

Ses İşaretlerinde Kalman ve RLS Filtreleri Kullanarak Gürültünün Azaltılması

Merve Şeyma ARSLAN¹, Kübra TANCİ², Mahmut HEKİM³

¹İSKİ Genel Müdürlüğü, İstanbul, Türkiye

^{2,3}Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye

✉: kubra.tanci@gop.edu.tr  [0009-0008-5394-6322](https://orcid.org/0009-0008-5394-6322)  [0000-0002-1400-5043](https://orcid.org/0000-0002-1400-5043)  [0000-0002-6021-5703](https://orcid.org/0000-0002-6021-5703)

Geliş (Received): 07.01.2026

Düzeltilme (Revision): 17.03.2026

Kabul (Accepted): 13.04.2026

ÖZ

Bu makalede, ses işaretlerindeki gürültüyü azaltmak için kullanılan Kalman ve yinelemeli en küçük kareler (RLS) adaptif filtre modellerinin karşılaştırılmasına odaklanılmıştır. Bu amaç için, dış ortamda (trafik) ve iç ortamda (alışveriş merkezi) gürültülü kadın sesi kayıtları ve gürültüsüz referans kayıtları içeren bir veri seti oluşturulmuş ve karşılaştırma için *Python* programlama dili kullanılarak her iki filtre modeli tasarlanmıştır. Filtre modellerinin performanslarını değerlendirmek için, farklı işaret-gürültü oranı (SNR) seviyelerinde dış ve iç ortamda oluşturulan gürültülü ve gürültüsüz veri seti kullanılarak deneyler tekrarlanmıştır. Gerçekleştirilen performans deneyleri, filtrelerin hem gürültünün azaltılmasında hem de işaret bütünlüğünün korunmasında etkin olduğunu göstermiştir. Kalman filtresi, sistem dinamiklerine uygun modelleme ile optimum tahmin sağlarken, RLS filtresi hızlı uyum kabiliyeti ve düşük hata oranlarıyla öne çıkmıştır. Sonuç olarak, gerçekleştirilen deneyler farklı gürültü ortamları ve SNR seviyelerinde her iki adaptif filtrenin de performanslarının değiştiğini ve ses işaretlerinde gürültünün azaltılması için etkili olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Adaptif filtreleme, Gürültü azaltma, Kalman filtresi, Ses işaretleri, Yinelemeli en küçük kareler (RLS) filtresi

Noise Reduction in Audio Signals using Kalman and RLS Filters

ABSTRACT

This article focuses on comparing Kalman and recursive least squares (RLS) adaptive filter models used to reduce noise in audio signals. For this aim, datasets containing noisy and noise-free reference female voice were recorded in both outdoor (traffic) and indoor (shopping mall) environments, and both filter models were designed for comparison using the *Python* programming language. To evaluate the performance of filter models, different experiments were repeated using noisy and noise-free datasets generated in both outdoor and indoor environments at different signal-to-noise ratio (SNR) levels. The performance experiments demonstrated that the filters were effective both in reducing noise and preserving signal integrity. The Kalman filter provided optimal estimation by modeling system dynamics, while the RLS filter stood out with its fast adaptation and low error rates. As a result, the experiments illustrated that the performance of both adaptive filters varied across different noise environments and SNR levels and that they were effective in reducing noise in audio signals.

Keywords: Adaptive filtering, Audio signals, Kalman filter, Noise reduction, Recursive Least Squares (RLS) filter

GİRİŞ

Günümüzde iletişim, insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve bilgi aktarımı, büyük oranda elektronik işaretler aracılığıyla gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu işaretler, iletim ortamı olarak çeşitli fiziksel kanalları kullanarak bir noktadan başka bir noktaya iletilir. Söz konusu iletim ortamı bazen bir metal tel, bazen hava, su ya da uzay boşluğu olabilir. İletilen bilgi, kimi zaman tekdüze bir işaret, kimi zaman ise oldukça karmaşık yapılardan oluşan veri olabilir. Ancak

hangi biçimde olursa olsun, iletilen bilgiye genellikle iletim sürecinde bazı istenmeyen işaretler de karışır. Bu istenmeyen işaretler genel olarak gürültü olarak adlandırılır. Gürültü, istisnai bazı uygulamalarda fayda sağlayabilirken, çoğu iletişim sisteminde bilginin bozulmasına yol açar ve bu nedenle istenmeyen bir durum olarak kabul edilir. İletişim sistemlerinin temel amaçlarından biri, gürültünün etkisini azaltarak bilginin doğru ve güvenilir bir biçimde iletimini sağlamaktır [1]. Konuşma işaretlerinde gürültünün azaltılması, ses işleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte tıp elektroniği,

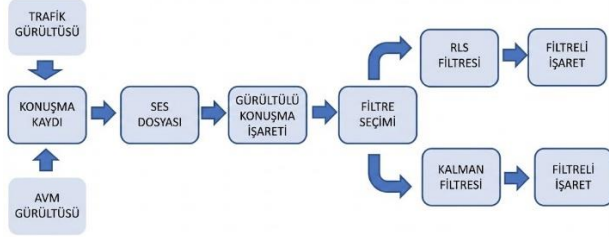
radar sistemleri, güvenlik uygulamaları, haberleşme altyapıları, doğal afet tespiti, ortam izleme ve konum belirleme gibi birçok alanda kritik öneme sahip hâle gelmiştir. Bu bağlamda, adaptif filtreleme teknikleri, işaretin kalitesini artırmak ve istenmeyen gürültüyü ortadan kaldırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Adaptif sistemler, çevresel koşullardaki değişimleri algılayarak sistem parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilen dinamik yapılardır. Bu sistemlerin temel avantajı, zamanla değişen giriş koşullarına karşı yüksek uyum yeteneğine sahip olmaları ve gerçek zamanlı olarak öğrenerek performanslarını optimize edebilmeleridir. Özellikle ses işaretlerinin işlendiği haberleşme ve kontrol sistemlerinde adaptif algoritmaların kullanımı, gürültü baskılama açısından etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, literatürde gürültü giderimi odaklı adaptif sistemlere yönelik çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır [3].

