

# ÇOK TAŞIYICILI YAYILI İZGE İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN KANAL MODELLEME VE KESTİRİMİ

Seda ŞENAY<sup>1</sup>

Aydın AKAN<sup>2</sup>

Luis F. CHAPARRO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Yeditepe Üniversitesi, <sup>2</sup>İstanbul Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Avcılar, 34850 İstanbul

<sup>3</sup> University of Pittsburgh, Dept. of Electrical and Computer Engineering  
Pittsburgh, PA 15261 USA

<sup>1</sup> e-posta: ssenay@yeditepe.edu.tr

<sup>2</sup> e-posta: akan@istanbul.edu.tr

<sup>3</sup> e-posta: chaparro@engr.pitt.edu

*Anahtar Sözcükler: Yayılı İzge, Çok Taşıyıcılı İletişim Sistemleri, OFDM, Zaman-Frekans Analizi*

## ABSTRACT

*In wireless communications, the channel is typically modeled as a random linear time-varying system that spreads the transmitted signal in both time and frequency due to multi-path fading and Doppler effects. In this paper, we show how time-frequency analysis can be used to model and estimate the channel of a multi-carrier spread spectrum (MC-SS) system with a complex quadratic spreading sequence. We will show that in this case the effects of time delays and Doppler frequency shifts can be characterized effectively as time-shifts. Using the discrete evolutionary transform (DET) we are able to estimate these effective time shifts via a spreading function and use them to equalize the channel. To illustrate the performance of the proposed method we perform several simulations with different levels of channel noise, jammer and Doppler frequency shifts.*

## 1. GİRİŞ

Çok taşıyıcılı bir modülasyon tekniği olan Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM), yüksek hızlı gezgin haberleşme sistemlerinde, çok yollu zayıflamalı ortamlarda tek taşıyıcılı sistemlere göre üstün başarımlar göstermektedir. Benzer şekilde yayılı izge (Spread Spectrum: SS) sistemleri bozucu girişleri ve ortak kanal girişimini yok etme özelliğiyle bilinirler. Bu iki tekniğin birleştirilmesi *Çok Taşıyıcılı Yayılı İzge (ÇTYİ)*, *Çok Taşıyıcılı Doğru Dizi Yayılı İzge* ve *Çok Tonlu Yayılı İzge* sistemlerini ortaya çıkarmıştır [1, 2].

Çok taşıyıcılı yayılı izge sistemlerinde veri, karmaşık katsayılar kullanılarak yayılır ve farklı alt bantlara ait taşıyıcıları modüle eder. İletilen işaretin sabit bir zarf ve aynı zamanda düz izgeye sahip olabilmesi için, yayıcı fonksiyon olarak karmaşık karesel diziler önerilmiştir [2]. Bu çalışmada haberleşme kanalının kestiriminde ve alıcı tasarımında bu dizilerin özelliklerinin kullanılabilceği gösterilmektedir. Haberleşme kanalının zamanla değişen ve çok yollu sönümlemeli yapısı nedeniyle, iletilen işaretle zamanda ve frekansta yayılma olduğundan iletilen bilginin alınabilmesi için kanal denkleştirme gereklidir. Kanalın zamanla değişme özelliği Doppler ötelemelerinin sonucu olmasına rağmen, pek çok uygulamada dikkate alınmamaktadır. Örneğin, CDMA yayılı izge sistemlerinde kullanılan RAKE alıcısında, Doppler ötelemeleri ihmal edildiği halde, yavaş sönümlemeli kanallarda oldukça iyi çalışır [4, 5]. Oysa ki, Doppler etkisi dikkate alındığında, alıcı başarımlarını artırılabilir.

