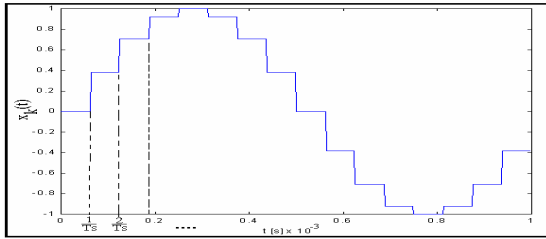
kuantalama gürültüsünün etkin değeri frekanstan bağımsızdır [6] Şekil 6'de ideal DAC çıkışındaki işaret kuantalama gürültüsüyle birlikte gösterilmiştir.

Parseval [7] teoremini kullanarak kuantalama gürültüsü ile DAC çıkışından filtrelenecek elde edilmek istenen işaret gücü arasındaki ilişki (4) eşitliğinde bulunmuştur. Bu eşitlikteki A, DAC çıkış spektrumundaki fs'in 0.harmoniği etrafındaki temel işaretin genliğini temsil etmektedir.

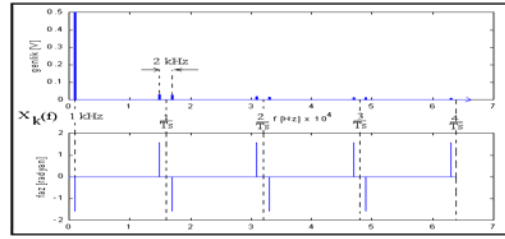
Tablo 1'de örnekleme oranına bağlı olarak istenen işaret gücünün kuantalama gürültüsü gücüne oranı (SN_R) gösterilmektedir. Bu tablodaki N DAC'm bit sayısını temsil etmektedir.



Şekil 3 DDS'nin blok diyagramı



Şekil 4 a) İdeal DAC çıkışı - zaman domeninde



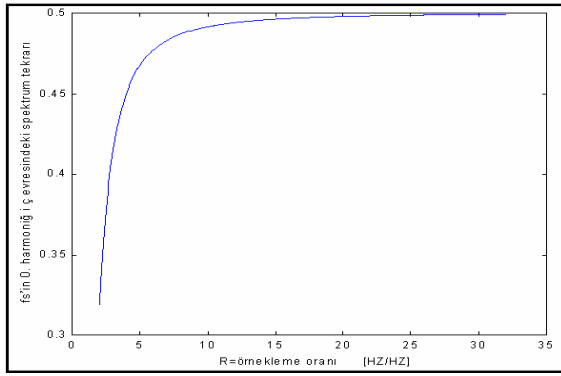
Şekil 4 b) İdeal DAC çıkışı - frekans domeninde

$$X_k(f) = \left\{ \frac{T_s}{2.T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ e^{-j.270-j.2.\pi.(n.f_s+f_0).\frac{T_s}{2}} \sin c[\pi.(n.f_s+f_0).T_s] \delta(f-(n.f_s+f_0)) + e^{j.270-j.2.\pi.(n.f_s-f_0).\frac{T_s}{2}} \sin c[\pi.(n.f_s-f_0).T_s] \delta(f-(n.f_s-f_0)) \right\} \right\} \quad (1)$$

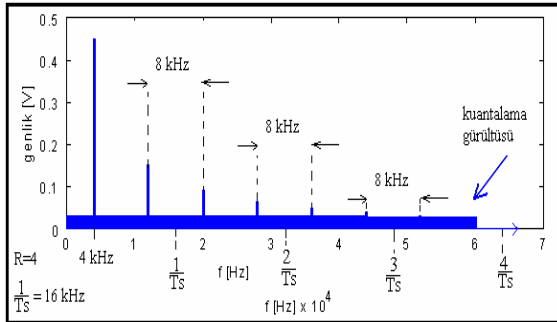
$$R = \frac{f_s}{f_0} \quad (2),$$

$$X_k(f) = \left\{ \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ e^{-j.270-j.2.\pi.(n+\frac{1}{R}).\frac{1}{2}} \sin c \left[\pi.(n+\frac{1}{R}) \right] \delta(f-(n.f_s+f_0)) + e^{j.270-j.2.\pi.(n-\frac{1}{R}).\frac{1}{2}} \sin c \left[\pi.(n-\frac{1}{R}) \right] \delta(f-(n.f_s-f_0)) \right\} \right\} \quad (3)$$