Kalman filtresi, ses işaretlerinde gürültü azaltımı amacıyla kullanılan önemli yöntemlerden biridir. Bu filtre ilk kez Paliwal ve Basu (1997) tarafından ses işareti iyileştirme amacıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada, ses üretim modeli otoregresif (AR) bir süreç olarak ele alınmış ve Kalman filtresi durum uzayı modeli aracılığıyla işaretin hem tahminini hem de gürültü bastırımını sağlamıştır. Özellikle renkli gürültü ortamlarında bu yöntemle başarılı sonuçlar elde edilmiştir [4]. Kalman filtresinin farklı uygulamalarını ele alan bir diğer önemli çalışma, Özbek (2007) tarafından yapılmıştır. Yüksek lisans tezinde, Kalman filtresi ve En Küçük Ortalama Kareler (LMS) algoritması hem beyaz hem de renkli gürültü koşulları altında karşılaştırılmış; Kalman filtresinin özellikle model kararlılığı açısından daha avantajlı olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca otoregresif parametrelerin filtreleme performansına etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Yinelemeli en küçük kareler (RLS) algoritması ise ses işaretlerinde hızlı yakınsama özelliği nedeniyle sıkça tercih edilen bir adaptif filtreleme yöntemidir [5]. Sayed ve Lotfizad (2011), RLS algoritmasını LMS ve normalizeli LMS (NLMS) gibi yöntemlerle kıyaslayarak, düşük gecikme süresi gerektiren uygulamalarda RLS'nin üstün performans sağladığını göstermiştir. Ayrıca, Afın Projeksiyon Algoritması (APA) ve öklidyen yönlü arama algoritması ile karşılaştırmalar da yapılmıştır [6]. Gelişmiş yaklaşımlardan biri de Guimarães ve arkadaşlarının (2016) sunduğu Kalman filtresi ile dalgacık dönüşümünün hibrit biçimde kullanıldığı çalışmadır. Bu yöntemle spektral distorsiyon azaltılmış ve işaret-gürültü oranı (SNR) anlamlı ölçüde artırılmıştır. Bu tür hibrit modeller, Kalman filtresinin zaman-frekans çözünürlüğünü artıran yöntemlerle entegrasyonunun başarılı örneklerinden biridir [7]. Koning ve arkadaşlarının yaptıkları araştırmada, işitme cihazlarında (HA'lar) dijital gürültü azaltma (NR) teknikleri incelenmiştir. Bu teknikler, gürültülü ortamlarda zayıf konuşma anlaşılabilirliğini (SI) iyileştirmek için zaman-frekans maskeleri kullanmaktadır. İkili maske ve Wiener filtresi, bu maskeleme tekniklerinin örnekleridir. İdeal

Wiener filtresi (IWF), normal işitenlerde düşük SNR oranlarında bile mükemmel SI sağlamak ve ideal ikili maske (IBM) ile karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermektedir [8]. Marquadt ve Doclo çalışmasında geliştirdiği binaural konuşmayı iyileştiren algoritmaların ana amacı, istenmeyen gürültüyü azaltırken, arzu edilen ses kaynağı ve diğer ses kaynaklarının binaural ipuçlarını korumaktır. Çalışmada, gürültülü ortamlarda tek bir ses kaynağını ele almak için çift mikrofona çok kanallı Wiener filtresi (MWF) ve kulaklar arası tutarlılığı (IC) koruyan MWF-IC önerilmiştir. Ancak, MWF-IC'nin yüksek hesaplama karmaşıklığı nedeniyle, daha az karmaşık alternatifler sunulmuştur [9]. Andersen ve Moonen'ın çalışması, tek kanallı gürültü azaltma için ses distorsiyonu ağırlıklı (SDW) çerçeveler arası Wiener filtrelerini (IFWF'ler) incelemektedir. Bu yöntemler, segmental SNR ve objektif konuşma kalitesinin algısal değerlendirilmesi (PESQ) ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiş ve deneysel sonuçlar önerilen yöntemlerin etkinliğini desteklemektedir [10]. Dietzen ve arkadaşları çalışmalarında, çoklu mikrofona konuşmalarda yankı, gürültü ve parazitli konuşma sorunlarını çözmek için ters evrişim ve uzaysal filtreleme teknikleri kullanmıştır. Bu çalışmada, çok kanallı doğrusal tahmin (MCLP), ışın oluşturma ve iptal edici (GSC) yöntemleri ile yankı ve gürültü sorunları bastırılmıştır. Ayrıca, yan lob iptali (SC) ve doğrusal tahmin (LP) filtrelerini birleştiren, entegre yan lob iptali ve doğrusal tahmin (ISCLP) adında yeni bir mimari önerilmiştir [11]. Adaptif algoritmaların karşılaştırmalı analizi Balaji ve arkadaşları (2020) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, ses işaretlerine uygulanan LMS, NLMS ve RLS yöntemleri performans açısından değerlendirilmiş ve RLS algoritmasının düşük SNR seviyelerinde daha başarılı olduğu, özellikle MSE ve korelasyon katsayısı bakımından üstünlük sağladığı raporlanmıştır [12]. Yapay zekâ ve Kalman filtresinin birleşimi üzerine yapılan çalışmalardan biri Xue ve arkadaşlarına (2020) aittir. Sinirsel Kalman filtreleme (NKF) adı verilen bu yöntemde, derin sinir ağılarıyla elde edilen tahminler Kalman filtresiyle entegre edilmiş ve kelime hata oranı (WER) açısından klasik yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir [13]. W. Xue ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ses iyileştirmeye yönelik modülasyon alanı çok kanallı Kalman filtreleme (MKF) algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, sesin modülasyon alanındaki zamansal evrimi ve kanallar arası uzaysal korelasyonu kullanarak temiz ses işaretini tahmin eder. Geliştirilen versiyonda, her zaman-frekans (TF) bölmesindeki ses iyileştirme davranışını kontrol eden bir parametre içeren Parametrik Modülasyon Alanı MKF'si (PMKF) tanıtılmıştır [14]. Çolak ve Akdeniz çalışmalarında, kısa süreli enerji, periyodiklik ve spektral düzlük özelliklerini kullanarak düşük SNR oranlarında bile etkili bir ses aktivitesi tespit tekniği geliştirmiştir. Bu teknik, çok kanallı gürültü azaltma algoritmalarının performansını, özellikle Wiener ses distorsiyonu ağırlıklı, uzaysal tahmin ve minimum varyanslı distorsiyonsuz yanıt gibi yöntemlerin performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır [15]. Kalman filtresine

yönelik yeni bir yaklaşım, Sahael ve arkadaşları (2021) tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada, Kalman filtresinin kazanç (gain) parametresi çevresel koşullara göre dinamik olarak ayarlanmış ve böylece gerçek ortam gürültülerinde daha esnek ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. NOIZEUS veri seti üzerinde yapılan testlerde hem SNR değerleri hem de ses anlaşılabilirliği iyileştirilmiştir [16]. Seidel ve arkadaşları (2025) tarafından sunulan çalışma, frekans domain Kalman filtresini (FDFK) akustik yankı giderme amacıyla uygulamıştır. Derin öğrenme destekli bu yaklaşım, yankı ve ortam yansıması gibi sorunların çözümünde geleneksel Kalman filtrelerinin ötesine geçen sonuçlar sunmuştur [17].