İletim kanalları genellikle rastgele zamanla değişen sistemler olarak modellenir [6, 7, 8]. Bu çalışmada ÇTYİ sistemleri için iletişim kanalının modellenmesi ve bir kestirim yöntemi önerilmektedir. [2]'de verilen karmaşık karesel dizi zamanda ve frekansta birim genliğe sahip doğrusal çarpı fonksiyonudur ve çevrimsel ötelemeleri birbirine diktir. Bu özellikler kullanılarak, alınan işaretin Ayrılcı Evrimsel Dönüşümünden (AED), kanal parametrelerinin kestirimi sunulmaktadır. Böylece kanala ait tüm bilgiler; yayılma yol sayısı, gecikmeler, sönümleme katsayıları ve Doppler frekans kaymaları elde edilmiş olacaktır. Bu bilgiler kullanılarak iletilen verinin kestirimi için bir alıcı da önerilecektir [9].

<sup>2</sup>Bu çalışma TÜBİTAK-BAYG tarafından desteklenmiş ve University of Pittsburgh, Dept. of Electrical and Computer Engineering'de gerçekleştirilmiştir.

## 2. KANAL MODELİ

Zadeh fonksiyonu olarak da bilinen zamanla değişen kanal frekans cevabı herbiri rastgele değişen zaman gecikmeleri, Doppler frekans ötelemeleri ve kazançlar cinsinden modellenir [2]. Evrimsel izge teorisi ve Zadeh'in fonksiyonu arasında var olan ilişki kanal parametrelerini kestirmede kullanılabilir [9]. L yayılma yollu, sönümlemeli, Doppler frekans ötelemeli iletişim kanalı aşağıdaki dürtü cevabı ile modellenebilir:

$$\begin{aligned} h(n, k) &= \sum_{\ell=0}^{L-1} h_{\ell}(n-k) f_{\ell}(n) \\ &= \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} \delta(k - N_{\ell}) e^{j\psi_{\ell} n} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $h_{\ell}(n)$  gecikmeleri modelleyen tüm geçiren süzgeci,  $f_{\ell}(n) = \alpha_{\ell} e^{j\psi_{\ell} n}$  Doppler frekanslarına karşı düşen dürtü cevabını ve  $\{\alpha_{\ell}\}$  kazançları göstermektedir. Bu iletişim kanalının frekans cevabı  $H(n, \omega_k)$  [9];

$$H(n, \omega_k) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} e^{j\psi_{\ell} n} e^{-j\omega_k N_{\ell}}. \quad (2)$$

Kanala ait ikili frekans fonksiyonu,  $B(\Omega_s, \omega_k)$ , frekans cevabı  $H(n, \omega_k)$ 'nin zaman değişkenine göre ayırık Fourier dönüşümü ile,

$$B(\Omega_s, \omega_k) = N \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} e^{-j\omega_k N_{\ell}} \delta(\Omega_s - \psi_{\ell}) \quad (3)$$

bulunur. Son olarak,  $B(\Omega_s, \omega_k)$ 'nin  $\omega_k$ , değişkenine göre ters Fourier dönüşümü, kanalın yayma fonksiyonu olarak ifade edilir ve;

$$S(\Omega_s, k) = N \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} \delta(\Omega_s - \psi_{\ell}) \delta(k - N_{\ell}). \quad (4)$$

şeklinde bulunur. Yayma fonksiyonu frekans-zaman düzleminde, gecikme ve Doppler frekanslarının kesişiminde, büyüklükleri  $N\alpha_{\ell}$  olan dürtüler oluşturur [10]. Bu bilgi kestirilebilirse, iletilen veri elde edilebilir.

## 3. ÇTYİ KANAL KESTİRİMİ

ÇTYİ sistemlerinde [1, 3, 2] veri dizisi  $d(n)$  frekans ortamında yayıcı katsayılarla,  $\{G(k)\}$ , yayılarak alt bantlara ait taşıyıcıları modüle eder. Bu sistem zaman bölgesinde yayıcı fonksiyonu karmaşık  $g(n)$  dizisi olan ( $G(k) = \mathcal{F}\{g(n)\}$ ) doğru dizi yayılı izge sistemine (DS-SS) denktir. Burada  $g(n)$  ve  $G(k)$  Fourier dönüşüm çiftidir. İletilen işaret kullanılan yayıcı diziyeye bağlıdır. Genellikle kullanılan diziler düz bir izgeye

sahiptir fakat zamanda sabit bir zarfa sahip değildir. Oysa ki, zaman ve frekansta sabit bir zarf, hem teknik hem de yayıcı özellikleri bakımından gereklidir. [2]'de, aşağıda gösterilen karmaşık karesel diziler mesajı zamanda ve frekansta yaymak için önerilmiştir:

$$\begin{aligned} g(n) &= e^{-j\frac{\pi}{8}} e^{j\frac{2\pi}{N}\frac{1}{2}n^2}, \quad n = 0, \dots, N-1 \\ G(k) &= e^{j\frac{\pi}{8}} e^{-j\frac{2\pi}{N}\frac{1}{2}k^2}, \quad k = 0, \dots, N-1 \end{aligned}$$

