

# DFBÇ Tabanlı Tam Çift Yönlü Kablosuz Sistemlerde Kalıntı İşaret Gürültüsü

## Residual Signal Noise in OFDM Based Full-Duplex Wireless Systems

Hayrettin Ayar  
Sabancı Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
İstanbul, Türkiye  
hayrettinayar@sabanciuniv.edu

Özgür Gürbüz  
Sabancı Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
İstanbul, Türkiye  
ozgur.gurbuz@sabanciuniv.edu

**Özetçe** — Tam Çift Yönlü iletişimde (TÇY) öz girişim (ÖG) giderimi adımlarından birisi sayısal ÖG giderimidir (SÖGG). Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (DFBÇ) bazlı sistemlerde TÇY iletimi gerçekleştirebilmek amacıyla SÖGG teknikleri uygulandığında, önemli miktarda ÖG giderim sağlanmasına rağmen, kalıntı ÖG işaretinde iki DFBÇ sembolü arası geçişlerde nispeten yüksek seviyelerde periyodik dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu dalgalanmalar, iletişim sağlanan iki uç birim arasındaki yayılım gecikmesine bağlı olarak, alınmak istenen işarete ait veri bölgesine denk gelerek ciddi girişim yaratabilmektedir. Bu çalışmada, dalgalanmaları azaltmak için daha önceden önerilmiş olan çözüm, farklı SÖGG tekniklerinin farklı modülasyon tipleri ve kodlamalı sistemlerde uygulandığı simülasyonlarla değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** — tam çift yönlü, sayısal öz girişim giderimi, dikgen frekans bölmeli çoklama, kalıntı işaret gürültüsü.

**Abstract** — One of the steps for suppressing the self-interference (SI) in Full-duplex (FD) communication is digital SI cancellation (DSIC). In orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based FD systems, despite providing significant SI cancellation, the residual SI after DSIC produces significantly high amount of periodic ripples at the transitions between two OFDM symbols. These ripples coincide with the data region of the desired signal when the propagation delay increases between two communicating nodes. In this work, digital SI cancellation performance of the previously proposed ripple reduction solution is evaluated for different communication schemes, considering various DSIC techniques over different modulation types and coding rates.

**Keywords** — full-duplex, digital self-interference cancellation, orthogonal frequency division multiplexing, residual signal noise.

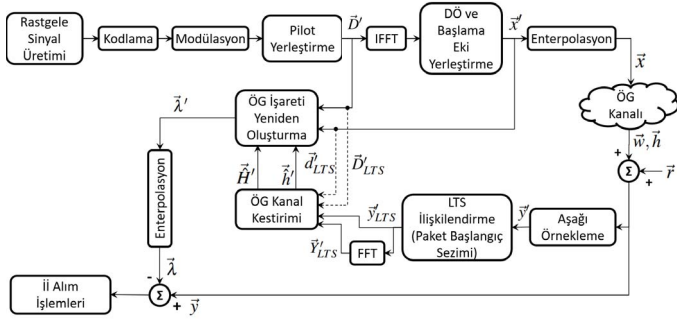
Bu çalışmanın ilk sonuçları İngilizce olarak 2019 yılında BalkanCom konferansında sunulmuş olup, DÖ gürültü azaltma (DÖGA) çözümü tek bir DFBÇ hava ara yüzü üzerinde incelenmiştir. Bu bildiride, DÖGA başarımı analizi için farklı modülasyon tipleri ve kodlama oranları ile elde edilen yeni sonuçlar eklenmiştir. Çalışmanın destek bilgisi çift taraflı gizlilik ilkesi kapsamında gizlenmiştir.

### I. GİRİŞ

İletişim ağlarında yüksek veri hızlarına olan talebin artması, bu yöndeki çalışmaları hızlandırmış durumdadır. Önerilen çözümlerden biri, bir radyo frekansı (RF) alıcı-vericisinin aynı bant içerisinde aynı anda işaret alışı verişini yapabildiği Tam Çift Yönlü (TÇY) kablosuz iletişimidir [1], [2]. Bununla birlikte, aynı verici uç birimi üzerindeki alıcı zincirinde yüksek düzeyde bir öz girişim (ÖG) oluştuğundan, karşı uç birimden gelen istenen işareti (İİ) başarıyla alabilmek için önemli miktarda ÖG bastırımı gerekmektedir [1], [3]. Bu amaçla alıcıda farklı aşamalarda ÖG bastırma teknikleri uygulanmakta olup, bunlar, 1) Anten seviyesinde pasif bastırma [4], 2) RF seviyesinde analog giderim [5] ve 3) Temel bant seviyesinde sayısal ÖG giderimi (SÖGG) [4], [6], [7] teknikleridir.