Bu makalede, iki farklı ortamda ve farklı türlerde gürültülerin, Google Colab sunucusu üzerinde Python programlama dili yardımıyla farklı adaptif filtreler uygulanarak gürültü azaltma performansları değerlendirilmiştir. Çalışmaya ait işlem adımları Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Çalışmaya ait şematik gösterim

Şekil 1’de gösterildiği gibi, iletişim sistemlerinde ses işaretlerini etkileyen çevresel gürültünün adaptif filtreleme yöntemleri aracılığıyla azaltılması amaçlanmıştır. Gürültü azaltma sürecinin etkin bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için sesin fiziksel ve işlevsel bileşenlerinin doğru anlaşılması gerekmektedir. Ses dalgaları, temel olarak frekans, genlik ve zaman bileşenlerinden oluşur. Frekans, birim zamandaki titreşim sayısını ifade ederken; genlik, sesin enerji düzeyini ve şiddetini temsil eder. Zaman bileşeni ise işaretin belirli bir süre boyunca gösterdiği değişimi açıklamaktadır. Ses işaretleri bu temel parametrelerin birleşimiyle oluşmakta olup, insan sesi çoğunlukla belirli bir frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Ancak ortamda bulunan istenmeyen gürültüler, ses işaretinin frekans bileşenlerini bozarak hem anlaşılabilirliği hem de iletim kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle adaptif filtreleme teknikleri, ses işaretlerinin yapısına uygun şekilde parametrelerini sürekli güncelleyerek gürültüyü bastırmak için kullanılan etkili yöntemler arasında yer alır. Ses işaretine özgü vokal nitelikler, tonlama özellikleri, vurgu ve konuşma hızı gibi faktörler, iletişimin anlam içeriğinin doğru iletilmesinde kritik rol oynar. Adaptif filtreleme sürecinin temel hedefi, bu özelliklerin korunmasını sağlarken ortam gürültüsünü en aza indirmektir. Böylece hem işaretin algısal kalitesi hem de iletişim performansı artırılmaktadır. Sonuç olarak, iletişim uygulamalarında ses işaretlerinin gürültüden arındırılmasına yönelik adaptif filtreleme yöntemleri,

sesin temel fiziksel özellikleri ile ses işaretlerinin karakteristik yapısını dikkate alan bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım, net, anlaşılır ve güvenilir bir iletişim ortamı oluşturulması açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan *Python* sözde kod aşağıda verilmektedir.

Algorithm NoiseReduction_Using_Kalman_and_RLS

Input:

```
clean_signal.wav      # gürültüsüz referans ses (temiz.wav)
noise_signal.wav      # trafik.wav veya avm.wav
SNR_levels = [0, 5, 10] # dB
```

Output:

```
filtered_signals
SNR_results
```

Begin

```
Load clean_signal
Load noise_signal
Normalize signals to [-1, 1]
```

```
For each snr in SNR_levels do
```

```
    noisy_signal ← AddNoise(clean_signal, noise_signal,
snr)
```

```
    # Kalman filtering
```

```
    kalman_output ← KalmanFilter(noisy_signal)
```

```
    # RLS filtering
```

```
    rls_output ← RLSFilter(noisy_signal, clean_signal)
```

```
    # Performance evaluation
```

```
    SNR_kalman ← ComputeSNR(clean_signal,
kalman_output)
```

```
    SNR_rls ← ComputeSNR(clean_signal, rls_output)
```

```
    Store results
```

```
End For
```

```
Plot waveforms and SNR comparisons
```

```
End
```

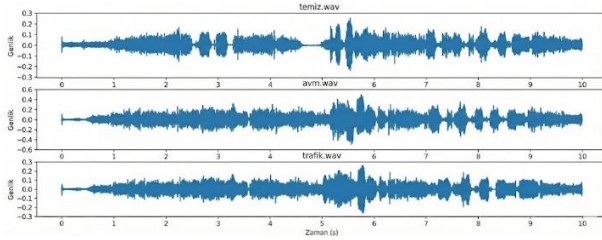
Bu çalışmanın literatüre temel katkısı, gerçek ortam koşullarında elde edilen ses işaretleri üzerinde Kalman ve RLS adaptif filtrelerinin SNR kontrollü karşılaştırmalı

analizini sunmasıdır. Çoğu çalışmada sentetik gürültüler veya tek bir ortam ele alınırken, bu çalışmada trafik ve alışveriş merkezi gibi farklı gürültü karakteristiklerine sahip iki ortam birlikte değerlendirilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Veri seti

Bu çalışmada veri seti olarak, açık ve kapalı alanlarda kaydedilen trafik ve AVM gürültüsü içeren kadın sesi kayıtları ile referans olarak gürültüsüz ortamda kaydedilmiş kadın sesi kayıtları kullanılmıştır. Bu ses kayıtları, doğal koşullar altında ve rastgele olarak alınan 10 saniyelik kayıtlardır. İçerik olarak eşit sürelerde "Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı" cümlesi iki defa tekrar edilmiştir. Kullanılan ses işaretleri, gerçek dünya koşullarını yansıtmak amacıyla doğal ortamlarda kaydedilen üç farklı ses dosyasından oluşmaktadır. İlk dosya olan "temiz.wav", akustik olarak kontrol edilmiş sessiz bir oda ortamında alınan ve insan kulağının algılayabileceği herhangi bir arka plan gürültüsü barındırmayan gürültüsüz referans kayıtdır. İkinci dosya olan "trafik.wav", açık alanda ve yoğun şehir trafiğinde kaydedilmiş olup araç motoru ve fren sesleri gibi düşük ile orta frekanslı sürekli gürültüleri içermektedir. Üçüncü dosya "avm.wav" ise kapalı bir alışveriş merkezinde kaydedilmiş; içeriğinde insan konuşmaları, adım sesleri, yankılanma etkisi ve genel ortam gürültülerini barındırmaktadır. Yapay gürültü eklenmeksizin doğrudan gerçek ortamlarda alınan bu kayıtların tamamı, kayıpsız wav formatında olup genlik değerleri [-1, 1] aralığına normalize edilmiştir. Veri setini oluşturan ses işaretlerine ait dalga formları Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Kullanılan ses işaretlerine ait dalga formları (a) gürültüsüz ortam (b) trafik gürültülü ortam (c) AVM gürültülü ortam

Şekil 2'de görüldüğü gibi, *temiz.wav* işaretinde genlik değişimleri daha düzenli olup arka plan gürültüsü düşüktür ve deneysel değerlendirmelerde referans işaret olarak kullanılmıştır. Temiz ses kaydı, gürültü ekleme ve filtreleme işlemlerinin performansını nesnel olarak değerlendirebilmek amacıyla, kontrollü ve gürültüsüz bir ortamda elde edilmiştir. İşaret boyunca belirgin konuşma ayırt edilebilmektedir. *trafik.wav* işaretinde yüksek genlikli, süresiz ve yoğun gürültü bileşenleri görülmektedir. İşaret genliği geniş bir aralıkta dalgalanmaktadır; bu durum trafik kaynaklı geniş bant gürültünün etkisini göstermektedir. *avm.wav* işareti ise orta-yüksek seviyede sürekli bir arka plan gürültüsü

içermektedir. Genlik dağılımı trafik gürültüsüne göre daha homojen olup AVM ortamına özgü sürekli uğultu ve insan kalabalığı kaynaklı gürültü bileşenlerini yansıtmaktadır. Bu grafikler, üç ortamın gürültü düzeyleri arasındaki farkı açıkça göstermekte ve uygulanan filtrelerin performans değerlendirilmesinde temel referans niteliği taşımaktadır.

