



Uniform cosine modulated filter banks - a new cascade method based on window functions

Gokcen Ozdemir*^{ID}, Nurhan Karaboga^{ID}

The Department of Electrical and Electronic Engineering, Erciyes University, Kayseri, 38039, Turkiye

Highlights:

- Cosine modulated filter bank design.
- Cascade method.
- Investigation of the effects of filter order on the filter bank design.
- ECG signal application.

Keywords:

- Modulated filter bank
- Discrete cosine transform
- Kaiser window
- Gaussian window
- Amplitude distortion
- Peak reconstruction error

Article Info:

Research Article

Received: 23.10.2018

Accepted: 15.05.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.473976

Correspondence:

Author:Gokcen Ozdemir

e-mail:

gozdemir@erciyes.edu.tr

phone: +90 352 207 6666 / 32207

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a new cosine modulated filter bank design is proposed by using window functions. The prototype filter of the filter bank is designed with cascade use of the Gaussian window function and Kaiser window function in the proposed method. The filter bank designed using proposed prototype filter and discrete cosine transform is analyzed for four different number of channels and different filter lengths. The proposed method is compared with the designs using Kaiser and Gaussian window functions. According to the results, it is seen that the proposed method gave better results than the others in terms of peak reconstruction error. It is shown that the proposed prototype filter has better stop band attenuation values than the compared ones in the literature. At the end of the study, the application of two filter banks with different channel numbers for the proposed method in the ECG signal is given.

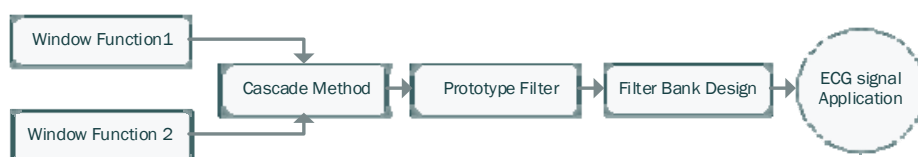


Figure A. Stages of the proposed study.

Purpose: The aim of the study is to design a high performance prototype filter for the cosine modulated filter banks. Optimizing the prototype filter means optimization of the filter bank.

Theory and Methods:

In this study, window functions are used to design the filter bank. One of the easiest and most efficient way to design a digital filter is using window functions. There are lots of window functions proposed by different researchers in the literature. Some window functions, called adjustable window functions, have adjustable parameters that allow selection of desired ripple and attenuation parameters. In this study, Kaiser and Gaussian windows are chosen as the adjustable window functions to design the cosine modulated filter bank due to their advantages in the application. The prototype filter of proposed method is obtained by cascading the Kaiser and Gaussian windows. The uniform filter bank is performed using the proposed prototype filter.

Results:

The performance of the proposed method is compared with the filter banks designed with a single window function as well as with some other studies in the literature. According to the results, it has been seen that the proposed method gave better results than the others in terms of peak reconstruction error and stopband attenuation. Finally, an ECG (Electrocardiography) signal application is included to the study to evaluate the performance of the proposed filter bank in terms of amplitude distortion and correlation.

Conclusion:

It has been shown that the proposed prototype filter has better performance values than the compared ones in the literature. At the end of the study, the ECG signal application of the two filter banks which have different channel numbers is given. For the same filter order, the correlation is increased related to the increase in the number of channels.



Düzgün kosinüs modüleli süzgeç bankaları –pencere fonksiyonu tabanlı yeni bir kaskat yöntem

Gökçen Özdemir*^{ID}, Nurhan Karaboğa^{ID}

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Melikgazi Kayseri, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kosinüs modüleli süzgeç bankası.
- Kaskat yöntem.
- Süzgeç derecesinin süzgeç bankası tasarımına etkilerinin incelenmesi.
- EKG işaret uygulaması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 23.10.2018
Kabul: 15.05.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.473976

Anahtar Kelimeler:

Modüleli süzgeç bankası
ayrık kosinüs dönüşümü
kaiser penceresi
gaussian penceresi
genlik bozulması
tepe yeniden yapılandırma
hatası

ÖZET

Bu çalışmada pencere fonksiyonları kullanılarak yeni bir kosinüs modüleli süzgeç bankası tasarımı önerilmiştir. Önerilen yöntemde süzgeç bankasının prototip süzgeci, Kaiser pencere fonksiyonu ile Gaussian pencere fonksiyonunun kaskat kullanımıyla tasarlanmıştır. Önerilen prototip süzgeç ve ayrık kosinüs dönüşümü kullanılarak tasarlanan süzgeç bankası, dört farklı kanal sayısı ve farklı süzgeç uzunluğu değerleri için incelenmiştir. Önerilen yöntem, Kaiser ve Gaussian pencere fonksiyonları kullanılarak yapılan tasarımlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yöntemin tepe yeniden yapılandırma hatası (PRE) değeri açısından diğerlerinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Önerilen prototip süzgecin literatürden karşılaştırılan benzerlerine göre daha iyi durdurma bandı zayıflatması değerlerine sahip olduğu gösterilmiştir. Çalışmanın sonunda, önerilen yöntem için farklı kanal sayılarına sahip iki süzgeç bankasının EKG işaretindeki uygulaması gösterilmiştir.

Uniform cosine modulated filter banks - a new cascade method based on window functions

H I G H L I G H T S

- Cosine modulated filter bank design.
- Cascade method.
- Investigation of the effects of filter order on the filter bank design.
- ECG signal application

Article Info

Research Article
Received: 23.10.2018
Accepted: 15.05.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.473976

Keywords:

Modulated filter bank
discrete cosine transform
kaiser window
gaussian window
amplitude distortion
peak reconstruction error

ABSTRACT

In this study, a new cosine modulated filter bank design is proposed by using window functions. The prototype filter of the filter bank is designed with cascade use of the Gaussian window function and Kaiser window function in the proposed method. The filter bank designed using proposed prototype filter and discrete cosine transform is analyzed for four different number of channels and different filter lengths. The proposed method is compared with the designs using Kaiser and Gaussian window functions. According to the results, it is seen that the proposed method gave better results than the others in terms of Peak Reconstruction Error (PRE). It is shown that the proposed prototype filter has better stop band attenuation values than the compared ones in the literature. At the end of the study, the application of two filter banks with different channel numbers for the proposed method in the ECG signal is shown.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: gozdemir@erciyes.edu.tr, nurhan_k@erciyes.edu.tr / Tel: +90 352 207 6666 / 32207

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Analog işaretler sayısal işaretlere dönüştürülürken işlenebilmeleri için genellikle ayrı parçalara bölünürler. Parçalara ayrıldıkları noktalardaki sınır etkilerinden korunmak için, işaret bloğunun her iki ucunu da incelten bir pencere fonksiyonu ile ağırlıklandırma işlemi yapılır. Pencere fonksiyonu, seçilen bir aralığın dışında sıfır değerini alan bir matematiksel fonksiyondur. Bir işaret bir pencere fonksiyonu ile çarpıldığı zaman, çarpım sonucu da aralığın dışında sıfıra eşittir. Belirlenen pencerenin dışında bir değer alamayacağından bu fonksiyonlar 'pencere fonksiyonu' ismini almıştır. Pencere fonksiyonuna $f(t)$ denecek olursa bu fonksiyonun Fourier transformu $F(j\omega)$ şu şekilde ifade edilir [1]:

$$F(j\omega) = \int_{-\tau}^{\tau} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Bir sonlu dürtü yanıtı (FIR) süzgeç tasarlanmanın en kolay ve en verimli yolu istenilen aralığın dışında kalan ideal süzgeç yanıtını kırpma [2]. Pencere fonksiyonlarında ana-lob genişliği, yan-lob azalma oranı gibi performansı etkileyen birtakım parametreler mevcuttur. Bir pencere fonksiyonu tasarımındaki temel amaç, istenilen genlik spektrumuna düşük derece ve uygun spektral parametrelerle ulaşmaktır.

Pencere fonksiyonlarının bazı karakteristiklere sahip olmaları gerekir [1]:

- $f(t)$ gerçek ve sıfırdan farklı olmalıdır.
- $f(t)$ bir çift fonksiyon olmalıdır, yani $f(t) = f(-t)$ ve bu yüzden $F(j\omega)$ gerçek olmalıdır.
- $f(t)$, $t = 0$ 'da maksimum değerine ulaşmalıdır, yani tüm t değerleri için $|f(t)| \leq f(0)$ ve $|t| > \tau$ için $f(t) = 0$ olmalıdır, burada τ pencerenin tek taraflı periyodunu ifade eder.
- $f(t)$ fonksiyonu orijinde bir ana-lob ve her iki tarafta yan-loblara sahip olmalıdır.
- Ana-lob genişliği mümkün olduğu kadar dar olmalıdır.
- Ana-lob, toplam enerjinin büyük bir kısmını ihtiva etmelidir.
- Maksimum yan-lob seviyesi ana-lob tepe değerine göre mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır.

