



**AKIM ÇARPMA TEKNİĞİ KULLANILARAK 7-SEVİYELİ AKIM-
MODLU ANALOG/SAYISAL DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI**

**(7-BIT CURRENT-MODE ANALOG/DIGITAL CONVERTER DESIGN
BASED ON CURRENT MULTIPLICATION TECHNIQUE)**

Yavuz İNCE*, Özge ŞAHİN**

ÖZET/ABSTRACT

Akım modlu sinyal işleme yaklaşımı, düşük gerilim ve güç tüketimi gerektiren durumlarda, yüksek duyarlıklı direnç ve kapasite gereksinimi olmadığı için gerilim modlu sinyal işleme yaklaşımına karşı avantajlara sahiptir. Akım modlu sinyal işleme tekniğinin seçilmesinin bir nedeni de sıcaklık, resim algılayıcıları ve biomedikaldeki sinyal kaynaklarının akım olmasıdır. Bu alanlarda akım işleme yöntemi kullanıldığında akımdan gerilime çevirme yapılmayacak ve maliyet de düşecektir. Bu çalışmada, düşük güç tüketimi, küçük alan ve biomedikal kayıt gibi uygulamalar için iki tür Analog/Sayısal Dönüştürücü (ASD) geliştirilerek benzetimleri yapılmıştır. Bu analog-sayısal çevirici geliştirilmesi sırasında akım modlu sinyal işleme yaklaşımı kullanılmıştır.

Current mode signal processing has some advantages over voltage mode signal processing in low voltage and low power applications because of not requiring high precision resistors or capacitors. And one reason to be chosen current mode signal processing is many signal sources are current-type, such as temperature sensors, photo sensors and many others in biomedical. This study reports development and simulation of two types of Analog/Digital Converters (ADCs) for low-power and small area applications, such as implantable telemetric biomedical recording applications. In development of these analog-to-digital (AD) converters current mode signal processing is chosen.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Analog sayısal çevirici, Akım modlu yaklaşım, Akım aynaları, Akım çarpma
Analog-digital converter, Current mode approach, Current mirror, Current multiplication

* Grundig Elektronik R&D, Kemalpaşa Cad. No:54, 35060-02 Pınarbaşı, İZMİR

** DEÜ Mühendislik Fak., Elektrik ve Elektronik Müh. Böl., 35160 Buca, İZMİR

1. GİRİŞ

ASD, analog bir işareti ayrık zaman aralıklarında sayısal koda çevirir. Örnekleme teoremine göre, giriş işaretinin bant aralığı, çakışmaları önlemek için, örnekleme frekansının yarısı ile sınırlıdır.

Hızlı ASD'ler, sürekli gelişim içindedir. Sayısal yöntemlerin üstünlüğü nedeniyle, ASD üretimi, bu yöntemlerle uyumlu olmalıdır. Akım-modlu, yani bilginin akım cinsinden işlendiği yöntemler bazı kolaylıklar sağlar. Birçok transistörün yapısındaki doğrusal olmayan akım-gerilim bağıntısı nedeniyle, giriş işaretinde veya kontrol gerilimindeki küçük bir değişim, çıkış akımında büyük değişimlere neden olur (Toumazou vd., 1990).

Sabit bir gerilim kaynağı ile, akım-modlu işaretlerin kullanılabilir değişim aralığı, gerilim-modlu işaretlere göre önemli ölçüde geniştir. Aynı zamanda, herhangi bir düğümde akan akımdaki değişim, bu düğümün geriliminde değişime neden olmaz. Parazitik kapasiteler, değişen gerilim seviyelerine bağlı olarak sık sık dolup boşalarak devrenin maksimum çalışma hızını düşürür. Akım-modlu devrelerde, düğüm gerilimlerinde değişim olmayacağından, çalışma hızı daha yüksek olur. Ayrıca, basit devre yapısına ve düşük güç tüketimine sahiptir (Tezel, 1999). Akım-modlu yöntemler, yükselteçler, çoklayıcılar, filtreler gibi işaret işleme devrelerinde ve farklı VLSI (Çok Geniş Ölçekli Entegre) devrelerinde kullanılmaktadır (Nairn ve Salama, 1988; Nairn ve Salama, 1990; Maloberti, 2001).

Bu çalışmada, basit ve kaskad akım aynaları kullanılan akım çarpma yöntemine dayalı, iki farklı yöntemde ASD'nün benzetimleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karmaşıklığı ve güç tüketimini azaltmak için, örnekleme devresi olmayan, akım aynası kullanılan akım-modlu yöntemler kullanılmıştır.