Bu diziler aşağıdaki özelliklere sahip doğrusal çiftlerdir:

- $g(n)$  ve  $G(k)$  birbirinin DFT'sidir ve aynı zamanda  $G(k) = g(k)^*$ ,
- $g(n)$  ve  $G(k)$  sabit zarfa sahiptir,
- Çevrimsel ötelemeleri birbirine diktir.

Temel bantlı bir ÇTYİ sisteminde, iletilen sinyal  $s(n)$ :

$$\begin{aligned} s(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} d G(k) e^{j\omega_k n}, \\ &= dg(n), \quad 0 \leq n \leq N-1 \end{aligned} \quad (5)$$

Zamanla değişen kanalın çıkışı  $y(n)$  ise,

$$y(n) = d \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} g(n - N_{\ell}) e^{j\psi_{\ell} n} \quad (6)$$

burada  $L$  yayılma yol sayısını,  $\{N_{\ell}\}$  ve  $\{\psi_{\ell}\}$  zamanda gecikmeleri ve Doppler frekans kaymalarını göstermektedir. Alınan sinyalin, toplamsal beyaz Gauss kanal gürültüsü  $\eta(n)$  ve bozucu giriş  $j(n)$  ile bozulduğu varsayılarak alınan işaret,  $r(n) = y(n) + \eta(n) + j(n)$  haline dönüşür.

$g(n)$  dizisi önemli bazı özelliklere sahiptir: 1)  $g(n)$  üzerindeki herhangi bir zaman gecikmesi, bir Doppler frekans kaymasına denktir; 2)  $g(n)$ 'e etki eden herhangi bir Doppler frekans kayması, zamanda bir gecikmeye denktir. Bu iki durum aşağıdaki gibi gösterilebilir:

1.  $N_0$  kadar zamanda öteleme:

$$\begin{aligned} g(n - N_0) &= e^{-j\frac{\pi}{8}} e^{j\frac{2\pi}{N}(n-N_0)^2} \\ &= g(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}N_0 n} e^{j\frac{\pi}{N}N_0^2} \end{aligned}$$

Burada  $e^{-j(2\pi N_0 n/N)}$  frekansı  $\psi_0 = -2\pi N_0/N$  olan bir Doppler kaymasını gösterir ve  $e^{j(2\pi N_0^2/2N)}$  bir sabittir.

2.  $\psi_1 = \frac{2\pi}{N}N_1$  kadar Doppler frekans kayması:

$$\begin{aligned} g(n) e^{j\psi_1 n} &= e^{-j\frac{\pi}{8}} e^{j\frac{2\pi}{N}n^2} e^{j\psi_1 n} \\ &= g(n + N_1) e^{-j\frac{2\pi}{N}N_1^2} \end{aligned}$$

Burada  $g(n + N_1)$ ,  $g(n)$ 'in  $N_1$  örnek ötelenmiş halidir ve  $e^{-j(2\pi N_1^2/2N)}$  bir sabittir. Üçüncü bir durum olarak:

3.  $N_0$  zaman ötelemesi ve  $\psi_1 = \frac{2\pi}{N}N_1$  Doppler frekans kayması:

$$\begin{aligned} g(n - N_0)e^{j\psi_1 n} &= g(n)e^{-j\frac{2\pi(N_0 - N_1)n}{N}}e^{j\frac{\pi N_0^2}{N}} \\ &= g(n - N_0 + N_1)e^{-j\frac{\pi(N_1^2 - 2N_0N_1)}{N}} \end{aligned}$$