Araştırmacılar tarafından sunulan çok sayıda pencere fonksiyonu mevcuttur. Pencere fonksiyonları sahip oldukları parametrelere göre kendi arasında sabit pencere fonksiyonları ve ayarlanabilir pencere fonksiyonları olmak üzere ikiye ayrılırlar. *Sabit pencere fonksiyonları*, sabit miktarda zayıflatma sağlar. Bu yüzden birçok uygulamada kullanıma elverişsizdirler. Literatürde kullanılan sabit pencere fonksiyonlarından bazıları şunlardır: Hann, Hamming, Bartlett, Blackman, Rectangular, Triangular, Parzen, vb. Pencere fonksiyonlarının hemen hepsi fonksiyonu öneren kişinin adı ile adlandırılır [1]. Bazı pencerelerde ise istenilen dalgalanma ve zayıflatma parametrelerinin seçilmesine izin veren biçim parametreleri

mevcuttur. Bu pencere fonksiyonlarına 'ayarlanabilir pencere fonksiyonları' adı verilir. Bu pencerelere Kaiser, Gaussian, Taylor, Chebyshev, Samaraki, Ultraspherical gibi fonksiyonlar örnek verilebilir.

Bu çalışmada kosinüs modüleli süzgeç bankası tasarımı için, uygulamada sahip oldukları üstünlüklerden dolayı ayarlanabilir pencere fonksiyonlarından Kaiser ve Gaussian pencereleri seçilmiştir. Bu pencere fonksiyonlarının literatürde yer almayan kaskat kullanımı ile prototip süzgeç tasarlanmış, elde edilen prototip süzgeç ile düzgün (uniform) süzgeç bankası tasarımı gerçekleştirilmiştir. Düzgün süzgeç bankalarında alt bantların frekans bandındaki genişlikleri birbirine eşittir. Önerilen yöntemle tasarlanan süzgeç bankası parametreleri, Kaiser penceresi ve Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanan süzgeç bankası parametreleri ile karşılaştırılmıştır.

1.1. Kaiser Penceresi (Kaiser Window)

Uygulamada en sık kullanılan pencere fonksiyonlarından biridir. Kaiser penceresi, sadeliği ve sahip olduğu iki bağımsız parametrenin verdiği esneklik ile yinelemesiz süzgeç tasarımında çok kullanılan bir penceredir. Bessel fonksiyonu temelli Kaiser penceresi Jim Kaiser tarafından geliştirilmiştir [3]. Kaiser penceresinin katsayıları aşağıdaki eşitlik ile belirlenir:

$$w(n) = \frac{I_0\left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{n-N/2}{N/2}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)}, 0 \leq n \leq N \quad (2)$$

Burada N süzgeç uzunluğu; I_0 , sıfırıncı dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonu ve β zayıflatma parametresidir. I_0 ,

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^{2k}}{k!} \right]^2 \quad (3)$$

olarak verilir. β değeri arttıkça ana-lob genişliği artarken yan-lobların genliği azalır. Bu durum üç farklı β değeri için Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bir Kaiser penceresi kullanarak FIR süzgeç tasarlamaya yardımcı olan β ve N tasarım formülleri de Kaiser tarafından deneysel olarak geliştirilmiştir[4]. Aşağıda tasarımda kullanılan parametrelerin eşitlikleri verilmektedir. Süzgeç derecesi N ,

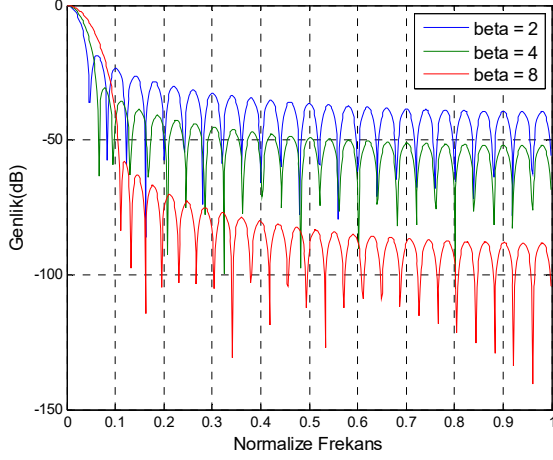
$$N = \frac{As - 7.95}{2.285 \Delta w} \quad (4)$$

Durdurma bandı zayıflatması A_s ,

$$A_s = -20 \log_{10} \delta_2 \quad (5)$$

Geçiş bandı genişliği Δw , durdurma bandı frekansı w_s ve geçiş bandı frekansı w_p cinsinden,

$$\Delta w = w_s - w_p \quad (6)$$



Şekil 1. Kaiser penceresi için β değerindeki artışa bağlı olarak ana-lob ve yan-loblardaki değişim.
(Change in the main-lobe and side-lobes due to the increase in β value for the Kaiser window.)

dir. Beta parametresi de durdurma bandı zayıflatmasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır:

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(A_s - 8.7), & A_s > 50 \\ 0.5842(A_s - 21)0.4 \\ + 0.07886(A_s - 21), & 50 \geq A_s \geq 21 \\ 0 & A_s < 21 \end{cases} \quad (7)$$

1.2. Gaussian Penceresi (Gaussian Window)

Bir Gaussian penceresinin frekans yanıtı yine bir Gaussian'dır. Bir Gaussian fonksiyonunun zaman periyodu sınırsız olduğundan pratikte bir pencere fonksiyonu olarak kullanılabilmesi için sınırlandırılmalıdır. Gaussian penceresi aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [5]:

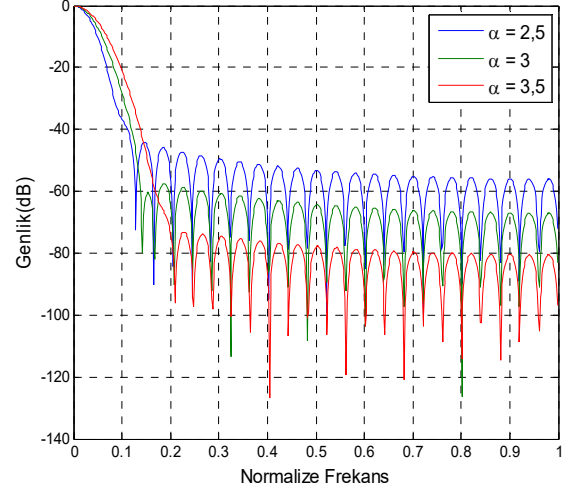
$$w(n) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n}{N/2}\right)^2}, 0 \leq |n| \leq N/2 \quad (8)$$

En çok kullanılan alfa değerleri 2.5, 3 ve 3.5 tir. α değeri arttıkça pencere genişliği azalırken ana-lob genişliği artar[1]. Üç farklı α değeri için Gaussian penceresi frekans spektrumu Şekil 2'te görülmektedir.

1.3. Kosinüs Modüleli Süzgeç Bankaları (Cosine Modulated Filter Banks)

M-kanallı filtre bankasının bir prototip filtre ve uygun bir kosinüs dönüşümü kullanılarak üretimi, ilk kez Rothweiler [6] tarafından 1983 yılında sunulmuştur. M-kanallı bir maksimum seyreltilmiş süzgeç bankasının yapısı Şekil 3'de verilmiştir. Modüleli Süzgeç bankaları 1990'larda üç farklı araştırma grubu olan Malvar [7], Ramstad ve Tanem [8], Koilpillai ve Vaidyanathan [9] tarafından birbirinden bağımsız olarak tanıtılmıştır [10]. Bu üç ana makale farklı şekillerde türetilmiştir ancak benzer sonuçlar vermektedir.

Kosinüs modüleli süzgeç bankalarında tüm analiz süzgeçleri $h_k(n)$ ve tüm sentez süzgeçleri $f_k(n)$ tek bir prototip süzgeç ve kosinüs modülasyonu ile türetilir:



Şekil 2. Gaussian penceresi için α değerindeki artışa bağlı olarak ana-lob ve yan-loblardaki değişim.
(Change in the main-lobe and side-lobes due to the increase in β value for the Gaussian window.)

$$h_k(n) = 2 \cdot h(n) \cdot \cos \left[(2k + 1) \frac{\pi}{2M} \left(n - \frac{N}{2} \right) + (-1)^k \frac{\pi}{4} \right] \quad (9)$$

$$f_k(n) = 2 \cdot h(n) \cdot \cos \left[(2k + 1) \frac{\pi}{2M} \left(n - \frac{N}{2} \right) - (-1)^k \frac{\pi}{4} \right] \quad (10)$$

$$0 \leq n \leq N - 1 \\ 0 \leq k \leq M - 1$$

Burada $h_k(n)$ analiz süzgeci, $h(n)$ prototip süzgecin dürtü yanıtının katsayıları, M kanal sayısı, $f_k(n)$ sentez süzgeci, $N-l$ süzgeç derecesi olup N genellikle *süzgeç uzunluğu* olarak adlandırılır [11]. Z domeninde, giriş işareti $X(z)$ ile çıkış işareti $Y(z)$ arasındaki ilişki şu şekilde verilir [10]:

$$Y(z) = T_0(z)X(z) + \sum_{l=1}^{M-1} T_l(z)X(z e^{-j2\pi l/M}) \quad (11)$$

$$T_0(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} F_k(z)H_k(z) \quad (12)$$

$$T_l(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} F_k(z)H_k(z e^{-j2\pi l/M}), \\ l = 1, 2, \dots, M - 1 \quad (13)$$

