

# YÜKSEK-Q DEĞERLİ, ELEKTRONİK OLARAK AYARLANABİLEN FARK ALICI AB-SINIFI LOGARİTMİK ORTAM BANT GEÇİREN SÜZGEÇ TASARIMI

Ali KIRÇAY<sup>1</sup>

Uğur ÇAM<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi

Dokuz Eylül Üniversitesi, 35160, İzmir

<sup>1</sup>e-posta: ali.kircay@eee.deu.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: ugur.cam@eee.deu.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Akım Modlu Devreler, Logaritmik Ortam Süzgeçleri, Analog İşaret İşleme.*

## ABSTRACT

*In this paper, a new high-Q (quality factor), electronically-tunable, current-mode second-order differential type class-AB log-domain bandpass filter is proposed. It is systematically derived using state-space synthesis procedure. It has a high-Q, a differential structure and class-AB operation. Only transistors and grounded capacitors are required to realize the filter circuit. The center frequency, the quality factor, and gain of the filter can be electronically tuned by changing external currents. It is suitable for low voltage/power applications. PSPICE simulations are given to confirm the theoretical analysis. For this purpose, the filter is simulated by using both idealized BJT models and AT&T CBIC-R (NR200N-2X NPN) type transistors.*

## 1. GİRİŞ

Translineer prensibine [1] dayanan logaritmik ortam süzgeç devrelerinde temel yaklaşım, BJT'nin üstel akım-gerilim karakteristiğine dayanmaktadır. Logaritmik ortam süzgeçlerinde, giriş ile çıkış arasında doğrusal bir ilişki olmasına karşın, işaretin işlendiği ortam tümüyle doğrusal olmayan bir ortamdır. Süzgeç gerçekleştirme yöntemleri bakımından da diğer süzgeç gerçekleştirme tekniklerine göre büyük avantajlar sağlamaktadır. Süzgeç fonksiyonunu gerçekleştirmek için sadece kapasite ve transistör kullanımı yeterli olmaktadır. Dinamik translineer süzgeçleri, genlik uygunlaştırıcı akım-modlu süzgeçleri ya da üstel durum-uzayı süzgeçleri olarak da adlandırılan logaritmik ortam süzgeçleri, düşük gerilim, düşük güç tüketimi, düşük gürültü, yüksek doğrusallık, yüksek frekans uygulamalarında kullanılabilirliği ve elektronik olarak kesim frekansının ayarlanabilir olması, tümdevre teknolojisine uygunluk gibi büyük avantajlar taşımaktadır [2]- [9].

AB sınıfı devre mantığı yükselteç devrelerinde kullanılmaktaydı. AB sınıfı süzgeç düşüncesi ise ilk defa Seevinck tarafından sunulmuştur [9]. Frey, Seevinck tarafından ortaya atılan AB sınıfı süzgeç yapısını logaritmik ortama taşımıştır [11], [12]. Fark alıcı AB sınıfı süzgeçleri sağ ve sol olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Bu yüzden giriş işaretinin de ikiye ayrılması gerekmektedir. Giriş işaretini ikiye ayırmak için de farklı devreler geliştirilmiştir. İşaretin çıkışı sol ve sağ olmak üzere ikiye ayrılmakta ve bunların farkı alınarak çıkış işareti elde edilmektedir [11], [12]. Yapılan bu çalışmada da analog işaret işleme uygulamalarının en önemli blok yapılarından biri olan yüksek Q değerli, elektronik olarak ayarlanabilen, ikinci derece bant geçiren bir süzgeç, durum-uzay metodu ile AB sınıfı fark alıcı türde logaritmik ortamda gerçekleştirilmiştir.

## 2. YÜKSEK-Q DEĞERLİ, AB-SINIFI LOGARİTMİK ORTAM BANT GEÇİREN SÜZGEÇ TASARIMI

İkinci derece bant geçiren süzgecin transfer fonksiyonu aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{H(\omega_0 / Q)s}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (1)$$

Burada  $\omega_0$  merkez frekansı,  $H$  kazanç ve  $Q$  süzgecin kalite faktörüdür. Denklem (1) zaman ortamına aktarırsa, aşağıdaki gibi bir sistem denklemi elde edilir.

$$\ddot{y} = -\frac{\omega_0}{Q} \dot{y} - \omega_0^2 y + \frac{H\omega_0}{Q} \dot{u} \quad (2)$$