Bu son durum belirtir ki  $g(n)$  zamanda ve frekansta ötelendiğinde sonuç  $g(n)$ 'in zamanda etkin bir değerle,  $N_e = -N_0 + N_1$ , ötelenmesi ve karmaşık bir sabitle çarpılmasına denktir. Gürültü ve bozucu giriş etkisi ihmal edilirse, alınan işaret, Doppler etkisi dahil edilerek  $y(n) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_\ell g(n - N_{e,\ell})$  şeklinde gösterilebilir. Bu durumda [9]'da sunulan AED tabanlı yöntem etkin gecikmeyi  $N_{e,\ell}$ ,  $S(0, k)$ 'dan kestirmekte kullanılabilir. Ayrıca etkin modelin zamanla değişmeyen yapısı hesaplamaları kolaylaştırmaktadır. Böylece kanalın transfer fonksiyonu aşağıdaki hale dönüşür:

$$\tilde{H}(\omega_k) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_\ell e^{-j\omega_k N_{e,\ell}} \quad (7)$$

ve ters Fourier dönüşümü ile,

$$\tilde{h}(n) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_\ell \delta(n - N_{e,\ell}) \quad (8)$$

Her iki fonksiyonda  $H(n, \omega_k)$  ve  $S(\Omega_s, k)$ 'nin özel durumlarıdır. Dikkat edilirse,  $\tilde{h}(n)$  ve  $S(0, n)$  (4)'de tanımlandığı gibi birbirine denktir. Kanal gürültüsü ve bozucu giriş etkisi dikkate alındığında bulunan etkin ötelemeler,  $\{N_{e,\ell}\}$ , sadece kestirimlerdir fakat iletilen veri bitini tespit etmekte kullanılabilirler. Eğer en kısa yola (en az sönmülemeye uğramış) ilişkin kestirilen etkin öteleme değeri,  $\hat{N}_e$ , ise  $g(n)$  dizisinin çevrimsel diklik özelliğine göre aşağıdaki karar değişkeni elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \rho &= \sum_{n=0}^{N-1} r(n) \frac{g^*(n - \hat{N}_e)}{\hat{\alpha}_e} \\ &= d \frac{\alpha_{\ell_0}}{\hat{\alpha}_e} + \sum_{n=0}^{N-1} [\eta(n) + j(n)] \frac{g^*(n - \hat{N}_e)}{\hat{\alpha}_e} \end{aligned}$$

Bu durum, kestirilen  $\hat{N}_e$  etkin gecikmesinin,  $N_{e,\ell}$ , değerlerinden herhangi biriyle örtüşmesi durumudur. Kanal gürültüsünün sıfır ortlamalı ve bozucu girişin küçük ortalama değere sahip olması durumunda, karar değişkeninin beklenen değeri,  $E[\rho] = d\alpha_{\ell_0}/\hat{\alpha}_e$ ,  $d$ 'ye yakın olacaktır.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

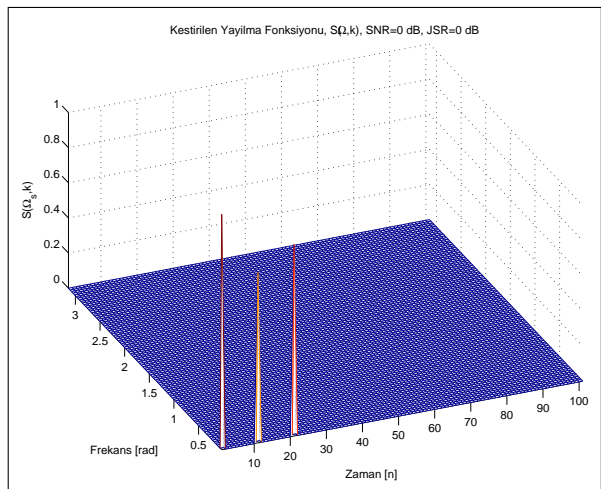
Temel bantlı bir ÇTYİ haberleşme sistemi karmaşık karesel diziler kullanılarak modellenmiştir. Haberleşme kanalı tüm benzetimlerde rasgele belirlenmiştir,

örneğin yol sayısı  $1 \leq L \leq 5$ , Doppler frekans kaymaları  $0 \leq \psi_i \leq \psi_{\max}$  ve gecikme değerleri rasgele değişmektedir.