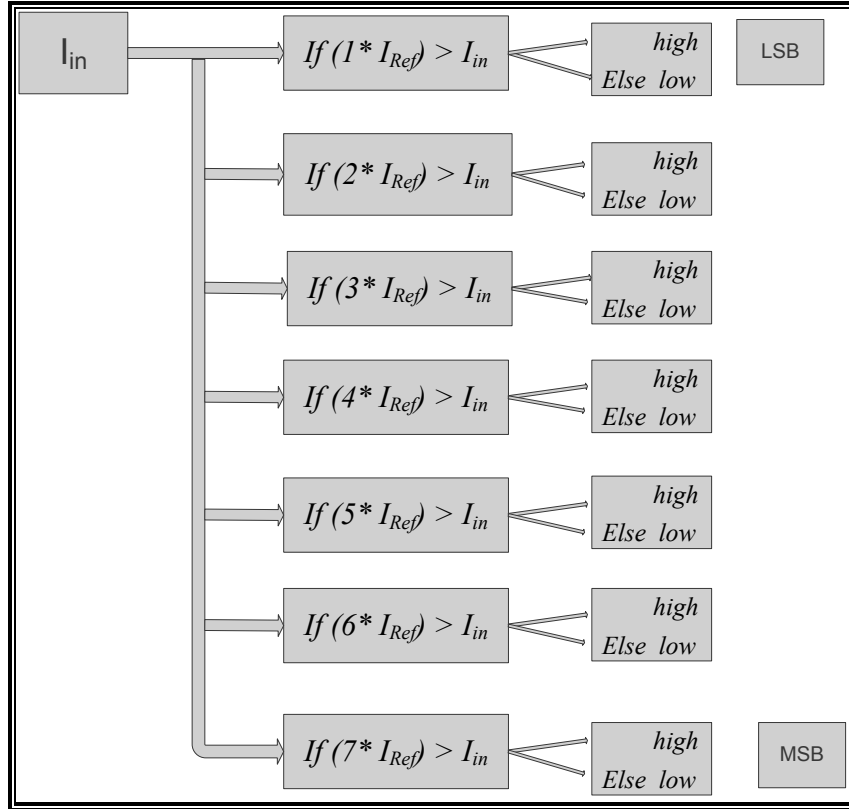
2. AKIM ÇARPMA YÖNTEMİNE DAYALI AKIM-MODLU ASD

Adından da anlaşılacağı gibi bu yöntem, referans işaretinin çarpımına ve referansların giriş işareti ile karşılaştırılması ilkesine dayanır. Bu yaklaşım, "flash" dönüştürücüye benzer. Dönüşümün temeli basit, uygulaması kolaydır. Bu uygulama ilk kez G.Rachmut tarafından kullanılmış, daha sonra H.Helble tarafından geliştirilmiştir (Helble, 2004).

Referans akımı, "flash" dönüştürücüden farklı olarak, dirençler ile bölünmemekte, akım aynaları kullanılarak kopyalanmakta ve farklı seviyelerde akım değerleri elde edilmektedir. Başlangıçta referans akımı, istenen seviyede bir faktör ile çarpılır. Seviye sayısına göre, LSB (en az anlamlı bit) I_{ref} değerine, onun N katı ise MSB (en anlamlı bit) değerine karşılık gelir. Burada N, dönüşüm seviyelerini gösterir. Sekiz dönüşüm seviyesi isteniyorsa, N değeri sekizdir. Dönüşümün temel algoritması Şekil 1'de gösterilmektedir.

Doğrusal çarpım seviyeleri, dönüşümün de doğrusal olmasını sağlar. Akım çarpma yöntemine dayalı ASD'nin en önemli özelliği, doğrusal dönüşüm karakteristiğine sahip olmasıdır.

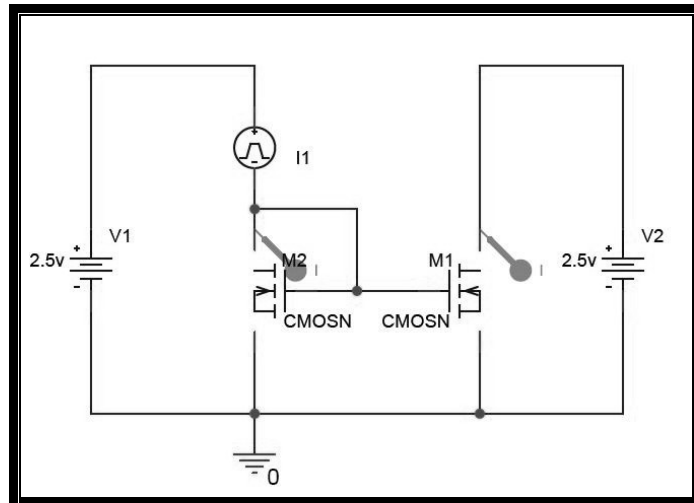
7-seviyeli ASD'de, referans akımı $10 \mu A$ olduğunda çarpım sonucunda oluşan akımlar $20 \mu A$, $30 \mu A$, vb. şeklinde doğrusal olarak değişir.