Giriş işaretinin türevi olan  $\dot{u}$ , süzgeci gerçekleştirmek için bir engel teşkil etmektedir. Bu yüzden  $\dot{u}$  bağıntıdan uzaklaştırılmalıdır. Durum denklemlerini

Companion formu ile belirlemek mümkündür. Durum değişkenleri şu şekilde seçilebilir:

$$x_1 = y + k_1 u \quad (3)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 + k_2 u \quad (4)$$

Denklem (2) yeniden düzenlenirse, aşağıda verilen birinci derece differensiyel denklemleri elde edilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 - k_2 u \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = -\omega_0^2 x_1 - \frac{\omega_0}{Q} x_2 + \left( \frac{\omega_0}{Q} k_2 + \omega_0^2 k_1 \right) u \quad (6)$$

$$+ \left( k_2 + \frac{\omega_0}{Q} k_1 + \frac{H\omega_0}{Q} \right) \dot{u} + k_1 \ddot{u}$$

$k_1$  ve  $k_2$  denklem (6)'dan bulunabilir.

$$k_1 = 0, \quad k_2 = -\frac{H\omega_0}{Q}$$

Elde edilen bağıntılar süzgecin gerçekleştirilmesi için ilk adım için uygun bir forma dönüşmüştür.

$$\dot{x}_1 = x_2 + \frac{H\omega_0}{Q} u \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = -\omega_0^2 x_1 - \frac{\omega_0}{Q} x_2 - \frac{H\omega_0^2}{Q^2} u \quad (8)$$

Denklem (6) ve (7) matris formda aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega_0^2 & -\frac{\omega_0}{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{H\omega_0}{Q} \\ -\frac{H\omega_0^2}{Q^2} \end{bmatrix} u \quad (9)$$

Süzgeç devresini gerçekleştirebilmek için ikinci adım uygulanmalıdır. Bu amaç için denklem (9) uygun bir katsayısı matrisi ile çarpılmalıdır. Bu durumda aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0^* & \omega_0 \\ -\omega_0^* & -\frac{\omega_0}{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{H\omega_0}{Q} \\ -\frac{H\omega_0^*}{Q^2} \end{bmatrix} u \quad (10)$$

$0^*$ ,  $-\omega_0^*$ , ve  $\frac{H\omega_0^*}{Q^2}$  parametreleri süzgeç devresini

gerçekleştirmek için engel teşkil etmektedir. Engel teşkil eden bu parametreleri (-) işaretinden kurtarmak için üçüncü adım olan fark alıcı AB sınıfı süzgeç yaklaşımı kullanılmalıdır.

Çıkış denklemi:  $y = x_1$  (11)

Burada  $u$  giriş,  $y$  çıkış,  $x_1$  ve  $x_2$  durum değişkenleridir.

Fark alıcı AB sınıfı için girişin, çıkışın ve durum değişkenlerinin sol taraf denklemleri ve sağ taraf denklemleri olmak üzere iki kısma ayrılması gerekmektedir. Durum değişkenleri, giriş bağıntısı ve çıkış bağıntısı aşağıdaki gibidir,

$$x_1 = x_{1L} - x_{1R}, \quad x_2 = x_{2L} - x_{2R}$$

$$u = u_L - u_R$$

$$y = y_L - y_R \quad (12)$$

Sol taraf denklemleri,

$$\dot{x}_{1L} = \omega_0 x_{2L} + \frac{H\omega_0}{Q} u_L - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{1L} x_{1R} \quad (13)$$

$$\dot{x}_{2L} = -\omega_0 x_{1L} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2L} - \frac{H\omega_0}{Q^2} u_L - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{2L} x_{2R} \quad (14)$$

Sağ taraf denklemleri,

$$\dot{x}_{1R} = \omega_0 x_{2R} + \frac{H\omega_0}{Q} u_R - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{1L} x_{1R} \quad (15)$$

$$\dot{x}_{2R} = -\omega_0 x_{1R} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2R} - \frac{H\omega_0}{Q^2} u_R - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{2L} x_{2R} \quad (16)$$

$0^*$ ,  $-\omega_0^*$ , ve  $-\frac{H\omega_0^*}{Q^2}$  parametrelerinin işaretleri

değiştirilmiş şekliyle bağıntılar yeniden yazılırsa, aşağıdaki uygunlaştırılmış form denklemleri elde edilmiş olur.