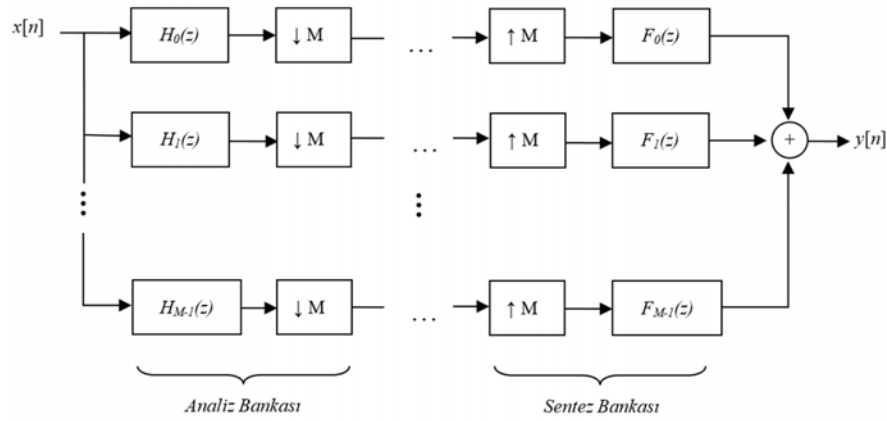
Yukarıdaki eşitliklerde,

$$H_k(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h_k(n)z^{-n}, F_k(z) = \sum_{n=0}^{N-1} f_k(n)z^{-n} \quad (14)$$

olup $T_0(z)$ *bozulma transfer fonksiyonu* ve eşitlik 4 ve eşitlik 5'teki $T_l(z)$ *örtüşme transfer fonksiyonu* dur. Dürtü yanıtları normalize edilmiş süzgeçler kullanıldığında [9]:

$$(1 - \delta_1) \leq M|T_0(e^{j\omega})| \leq (1 + \delta_2) \quad (15)$$

elde edilir.



Şekil 3. M - kanallı maksimum seyreltilmiş süzgeç bankası. (M-channel maximum decimated filter bank.)

Kosinüs modüleli süzgeç bankaları için aşağıda verilen performans parametreleri Kaiser, Gaussian ve önerilen yöntem kullanılarak tasarlanmış her bir süzgeç bankası için ayrı ayrı incelenerek elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. Gerçekleştirilen tasarımlardaki tepe yeniden yapılandırma hatası ve durdurma bandı zayıflatması değerleri karşılaştırılmıştır. Performans parametrelerine ait denklemler aşağıda verilmiştir. Tepe Değeri Yeniden Yapılandırma Hatası (*PRE-Peak Reconstruction Error*) [12],

$$PRE = \max_{\omega} \left\{ 10 \log \left(\sum_{i=1}^M |H_i(e^{j\omega})|^2 \right) \right\} \quad (16)$$

Geçirme Bandı (Passband) Hatası (E_p),

$$E_p = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_p} (H_0(\omega))^2 \cdot d\omega \quad (17)$$

Durdurma Bandı (Stopband) Hatası (E_s),

$$E_s = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_s}^{\pi} (H_0(\omega))^2 \cdot d\omega \quad (18)$$

Geçiş Bandı (Transition Band) Hatası (E_t),

$$E_t = (H_0(\omega) - 0.707 H_0(0))^2, \omega = \omega_c \quad (19)$$

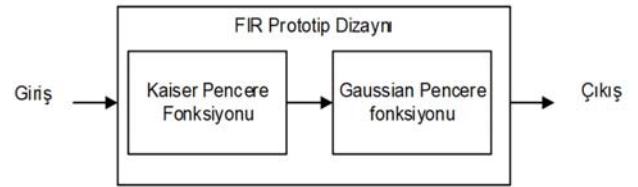
denklemleri ile hesaplanmıştır. Burada $H_0(\omega)$ tasarlanan prototip süzgecin transfer fonksiyonunu ifade etmektedir. Buna ilaveten, kesim frekansı ω_c 'nin genlik değeri ω_s ve ω_p cinsinden şu şekilde ifade edilir: [13]

$$\omega_c = (\omega_s + \omega_p)/2 \quad (20)$$

2. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

Bu çalışmada Kaiser ve Gaussian pencere fonksiyonları kullanılarak tasarlanan yeni bir kaskat prototip süzgeç yapısı önerilmiştir. Daha sonra tasarlanan prototip süzgeç ve Ayrık Kosinüs Dönüşümü kullanılarak kosinüs modüleli süzgeç bankası tasarımı yapılmıştır. Önerilen yönteme dair yapılan analizler ve yalnızca bir pencere fonksiyonu ile yapılan tasarımlarla karşılaştırma sonuçları çalışmanın bir sonraki

bölümünde yer almaktadır. Önerilen kaskat yapının blok diyagramı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. CMFB için tasarlanan FIR prototip için önerilen kaskat yapısı.

(Proposed method to design the FIR prototype of the CMFB)

Bir FIR filtre tasarlanmasının en basit ve etkili yollarından birisi, ideal süzgeç yanıtı $h_d(n)$ 'nin istenilen $0 \leq n \leq M$ aralığının dışında kalan kısmını kırparak tasarlanan süzgeç yanıtı $h(n)$ 'i üretmektir[2]:

$$h(n) = \begin{cases} h_d(n), & n = 0, 1, \dots, N \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (21)$$

Bir pencere fonksiyonu $w(n)$ kullanıldığı zaman bu ifade aşağıdaki çarpım ifadesine dönüşür:

$$h(n) = w(n) \cdot h_d(n) \quad (22)$$

Ayrık bir sistem için Şekil 4 ile verilen FIR süzgecin yanıtı $h[n]$, girişi $x[n]$ ve çıkışı $y[n]$ olsun. Sistemin giriş-çıkış ilişkisi eşitlik 23 ile verilmiştir:

$$y[n] = x[n] * (w_K[n] * w_G[n]) \quad (23)$$

Burada Kaiser penceresinin dürtü yanıtı $w_K[n]$, Gaussian penceresinin dürtü yanıtı ise $w_G[n]$ ile gösterilmiştir. Bu durumda önerilen kaskat yapının dürtü yanıtı $h[n]$ şu şekilde ifade edilir:

$$h[n] = h_d[n] * w_K[n] * w_G[n] \quad (24)$$

$y[n]$ çıkışının kararlı olabilmesi için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekir:

$$|y[n]| = \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k]x[n-k] \right| \leq \infty \quad (25)$$

Önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 5’de görülmektedir. Önerilen yöntemde öncelikle tasarımda kullanılacak parametre değerleri seçilmiştir. Sonraki adımda belirlenen iki pencere fonksiyonu olan Kaiser ve Gaussian kaskat yapısı kullanılarak FIR prototip süzgeç tasarımı yapılmıştır. Daha sonra elde edilen prototip süzgeç ve ayrık kosinüs dönüşümü kullanılarak süzgeç bankası tasarımı yapılmıştır. Son adımda önerilen tasarım yöntemine ait performans parametre değerleri hesaplanmıştır.

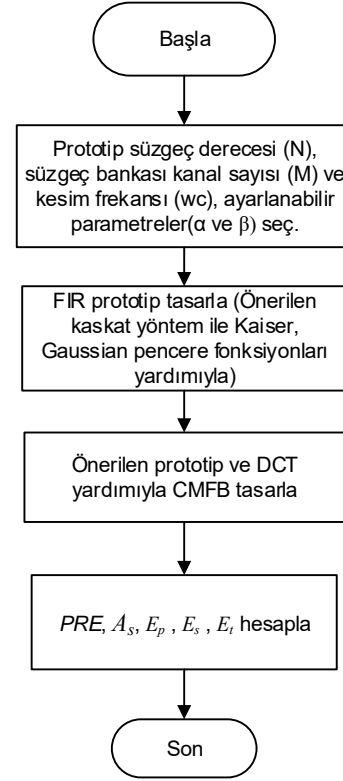
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu kısımda Kaiser, Gaussian ve önerilen yöntem kullanılarak tasarlanan süzgeç bankalarının tasarım sonuçları üç farklı başlık altında incelenmiştir. Tasarlanan süzgeç bankalarının performans değerleri farklı tasarım örnekleri için ayrı ayrı irdelenerek, tablolar halinde detaylı bir biçimde sunulmuş, elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Literatürde 2 kanaldan M kanala kadar çeşitli kanal sayılarına sahip tasarımlar mevcuttur [14-16]. Ayrıca pencere fonksiyonlarının hibrit kullanımına yönelik yapılar da bulunmaktadır [17, 18]. Kaiser, Gaussian ve önerilen kaskat pencerelerle kanal sayısının 4, 8, 16 ve 32 olması durumu ve 32 ile 1024 arasında seçilen on beş farklı süzgeç uzunlukları için kosinüs modüleri süzgeç bankaları tasarlanmış hem prototip süzgeç hem de süzgeç bankası için elde edilen performans parametreleri değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde w_c kesim frekansı değerleri π/M değerinden çok az küçük olacak şekilde sırasıyla 0.12, 0.062, 0.031 ve 0.015 olarak seçilmiştir. Tablolarda sunulan performans parametrelerinden elde edilen en iyi değerler, **kalin** yazı tipiyle vurgulanmıştır.