Şekil 1. Akım çarpma yönteminin akış diyagramı

2.1. Akım Aynası

Basit bir CMOS akım aynası Şekil 2’de görülmektedir. Kullanılan MOSFET’ler N-tipi olduğundan akım aynası N-ayna olarak adlandırılabilir.



Şekil 2. Basit CMOS akım aynası

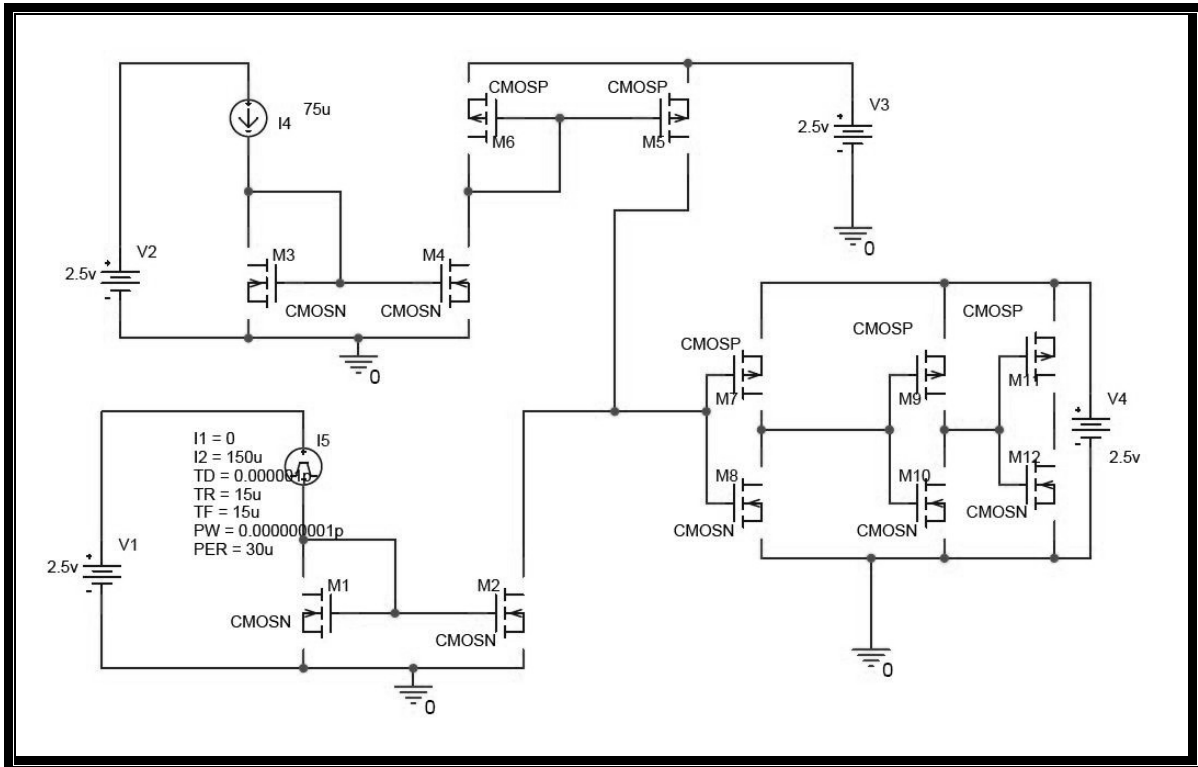
Her iki transistörün de aktif bölgede olduğu varsayılmaktadır. Transistörlerin sonlu çıkış empedansları ihmal edilir ve aynı boyutlarda olduğu varsayılırsa geçit-kaynak (gate-source) gerilimleri (V_{gs}) aynı olduğunda, M_1 ve M_2 'nin üzerinden aynı akım geçecektir. Bununla

birlikte, çıkış empedansları dikkate alındığında, hangi transistörün savak-kaynak (drain-source) gerilimi (V_1, V_2) daha büyükse, o transistörün akımı daha yüksek olacaktır.

2.2. Basit Akım Aynaları Kullanılarak Akım Çarpma Yöntemine Dayalı ASD

Akım çarpma yöntemine dayalı, basit akım aynası kullanılarak oluşturulan tek seviyeli ASD devresi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilde I_5 , referans akımını (I_{ref}), I_4 ise, giriş akımını (I_{in}) göstermektedir. I_{ref} akımı, dönüştürücüyü dış dünyadan yalıtılmak için N-ayna ile kopyalanmıştır. Akım çeken (current sink) bir yapıdan akım basan (akım kaynağı) bir yapıya dönüştürmek için de P-ayna ile tekrar kopyalanmıştır. Akım aynalarının hataları ihmal edilecek olursa, referans akımı iki kez kopyalanmasına karşın değerini korumaktadır.