Sol taraf denklemleri (uygunlaştırılmış form),

$$\dot{x}_{1L} = \omega_0 x_{2L} + \frac{H\omega_0}{Q} u_L - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{1L} x_{1R} \quad (17)$$

$$\dot{x}_{2L} = +\omega_0 x_{1R} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2L} + \frac{H\omega_0}{Q^2} u_R - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{2L} x_{2R} \quad (18)$$

Sağ taraf denklemleri (uygunlaştırılmış form),

$$\dot{x}_{1R} = \omega_0 x_{2R} + \frac{H\omega_0}{Q} u_R - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{1L} x_{1R} \quad (19)$$

$$\dot{x}_{2R} = +\omega_0 x_{1L} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2R} + \frac{H\omega_0}{Q^2} u_L - \frac{\omega_0}{I_{f1}} x_{2L} x_{2R} \quad (20)$$

Uygunlaştırılmış forma dönüştürülen sol ve sağ tarafta bulunan bağıntılara aşağıdaki üstel aktarım fonksiyonları uygulanmalıdır. Burada üstel aktarım fonksiyonları seçilirken, BJT'nin üstel aktarım fonksiyonuna uygun fonksiyon seçilmelidir. BJT'nin  $\beta$ 'sı sonsuz kabul edilmiştir. Bağıntıların her iki tarafı  $CV_t / I_s e^{V_{iL} / V_i}$  ile çarpılırsa, (22) ve (23) denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned} x_{1L} &= I_s e^{V_{iL} / V_i}, \quad x_{1R} = I_s e^{V_{iR} / V_i}, \\ x_{2L} &= I_s e^{V_{i2L} / V_i}, \quad x_{2R} = I_s e^{V_{i2R} / V_i}, \\ u_L &= I_s e^{V_{oL} / V_i}, \quad u_R = I_s e^{V_{oR} / V_i} \end{aligned} \quad (21)$$

Burada  $I_s$  saturasyon akımı,  $V_i$  ise termal gerilimi  $V_i = kT / q$  dir.

$$CV_{iL} = \omega_0 CV_t e^{\frac{V_{i2L} - V_{iL}}{V_i}} + \frac{H\omega_0}{Q} CV_t e^{\frac{V_{oL} - V_{iL}}{V_i}} \quad (22)$$

$$- \frac{\omega_0}{I_{f1}} CV_t I_s e^{V_{iR} / V_i}$$

$$CV_{i2L} = \omega_0 CV_t e^{\frac{V_{iR} - V_{i2L}}{V_i}} - \frac{\omega_0}{Q} CV_t \quad (23)$$

$$+ \frac{H}{Q^2} CV_t e^{\frac{V_{oR} - V_{i2L}}{V_i}} - \frac{\omega_0}{I_{f1}} CV_t I_s e^{V_{i2R} / V_i}$$

$$I_{f1} = \omega_0 CV_t \quad (24)$$

$$I_{f2} = \frac{H\omega_0}{Q} CV_t \quad (25)$$

$$I_{f3} = \frac{\omega_0}{Q} CV_t \quad (26)$$

$$I_{f4} = \frac{H\omega_0}{Q^2} CV_t \quad (27)$$

$$C\dot{V}_{1L} = I_{f1}e^{\frac{V_{2L}-V_{1L}}{V_t}} + I_{f2}e^{\frac{V_{0L}-V_{1L}}{V_t}} - I_s e^{V_{1R}/V_t} \quad (28)$$

$$C\dot{V}_{2L} = I_{f1}e^{\frac{V_{1R}-V_{2L}}{V_t}} - I_{f3} + I_{f4}e^{\frac{V_{0R}-V_{2L}}{V_t}} - I_s e^{V_{2R}/V_t} \quad (29)$$