3.1. Kaiser Penceresi Kullanılarak Kosinüs Modüleri Süzgeç Bankası Tasarımı (Cosine Modulated Filter Bank Design Using Kaiser Window)

Kaiser penceresi kullanılarak tasarlanan süzgeç bankası parametre değerleri bu kısımda incelenmiştir. Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’te farklı kanal sayıları ve farklı süzgeç uzunlukları için tasarlanan süzgeç bankalarının performans parametre değerleri sunulmuştur. Tablo 1’e göre 4-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=32$ için 92.5803 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=48$ için 5.9945 olarak bulunmuştur. Genel olarak E_s değeri N değerinin artışına bağlı olarak düşüş gösterirken, E_t değeri N değerinin artışına bağlı olarak artma eğilimindedir. E_p değeri için böyle bir

orantı söz konusu değildir. En düşük E_s değeri $N=1024$ için $2.5955e-08$ olarak elde edilirken en düşük E_p değeri $N=32$ için $3.3068e-08$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Önerilen yöntemin akış diyagramı.
(Flowchart of the proposed method)

Tablo 2’ye göre Kaiser penceresi kullanılarak tasarlanmış 8-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=32$ için 82.0220 dB olarak elde edilmiş, en düşük PRE değeri $N=32$ için 5.9197 olarak bulunmuştur. Genel olarak E_t değeri N değerinin artışına bağlı olarak artma eğilimindedir. E_s değeri ve E_p değeri için doğrudan bir orantı olmasa da, N değerindeki artışla E_s değeri azalma eğilimindedir. En düşük E_s değeri $N=1024$ için $1.1672e-07$ olarak elde edilirken, en düşük E_p değeri $N=72$ için $7.7097e-09$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 3’e göre Kaiser penceresi kullanılarak tasarlanmış 16-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=1024$ ’te 76.6370 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=32$ için 4.2524 olarak bulunmuştur. Genel olarak E_s değeri N

Tablo 1. Kaiser penceresi ile tasarlanmış 4-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 4-Channel CMFB designed using the Kaiser window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	92.5803	6.0103	$2.3623e-06$	0.2133	3.3068e-08	0.0786
40	82.5596	6.0122	$6.6687e-06$	0.2140	$2.4051e-07$	0.0764
48	78.7210	5.9945	$1.7717e-06$	0.2136	$1.4370e-05$	0.0776
56	76.0073	6.0161	$5.9461e-06$	0.2166	$8.3357e-06$	0.0768
64	74.8348	6.0116	$1.5067e-06$	0.2171	$1.3606e-05$	0.0772
72	64.5269	6.0040	$5.9700e-06$	0.2173	$1.3003e-05$	0.0753
80	74.6507	6.0095	$1.4251e-06$	0.2189	$1.4747e-05$	0.0883

Tablo 2. Kaiser penceresi ile tasarlanmış 8-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 8-Channel CMFB designed using the Kaiser window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	82.0220	5.9197	3.1883e-06	0.1618	6.9937e-08	0.0762
40	73.1635	6.0012	9.1720e-06	0.1890	9.8378e-08	0.0934
48	67.8976	6.0184	8.4547e-06	0.2024	9.3103e-08	0.0703
56	79.4441	6.0191	1.9395e-06	0.2078	5.5355e-08	0.0779
64	71.6395	6.0108	1.9144e-06	0.2096	1.5936e-08	0.0780
72	78.0336	6.0128	3.9630e-06	0.2096	7.7097e-09	0.0717
80	69.6276	6.0008	4.8438e-06	0.2080	2.1210e-06	0.0811

Tablo 3. Kaiser penceresi ile tasarlanmış 16-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 16-Channel CMFB designed using the Kaiser window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	76.3742	4.2524	3.0540e-05	0.0806	1.3154e-07	0.0886
40	64.7224	5.0573	2.2844e-05	0.1003	2.8724e-07	0.0801
48	65.9326	5.5491	7.2042e-06	0.1217	5.1779e-07	0.0753
56	64.2080	5.8016	3.2262e-06	0.1429	8.0772e-07	0.0794
64	70.0956	5.9200	1.6261e-06	0.1619	1.1189e-06	0.0808
72	74.0763	5.9733	2.4681e-06	0.1775	1.3961e-06	0.0777
80	72.6514	6.0007	3.3729e-06	0.1892	1.5790e-06	0.0822

Tablo 4. Kaiser penceresi ile tasarlanmış 32-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 32-Channel CMFB designed using the Kaiser window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	71.8117	1.4150	1.5206e-07	0.0524	4.7730e-05	0.0917
40	69.6898	2.3541	6.4490e-05	0.0577	3.6166e-07	0.0792
48	75.4356	3.1099	2.5863e-05	0.0643	7.2701e-07	0.0766
56	72.0833	3.7371	3.2948e-05	0.0720	1.2988e-06	0.0765
64	55.3427	4.2680	5.3604e-05	0.0808	2.1247e-06	0.0810
72	63.8824	4.7156	3.0552e-05	0.0905	3.2446e-06	0.0795
80	66.2484	5.0808	1.6439e-05	0.1010	4.6856e-06	0.0749

değerinin artışına bağlı olarak düşüş gösterme eğilimindeyken, E_t değeri N değerinin artışına bağlı olarak artma eğilimindedir. E_p değeri için böyle bir orantı söz konusu değildir. En düşük E_s değeri $N=1024$ için $8.1685e-08$ olarak elde edilirken, en düşük E_p değeri $N=72$ için $1.3154e-07$ olarak elde edilmiştir.

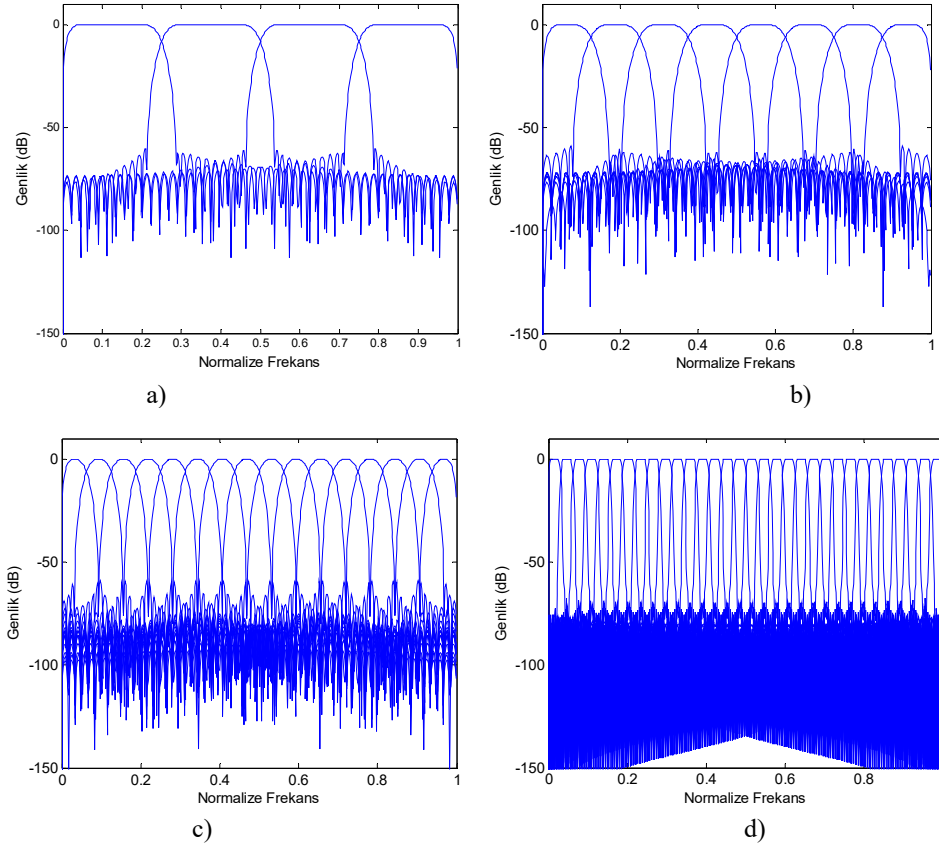
Tablo 4'e göre Kaiser penceresi kullanılarak tasarlanmış 32-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=1024$ için 82.1161 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=32$ için 1.4150 olarak bulunmuştur. E_s 'nin en düşük değeri $N=1024$ için elde edilirken, en düşük E_t değeri $N=32$ de, en düşük E_p değeri ise $N=40$ 'da elde edilmiştir. Tüm Kaiser penceresi kullanılarak yapılan tasarımlarda hesaplama süresi 0.07 saniye ile 0.1 saniye arasında değişkenlik göstermiştir. Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te Kaiser penceresi yardımıyla tasarlanmış süzgeç bankası için elde edilen veriler dikkate alındığında her bir kanal sayısı için ($4,8,16$ ve 32) en düşük PRE değerinin elde edildiği süzgeç bankasına ait frekans spektrumu grafikleri Şekil 6'de verilmiştir.

3.2. Gaussian Penceresi Kullanılarak Kosinüs Modüleri Süzgeç Bankası Tasarımı

(Cosine Modulated Filter Bank Design Using Gaussian Window)

Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanan süzgeç bankasından elde edilen parametre değerleri bu kısımda incelenmiştir. Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de kanal sayıları ve süzgeç uzunluklarına bağlı olarak tasarlanan kosinüs modüleri süzgeç bankaları için elde edilen performans parametre değerleri görülmektedir.