Mevcut kablosuz sistemlerin çoğunda, hava arayüzü Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama (DFBÇ) tekniğine dayanmaktadır [8], [9]. Bu nedenle, TÇY iletişimde kullanılan SÖGG tekniklerinin çoğu yine DFBÇ tabanlı olarak tasarlanmıştır [6], [7], [10], [11]. Bu teknikler öncelikle ÖG kanal kestirimi ve sonrasında ÖG işaretinin yeniden oluşturulması ve nihai olarak yeniden oluşturulan işaretin alınan işareten çıkarılması adımlarını takip etmektedirler.

SÖGG teknikleri incelendiğinde, ÖG gideriminden sonra geriye kalan ÖG işareti üzerinde periyodik dalgalanmalar gözlenmektedir. Dalgalanmalar, döngüsel önek (DÖ) bölgesine karşılık gelen iki DFBÇ sembolü arasındaki geçiş bölgelerinde görülmektedir; bu nedenle bu etki DÖ gürültüsü olarak adlandırılmıştır [12]. Önceki çalışmalarda, iletişim yapan uç birimlerin senkronize olduğu varsayılmıştır. Uç birimlerdeki paketler tam olarak senkronize edilmediğinde veya yayılma gecikmesinden dolayı paketler hizalı olmadığında, kalan ÖG işaretindeki DÖ gürültüsü İİ işaretinin veri kısmını etkilemektedir. Bu nedenle, bir önceki çalışmada [12], TÇY uç birimlerin eşzamansız olarak da çalışmasını sağlamak için DÖ gürültüsünün tüm SÖGG teknikleri üzerinde ortadan kaldırılması amacıyla iki adımdan oluşan DÖ Gürültü Azaltma (DÖGA) çözümü önerilmiş ve IEEE 802.11g standardı baz alınan temel bant sistem modeli üzerinde, sadece 16-QAM modülasyon tipi üzerinde ayrıntılı benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler ile, önerilen DÖGA çözümünün DFBÇ tabanlı TÇY radyolarda



Şekil 1. IEEE 802.11g DFBC sistem modeli temel alınarak oluşturulan TCY alıcı-verici sistem modeli.

kullanılan SÖGG tekniklerinin performansını önemli ölçüde artırmış olduğu, frekans tabanlı SÖGG tekniklerinde 15 dB'ye ve zaman tabanlı SÖGG teknikleri için 4.5 dB'ye kadar kazanç sağlandığı gösterilmiştir. Bu çalışmada da DÖGA performansı IEEE 802.11g hava ara yüzünün farklı -BPSK, QPSK ve 16-QAM- modülasyon tipleri ve farklı (her bir modülasyon tipi için 1/2 ve 3/4) kodlama oranları uygulanarak incelenmiştir.

## II. SİSTEM MODELİ

Bu bölümde, IEEE 802.11g standardı [8] ile tanımlı yarı çift yönlü DFBC sistem modeli üzerinde geliştirilen TCY SÖGG algoritmaları anlatılmıştır. Şekil 1'de DFBC tabanlı TCY alıcı-verici temel bant seviyesi blok diyagramı gösterilmektedir. Bu modelde, alınan  $\vec{y}$  işareti aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\vec{y} = \vec{x} * \vec{h} + \vec{r} + \vec{w}. \quad (1)$$

Burada  $\vec{h}$ , bilinen gönderim işareti  $\vec{x}$ 'e etki eden ÖG kanalının dürtü yanıtını temsil eder.  $\vec{r}$  alınacak olan İİ işaretidir.  $\vec{w}$  ise ilave beyaz Gauss gürültüsüdür (İBGG). Burada \* evrişim operatörüdür.