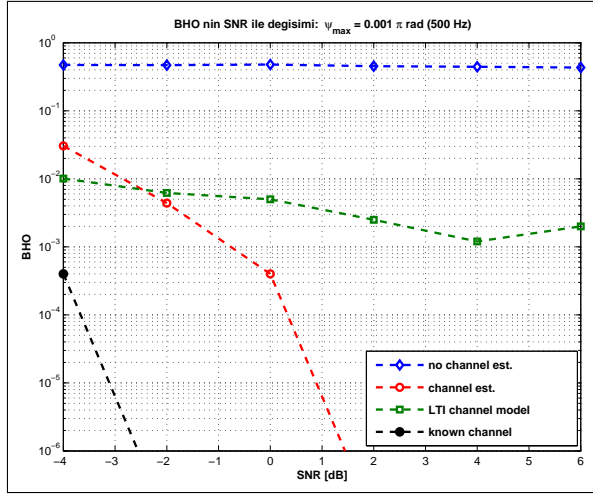
İletilecek veri  $K = 100$  alt taşıyıcı ile modüle edilmiştir. Mevcut band genişliğinin  $500\text{KHz}$  olduğu kabul edilerek, alt taşıyıcılar arasındaki frekans aralığı  $F = 5\text{KHz}$  alınmıştır. Etkin öteleme değerlerinin kestirimi Şekil.1'de gösterilmektedir. İlk benzetim kümesinde kanal gürültüsünün SNR değerleri  $-4$  ile  $6\text{dB}$ , Doppler frekans kaymaları  $0$  ile  $\psi_{\max} = 500\text{Hz} \cdot (0.001\pi\text{rad})$  arasında değiştirilerek bit hata oranı (BHO) dört değişik yöntemle hesaplanmıştır: 1) kanal kestirimının olmadığı durum, 2) önerilen yöntem, 3) bilinen LTI kanal modeli, (Doppler etkilerinin ihmal edildiği durum), ve 4) kanal parametrelerinin bilindiği durum (bkz. Şekil 2).  $2\text{dB}$ 'den büyük SNR değerleri için BHO'nun sıfıra yakın olduğu görülmektedir. İkinci benzetim kümesinde Doppler etkisinin BHO'na etkisi test edilmiştir (Şekil 3).  $1000\text{Hz}$ 'den büyük Doppler frekanslarının kanal kestirimine büyük etkisi olmaktadır. Son olarak önerilen yöntemin geniş bantlı bozucu giriş etkisine karşı dayanıklılığı test edilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi, çırp bozucu giriş durumunda bozucu-ışaret-oranı (JSR)  $2\text{dB}$ 'den büyük olduğunda, kanal parametrelerinin kestirim başarımı azalmaktadır.

#### 5. SONUÇLAR

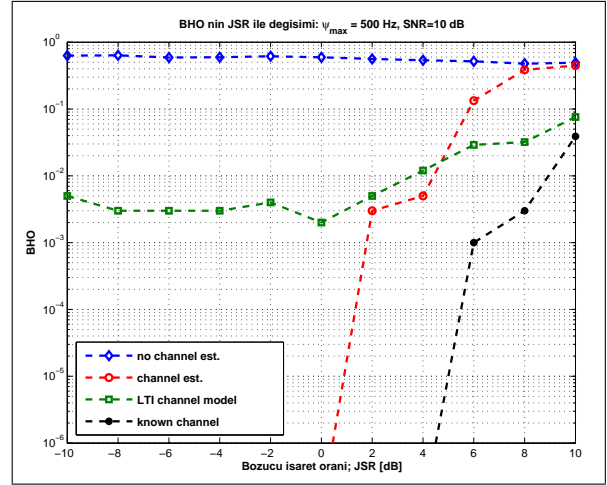
Bu bildiri zaman-frekans kanal kestirim yönteminin çok taşıyıcılı yayılı izge sistemlerinde kullanımı sunulmaktadır. Elde edilen etkin öteleme özelliğiyle bir kanal kestirim yöntemi ve buna uygun bir alıcı geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin başarımı farklı kanal gürültüleri, Doppler frekans kaymaları ve bozucu giriş güç değerleri için test edilmiş ve oldukça yüksek gürültü, Doppler ve bozucu seviyelerinde başarılı sonuçlar alınmıştır.