Tablo 5'e göre Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanmış 4-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=1024$ için 120.5536 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=32$ için 5.7696 olarak bulunmuştur. E_s değeri N değeri arttıkça düşüş gösterme eğilimindedir. E_t değeri ise aksine N değeri arttıkça artış göstermiştir. E_p için ise böyle bir çıkarım yapmak söz konusu değildir. En düşük E_s değeri $N=1024$ için $2.8104e-13$ olarak elde edilirken, en düşük E_p değeri $N=32$ için $3.2969e-09$ olarak elde edilmiştir. Tablo 6'da Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanmış 8-Kanallı CMFB için en iyi A_s



Şekil 6. 4 farklı kanal sayısı için elde edilen Kaiser penceresi kullanılarak tasarlanmış kosinüs modüledi süzgeç bankalarının frekans eksenini gösterimleri a) 4 kanal N=48 b) 8 kanal N=56 c) 16 kanal N=120 d) 32 kanal, N=512. (Frequency spectrum figures of the cosine modulated filter bank designed using Kaiser window for 4 different channel numbers (a)4 channel N=48 (b) 8 channel N=56 (c) 16 channel N=120 (d) 32 channel N=512.)

Tablo 5. Gaussian penceresi ile tasarlanmış 4-Kanallı CMFB için performans değerleri. (Performance values table for 4-Channel CMFB designed using the Gaussian window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	80.9588	5.7696	1.8907e-08	0.1376	3.2969e-09	0.0663
40	81.4605	5.9497	1.3768e-08	0.1653	5.0560e-09	0.0715
48	81.5282	6.0018	1.1539e-08	0.1850	5.8221e-09	0.0742
56	81.7651	6.0160	9.5400e-09	0.1975	5.2487e-09	0.0685
64	81.5117	6.0196	9.0277e-09	0.2050	3.7876e-09	0.0738
72	81.7459	6.0204	7.7295e-09	0.2093	3.7760e-08	0.0720
80	82.8207	6.0206	5.4945e-09	0.2118	1.8117e-08	0.0723

değeri $N=32$ için 90.5294 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=32$ için 5.8734 olarak bulunmuştur. E_t değeri süzgeç derecesinin artışına bağlı olarak artma eğilimindedir. E_s ve E_p için böyle bir orantı söz konusu değildir. En düşük E_s değeri $N=1024$ için 5.6944e-08 olarak bulunurken en düşük E_p değeri $N=96$ 'da 3.9275e-09 olarak elde edilmiştir.

Tablo 7'ye göre Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanmış 16-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=1024$ 'te 80.6329 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=32$ için 4.1942 olarak bulunmuştur. 8 kanallı süzgeç bankasında da E_t değeri süzgeç derecesinin artışına bağlı olarak artmaktadır. En düşük E_s değeri $N=1024$ için 3.4411e-08 olarak bulunurken en düşük E_p değeri $N=32$ 'de 1.3160e-07

değerini almıştır. Gaussian penceresi ile yapılan tasarımlarda hesaplama süresi $t=0.06$ ile 0.08 arasında değişkenlik göstermiştir.

Tablo 8'de Gaussian tabanlı 32-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=1024$ 'de 81.8438 dB, en düşük PRE değeri $N=32$ 'de 1.3750, en düşük E_s değeri $N=1024$ 'de 7.9667e-08, en düşük E_p değeri $N=32$ 'de 1.5458e-07 dir.

Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de Gaussian penceresi yardımıyla tasarlanmış süzgeç bankası için elde edilen veriler dikkate alındığında her bir kanal sayısı için (4,8,16 ve 32) en düşük PRE değerinin elde edildiği süzgeç bankasına ait frekans spektrumu grafikleri Şekil 7'de görülmektedir.

Tablo 6. Gaussian penceresi ile tasarlanmış 8-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 8-Channel CMFB designed using the Gaussian window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	90.5294	5.8734	2.6009e-06	0.1577	6.6527e-08	0.0780
40	75.7447	5.9840	4.0002e-05	0.1831	9.0224e-08	0.0854
48	71.2904	6.0158	4.8790e-05	0.1974	8.2811e-08	0.0663
56	74.1626	6.0143	1.6183e-05	0.2055	4.9737e-08	0.0693
64	75.3961	6.0205	1.8681e-06	0.2099	1.7702e-08	0.0607
72	69.3660	6.0169	1.8808e-05	0.2117	3.2701e-09	0.0698
80	67.8455	6.0177	2.2777e-05	0.2127	1.1239e-08	0.0752

Tablo 7. Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanmış 16-Kanallı CMFB için performans değerleri tablosu.
(Performance values table for 16-Channel CMFB designed using the Gaussian window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	69.0954	4.1942	1.6052e-04	0.0804	1.3160e-07	0.0789
40	67.5133	4.9789	1.4152e-04	0.0994	2.8327e-07	0.0800
48	74.5564	5.4596	4.2617e-05	0.1198	5.0283e-07	0.0899
56	77.8529	5.7301	7.9007e-06	0.1395	7.7103e-07	0.0794
64	77.8661	5.8700	1.3634e-06	0.1568	1.0478e-06	0.0688
72	68.6975	5.9429	1.0956e-05	0.1710	1.2799e-06	0.0721
80	69.4885	5.9813	1.5839e-05	0.1817	1.4148e-06	0.0791

Tablo 8. Gaussian penceresi ile tasarlanmış 32-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 32-Channel CMFB designed using the Gaussian window.)

N	A_s (dB)	PRE	E_s	E_t	E_p	t (s)
32	65.1622	1.3750	4.8427e-04	0.0524	1.5458e-07	0.0748
40	63.0951	2.3087	3.8915e-04	0.0578	3.6541e-07	0.0785
48	62.9445	3.0596	3.0490e-04	0.0643	7.3066e-07	0.0771
56	63.9431	3.6819	1.6212e-04	0.0719	1.2987e-06	0.0833
64	63.4643	4.2075	1.4434e-04	0.0805	2.1137e-06	0.0822
72	58.9934	4.6451	1.5293e-04	0.0900	3.2106e-06	0.0751
80	61.8101	5.0045	8.7745e-05	0.1001	4.6102e-06	0.0757

Şekil 7a'da 4 kanallı Gaussian tabanlı süzgeç bankasının; Şekil 7b'de 8 kanallı Gaussian tabanlı süzgeç bankasının; Şekil 7c'de 16 kanallı Gaussian tabanlı süzgeç bankasının; Şekil 7d'de ise 32 kanallı Gaussian tabanlı süzgeç bankasının analiz bankalarına ait frekans spektrum eğrileri verilmiştir.

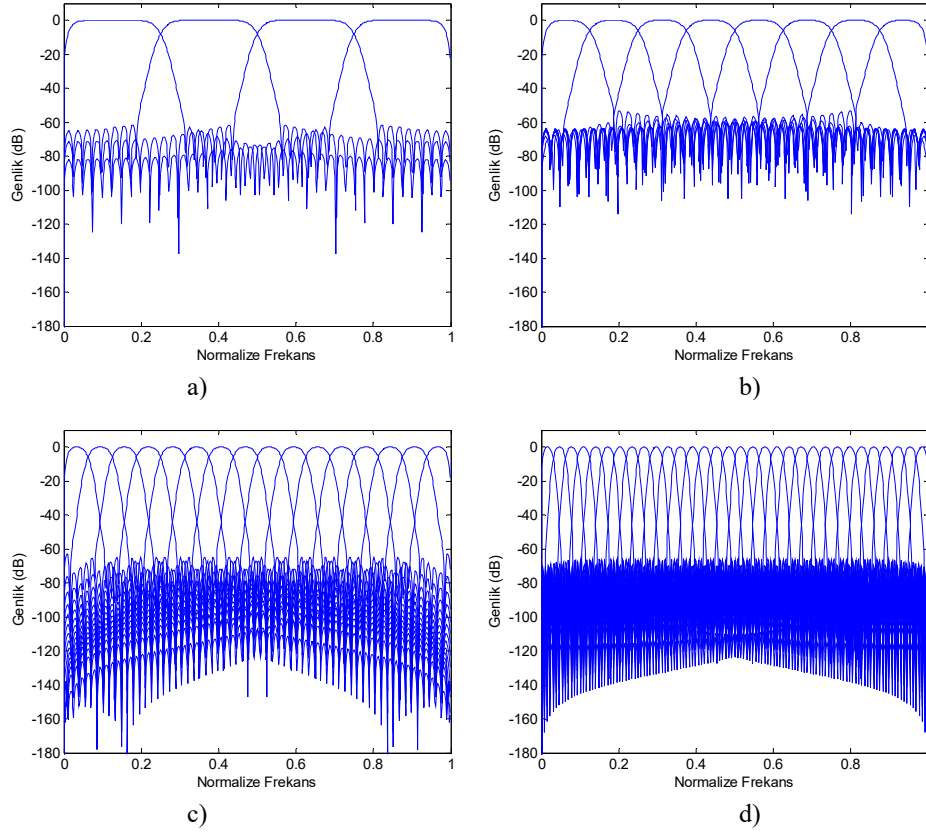
3.3. Önerilen Yöntem Kullanılarak Kosinüs Modüleli Süzgeç Bankası Tasarımı (Cosine Modulated Filter Bank Design Using Proposed Method)

Bu kısımda kosinüs modüleli süzgeç bankası önerilen prototip süzgeç ile tasarlanarak, elde edilen performans parametreleri Kaiser ve Gaussian pencere fonksiyonları kullanılarak tasarlanan süzgeç bankaları ile kıyaslanmıştır. Aynı kanal sayıları ve aynı süzgeç uzunlukları için elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 9, Tablo 10, Tablo 11 ve Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 9'a göre önerilen yöntem kullanılarak tasarlanmış 4-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=128$ için 95.2379 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=88$ için $1.0665e-04$ olduğu görülmektedir. En iyi E_s değeri $6.3241e-09$ olarak $N=1024$ 'te elde edilmiştir. En düşük E_p değeri $N=112$ için $5.4575e-09$ dir.