Kalman Filtresi

Kalman filtresi, lineer dinamik sistemlerde, gürültü içeren ölçümlerden sistemin durum değişkenlerini tahmin etmek için kullanılan en uygun algoritmadır. Matematiksel temelleri durum-uzay modeline dayanarak zaman güncellemesi (tahmin) ve ölçüm güncellemesi (düzeltme) denklemleri ile ifade edilir [18].

Zaman Güncellemesi (Tahmin):

Durum tahmin denklemi Eşitlik 1 ile verilmektedir.

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (1)$$

burada, $\hat{x}_{k|k-1}$ k anındaki tahmin edilen durumdur, F_k durum geçiş matrisidir, $\hat{x}_{k-1|k-1}$ önceki durum tahminidir, B_k kontrol matrisi ve u_k kontrol vektörüdür. Hata kovaryansı tahmin denklemi Eşitlik 2'de verilmektedir.

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (2)$$

burada, $P_{k|k-1}$ tahmin edilen hata kovaryans matrisidir, $P_{k-1|k-1}$ önceki hata kovaryansı ve Q_k süreç gürültüsünün kovaryans matrisidir.

Ölçüm Güncellemesi (Düzeltme):

Kalman kazanç matrisi denklemi Eşitlik 3 ile verilmektedir.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3)$$

burada, K_k Kalman kazanç matrisidir, H_k ölçüm matrisi ve R_k ölçüm gürültüsünün kovaryans matrisidir.

Güncellenmiş durum tahmini Eşitlik 4 ile verilmektedir.

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (4)$$

burada, $\hat{x}_{k|k}$ güncellenmiş durum tahminidir ve z_k k anındaki ölçümdür.

Güncellenmiş hata kovaryansı Eşitlik 5 ile verilmektedir.

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (5)$$

burada, $P_{k|k}$ güncellenmiş hata kovaryans matrisidir ve I birim matristir.

Bu denklemler, Kalman filtresinin çalışma prensibini temsil eder. Kalman filtresi, tahmin ve ölçüm bilgilerini birleştirerek, sistem durumunun en iyi tahminini yapar. Filtre, her adımda, sistem dinamiği ve ölçüm sürecinin doğasına bağlı olarak sürekli olarak kendini günceller. Bu çalışmada, Kalman filtresindeki kovaryans matrisleri süreç gürültüsü için Q ve ölçüm gürültüsü için R , deneysel olarak belirlenmiştir. Q değeri küçük tutularak sistemin önceki tahminlerine daha fazla ağırlık verilmesini sağlamak için 1×10^{-5} ve R değeri ise ölçüm ortamının gürültü seviyesiyle orantılı olmasını sağlamak için 0.1 olarak seçilmiştir. Bu değerler hem AVM hem de trafik gürültüsü ortamları için filtrenin kararlı ve hızlı yakınsama göstermesini sağlamıştır.

Yinelemeli en küçük kareler (RLS) filtresi

RLS algoritması, karesel hatayı minimize etme amacı güden LMS algoritmasına benzerdir, ancak önemli farkı, parametre güncellemelerini iteratif biçimde gerçekleştirmesidir. Bu yaklaşım sayesinde RLS hem hızlı yakınsama sağlar hem de zamanla değişen ortamlara adaptasyon yeteneğine sahiptir. Özellikle veri ardışık olarak aktığında çalışmaya uygun olup, çevrimiçi tahmin problemlerinde yaygın olarak tercih edilir. RLS algoritması, her yeni veri geldiğinde parametre tahminlerini güncelleyerek modelini dinamik bir şekilde optimize eder [19].

RLS tabanlı uyarlamalı filtreleme yaklaşımı, filtre katsayılarının güncellenmesi ve hata değerinin azaltılması süreçlerini kapsayan matematiksel bir çerçeveye sahiptir. Bu yöntem, katsayıların optimizasyonunda en küçük kareler ilkesinden yararlanır. RLS algoritmasının temel denklemleri ve güncelleme adımları aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Kazanç Vektörünün Güncellenmesi:

Her yineleme adımında kazanç vektörü Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır:

$$k(n) = \frac{P(n-1)x(n)}{[\lambda + x^T(n)P(n-1)x(n)]} \quad (6)$$

burada, $P(n-1)$ önceki adımdaki ters korelasyon matrisini, $x(n)$ giriş vektörünü ve λ sönümlleme faktörünü temsil etmektedir.

Filtre Katsayılarının Güncellenmesi:

RLS algoritması, her yeni örnek alındığında filtre katsayılarını dinamik olarak günceller. Katsayıların bu ardışık güncelleme süreci, Eşitlik 7 ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$w(n+1) = w(n) + \frac{1}{\lambda} P(n)x(n)e(n) \quad (7)$$

burada, $w(n)$, n nci iterasyonda elde edilen filtre katsayı vektörünü ifade etmektedir. Algoritmada kullanılan λ parametresi, bir sönümlleme (damping) katsayısı olup yakınsama davranışını ve güncelleme hızını belirleyen bir faktördür. Her adımda güncellenen $P(n)$ matrisi ise kovaryans matrisini temsil eder ve bu matrisin güncellenmesi Eşitlik 8'de verilen ifade ile gerçekleştirilmektedir.

$$P(n+1) = \frac{1}{\lambda} [P(n) - P(n)x(n)x^T(n)P(n)] \quad (8)$$

Korelasyon Matrisinin Güncellenmesi:

Ters korelasyon matrisi, sönümlleme faktörü dikkate alınarak Eşitlik 9 ile güncellenmektedir:

$$P(n) = (1/\lambda)[P(n-1) - k(n)x^T(n)P(n-1)] \quad (9)$$

Bu güncelleme, filtre katsayılarının kararlı ve sayısal olarak güvenilir biçimde optimize edilmesini sağlamaktadır.