$$6,021 \times N + 10 \log(6 \times A^2) \quad (4)$$



Şekil 5 Örnekleme oranının temel işaretin genliğine etkisi



Şekil 6 DAC çıkışındaki işaretin teorik spektrumu

Tablo 2'deki veriler kalibratörün doğrudan çıkış verdiği (yükseltmeden/zayıflatmadan) aralık için verilmiştir. Bu verilerden yararlanarak tasarlanan AC üreticinin taşıması gereken özellikler belirlenebilir. Bu tabloda verilen toplam harmonik bozulma parametresi kalibratörün çıkış spektrumundaki istenen işaret gücünün istenmeyen harmoniklerin toplam gücüne oranıdır. Tablo 1 ile Tablo 2 karşılaştırıldığında DDS DAC'ının 12 bit olması durumunda, FLUKE 5700A doğruluğunda bir kalibratör gerçekleştirilmede DDS tekniğinin ümit verici olduğu görülmektedir.

Tablo 1 İşaret / kuantalama-gürültüsü oranı

Örnekleme oranı R [Hz/Hz]	A [V]	SN _{k,R} [dB] N=11	SN _{k,R} [dB] N=12
1600	0.50000	67.98	74.01
32	0.4992	67.97	74.00
16	0.4968	67.93	73.96
4	0.4502	67.07	73.10
2	0.3183	64.06	70.09

3.3 DAC'ların Spektruma Etkisi

Şekil 7' de pratikte gözlenen DDS spektrumu verilmiştir. Bu kirlilik, DAC'ın doğrusal çalışmaması nedeniyle temel frekansın ($f_a=f_0$) harmoniklerinin oluşması ve bu harmoniklerin örnekleme sonucunda oluşan spektrum tekrarları nedeniyle ilgilenilen frekans bandına ($f_{rcf}/2$ veya $f_c/2$) düşmesiyle veya referans frekansın veya sayısal girişlerin değişmesiyle çıkış spektrumunda istenmeyen harmoniklerin oluşmasıyla oluşur.

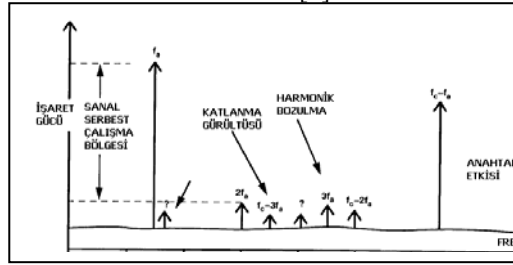
DAC transfer fonksiyonu işaretin spektrumunu etkilemektedir. Ancak DAC üreticileri doğrusallık parametrelerini bütün transfer fonksiyonu için değil sadece ideal doğrudan en büyük sapma için beyan etmişlerdir.

Tablo 2 FLUKE 5700A Özellikleri

Gerilim	Frekans-Aralığı	Yük Regülasyonu	Toplam Harmonik Bozulma
1V	40 Hz-1 kHz	12 ppm	67 [dB]
	50 kHz-100 kHz	136 ppm	67 [dB]
	500 kHz-1 MHz	1200 ppm	40 [dB]

Ac-zaman domeni hataları, DAC giriş kodunun değişmesi sırasında çıkışında oluşan geçici sapmalardan kaynaklanmaktadır. Bu parametreler DAC mimarisine ve çevre elemanlarına bağlıdır [4].

DAC'ın hem DC karakteristikleri hem de ac-zaman domeni karakteristikleri DDS üreticinin frekans karakteristiğini etkileyecektir. Bu etkinin ne şekilde olacağına DAC üretici firmanın beyanlarına bakılarak karar verilemez. [4].