Tablo 10'a göre önerilen yöntem kullanılarak tasarlanmış 8-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=32$ için 97.5860 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=64$ için $2.1644e-04$ olarak bulunmuştur. En iyi E_s değeri olarak $N=1024$ 'te $3.9278e-08$ elde edilmiştir. E_t değeri yine N değerindeki artışa bağlı olarak artış göstermiş, en düşük değerini $N=32$ için 0.0083 olarak almıştır. En düşük E_p değeri $N=120$ için $4.6287e-09$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 11'e göre önerilen yöntem kullanılarak tasarlanmış 16-Kanallı CMFB için en iyi durdurma bandı zayıflatması değeri $N=56$ için $A_s=121.7585$ dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=120$ için $4.6287e-09$ 'dur. En düşük E_s değeri $N=1024$ ' te $2.9002e-08$, en düşük E_t değeri $N=48$ için $1.4636e-04$, minimum E_p değeri $N=128$ için $2.5953e-07$ olarak bulunmuştur. Tablo 12'ye göre önerilen yöntem kullanılarak tasarlanmış 32-Kanallı CMFB için en iyi A_s değeri $N=1024$ için 81.8740 dB olarak elde edilmiştir. En düşük PRE değeri $N=256$ için $1.9503e-04$ olarak elde edilmiştir. En düşük E_s değeri $N=1024$ ' te $4.6657e-08$, en düşük E_t değeri $N=96$ için $5.8028e-05$, minimum E_p değeri $N=512$ için $4.6362e-08$ olarak bulunmuştur. Burada durdurma bandı zayıflatmasının 80 dB üzerinde olması, aynı zamanda PRE hatasının düşük değer alması istenilen bir özelliktir.



Şekil 7.4 farklı kanal sayısı için Gaussian penceresi kullanılarak tasarlanmış kosinüs modüveli süzgeç bankalarının frekans eksenini gösterimleri a) 4 kanal, N=80 b) 8 kanal N=64 c) 16 kanal N=128 d) 32 kanal, N=256. (Frequency spectrum figures of the cosine modulated filter bank designed using Gaussian window for 4 different channel numbers (a) 4 channel N=80 (b) 8 channel N=64 (c) 16 channel N=120 (d) 32 channel N=512.)

Tablo 9. Önerilen yöntem ile tasarlanmış 4-Kanallı CMFB için performans değerleri. (Performance values table for 4-Channel CMFB designed using the proposed method.)

N	A _s (dB)	PRE	Es	Et	Ep	t (s)
32	80.5842	0.2579	4.4632e-08	0.0047	2.6612e-08	0.0988
40	82.4328	0.1156	4.2710e-07	0.0111	7.6949e-09	0.0963
48	80.8992	0.0474	3.7653e-08	0.0189	1.1926e-08	0.0991
56	84.7634	0.0183	4.3217e-07	0.0267	2.8607e-08	0.0994
64	81.8627	0.0077	5.1078e-08	0.0333	2.6125e-08	0.1002
72	91.9998	0.0034	3.7700e-07	0.0385	1.6536e-08	0.1028
80	82.3402	8.3024e-04	7.3679e-08	0.0427	2.1852e-08	0.1031

Tablo 10. Önerilen yöntem ile tasarlanmış 8-Kanallı CMFB için performans değerleri. (Performance values table for 8-Channel CMFB designed using the proposed method.)

N	A _s (dB)	PRE	Es	Et	Ep	t (s)
32	97.5860	0.1244	1.6029e-06	0.0083	6.7684e-08	0.1013
40	79.6996	0.0281	1.7724e-05	0.0236	9.2973e-08	0.1112
48	77.7910	0.0032	1.9921e-05	0.0340	8.5923e-08	0.1108
56	85.3906	0.0035	5.6080e-06	0.0395	5.0632e-08	0.1013
64	90.4784	2.1644e-04	1.1996e-06	0.0421	1.5815e-08	0.1119
72	69.9739	0.0028	9.7401e-06	0.0426	2.3915e-08	0.1136
80	69.8721	0.0041	1.1911e-05	0.0425	1.5098e-08	0.1086

Tablo 9, Tablo 10, Tablo 11 ve Tablo 12’de önerilen yöntemle tasarlanmış süzgeç bankası için elde edilen veriler dikkate alındığında her bir kanal sayısı için (4,8,16 ve 32) en

düşük PRE değerinin elde edildiği süzgeç bankasına ait frekans spektrumu grafikleri Şekil 8’da görülmektedir. Şekil 8a’da önerilen yöntem tabanlı 4 kanallı süzgeç bankasının,

Tablo 11. Önerilen yöntem ile tasarlanmış 16-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 16-Channel CMFB designed using the proposed method.)

N	A_s (dB)	PRE	Es	Et	Ep	t (s)
32	70.9084	1.7960	9.2078e-05	0.0195	1.3157e-07	0.0969
40	74.7456	1.0006	4.7827e-05	0.0056	2.8525e-07	0.1032
48	76.5647	0.5155	1.9059e-05	1.4636e-04	5.1028e-07	0.1005
56	121.7585	0.2536	2.9074e-06	0.0020	7.8927e-07	0.1034
64	92.4547	0.1240	7.1709e-07	0.0083	1.0831e-06	0.1138
72	78.4565	0.0616	4.1763e-06	0.0163	1.3373e-06	0.0995
80	70.3615	0.0289	1.1248e-05	0.0238	1.4958e-06	0.1043

Tablo 12. Önerilen yöntem ile tasarlanmış 32-Kanallı CMFB için performans değerleri.
(Performance values table for 32-Channel CMFB designed using the proposed method.)

N	A_s (dB)	PRE	Es	Et	Ep	t (s)
32	71.9744	4.6241	1.8940e-04	0.0622	1.5332e-07	0.1099
40	66.1193	3.6877	1.9648e-04	0.0513	3.6353e-07	0.1021
48	67.1303	2.9345	1.3174e-04	0.0400	7.2883e-07	0.1060
56	67.9081	2.3098	7.3449e-05	0.0291	1.2988e-06	0.0995
64	64.7650	1.7816	9.3009e-05	0.0193	2.1192e-06	0.1086
72	64.9760	1.3390	5.7226e-05	0.0113	3.2276e-06	0.1159
80	63.6632	0.9750	4.6473e-05	0.0053	4.6478e-06	0.1080

Şekil 8b'de önerilen yöntem tabanlı 8 kanallı süzgeç bankasının, Şekil 8c'de önerilen yöntem tabanlı 16 kanallı süzgeç bankasının, Şekil 8d'de ise önerilen yöntem tabanlı 32 kanallı süzgeç bankasının analiz bankalarına ait frekans spektrum eğrileri dB cinsinden verilmiştir.

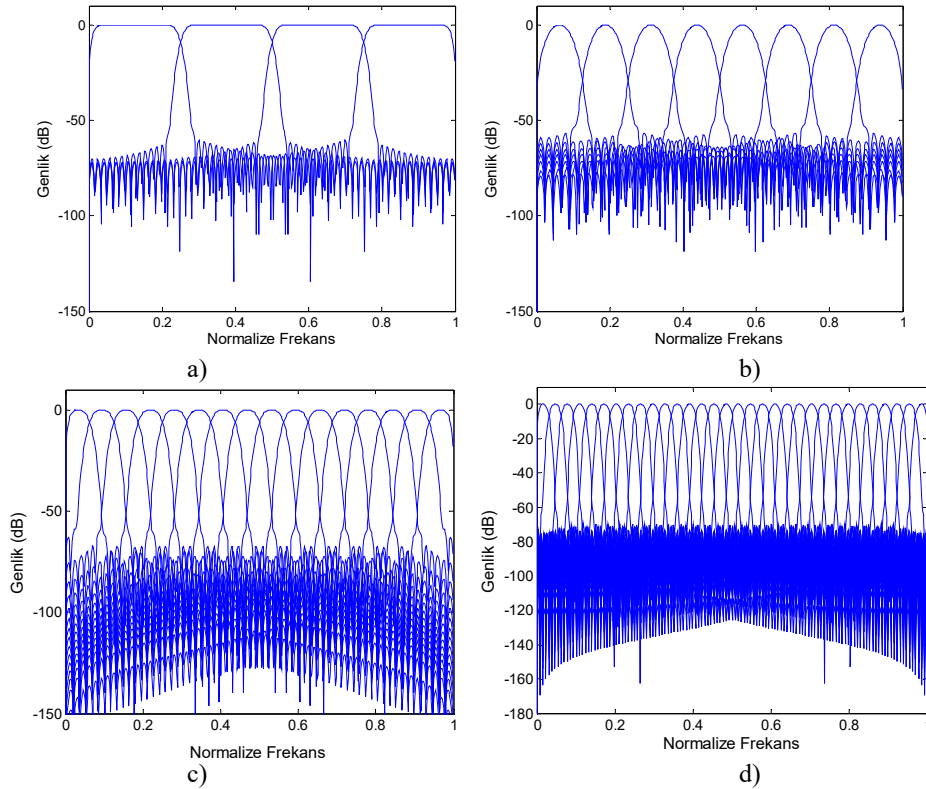
Kosinüs modüleli süzgeç bankalarının performansı doğrudan tasarlanan prototip süzgecin performansına bağlıdır. Prototip süzgecin optimizasyonu, süzgeç bankasının optimizasyonu anlamına gelir. Tablo 13'te önerilen yöntemin performansı literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan prototip süzgecin durdurma bandı zayıflatma değerinin literatürdeki benzerlerine göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 13. Önerilen prototip süzgecin performans karşılaştırması.
(Performance comparison of the proposed prototype filter.)