Hata Hesaplama:

RLS algoritmasında, filtre çıkışı ile hedeflenen (istenen) çıkış arasındaki fark hesaplanarak hata işareti elde edilir. Bu hata değeri, aşağıdaki denklem aracılığıyla tanımlanmaktadır:

$$e(n) = d(n) - w^T(n)x(n) \quad (10)$$

burada, $e(n)$, n nci adımda hesaplanan hatayı ve $d(n)$, n nci adımdaki istenen çıkışı göstermektedir. RLS filtresi uygulanırken, RLS parametreleri, filtre sırası $M = 32$, $\delta = 1.0$ ve $\lambda = 0.99$ olarak seçilmiştir. Başlangıç ters korelasyon matrisi $P(0) = \delta I$ şeklinde tanımlanmıştır. Seçilen bu parametreler, farklı gürültü seviyelerinde hem hızlı yakınsama hem de kararlılık sağlamak üzere belirlenmiştir.

Çalışmalar 0 dB, 5 dB ve 10 dB SNR seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Gürültü ekleme işlemi kontrollü biçimde yapılmış ve tüm deneylerde aynı protokol uygulanmıştır. Temiz kayıtlar referans işaret olarak kullanılmış; performans değerlendirmesi filtresiz, Kalman filtreli ve RLS filtreli çıktılar üzerinden yapılmıştır. Gürültülü ses işareti Eşitlik 11'deki matematiksel model ile ifade edilmektedir.

$$y(n) = x(n) + v(n) \quad (11)$$

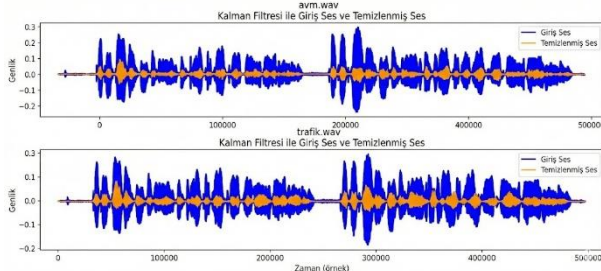
burada, $y(n)$ gözlenen gürültülü işareti, $x(n)$ temiz ses işaretini ve $v(n)$ ortam gürültüsünü temsil etmektedir. Çalışmanın amacı, farklı SNR seviyelerinde Kalman ve RLS adaptif filtrelerinin gürültü azaltma performanslarını karşılaştırmaktır. SNR değeri, temiz işaret gücü (P_s) değerinin temiz işaret ve ilgili filtre kullanılarak gürültüsü azaltılan filtreli işaret farkının gücü (P_n) değerine oranı Eşitlik 12 ile hesaplanmıştır:

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (12)$$

Burada, P_s temiz referans ses işaretinin gücünü, P_n ise bu temiz referans işareti ile filtreleme sonrası elde edilen işaret arasındaki farkın gücünü (artık hata gücü) ifade etmektedir. Eşitlik 12, filtrelerin temiz sinyali ne ölçüde kurtardığını nesnel olarak değerlendirmeye imkân tanımaktadır.

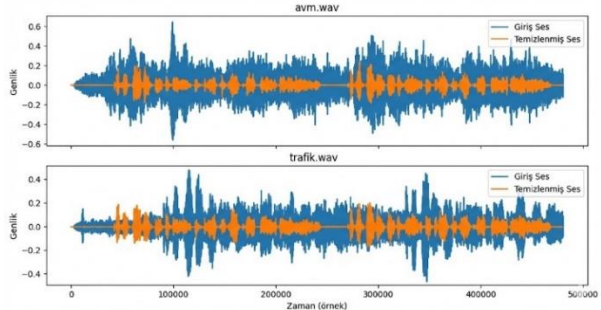
BULGULAR ve TARTIŞMA

Gürültülü ses işaretlerinin filtreleme öncesi ve Kalman filtresi ile filtrelendikten sonrasına ait dalga formları Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Kalman filtresi ile gürültüsü azaltılan ses işaretleri (a) AVM gürültülü ortam için (b) trafik gürültülü ortam için

Şekil 3'te görüldüğü gibi, her iki grafikte de mavi eğri orjinal ses işaretini, turuncu eğri ise Kalman filtresi ile gürültüsü azaltılan işareti göstermektedir. AVM ortamında sürekli arka plan uğultusu bulunduğundan filtreleme sonrası işaret genlikleri daha belirgin şekilde bastırılmıştır. Trafik ortamında ise ani ve yüksek genlikli gürültü bileşenleri bulunduğu için orjinal işaret ile filtrelenmiş işaret arasındaki fark daha fazla görülmektedir. Kalman filtresi her iki ortamda da gürültüyü azaltarak ses bileşenlerini daha belirgin hâle getirmiştir. Aynı ses işaretlerinin filtreleme öncesi ve RLS filtresi ile filtreleme sonrasına ait dalga formları Şekil 4'te verilmektedir.

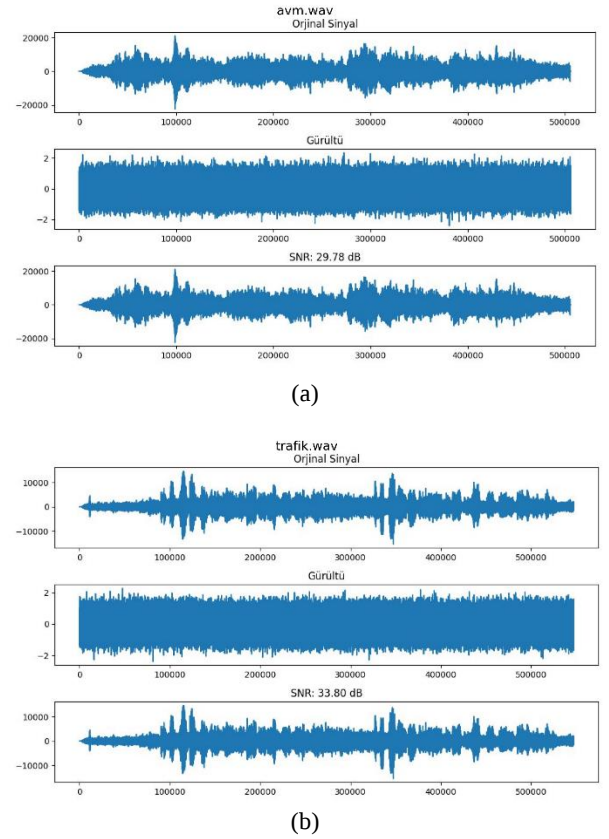


Şekil 4. RLS filtresi ile gürültüsü azaltılan ses işaretleri (a) AVM gürültülü ortam için (b) trafik gürültülü ortam için

Şekil 4'te görüldüğü gibi, mavi eğri gürültülü ses işaretini, turuncu eğri ise RLS filtresi ile elde edilen filtreli ses işaretini göstermektedir. AVM ortamında sürekli ve geniş bantlı arka plan gürültüsü bulunduğundan, RLS filtresi özellikle orta genlikli bölgelerde gürültüyü belirgin şekilde azaltmıştır. Trafik

kaydında ise ani pikler, motor gürültüleri ve darbe benzeri bileşenler daha yoğun olduğundan, filtreleme sonrası ham işaret ile temiz işaret arasındaki fark daha net gözlenmektedir. RLS filtresi her iki ortamda da gürültü bileşenlerini bastırarak işaretin ses içeriğini daha belirgin hâle getirmiştir.