$I_{f1}$ ,  $I_{f2}$  ve  $I_{f4}$  sabit akım değerleri de üstel olarak şu şekilde tanımlanabilir;  $I_s e^{V_{f1}/V_t}$ ,  $I_s e^{V_{f2}/V_t}$  ve  $I_s e^{V_{f4}/V_t}$ . Sol taraftaki denklemler aşağıdaki bağıntılara dönüşür,

$$C\dot{V}_{1L} = I_s e^{\frac{V_{2L}+V_{f1}-V_{1L}}{V_t}} + I_s e^{\frac{V_{0L}+V_{f2}-V_{1L}}{V_t}} - I_s e^{V_{1R}/V_t} \quad (30)$$

$$C\dot{V}_{2L} = I_s e^{\frac{V_{1R}+V_{f1}-V_{2L}}{V_t}} - I_{f3} + I_s e^{\frac{V_{0R}+V_{f4}-V_{2L}}{V_t}} - I_s e^{V_{2R}/V_t} \quad (31)$$

$$\text{Sol taraf çıkış bağıntısı: } y_L = I_s e^{V_{1L}/V_t} \quad (32)$$

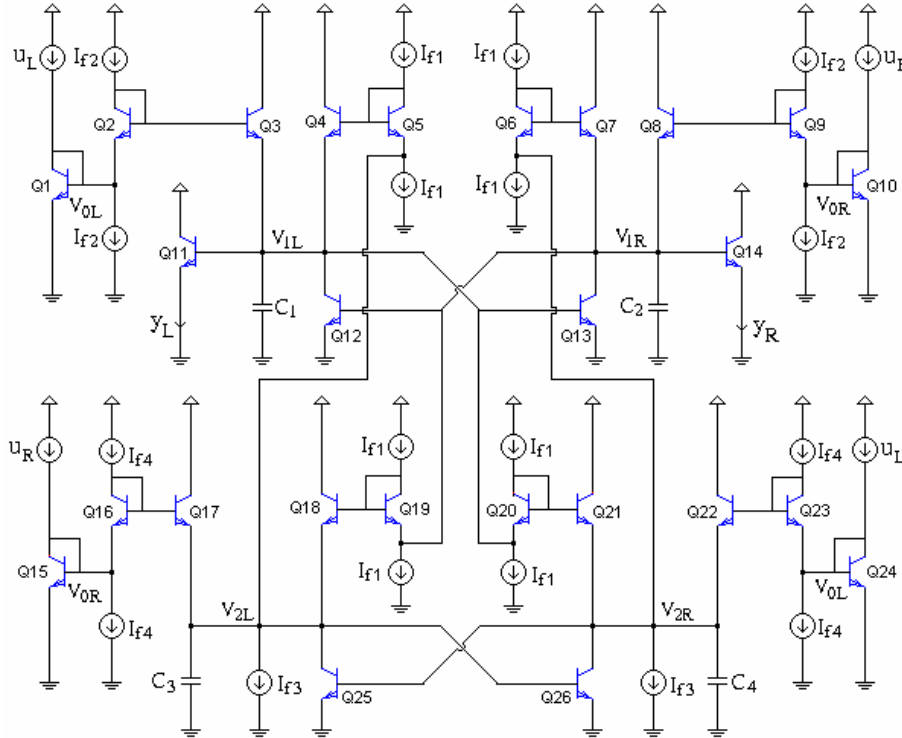
Denklem (31)'in sol tarafındaki terim bir kondansatörün akımını, sağ tarafındaki terimler de sabit bir akım kaynağı ile transistorlerin kollektör akımlarını tanımlar. Aynı yöntemle sağ taraftaki denklemler de elde edilebilir;

$$C\dot{V}_{1R} = I_s e^{\frac{V_{2R}+V_{f1}-V_{1R}}{V_t}} + I_s e^{\frac{V_{0R}+V_{f2}-V_{1R}}{V_t}} - I_s e^{V_{1L}/V_t} \quad (33)$$

$$C\dot{V}_{2R} = I_s e^{\frac{V_{1L}+V_{f1}-V_{2R}}{V_t}} - I_{f3} + I_s e^{\frac{V_{0L}+V_{f4}-V_{2R}}{V_t}} - I_s e^{V_{2L}/V_t} \quad (34)$$

$$\text{Sağ taraf çıkış bağıntısı: } y_R = I_s e^{V_{1R}/V_t} \quad (35)$$

(30), (31), (32), (33), (34), ve (35) bağıntılarını kullanarak, fark alıcı AB sınıfı ikinci derece bant geçiren logaritmik ortam süzgecinin devresini Şekil-1'de görüldüğü tasarlamak mümkündür. Giriş akımını sol ve sağ akımlara ayırmak için akım ayırıcısı devresi kullanılmıştır. Akım ayırıcısı  $u_L$  ve  $u_R$ 'yi üretmektedir [12], [13].