Karşılaştırılan Yöntem	N	α	β	A_s (dB)
Yöntem [19]	127	3.08	-	50.02
Önerilen yöntem	128	3.08	-	81.59
Yöntem [20]	48	-	4	65.84
Önerilen yöntem	48	-	4	74.22
Yöntem [21]	20	-	5.65	75
Önerilen yöntem	20	-	5.65	84.89
Yöntem [22]	127	-	6	58.79
Önerilen Yöntem	128	-	6	85.81

Tablo 14'te üç tasarım örneğinden elde edilen sonuçların karşılaştırmalı tablosu görülmektedir. Tabloda ilk üç satırda sırasıyla 4 kanallı süzgeç bankası için A_s ve PRE değerlerinin en iyi elde edildiği satırlar yer almaktadır. Tablonun 3. ve 4. satırlarında 8 kanal için; 5. ve 6. satırlarında 16 kanal için; 7. ve 8. satırlarında 32 kanal için yine sırasıyla için A_s ve PRE

değerlerinin en iyi elde edildiği satırlar seçilmiştir. Tablo 14'ün 1. satırına bakılacak olursa, 4 kanallı süzgeç bankası için Kaiser penceresinin en iyi A_s değeri $N=32$ 'de 92.5803 olarak elde edilmiştir. Bu değer Gaussian penceresinde $N=1024$ için 92.2537 olarak elde edilirken, önerilen yöntemde $N=128$ için 95.2379 değeri elde edilmiştir. Burada Gaussian penceresi kullanılan tasarımda en yüksek süzgeç uzunluğu ile en kötü A_s değerinin elde edildiği dikkat çekicidir, önerilen yöntemin A_s değeri diğerlerinden daha iyidir. Tablonun 2. satırında üç yöntemden elde edilen en iyi PRE değerleri için bir karşılaştırma yer almaktadır. Burada Kaiser penceresi kullanılarak elde edilen yöntem ile elde edilen minimum PRE değeri 5.9945, Gaussian penceresi kullanılarak elde edilen yöntem ile elde edilen minimum PRE değeri 5.7696 dir. Burada önerilen yöntemden elde edilen PRE değeri açık ara iyi olup 1.06e-04 olarak elde edilmiştir. Önerilen yöntem için elde edilen optimum değerler, aynı kanal sayıları ve aynı süzgeç dereceleri için diğer yöntemler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 14'te gösterilmiştir. 4,8, 16 ve 32 kanallı süzgeç bankası tasarımları içinde önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar, Kaiser ve Gaussian penceresi kullanılarak yapılan tasarımlardan elde edilen sonuçlardan daha iyidir. 8 kanallı süzgeç bankası için Tablo 14'ün 3. ve 4. satırlarına bakıldığında $A_s=97.5860$ dB ve $PRE=2.16e-04$ ile en iyi sonuçlar önerilen yöntem ile elde edilmiştir. 16 ve 32 kanallı süzgeç bankaları için de önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar diğerlerinden daha iyidir. 16 kanal ve $N=56$ için elde edilen A_s değeri, 121.7585 dB ile tüm incelemeler içindeki en iyi durdurma bandı zayıflatması değeridir. Yine 16 kanal ve $N=128$ için elde edilen PRE değeri 3.46e-06 ile elde edilen tüm PRE değerlerinin en iyisidir. Çalışmada elde edilen sonuçların birçoğunda, önerilen yöntem kullanıldığında Kaiser ve Gaussian pencereleri ile elde edilen A_s değerlerinden daha iyi değerlerin daha düşük N değerleri ile gerçekleştirildiği görülmektedir.



Şekil 8. 4 farklı kanal sayısı için önerilen yöntem kosinüs modüleli süzgeç bankalarının frekans eksenini gösterimleri a) 4 kanal, $N=88$ b) 8 kanal $N=64$ c) 16 kanal $N=128$ d) 32 kanal $N=256$.

(Frequency spectrum figures of the proposed cosine modulated filter bank design for 4 different channel numbers)

Tablo 14. Kaiser, Gaussian ve Önerilen yöntem için karşılaştırma tablosu.
(Comparison table for Kaiser, Gaussian and Recommended Method.)

M	N	Kaiser		Gaussian		Önerilen Yöntem	
		As	PRE	As	PRE	As	PRE
4	88	76.2029	6.0164	82.7939	6.0206	89.7997	1.0665e-04
4	128	75.4952	6.0105	82.5015	6.0206	95.2379	2.6160e-04
8	32	82.0220	5.9197	90.5294	5.8734	97.5860	0.1244
8	64	71.6395	6.0108	75.3961	6.0205	90.4784	2.1644e-04
16	56	64.2080	5.8016	77.8529	5.7301	121.7585	0.2536
16	128	71.3378	6.0107	71.5437	6.0203	77.1504	3.4609e-06
32	256	73.9259	6.0108	66.3138	6.0202	72.0365	1.9503e-04
32	1024	82.1161	6.0173	81.8438	6.0123	81.8740	0.0041

Yapılan incelemelerde süzgeç derecesi incelemeleri 32-1024 aralığında sınırlı tutulmuştur. Süzgeç derecesinin 80' in üzerinde olduğu durumlar için elde edilen verilerin tamamı incelenmek istenirse Tablo 15' e bakılmalıdır.

3.3.1. Önerilen Yöntemin EKG İşaretine Uygulanması (Application of the Proposed Method to the EGC Signal)

Bu kısımda, Bölüm 3.3'te önerilen kosinüs modüleli süzgeç bankalarının genlik bozunumu ve korelasyon açısından performansını değerlendirmek için, Matlab programıyla simülasyon ortamında üretilen bir EKG

(Elektrokardiyografi) işareti temel alınmıştır. Kalbi oluşturan kasların hareketlerinin elektriksel işaretlerinden oluşan EKG, pek çok kalp hastalığının teşhisinde kullanılan bir işarettir. Klinik ortamda çok tercih edilen bir işaret olan EKG işaretinin örnek sayısı bu çalışmada 1024 olarak alınmıştır.

Uygulamada birisi dört kanallı, diğeri 8 kanallı olmak üzere süzgeç derecesi $N=32$ olan iki farklı süzgeç bankası için gerçekleştirilen uygulamada önerilen yöntemle tasarlanan prototip süzgeçlere ait katsayılar sırasıyla aşağıda verildiği gibidir.

Tablo 15. N^o nin 88-1024 arasındaki değerleri için Kaiser, Gaussian ve önerilen yöntemin A_s ve PRE değerleri.

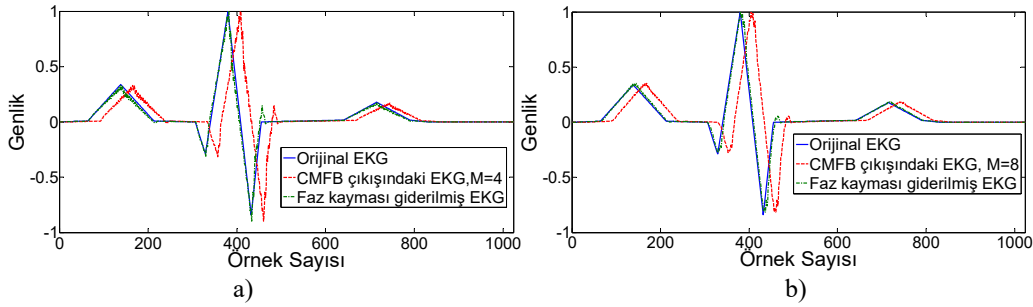
M	N	Kaiser		Gaussian		Önerilen Yöntem	
		A _s	PRE	A _s	PRE	A _s	PRE
4	88	76.2029	6.0164	82.7939	6.0206	89.7997	1.0665e-04
4	96	70.9394	6.0108	82.1396	6.0206	84.3743	3.4547e-04
4	112	73.8678	6.0109	82.9328	6.0206	89.4763	2.3834e-04
4	120	69.8318	6.0157	83.3269	6.0206	94.5414	3.0694e-04
4	128	75.4952	6.0105	82.5015	6.0206	95.2379	2.6160e-04
4	256	69.1174	6.0083	88.8956	6.0206	86.2926	4.7695e-04
4	512	69.1423	6.0153	91.8449	6.0206	93.2616	4.3080e-04
4	1024	84.3048	6.0158	92.2537	6.0206	90.3674	4.8766e-04
8	88	62.9447	5.9872	68.7164	6.0156	74.0139	0.0041
8	96	74.5284	5.9962	73.7426	6.0166	75.6168	0.0013
8	112	69.9941	6.0131	65.4169	6.0124	68.2547	0.0058
8	120	71.7344	6.0067	65.2444	6.0061	74.8770	0.0041
8	128	67.8661	6.0022	75.1831	5.9878	70.8981	0.0185
8	256	69.6429	6.0014	62.5640	5.9943	70.0618	0.0185
8	512	67.5994	6.0026	63.4566	6.0039	72.9198	0.0136
8	1024	75.2632	6.0036	80.7173	6.0110	80.6843	0.0098
16	88	67.1283	6.0131	67.2735	5.9984	70.2746	0.0143
16	96	63.2979	6.0175	63.1294	6.0131	67.3284	0.0048
16	112	71.1994	6.0189	67.4777	6.0139	73.9186	0.0039
16	120	69.1898	6.0202	74.4837	6.0188	76.0981	8.9562e-04
16	128	71.3378	6.0107	71.5437	6.0203	77.1504	3.4609e-06
16	256	71.7422	6.0036	66.3429	5.9879	66.5990	0.0185
16	512	68.0051	6.0014	70.6969	5.9964	74.9464	0.0156
16	1024	76.6370	6.0027	80.6329	6.0013	80.7700	0.0116
32	88	65.9156	5.3616	66.2722	5.2824	70.0690	0.6946
32	96	69.1128	5.5764	66.3343	5.4877	69.6983	0.4878
32	112	70.9105	5.8248	64.8553	5.7556	70.5606	0.2292
32	120	59.8210	5.8917	69.4872	5.8308	80.0684	0.1577
32	128	73.5517	5.9360	70.9591	5.8882	79.4532	0.1071
32	256	73.9259	6.0108	66.3138	6.0202	72.0365	1.9503e-04
32	512	69.7732	6.0193	72.9338	5.9997	67.2473	0.0059
32	1024	82.1161	6.0173	81.8438	6.0123	81.8740	0.0041