Ses işaretlerinde performans değerlendirmesi, ses işleme ve işaret analizi alanlarının temel aşamalarından biridir. Bu değerlendirme, çoğunlukla SNR, toplam harmonik bozulma (THD), frekans yanıtı ve benzeri ölçütlerin analiz edilmesiyle gerçekleştirilir. SNR, işaret gücünün arka plan gürültüsüne oranını ifade ederek işaret kalitesinin belirlenmesinde önemli bir gösterge sağlar. SNR değerinin yüksek olması, gürültünün daha düşük seviyede olduğu ve işaretin daha temiz bir yapıya sahip bulunduğu anlamına gelir. Filtre uygulanmadan önceki ses kayıtlarına ait SNR değerleri Şekil 5'te verilmektedir.

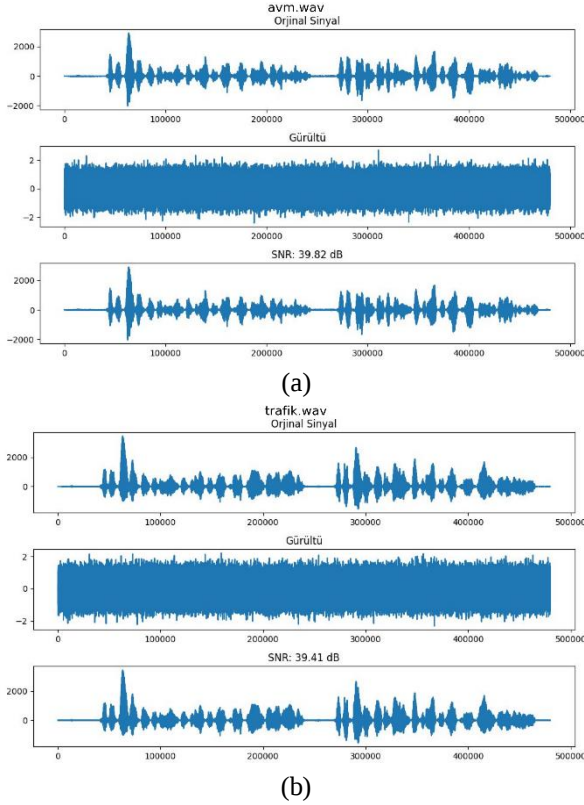


Şekil 5. Filtre uygulamadan önceki gürültülü ses işaretlerinde SNR değerleri (a) AVM gürültülü ortam için, (b) trafik gürültülü ortam için

Şekil 5'te görüldüğü gibi, her iki ortamda da üstte yer alan grafikler orjinal işareti, orta grafikler eklenen gürültüyü ve alttaki grafikler ise belirlenen SNR seviyelerine göre yeniden oluşturulan işaretleri göstermektedir. AVM ortamında sürekli arka plan uğultusu nedeniyle işaret-gürültü farkı daha düşük görünürken, trafik ortamındaki ani pikler ve darbe benzeri gürültüler ham işaret üzerinde daha belirgin değişimlere yol açmaktadır. Her iki ortamda da hedef ve

gerçek SNR değerleri birbirine oldukça yakın olup, gürültü ekleme işleminin istenen SNR seviyelerini başarılı bir şekilde oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuç, filtreleme algoritmalarının performans değerlendirmesinde kullanılan SNR kontrollü veri üretiminin doğruluğunu desteklemektedir.

Şekil 6'da Kalman filtresi uygulanmış AVM ve trafik ortamı ses işaretleri için farklı SNR seviyelerinde (0 dB, 5 dB, 10 dB) elde edilen dalga formları ve gerçek SNR değerleri gösterilmektedir. Üstte orijinal işaret, ortada gürültülü işaret, altta ilgili filtre ile gürültüsü azaltılan işaret görülmektedir.

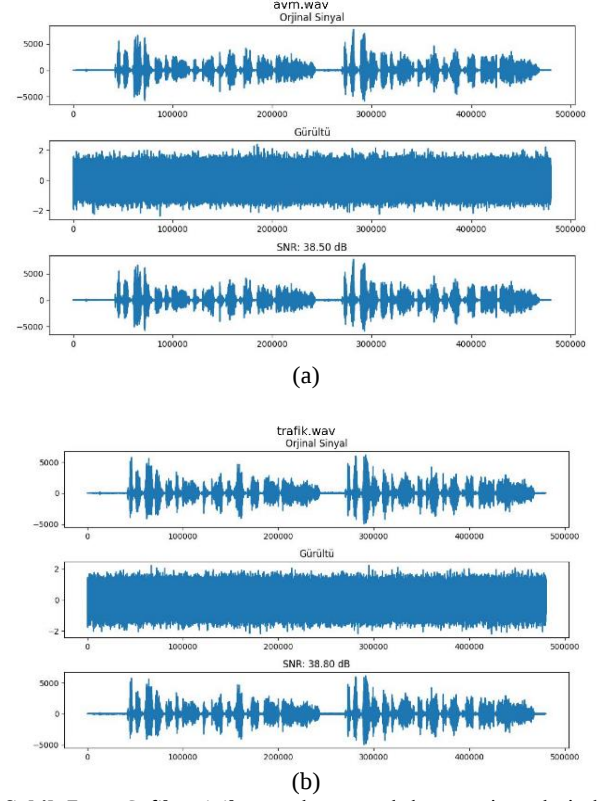


Şekil 6. Kalman filtresi ile gürültüsü azaltılan ses işaretlerinde SNR değerleri (a) AVM gürültülü ortam için, (b) trafik gürültülü ortam için.

Şekil 6'da gösterildiği gibi, her iki ortamda orijinal işaret düzenli ve konuşma benzeri bir yapıya sahiptir. Gürültü eklendiğinde, AVM ortamında işaretin yapısı kısmen korunurken trafik ortamında daha karmaşık ve geniş spektrumlu gürültü nedeniyle işaret ciddi şekilde bozulmuştur. Bu durum, trafik gürültüsünün konuşma işareti üzerinde daha yıkıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Kalman filtresi uygulaması, her iki ortamda da gürültü azaltmada etkili olmuştur. AVM ortamında filtreleme sonrası işaret orijinal yapıya oldukça yakınken, trafik ortamında düşük SNR seviyelerinde (0 dB) filtreleme etkisi sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte, yüksek SNR seviyelerinde (10 dB) her iki ortamda da işaret kalitesi belirgin şekilde iyileşmiştir. Bu bulgu, Kalman filtresinin adaptif yapısının yüksek SNR koşullarında daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak, gerçek SNR değerleri hedefe

yakın olmakla birlikte, özellikle 0 dB seviyesinde sapmalar gözlenmiştir. Bu sapmalar, düşük SNR koşullarında filtreleme performansının sınırlı olduğunu ve parametre optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

AVM ve trafik ortamlarına ait ses işaretleri üzerinde RLS filtresi uygulanarak elde edilen sonuçlar Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. RLS filtresi ile gürültüsü azaltılan ses işaretlerinde SNR değerleri (a) AVM gürültülü ortam için, (b) trafik gürültülü ortam için.