Şekil-1 Yüksek-Q değerli, elektronik olarak ayarlanabilen fark alıcı AB-sınıfı logaritmik ortam bant geçiren süzgeç

$$\text{Tasarlanan süzgecin merkez frekansı: } \omega_0 = \frac{I_{f1}}{CV_t} \quad (36)$$

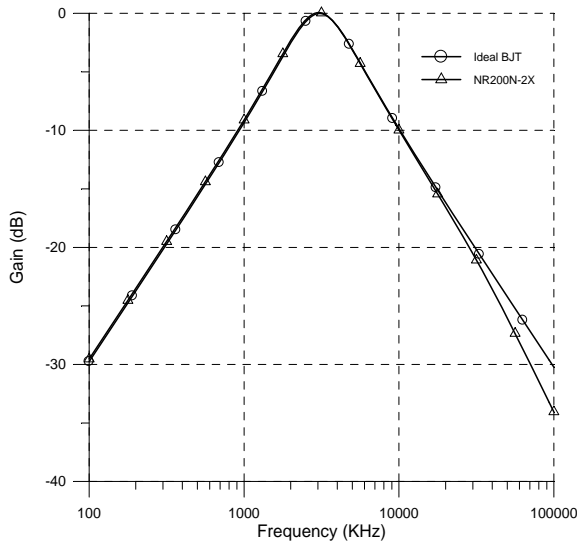
$$\text{Süzgecin kazancı: } H = \frac{I_{f2}}{I_{f3}} \quad (37)$$

$$\text{Süzgecin kalite faktörü: } Q = \sqrt{\frac{I_{f1}I_{f2}}{I_{f3}I_{f4}}} \quad (38)$$

$\omega_0$ ,  $H$ ,  $Q$  parametre değerleri elektronik olarak akım kaynaklarının değerleri değiştirilerek yapılabilmektedir.

### 3. BENZETİM SONUÇLARI

Tasarımı yapılan devrenin benzetimi hem ideal, hem de AT&T CBIC-R (NR200N-2X NPN), (PR200N-2X PNP) transistörleri kullanılarak PSPICE ile yapılmıştır. Benzetim için seçilen değerler sırası ile şu şekilde seçilmiştir;  $Q = 1, H = 1, C = 100 \text{ pF}$ ,  $I_{f1} = I_{f2} = I_{f3} = I_4 = \omega_0 CV_t = 50 \mu\text{A}$ ,  $V_t = 25.6 \text{ mV}$ ,  $V_{cc} = 1.2 \text{ V}$ . Süzgecin merkez frekansı  $f_0 = 3.108 \text{ MHz}$  dir. Şekil-2’de, gerçekleştirilen süzgecin kazanç cevabı görülmektedir.



Şekil-2. Tasarlanan bant geçiren logaritmik ortam süzgecinin kazancı

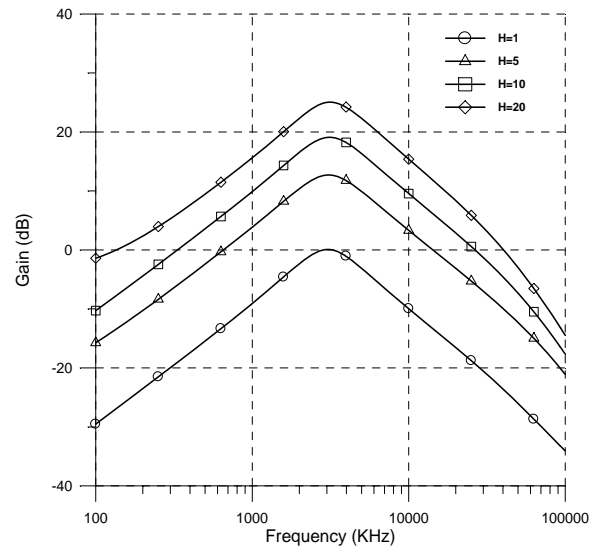
Süzgecin merkez frekansı  $f_0$ , kalite faktörü  $Q$ , ve kazancı  $H$  devredeki akım kaynakları ile değiştirilerek elektronik olarak ayarlanabilmektedir. Tablo I ve Şekil-3’de süzgecin kazancı  $H$ ’nin devrede bulunan akım kaynaklarının değerleri değiştirilerek, elektronik olarak ayarlandığı görülmektedir. Bu amaç için akım kaynakları  $I_{f2} = I_{f4} = 50 \mu\text{A}$ ’den

$I_{f2} = I_{f4} = 1000 \mu\text{A}$ ’ye kadar değiştirilerek kazanç  $H = 1$ ’den  $H = 20$ ’ye ayarlanabilmektedir.