Diğer hücrede giriş akımı da (I_{in}) önce N-aynadan geçerek akım çeken yapıya dönüşür. Akımın büyüklüğü aynı kalır; sadece yönü değişir.



Şekil 3. Basit akım aynası kullanılan tek seviyeli ASD

Basit akım aynalı, akım modlu ASD'lerin avantajlarının yanında, kullanılan akım aynasının tipinden kaynaklanan bazı dezavantajları da vardır. Basit akım aynalarının bazı eksiklikleri şu şekilde özetlenebilir:

- 1- En önemli eksiklik, çıkış gerilimindeki değişimlere bağlı olarak çıkış akımının da değişmesidir. Bu etki, akım aynasının küçük işaret çıkış direnci R_0 ile belirtilebilir. Akım aynasının çıkışının Thevenin eşdeğerinde R_0 ve ona paralel olarak giriş akımı ile kontrol edilen bir akım kaynağı bulunur. Çıkış direnci, akım aynası kullanılan birçok devrenin performansını etkiler. Çıkış direncinin artmasıyla çıkış akımının, çıkış gerilimine bağımlılığı azalır. Bu nedenle istenen bir durumdur.
- 2- Diğer hata kaynağı ise, akım kaynağının kazancının ideal değerinden sapsmasıdır. Sistematik kazanç hatası "e", akım aynasında kullanılan tüm elemanların mükemmel

şekilde uyumlu olmasına karşın ortaya çıkan hatadır. Rastlantısal kazanç hatası ise, elemanların istenmeyen uyumsuzluklarından ortaya çıkar.

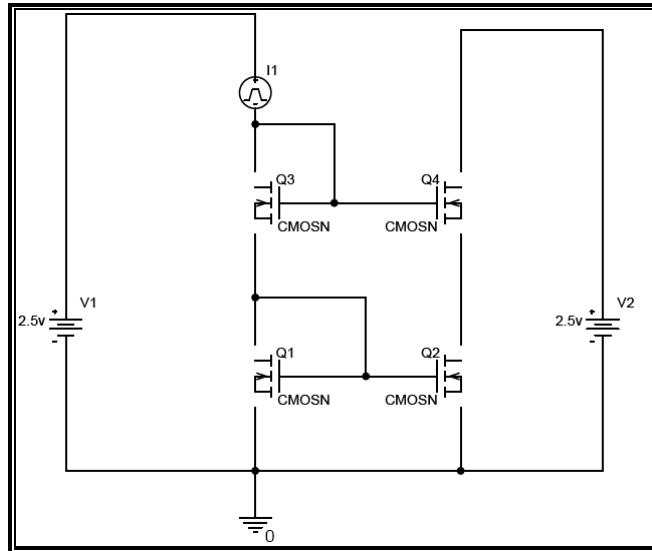
- 3- Akım aynasının girişine bir akım kaynağı bağlandığında, giriş akım kaynağı üzerindeki gerilimi düşüren pozitif bir gerilim düşümü “ V_{IN} ” oluşur. V_{IN} geriliminin en aza indirgenmesi, özellikle düşük besleme uygulamalarında önemlidir.
- 4- Çıkışta pozitif bir gerilim “ V_{OUT} ” oluşması, çıkış akımının giriş akımına bağlı olması için pratikte gereklidir. Bu karakteristik, çıkış kolunda minimum V_{OUT} üretilmesi şeklinde anlatılabilir. Çıkış geriliminin minimum olması, akım aynasının çıkış direncinin hemen hemen sabit kalabileceği çıkış gerilim aralığını genişletir (Gray ve Meyer, 2001).

Bu kısıtlamalar nedeniyle basit akım aynalarının kullanımı sınırlıdır. Bunların üstesinden gelmek için yeni akım aynaları geliştirilmiştir. Çıkış direncinin artmasına karşılık dinamik aralıkları azalmıştır. Bu çalışmada kaskad akım aynalarının kullanılmasıyla akım modlu ASD'nin performansının arttığı gözlenmiştir.

3. KASKAD AKIM AYNALARI KULLANILARAK AKIM ÇARPMA YÖNTEMİNE DAYALI ASD

Sonlu çıkış direnci, akım aynalarının başlıca performans sınırlamasıdır. MOS transistörlerin yüksek çıkış direncine sahip olmalarına karşın bu yine de yüksek doğruluk için yeterli değildir. Çıkış direncini arttırmanın bir yolu, kaskad yapılar kullanmaktır.