Şekil 7 Pratikte gözlenen spektrum

BÖLÜM 4. DDS ÜRETECECİN TASARIMI VE YAPIMI

Bölüm 2'de verilen FLUKE kalibratör mimarisindeki ac üreticinin görevlerini hatırlayalım:

- Referans AC işareti üretmek
- Geri-beslemeden gelen hata işareti ile orantılı yük düzeltmesi yapmak
- Frekans anahtarlama yapmaktır.

Bölüm 3'de belirtildiği gibi, örnekleme oranının (R) azalmasıyla sinüsün genliği azalacaktır, bunun yanı sıra kaçak kapasiteler nedeniyle frekansın artmasıyla çıkış genliği daha da düşecektir.

DAC'ın çıkış genliği referans gerilimle orantılı olarak değişmektedir. Bu durumda DAC referans gerilimini değiştirerek frekansa bağlı genlik azalması düzeltilebilir.

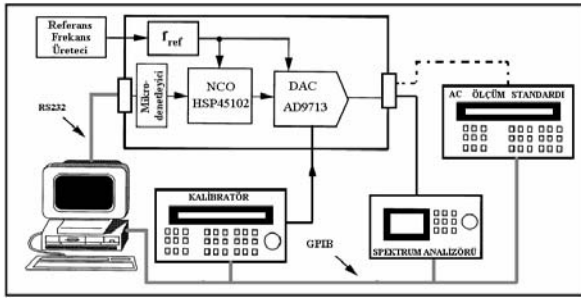
Referans ac-işaretin görevlerinden biri de yük regülasyonu yapmaktır. Tablo 2'deki veriler bu regülasyonun büyüklüğü hakkında fikir vermektedir. DAC referansını değiştirerek çıkış gerilimindeki kayıpları ortadan kaldırma yöntemi yük regülasyonu için de uygundur.

DAC karakteristikleri referans gerilimle değişmektedir. Bu nedenle DDS üreticinin frekans karakteristiğini değişen referans gerilimler için incelemek gerekir.

Şekil 8’de DDS tekniğiyle gerçekleştirilecek ac kaynağın, yüksek doğruluklu kalibratörde kullanılmak üzere özelliklerinin tespiti için gerçekleştirilmiş sistem görülmektedir.

Referans frekans üretici değişken frekanslı TTL çıkışlı bir fonksiyon jeneratörüdür ve f_{ref} (örnekleme frekansı) frekansını sağlamaktadır. Sistemdeki kalibratör değişken referans gerilimi uygulamak için kullanılmıştır. AC ölçüm standardı; ac işaretin rms değerini elektronik ısı çözümlerle belirleyen, geniş gerilim ve frekans aralığında kullanılabilen yüksek doğruluklu ac voltmetredir. Spektrum analizörünün görevi ise DDS üreticinin frekans spektrumunu, değişen referans gerilim, örnekleme oranı ve örnekleme frekansı için belirlemektir. Şekil 8’de gösterilen test devresini kurmak amacıyla temel DDS elemanları olan DAC ve NCO tek bir temel devre üzerinde birleştirilmiştir.

Şekil 7’de gösterilen Sanal Serbest Çalışma Bölgesi parametresi (Spurious Free Dynamic Range-SFDR) spektrum özelliklerinin kalitesini temsil etmede önemli bir parametredir ve DDS’nin AGS’si ile süzölemeyecek en kötü işareti temsil etmektedir.



Şekil 8 AC işaret kaynağının özelliklerinin belirlenmesi

SONUÇ VE ÖNERİLER

Şekil 8’deki düzenekle alınan ölçümler Tablo 3’de ve Şekil 9’de gösterilen grafikte özetlenmiştir. Referansın $100\mu V$ ’luk değişimleri çıkış geriliminde yaklaşık olarak $50\mu V$ ’luk değişimlere sebep olmaktadır. Referansın $10\mu V$ ’luk artımları ise çıkışta bir artışa sebep olmakla birlikte çıkışın artış miktarı sabit değildir. (Şekil 9).

DDS işaretinin spektrumu, DAC referansının (bu çalışmada kullanılan DAC için) $-0.75V$ ile $-2.2V$ aralığında yeterince saftır ve DDS sistemindeki DAC bu aralıkta çalıştırılmalıdır.