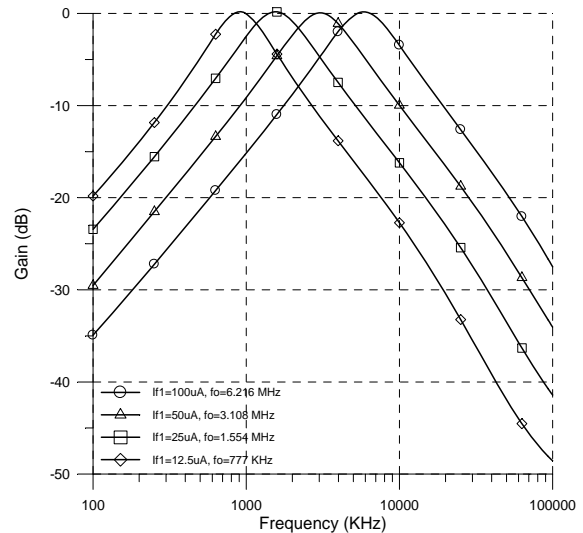
Şekil-4’te ise akım kaynaklarını değiştirerek süzgecin merkez frekansının elektronik olarak ayarlandığını görmek mümkündür. Merkez frekansını  $777 \text{ KHz}$  den  $6.216 \text{ MHz}$ ’ye kadar ayarlamak için akım kaynağını  $12.5 \mu\text{A}$  den  $100 \mu\text{A}$ ’ya kadar değiştirmek gerekmektedir.

Tablo-1.  $H$ ’nin akım kaynakları ile değişimi

H	$f_0$	$I_{f1} = I_{f3}$	$I_{f2} = I_{f4}$	C
1	3.108 MHz	50 $\mu\text{A}$	50 $\mu\text{A}$	100 pF
5	3.108 MHz	50 $\mu\text{A}$	250 $\mu\text{A}$	100 pF
10	3.108 MHz	50 $\mu\text{A}$	500 $\mu\text{A}$	100 pF
20	3.108 MHz	50 $\mu\text{A}$	1000 $\mu\text{A}$	100 pF



Şekil-3. Tasarlanan bant geçiren logaritmik ortam süzgeç kazancının elektronik olarak ayarlanması

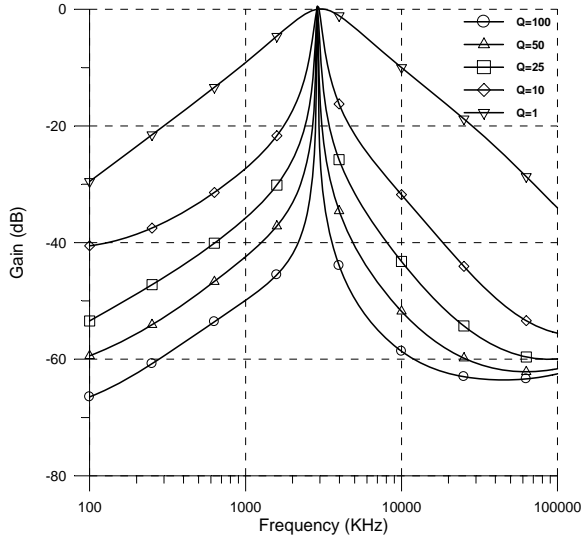


Şekil-4. Bant geçiren logaritmik ortam süzgecinin merkez frekansının elektronik olarak ayarlanması

Tablo II ve Şekil-5’te süzgecin kalite faktörü  $Q$  değerinin 1’den 100’e kadar değişimi devrede bulunan akım değerleri değiştirilerek, elektronik olarak ayarlandığı görülmektedir.