Kaskad akım aynası yapısı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Kaskad akım aynası

Şekil 4'te MOSFET Q_2 'nin savak ucundan bakıldığında görülen çıkış empedansı r_{ds2} 'dir. Bu aynı zamanda basit akım aynasının analizine benzerlik gösterir. MOSFET Q_4 'ü r_{ds2} için bir akım kaynağı olarak kabul edip çıkış empedansı hızlı bir şekilde bulunabilir.

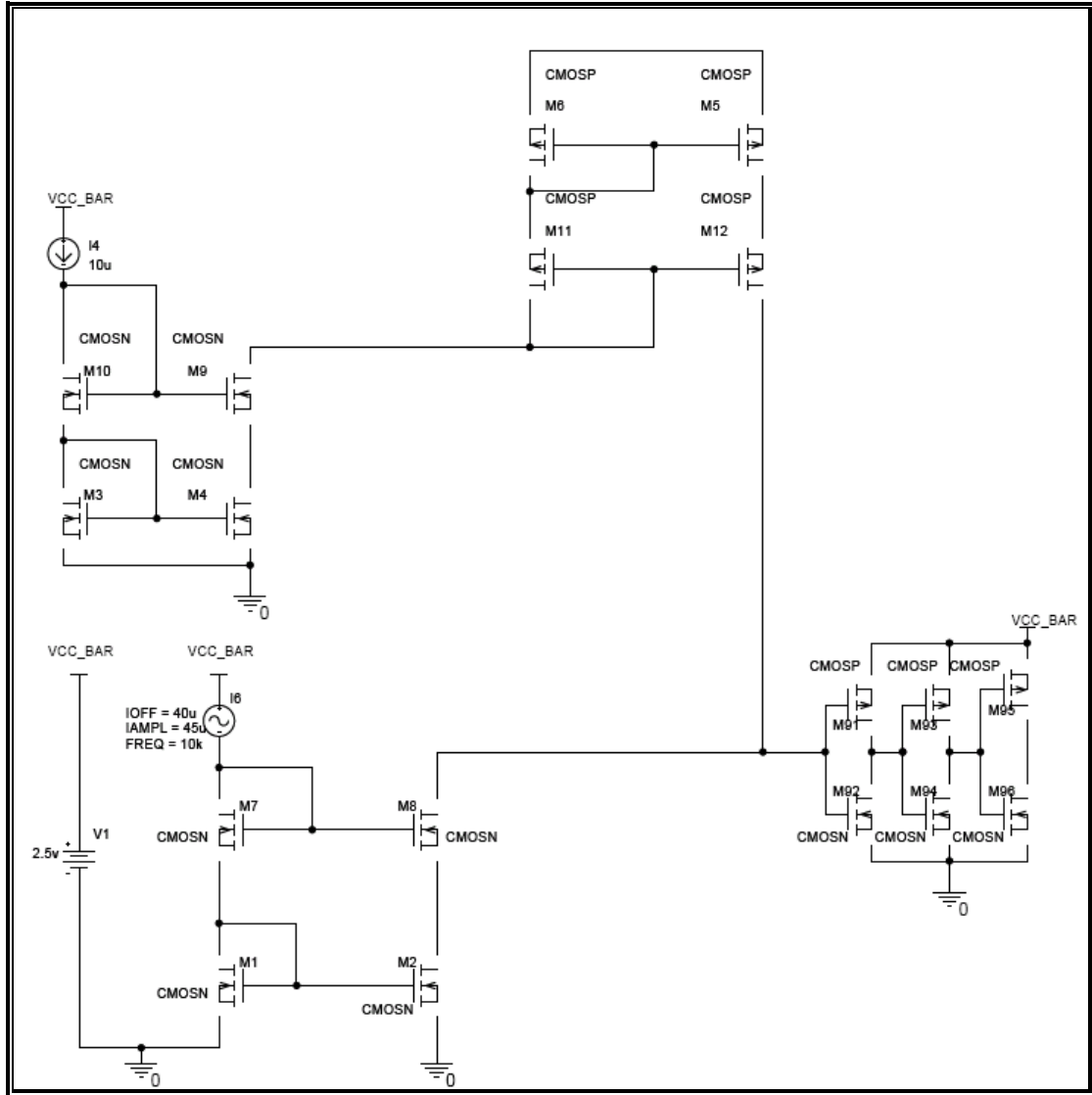
$$r_{out} \cong r_{ds2} \cdot g_{m4} \quad (1)$$

Görüldüğü gibi çıkış empedansı “ $g_{m4}r_{ds2}$ ” kat artmış olur. Bu da transistörün tipine ve akımlara göre 10 ile 100 kat arasında değişir. Çıkış empedansındaki bu önemli artış, özellikle tek katlı, düşük frekanslı yükselteçlerde etkili olur.