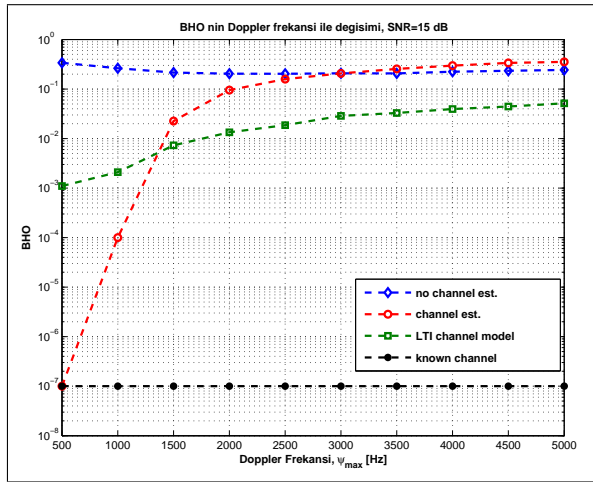
Şekil 1: Kanal gürültüsü (SNR=0 dB) ve bozucu giriş (JSR = 0 dB) varken kestirilen yayma fonksiyonu.



Şekil 2: Doppler frekansı  $500\text{ Hz} (\psi_{max} = 0.001\pi)$  rad. için BHO'nun SNR ile değişimi.



Şekil 4: SNR=10 dB ve  $\psi_{max} = 500\text{ Hz}$ . için BHO'nun JSR ile değişimi.



Şekil 3: SNR=15 dB için BHO'nun Doppler frekansı ile değişimi.

## KAYNAKLAR

- [1] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," *IEEE Communication Magazine*, Vol. 35, No.12, pp. 126–133, 1997.
- [2] J. Tan and G. Stuber, "Anti-jamming performance of multi-carrier spread spectrum with constant envelope," *IEEE Intl. Conf. on Comm.*, Vol. 1, pp. 743–747, May 2003.
- [3] V. Aue and G. Fettweis, "Higher-level multi-carrier modulation and its implementation," *IEEE Intl. Symp. on Spread Spectrum Tech. and Appl.*, Vol. 1, pp. 126–130, Sept. 1996.
- [4] G. Proakis and M. Salehi, "Communication Systems Engineering," *Prentice Hall*, 1994.
- [5] T.S. Rappaport, "Wireless Communications," *Prentice Hall*, 1996.
- [6] P.A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Trans. on Comm. Systems*, pp. 360–393, Dec. 1963.
- [7] M. Tsatsanis and G.B. Giannakis, "Subspace Methods for blind estimation of time-varying FIR channels," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, pp. 3084–3093, Dec. 1997.
- [8] A.M. Sayeed and B. Aazhang, "Joint multipath-Doppler diversity in mobile wireless communications," *IEEE Trans. on Comm.*, Vol.47, No.1, pp. 123–132, Jan.1999.
- [9] Chaparro, L.F., and Alshehri, A.A., "Channel Modeling for Spread Spectrum via Evolutionary Transform," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP'04*, Vol. II, pp. 609–612, May 17–21, 2004.
- [10] M.D. Hahm, Z.I. Mitrovski, and E.L. Titlebaum, "Deconvolution in the Presence of Doppler with Application to Specular Multipath Parameter Estimation," *IEEE Trans. on Signal Proc.*, Vol. 45, No. 9, pp. 2203–2219, Sep. 1997.
- [11] N.C. Huang and J.K. Aggarwal, "Synthesis and Implementation of recursive linear shift-variant linear filters," *IEEE Trans. on Circuits and Sys.*, pp. 29–36, Jan. 1983.