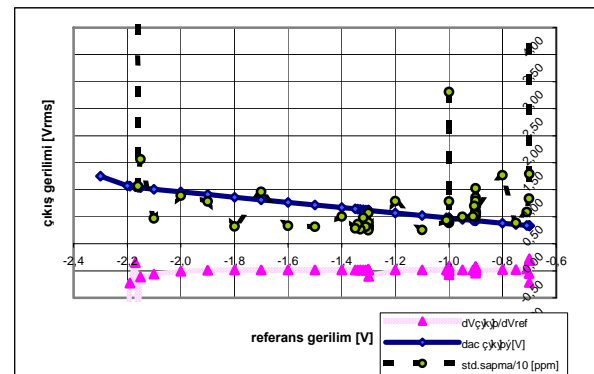
Yük regülasyonu bilgisi geri-besleme işaretinden elde edilir. Geri-besleme işareti işlenerek elde edilen düzeltme işareti DAC referansıyla toplanabilir veya DAC referansından çıkarılabilir. Bu işlem sonunda da DAC referansının değeri hala $-0.75V$ ile $-2.2V$ aralığında kalmalıdır.

Tablo 3’deki SFDR ölçümleri, DDS tekniğiyle üretilecek sinüs işaretinin frekans spektrumu hakkında fikir verir. Tablo 3’deki sonuçlar Tablo 2’deki verilerle karşılaştırıldığında oldukça iyidir.

DDS prensibi kullanılarak üretilecek kalibratörün frekans çözünürlüğü ve kararlılığı yüksek doğruluklu kalibratörlerden daha iyi olacaktır. Genlik çözünürlüğü, kararlılığı ve yük regülasyonu yapabileceği özelliklerinin bu doğrulukta bir kalibratör gerçekleştirilmede yetersiz olduğu görülmektedir. Ancak DAC’ların referans gerilimlerine bağlı çıkış gerilimi karakteristikleri iyileştirildiğinde DDS’li kalibratör mimarisi oldukça basitleşecektir.

Tablo 3 DDS’nin frekans spektrumu özellikleri

V_{ref} [V]	Örnekleme Oranı R	SFDR [dB]	SFDR Frekansı [Hz]	Örnekleme Frekansı [Hz]
-1.2	128	-70.33	0-100	1 M
-1.2	64	-71.00	32kHz	1 M
-1.2	64	-70.84	0-100	2 M
-1.2	64	-68.84	32kHz	5 M
-1.2	32	-65.00	250	1 M
-1.2	4	-61.67	95.4k	1 M
-1.2	4	-47.84	1.254M	5 M
-1.2	2	-32.83	134 k	1 M
-0.9	64	-68.70	95.8k	1 M
-0.9	128	-70.01	95.8k	1 M
-1.9	64	-70.10	95.8k	1 M
-1.9	128	-71.22	95.8k	1 M
-2.9	128	-20		1 M



Şekil 9 DDS’nin genlik özellikleri

TEŞEKKÜR

Bu çalışma UME Gerilim Standartları Laboratuvarında UME cihaz ve bilgi alt yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya imkan tanıyan UME’ye ve desteklerini esirgemeyen Tansu Kefeli ve diğer mesai arkadaşlarımıza teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- 1- Stanford Research Systems, ‘Scientific And Engineering Instruments’, 1992-1993, Syf.155-160
- 2- FLUKE, ‘Calibration Philosophy in Practice’, May 1994, Syf.15.1-15.17
- 3- FLUKE 5200A Service Manuel, Syf.3.1-3.16
- 4- David Bunchanan, ‘Choosing DACs for Direct Digital Synthesis’, Analog Devices Application Note
- 5- Tezgül COŞKUN, ‘Yüksek Doğruluğa Sahip Kalibratörün Ac İşaret Kaynağının Doğrudan Sayısal Sentez Tekniğiyle Üretilmesi’, 2004
- 6- Analog Devices Application Note, ‘Fundamentals of Sampled Data Systems’
- 7- Alan V.Oppenheim and Alan S. Willsky with S.Hamid Nawab, ‘Signals & Systems’, Prentice Hall, Second Edition, Syf. 312