Ancak kaskat akım aynası kullanmanın da bir dezavantajı vardır. MOSFET’ler triod bölgesine girmeden önce maksimum sinyal salınımı düşüktür (Johns ve Martin, 1997).

Önceki tasarım basit akım aynaları kullanılarak yapılmıştır. ASD’nin performansını arttırmak için bütün basit akım aynaları, kaskad akım aynaları ile değiştirilmiştir.

Şekil 5’te kaskad akım aynaları kullanılarak çarpma yöntemine dayalı ilk 1-bitlik hücre yapısı görülmektedir.



Şekil 5. Kaskat akım aynaları ile çarpma yöntemine dayalı 1-bitlik hücre yapısı

I_{ref} akımı, M_1 , M_2 , M_7 , M_8 'ten oluşan kaskad yapıdaki N-ayna tarafından kopyalanmaktadır. Bu işlem aynı zamanda dönüştürücüyü dış ortamdandır. Akım çeken kaynaktan (current sink) akım basan kaynağa (akım kaynağı) dönüştürmek için, M_5 , M_6 , M_{11} , M_{12} 'den oluşan P-ayna kullanılarak akım tekrar kopyalanır. Akım aynalarının hataları ihmal edilirse, iki kez kopyalanan akımın referans akımına eşit olması gerekir.

Hücreye giren diğer akım " I_{In} " de N-aynadan (M_1, M_2, M_7, M_8) geçerek akım çeker duruma dönüşür. Değeri aynı, yönü farklıdır. Bu düğüm, P-aynanın (M_5, M_6, M_{11}, M_{12}) savak düğümüne bağlanarak I_{Ref} akım kaynağının yalıtılmış hali elde edilir. Buna ek olarak, CMOS akım karşılaştırıcısının girişi de bu düğüme bağlanır. Giriş akımı (sink), referans akımından (kaynak) büyük olduğunda "0"dan "1" seviyesine anahtarlama olacağı düşünülür. Giriş işareti üçüncü kez dönüştürülerek $|I_{In}| > |I_{Ref}|$ olduğunda karşılaştırıcı çıkışının anahtarlanması sağlanır.

7-bitlik, akım çarpma yöntemine dayalı kaskad ASD oluşturmak için Şekil 5'teki hücre yapısı yedi kez kopyalanmalıdır. Kopyalama işlemi için, N-MOS transistörlerin geçit uçları, sürdürdükleri, I_{In} için olan N-aynadaki ikinci transistörün geçit ucunu süren düğüme bağlanmalıdır.

İkinci bit hücresinin girişi için I_{Ref} akımının iki katı ($2I_{Ref}$) gereklidir. Birinci hücrede I_{Ref} kopyalanıp N-aynada ikiye katlanır. Transistörlerin geçit uçları paralel bağlıdır.

Üçüncü bit hücresinin girişi için $3I_{Ref}$ gereklidir. Bunun için katlama işleminden yararlanılamaz. Bunun yerine $2I_{Ref}$ ile I_{Ref} akımları ayrı ayrı kopyalanıp toplanır.

$4I_{Ref}$ elde etmek için $2I_{Ref}$ akımı ikiye katlanır.

$5I_{Ref}$ elde etmek için $2I_{Ref}$ ile $3I_{Ref}$ akımları kopyalanarak toplanır.

$6I_{Ref}$ için benzer şekilde $3I_{Ref}$ akımı ikiye katlanır.

$7I_{Ref}$ ise, $6I_{Ref}$ ile I_{Ref} akımlarının kopyalanarak toplanmasıyla elde edilir.

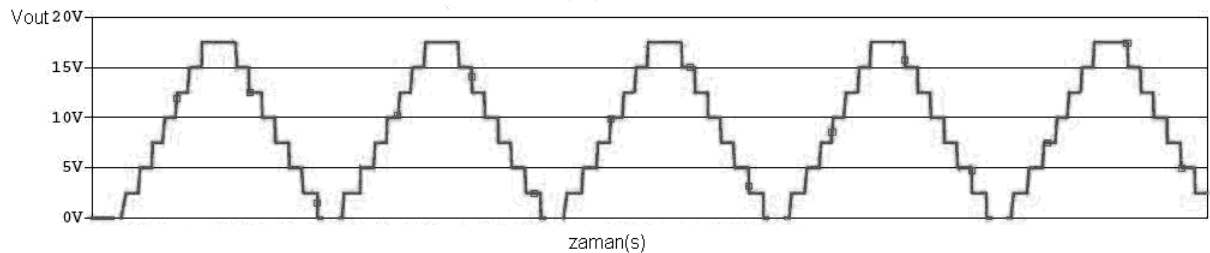
4. BENZETİM SONUÇLARI

Benzetimler, OrCAD 10.5 programı kullanılarak yapılmıştır. Transistör modelleri için MOSIS kütüphanesi kullanılmıştır. Öncelikle referans olarak, Helble tarafından 2004 yılında yapılmış olan basit akım aynalı yöntemin benzetim sonuçları doğrulanmış, daha sonra kaskad akım aynalı yöntem için benzer işlemler tekrarlanmıştır (Helble, 2004).