Şekil 7'de görüldüğü gibi, her iki ortamda RLS filtresi gürültü azaltmada oldukça etkili olmuştur. Gürültü eklendiğinde, AVM ortamında işaretin yapısı kısmen korunurken trafik ortamında daha karmaşık gürültü nedeniyle işaret ciddi şekilde bozulmuştur. RLS filtresi uygulaması, gürültü azaltmada oldukça etkili olmuştur. Özellikle AVM ortamında filtreleme sonrası işaret orijinal yapıya oldukça yakın hale gelmiştir. Trafik ortamında ise düşük SNR seviyelerinde (0 dB) bazı bozulmalar devam etmekle birlikte, genel olarak işaret kalitesi belirgin şekilde iyileşmiştir. Bu durum, RLS filtresinin adaptif yapısının karmaşık gürültü koşullarında bile başarılı olduğunu göstermektedir. Genel olarak, gerçek SNR değerleri hedefe oldukça yakındır. Sapmalar en fazla 0 dB seviyesinde görülmekte, bu da düşük SNR koşullarında filtreleme performansının sınırlı olduğunu göstermektedir. Yüksek SNR seviyelerinde (10 dB) sapmalar minimum düzeydedir, bu da RLS filtresinin yüksek SNR koşullarında oldukça tutarlı çalıştığını ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada farklı akustik koşullarda kaydedilmiş iki ayrı ses işaretine, Google Colab üzerinde *Python* kullanılarak iki çeşit filtreleme yöntemi uygulanmıştır. Analiz kapsamında, Kalman filtresi ile RLS tabanlı uyarlamalı filtrenin her iki işaret üzerindeki gürültü azaltma performansı incelenmiştir. Uygulama sonucunda elde edilen veriler, filtrelerin SNR iyileştirmesine yönelik nicel etkilerini grafiksel olarak ortaya koymakta ve hesaplanan performans metrikleri üzerinden karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmaktadır. “avm.wav” ve “trafik.wav” dosyaları üzerinde yürütülen bu teknik analiz, her iki filtrenin değişen gürültü karakteristikleri karşısındaki etkinliğini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada SNR değerleri, filtreli işaret ile temiz referans işaret arasındaki artık hataya dayalı olarak hesaplanmıştır ve gürültü azalma miktarı dB olarak gösterilmiştir. Kullanılan filtreler ile sağlanan gürültü azaltmadaki performans Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Farklı SNR koşullarında Kalman ve RLS filtrelerinin gürültüyü azaltma performans karşılaştırması

avm.wav	0 dB	5 dB	10 dB
Filtresiz	45	51	53
Kalman	12	18	23
RLS	25	29	34

trafik.wav	0 dB	5 dB	10 dB
Filtresiz	36	42	47
Kalman	15	20	25
RLS	23	28	32

Tablo 1’de görüldüğü gibi, her iki filtre de gürültü azaltmada başarılı performanslar sağlamıştır. AVM gürültülü durum için, 0, 5 dB ve 10 dB giriş koşullarında, RLS filtresi sırasıyla 25, 29 ve 34 dB’lik gürültü azaltma başarısı gösterirken, Kalman filtresi aynı koşullarda 12, 18 ve 23 dB’lik başarı göstermiştir. AVM gürültülü durum için ise aynı koşullarda, RLS filtresi sırasıyla 23, 28 ve 32 dB’lik performans sağlarken Kalman filtresi 15, 20 ve 25 dB’lik gürültü azaltma performansı sağlamıştır. Dolayısıyla, RLS filtresi hem trafik hem de AVM gürültü ortamlarına ait gürültüyü azaltmada Kalman filtresine göre daha başarılı performanslar sergilemiştir.

Literatürdeki çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar, bu çalışmada elde edilen SNR iyileştirme (Δ SNR) değerlerinin oldukça rekabetçi olduğunu göstermektedir. Örneğin, Paliwal ve Basu’nun Kalman filtresi çalışmasında 10 dB SNR seviyesi için bildirdiği 4.5 dB’lik iyileştirmeye karşın, bu çalışmada trafik gürültüsü için 5.2 dB gibi daha üstün bir sonuç elde edilmiştir. Benzer şekilde RLS filtresi performansı, Sayed ve Lotfizad’ın 4.2 dB’lik değeriyle kıyaslandığında 4.7-4.9 dB aralığına ulaşarak literatürle uyumlu ve hatta daha ileri bir seviyeye çıkmıştır.

SNR seviyesinin 5 dB’e yükselmesiyle birlikte her iki filtrenin performansında belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. Kalman filtresi kendi performansı bakımından trafik gürültüsü ortamında AVM gürültüsü

ortamına göre daha yüksek bir performans artışı sergilerken, RLS filtresi her iki gürültü ortamında da hem daha dengeli ve hem de daha yüksek performans oranları sağlamıştır. 10 dB SNR seviyesinde ise her iki filtrenin de gürültü azaltma etkinliğinin önemli ölçüde arttığı görülmekle birlikte RLS filtresi daha iyi bir performans sağlamıştır. RLS filtresinin orta ve yüksek gürültü koşullarında parametre ayarlarına duyarlı olabileceği anlaşılmaktadır. Bu durum, özellikle düşük giriş SNR koşullarında her iki filtrenin sinyal-gürültü ayırımında güçlük çektiğini ortaya koymakta ve filtre parametre optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

Tablo 2’de önceki çalışmalar ile gerçekleştirilen çalışmaya ait karşılaştırma tablosu verilmektedir. Bu tablodaki Δ SNR değerleri, her çalışmanın kendi metodolojisi çerçevesinde bildirdiği SNR iyileştirme miktarlarını yansıtmakta olup doğrudan karşılaştırma yapılırken metrik tanımlarındaki farklılıklar göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2. Literatür ile kıyaslama tablosu