4 Kanal ve N-1=32 değeri için elde edilen prototip süzgecin katsayıları:

- 0.000208878667407
- 0.000737720897405
- 0.000781968501672
- 0.001409842755193
- 0.007855254339063
- 0.020890539346966
- 0.049581796650666
- 0.103153802202547
- 0.137624600032137
- 0.103153802202547
- 0.049581796650666
- 0.020890539346966
- 0.007855254339063
- 0.001409842755193
- 0.000781968501672
- 0.000737720897405
- 0.000208878667407

8 Kanal ve N-1=32 değeri için elde edilen prototip süzgecin katsayıları:

- 0.000442051216234
- 0.001926216465019
- 0.004771687275456
- 0.009148921872725
- 0.015046816747074
- 0.024338457433520
- 0.046809135360883
- 0.089490701307131
- 0.116158101841610
- 0.089490701307131
- 0.046809135360883
- 0.024338457433520
- 0.015046816747074
- 0.009148921872725
- 0.004771687275456
- 0.001926216465019
- 0.000442051216234



Şekil 9. 4 kanallı ve 8 kanallı süzgeç bankalarının EKG işaretine uygulanması sonucu elde edilen grafikler a) 4 Kanallı süzgeç bankasının kullanıldığı durum b) 8 Kanallı süzgeç bankasının kullanıldığı durum.

(Figures obtained by applying 4-channel and 8-channel filter banks to the ECG signal (a) the case where the 4-channel filter bank is used (b) the case where the 8-channel filter bank is used.)

CMFB çıkışında EKG işareti faz kaymalı olarak elde edilmektedir. Faz kaymalı işaret ve faz kayması giderildikten sonraki işaret Şekil 9'da verilmektedir. Orijinal EKG işareti ile 4 kanal için 0.1215 rad.'lık 8 kanal için de 0.1260 rad.'lık bir faz kayması söz konusudur. 4 kanal için genlik bozunumu ve korelasyon sırasıyla 0.2505 ve 0.9879 iken 8 kanal için bu değerler 0.6408 ve 0.9881 olarak elde edilmiştir. Aynı süzgeç derecesi için kanal sayısının artmasına bağlı olarak korelasyon daha iyi elde edilmiştir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

A_s	: Durdurma bandı zayıflatması
E_p	: Geçirme Bandı (Passband) Hatası
E_s	: Durdurma Bandı (Stopband) Hatası
E_t	: Geçiş Bandı (Transition Band) Hatası
FIR	: Sonlu Dürtü Yanıtlı (Finite Impulse Response)
M	: Kanal sayısı
N	: süzgeç uzunluğu
PRE	: Tepe Değeri Yeniden Yapılandırma Hatası
α	: Gaussian penceresi zayıflatma parametresi
β	: Kaiser penceresi zayıflatma parametresi
w_c	: Kesim frekansı
w_p	: Geçirme bandı frekansı
w_s	: Durdurma bandı frekansı

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada pencere fonksiyonları yardımıyla kosinüs modüleli süzgeç bankası tasarımına yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Sunulan yöntemde, süzgeç bankasının prototip süzgeci Kaiser ve Gaussian pencere fonksiyonlarının kaskat bağlanmasıyla tasarlanmıştır. Kaiser, Gaussian ve önerilen yöntem kullanılarak tasarlanan üç farklı süzgeç bankası, farklı süzgeç dereceleri ve farklı kanal sayıları için parametre değerleri tablolararak karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler ve yapılan literatür karşılaştırmaları sonucunda önerilen prototip süzgecin performans parametrelerinin diğerlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Tasarlanan süzgeç bankalarından farklı kanal sayılarına sahip iki süzgeç bankasının EKG işaretindeki uygulamasına çalışmanın sonunda yer verilmiştir. Gelecek çalışmalarda, burada elde edilen genlik bozunumunun minimize edilmesine yönelik incelemeler yapılabilir veya tasarlanan prototip süzgeç

kullanılarak düzgün olmayan (non-uniform) süzgeç bankası tasarımı gerçekleştirilebilir. Ayrıca tasarlanan prototip süzgecin sezgisel algoritmalar kullanılarak optimize edilebilmesi de mümkündür. Tasarlanan prototip süzgeç, süzgeç bankasının tercih edildiği işaret işleme uygulamalarında kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. K. M. M. Prabhu, "Window Functions and their Applications in Signal Processing": CRC Press, 2014.
2. L. B. Jackson, Digital Filters and Signal Processing: With MATLAB Exercises: Kluwer Academic Publishers, 1996.
3. J. F. Kaiser and R. W. Schafer, "Use of the Io-Sinh Window for Spectrum Analysis," Ieee Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, vol. 28, pp. 105-107, 1980.
4. V. K. Ingle and J. G. Proakis, Digital Signal Processing Using MATLAB (3rd ed.). CL-Engineering 2011.
5. F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," Proceedings of the Ieee, vol. 66, pp. 51-83, 1978.
6. J. Rothweiler, "Polyphase quadrature filters--A new subband coding technique," in Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '83., 1983, pp. 1280-1283.
7. H. S. Malvar, "Modulated Qmf Filter Banks with Perfect Reconstruction," Electronics Letters, vol. 26, pp. 906-907, Jun 21 1990.
8. T. A. Ramstad and J. P. Tanem, "Cosine-Modulated Analysis-Synthesis Filterbank with Critical Sampling and Perfect Reconstruction," Icassp 91, Vols 1-5, pp. 1789-1792, 1991.
9. R. D. Koilpillai and P. P. Vaidyanathan, "Cosine-Modulated Fir Filter Banks Satisfying Perfect Reconstruction," Ieee Transactions on Signal Processing, vol. 40, pp. 770-783, Apr 1992.
10. G. Ozdemir and N. Karaboga, "A Review on the Meta-Heuristic Optimization Algorithms for Cosine Modulated Filter Banks," Artificial Intelligence Review, pp. 1-25, 2017.
11. L. Milic, Multirate Filtering for Digital Signal Processing: MATLAB Applications: Information Science Reference - IGI Publishing, 2009.

12. A. Datar, A. Jain, and P. C. Sharma, "Design of Kaiser window based optimized prototype filter for cosine modulated filter banks," *Signal Processing*, vol. 90, pp. 1742-1749, May 2010.
13. K. Avci, "Design of fir filters using exponential-Hamming window family," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 24, pp. 2513-2524, 2016.
14. G. Ozdemir, N. Karaboga, and T. Koza, "Performance Comparison of Two Channel CMFB and QMF Bank Designed via ABC Algorithm," 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (Siu), 2017.
15. O. G. and N. Karaboga, "The effect of the increase in the number of channels to the performance in the Cosine Modulated Filter Bank design," presented at the 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir, 2018.
16. H. Liu, Z. Yang, and Z. Cao, "Design perfect reconstruction cosine-modulated filter bank by variable neighbourhood search-least-mean-square error," *Iet Signal Processing*, vol. 6, pp. 273-280, May 2012.
17. N. Karaboga and B. Kamislioglu, "A New Method for Quarter Mirror Filter Bank Design," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(2), 297-307, 2015.
18. K. Avci, "Two dimensional digital filter design using Kaiser-Hamming window structure and Huang transform and image enhancement application," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 33(4), 1459-1473, 2018.
19. B. Ustun and K. Avci, "A New Hybrid Window based on Cosh and Hamming Windows for Nonrecursive Digital Filter Design," 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (Siu), pp. 2282-2285, 2015.
20. R. Arya and S. Jaiswal, "Design of Low pass FIR Filters using Kaiser Window Function with variable parameter Beta (β)," *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, vol. 3, pp. 220-224, 10 march 2015 2015.
21. T. K. Roy and M. Morshed, "Performance Analysis of Low Pass FIR Filters Design Using Kaiser, Gaussian and Tukey Window Function Methods," 2013 2nd International Conference on Advances in Electrical Engineering (Icaee 2013), pp. 1-+, 2013.
22. K. Avci, "Kaiser-Hamming Window and Its Performance Analysis for Nonrecursive Digital Filter Design," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 823-833, 2014.