Basit akım aynalarında dinamik aralığın geniş olmasına karşın çıkış empedansı, kaskad akım aynalarına göre düşüktür. Bu da doğruluğunun daha düşük olmasına neden olur. Kaskad akım aynalarında dinamik aralığın daha düşük olmasına karşın çıkış empedansı, basit akım aynalarına göre daha yüksektir.

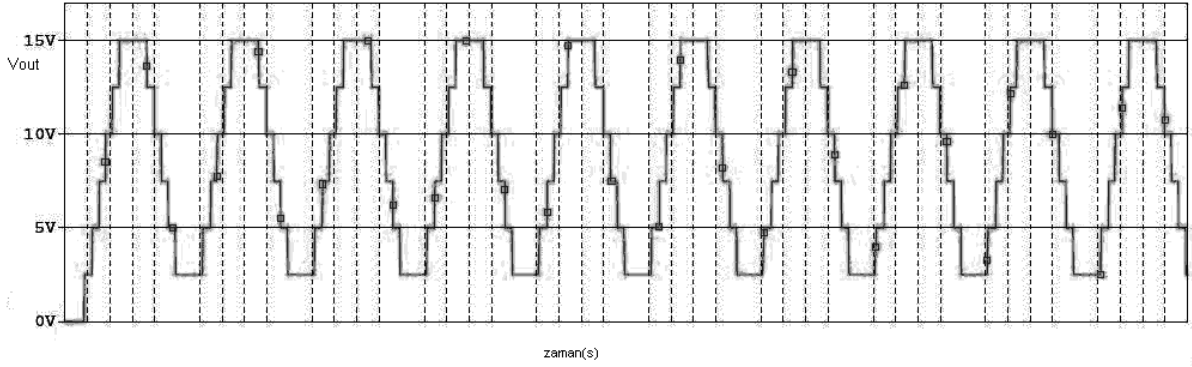
4.1. Çıkış Gerilimleri

Başlangıçta referans akımı $1 \mu A$, giriş işaretinin frekansı 100 kHz seçilmiştir. Bu referans akımı, yedi kata kadar çarpılmış ve testere dalga ile karşılaştırılmıştır. Birden yediye kadar her bitin "0"dan "1" seviyesine anahtarlanmasına bakıldığında doğrusallığın yüksek olduğu (yaklaşık $100 V/\mu s$) olduğu görülmüştür. Kod kaybı olmadığı ve doğrusallığın basit akım aynalı yöntemden daha iyi olduğu Şekil 6'daki gibi gözlenmiştir.



Şekil 6. 100 kHz için kaskad akım aynası kullanılan akım çarpma yöntemine dayalı 7-bitlik ASD çıkışı

Referans akımı 1 μ A, giriş işaretinin frekansı 200 kHz seçildiğinde, parazitik kapasite ve osilasyonlar nedeniyle, Şekil 7'den de görüleceği gibi, ASD çıkışında bazı bitler kaybedilmiştir. Frekansın artmasıyla, referans akımları üzerindeki osilasyonlar artmıştır. Bu durum, parazitik kapasitelerin, bant genişliği üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 7. 200 kHz için kaskad akım aynası kullanılan akım çarpma yöntemine dayalı 7-bitlik ASD çıkışı

Frekans 500 kHz seçildiğinde sürekli halde ortalama güç tüketiminin 7 mW olduğu söylenebilir. Düşük gerilim uygulamaları için bu çok uygun bir değerdir. Frekans 50 kHz'e düşürüldüğünde güç tüketimi benzer şekilde ortalama 3.5 mW değerine düşmüştür. Bu durum, beklenen bir sonuçtur.

4.2. INL ve DNL Sonuçları

İntegral doğrusalsızlık (INL), dönüştürücünün transfer fonksiyonunun, tam skala aralığında ideal doğrusal çizgiden ne kadar saptığını gösterir. Genellikle tam skala yüzdesi veya LSB (en az anlamlı bit) cinsinden ifade edilir.

$$INL = \frac{V_D - V_0}{V_{LSB}}, \quad 0 < D < 2^N - 1 \quad (2)$$

V_D , sayısal çıkış kodu D 'nin karşılık geldiği analog değer, N , ASD çözünürlüğü; V_0 , çıkış kodunun hepsi sıfır olduğu duruma karşılık gelen minimum analog değer; V_{LSB} , ardışıl iki kod arasındaki gerilim değeridir.