Tablo-2. Q'nun akım kaynakları ile ayarlanması

Q	$f_0$	$I_{f1}$	$I_{f2}$	$I_{f3}$	$I_{f4}$	C
1	3.108 MHz	50uA	50uA	50uA	50uA	100pF
10	3.108 MHz	50uA	5uA	5uA	0.2uA	100pF
25	3.108 MHz	50uA	2uA	2uA	0.08uA	100pF
50	3.108 MHz	50uA	1uA	1uA	0.02uA	100pF
100	3.108 MHz	50uA	0.5uA	0.5uA	0.005uA	100pF



Şekil-5. Bant geçiren logaritmik ortam süzgecinin kalite faktörünün elektronik olarak ayarlanması

#### 4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, yüksek kalite faktörüne sahip, ikinci derece fark alıcı AB sınıfı bant geçiren akım modlu, logaritmik ortam süzgeci gerçekleştirilmiştir. 1.2 V gibi oldukça düşük bir besleme gerilimiyle teorik analiz sonuçları PSPICE benzetimi ile doğrulanmıştır. Bu süzgecin en önemli özelliği ise giriş ile çıkış arasında doğrusal bir ilişki olmasına karşın, işaretin işlendiği ortam tümüyle doğrusal olmayan bir ortamda işlenmesidir. Süzgecin merkez frekansı, kazancı ve kalite faktörü elektronik olarak akım kaynaklarının değerleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Önerilen devrenin diğer avantajları ise süzgeç fonksiyonunu gerçekleştirmek için sadece kapasite ve transistör kullanımının yeterli olması, düşük güç tüketimi, düşük gürültü, bant genişliğinin geniş bir aralıkta bulunması, yüksek frekans uygulamalarında kullanılabilmesi ve tümdevre teknolojisine uygunluk gibi özelliklerinden dolayı analog işaret işleme uygulamalarına alternatif çözümler sağlamaktadır.

#### KAYNAKLAR

[1] Gilbert B., Translinear circuits: A proposed classification, *ELECTRONICS LETTERS*, Vol.11, pp.14-16, 1975.

[2] Adams R.W., "Filtering in the log-domain", Presented at *63<sup>rd</sup> AES Conference*, New York, May 1979.

[3] Frey D. R., Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering, *IEE PROC.-G, CIRCUITS SYST. DEVICES*, Vol.140, No.6, pp.406-416, Dec.1993.

[4] Frey D. R., Exponential state-space filters: A generic current-mode design strategy, *IEEE TRANSACTION on CIRCUITS and SYSTEMS-I: Fundamental Theory And Application*, Vol.43, pp.34-42, 1996.

[5] Mulder J., Serdijn W. A., Woerd A. C., and Roermund A. H. M., Dynamic Translinear Circuits-An Overview, *ANALOG INTEGRATED CIRCUITS and SIGNAL PROCESSING*, Volume 22, Issue 2, pp.111-126, 2000.

[6] Roberts G. W., Leung V. W., *Design And Analysis of Integrator-Based Log-Domain Filter Circuits*, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[7] Minch B. A., Multiple-input translinear element log-domain filters, *IEEE TRANSACTION on CIRCUITS and SYSTEMS-II Analog and Digital Signal Processing* Vol.48, Issue:1, pp.29-36, 2001.

[8] Tsvividis Y. P., Companding in signal processing, *ELECTRONICS LETTERS*, Vol.26, pp. 1331-1332, 1990.

[9] Seevinck E., Companding current-mode integrator: A new circuit principle for continuous-time monolithic filters, *ELECTRONICS LETTERS* Vol.26, No.24, pp.2064-2065, 1990.

[10] E. Masry e., Wu j., Fully Differential Class-AB Log-Domain Integrator, *ANALOG INTEGRATED CIRCUITS and SIGNAL PROCESSING* Vol.25, Issue 1, pp. 35-46, 2000.

[11] Frey D. R., Tola A. T., A state-space formulation for externally linear class-AB dynamical circuits'' *IEEE TRANSACTION on CIRCUITS and SYSTEMS-II Analog and Digital Signal Processing*, Vol: 46, Iss:3, pp:306-314, 1999 .

[12] Tola A. T., Frey D. R., Study of Different Class-AB Log Domain First-Order Filters, *ANALOG INTEGRATED CIRCUITS and SIGNAL PROCESSING* Volume 22, Issue 2, Pages: 163-176, Mar 2000.

[13] Tola A. T., *A study of non-ideal log-domain and differential class-AB filters*. PhD Thesis, Lehigh University, Dec.1999.