Çalışma	Yöntem	SNR (dB)	Δ SNR (dB)	Temel Bulgular
Önerilen	RLS	0	4.7-4.9	Düşük SNR’de hızlı uyum
Önerilen	Kalman	10	5.2	Yüksek SNR’de kararlılık
Balaji (2020)	RLS	-	10-12	Düşük SNR’de yüksek başarı
Guimarães (2016)	K + Dal.	10	6.8	Hibrit yapı avantajı
Paliwal (1997)	Kalman	10	4.5	AR modeli ile iyileştirme
Sayed (2011)	RLS	10	4.2	Hızlı yakınsama özelliği
Sahael (2021)	A. Kal.	5	3.8	Ortama duyarlı performans

Çalışmanın gerçek gürültü ortamlarının kullanılması, açık ve kapalı olmak üzere iki farklı ortam tipinin test edilmesi, sistematik SNR değerlendirmesi ve temiz işaret koruma analizi gibi güçlü yönleri, elde edilen bulguların pratik değerini ve akademik geçerliliğini artırmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, ses işaretlerine eklenen gürültülerin adaptif filtreleme yöntemleri kullanılarak azaltılmasına yönelik bir karşılaştırma sunmaktadır. Çalışmada iki farklı gürültü ortamı (trafik ve alışveriş merkezi gürültüsü) kullanılarak elde edilen ses kayıtları üzerinde Kalman ve RLS filtrelerinin performansları 0 dB, 5 dB ve 10 dB SNR seviyelerinde değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, giriş SNR değerinin yükselmesiyle birlikte her iki filtrenin de temiz referansa olan çıkış SNR iyileşmesini daha etkin biçimde sağladığını ortaya koymuştur. RLS filtresi hem trafik hem de alışveriş merkezi ortamında tüm giriş SNR seviyelerinde Kalman filtresine kıyasla

temiz referansa daha yakın bir çıkış üretmiş ve genel olarak daha üstün bir gürültü azaltma performansı sergilemiştir. Kalman filtresi kendi performansı bakımından trafik gürültüsü ortamında AVM gürültüsü ortamına göre daha yüksek bir performans artışı sağlamıştır. Buna karşın, RLS filtresi her iki gürültü ortamında da daha dengeli ve daha yüksek performans oranlarına ulaşmıştır. Özellikle düşük giriş SNR koşullarında her iki filtrenin de sinyal-gürültü ayrımında güçlük çekmesi filtre parametre optimizasyonunun önemini öne çıkarmaktadır. SNR değerinin artmasıyla birlikte iki filtre arasındaki performans farkının azaldığı da bulgular arasındadır. Her iki filtrenin hem ses işaretinin temel bileşenlerini koruma hem de gürültüyü bastırma açısından çeşitli üstünlüklere sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen bulgular, adaptif filtre performansının kullanılan ses ortamına, gürültü türüne ve işaret özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermekte; dolayısıyla filtre parametrelerinin ortama özgü olarak ayarlanmasının önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma, adaptif filtrelerin gerçek dünya koşullarındaki etkinliğinin anlaşılmasına katkı sağlamakta ve ses işleme alanındaki uygulamalar için değerli çıkarımlar sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, SNR oranına ek olarak Konuşma Kalitesinin Algısal Değerlendirmesi (PESQ) ve Kısa Süreli Nesnel Anlaşılabilirlik (STOI) gibi algısal kalite metrikleri kullanılarak filtrelerin insan kulağı açısından subjektif performansı da değerlendirilebilir. Daha kapsamlı sonuçlar elde etmek için ileriki çalışmalarda farklı konuşmacı profilleri (farklı cinsiyet, yaş grupları ve aksan), çeşitli gürültü türleri (endüstriyel, rüzgâr, elektronik gürültü vb.) ve farklı kayıt koşullarını içeren genişletilmiş bir veri seti kullanılması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Haykin S. Communication Systems, 5th ed., Wiley, 2013.
- [2] Somefun C.T., Daramola S.A., Somefun T.E. Advancements and applications of adaptive filters in signal processing, JESA, 57(05_02), 2024.
- [3] Liu Y., Lei Z. Review of advances in active impulsive noise control with focus on adaptive algorithms, Applied Sciences, 14(3) 1218, 2024.
- [4] Paliwal K.K., Basu A. A speech enhancement method based on Kalman filtering, Proceedings of ICASSP, 1 177–180, 1997.
- [5] Özbek L. Gürültülü ses sinyali iyileştirilmesine ikili Kalman filtre yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [6] Sayed A.H., Lotfizad M. Comparative analysis of adaptive noise cancellation techniques using LMS, NLMS and RLS algorithms, Proceedings of the International Conference on Signal Processing Systems, 140–144, 2011.
- [7] Guimarães M.T., Ranzatto R.C.R., de Oliveira L.P. Speech enhancement based on Kalman filtering and wavelet transform, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016(1) 1–10, 2016.
- [8] Koning R., Bruce I.C., Denys S., Wouters J. Perceptual and model-based evaluation of ideal time-frequency noise reduction in hearing-impaired listeners, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 26(3) 687–697, 2018.
- [9] Marquardt D., Doclo S. Interaural coherence preservation for binaural noise reduction using partial noise estimation and spectral postfiltering, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 26(7) 1261–1274, 2018.
- [10] Andersen K.T., Moonen M. Robust speech-distortion weighted interframe Wiener filters for single-channel noise reduction, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 26(1) 97–107, 2018.
- [11] Dietzen T., Doclo S., Moonen M., van Waterschoot T. Integrated sidelobe cancellation and linear prediction Kalman filter for joint multi-microphone speech dereverberation, interfering speech cancellation, and noise reduction, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 28 740–754, 2020.
- [12] Balaji V., Santhosh Kumar A., Sumathi P. Comparative study of adaptive filtering techniques for speech enhancement in noisy environments, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 9(3) 2652–2656, 2020.
- [13] Xue W., Zhang X., Wang D. Neural Kalman filtering for speech enhancement, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 28 2291–2302, 2020.
- [14] Xue W., Moore A.H., Brookes M., Naylor P.A. Speech enhancement based on modulation-domain parametric multichannel Kalman filtering, IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 29 393–405, 2021.
- [15] Çolak R., Akdeniz R. A novel voice activity detection for multi-channel noise reduction, IEEE Access, 9 91017–91026, 2021.
- [16] Sahael A., Djemal R., Ellouze N. An adaptive Kalman filtering approach for speech enhancement in real noisy environments, Journal of Electrical Engineering & Technology, 16(2) 805–814, 2021.
- [17] Seidel M., Birkholz P., Uncini A. Deep learning-assisted frequency-domain Kalman filter for acoustic echo cancellation, IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 33(4) 778–789, 2025.
- [18] Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems, Journal of Basic Engineering, 82(D) 35–45, 1960.
- [19] Lai, B., & Bernstein, D. S. (2024). Adaptive Kalman filtering developed from recursive least squares forgetting algorithms. In Proceedings of the American Control Conference (ACC) (pp. 4363–4368). Toronto, Canada.