Türevsel doğrusalsızlık (DNL), transfer fonksiyonunun herhangi bir basamağındaki maksimum hatadır ve (2) bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$DNL = \frac{V_{D+} - V_D}{V_{LSB}}, \quad 0 < D < 2^N - 2 \quad (3)$$

Benzetim sonuçlarından hesaplanan maksimum INL ve DNL değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1'de görüldüğü gibi, INL değeri kaskat akım aynalı yöntemde 1.3 LSB'den 0.6 LSB'ye düşmüştür. Benzer şekilde, DNL değeri 2.3 LSB'den 1.2 LSB'ye inmiştir.

Çizelge 1. Akım çarpma yöntemine dayalı 7-bitlik ASD'ler için INL ve DNL değerleri

	Maks. INL (LSB)	Maks. DNL (LSB)
Basit akım aynaları kullanılan, akım çarpma yöntemine dayalı 7-bitlik ASD	1.3	2.3
Kaskad akım aynaları kullanılan, akım çarpma yöntemine dayalı 7-bitlik ASD	0.6	1.2

5. SONUÇLAR VE YORUM

Bu çalışmada akım aynalı ASD'lerin akım çarpma yöntemine dayalı iki farklı çeşidi incelenmiştir. Basit ve kaskad akım aynalı yöntemler hakkında bilgi verilmiş, daha sonra OrCAD 10.5 programı kullanılarak 7-bit için bu iki yöntemin benzetimleri yapılmıştır. Kaskat akım aynalı yöntemde, çıkış empedansı daha yüksek olduğu için ASD'nin performansının arttığı gözlenmiştir.

Helble tarafından basit akım aynaları ile geliştirilen tasarım, 25 nA referans akımı ve 5 kHz frekans koşullarında denenmiştir. Bu çalışmada ise referans akımı 1 μ A, giriş işaretinin frekansı 100 kHz'e çıkartılarak gerek referans akımı, gerekse frekans önemli ölçüde arttırılmıştır.

Akım aynalı, akım çarpma yöntemine dayalı ASD'ler, ilk olarak tıbbi alanda ve düşük güç tüketimi gerektiren sistemlerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Kaskad akım aynalı yöntemde güç tüketimi 50 kHz için 3.5 mW'a kadar düşmüştür.

ASD'lerin performansında bir gösterge olan INL ve DNL değerleri hesaplanmış ve kaskat akım aynalı yöntemde, basit akım aynalı yöntemle göre belirgin bir düşüş görülmüştür. Bu da hata oranının düştüğü ve doğrusallığın arttığı anlamına gelir.

Akım modlu devreler yeni bir yaklaşım olmamakla birlikte, bu yaklaşımla tasarlanan devreler yaygın değildir. Akım modlu devrelerin gerilim modlu devrelere, özellikle sensörlerle uyumlu çalışma ve düşük gerilimli uygulamalar yönünden üstünlükleri vardır.

İleriki çalışmalarda ASD seviyeleri arttırılabilir. VLSI uygulamasında transistörlerin uyumu iyileştirilerek ve boyutları küçültülerek sistemin hızı arttırılabilir.

TEŞEKKÜR

Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof.Dr.Uğur ÇAM'a çalışmalarımızda yol gösterdiği için teşekkür ederiz

KAYNAKLAR

- Gray P. R., Meyer R. G. (2001): "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits", John Wiley and Sons, Inc. .
- Helble H. (2004): "Development of a CMOS A/D Converter for an Artificial Synapsis", Diploma Degree thesis, Fachhochschule Konstanz.
- Johns D., Martin K. (1997): "Analog Integrated Circuit Design", John Wiley and Sons, Inc.
- Maloberti F. (2001): "Analog Design for CMOS VLSI Systems", Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Nairn D. G., Salama C. A. T. (1988): "Current-Mode Algorithmic Analog-to-Digital Converter", International Symposium on Circuits and Systems, s. 2573-2576.

- Nairn D. G., Salama C. A. T. (1990): “Algorithmic Analogue-to-Digital Converters Using Current-Mode Techniques”, IEE Proceedings, Cilt. 137, s. 163-168.
- Tezel A. (1999): “VLSI Implementation of Low Power Current Mode CMOS Algorithmic Analog to Digital Converters”, MSc., Thesis. Middle East Technical University.
- Toumazou C., Lidgey F., Haigh D. G. (1990): “Analogue IC Design: the Current-Mode Approach” Peter Peregrinus Ltd., London.