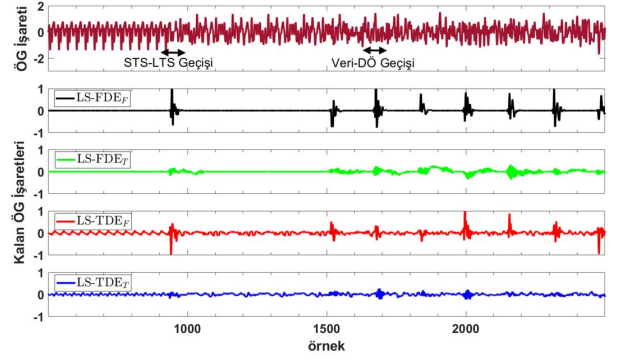
Alınan sinyal aşağı örnekleme ile azaltılır ve  $\vec{y}'$  elde edilir. Daha sonra, Uzun Eğitim Dizisi (Long Training Sequence, LTS) ilişkilendirme işlemi yardımıyla paket başlangıcı tespit edilerek LTS sembolleri paketten alınır ve ortalaması elde edilir. Ortalama LTS sembolü kanal kestiriminde kullanılır. Kanal kestirimi ve gönderilen işaretler kullanılarak yeniden oluşturulan ÖG işareti  $\vec{\lambda}'$ , zaman tabanına ait bir işarettir:

$$\vec{\lambda}' = \text{IFFT}\{\vec{\Lambda}' = \vec{D}' \cdot \vec{H}'\} \quad \text{veya} \quad \vec{\lambda}' = \vec{h}' * \vec{x}'. \quad (2)$$

Denklem (2)'de görüleceği üzere  $\vec{\lambda}'$  işareti zaman tabanlı bilinen gönderim işareti  $\vec{x}'$  ile ÖG kanalı dürtü yanıtı  $\vec{h}'$ 'den evrişim yoluyla elde edilebilir. Aynı zamanda, frekans tabanlı bilinen gönderim işareti  $\vec{D}'$  ile ÖG kanal kestirimi  $\vec{H}'$ 'nin çarpım sonucunun zaman tabanına dönüştürülmesi şeklinde de ifade edilebilir.  $\vec{\lambda}'$  enterpole edilerek  $\vec{\lambda}$  oluşturulur. Ardından  $\vec{\lambda}$  işareti alım işaretinden çıkarılır:

$$\vec{y} - \vec{\lambda} = \vec{r} + \vec{w} + \vec{x}^{res}. \quad (3)$$

Denklem (3)'teki çıkarma işleminden sonra kalan işaret, işlenecek olan İİ işareti  $\vec{r}$ 'den, kalan ÖG işareti  $\vec{x}^{res}$ 'den ve İBGG işareti  $\vec{w}$ 'den oluşmaktadır. İİ'nin işlenmesi mevcut IEEE 802.11g DFBC sisteminde olduğu gibi gerçekleştirilmektedir (Şekil 1) [8]. Ancak, yalnızca SÖGG performansına



Şekil 2. Farklı SÖGG tekniklerinde (LS-FDE<sub>F</sub>, LS-FDE<sub>T</sub>, LS-TDE<sub>F</sub>, LS-TDE<sub>T</sub>) DÖ gürültüsü.

odaklanmak amacıyla simülasyonlarda  $\vec{r}$  işareti sıfır olarak kabul edilmiştir.

Kanal kestiriminde en küçük kareler (least squares, LS) algoritmasının, diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında ([13]) en iyi performansı verdiği ve daha düşük karmaşıklığı sağladığı gösterilmiştir [11]. ÖG kanal kestiriminin ve yeniden oluşturmanın gerçekleştirildiği bölgelerin kombinasyonlarına bağlı olarak ve her birine LS uygulayarak elde edilen LS-FDE<sub>T</sub> (frekans-zaman) [4], LS-TDE<sub>T</sub> (zaman-zaman) [3], [7], LS-FDE<sub>F</sub> (frekans-frekans) [6], [11] ve LS-TDE<sub>F</sub> (zaman-frekans) [6], [11] teknikleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

LS-FDE'de frekans tabanlı ÖG kanal kestirimi  $\vec{H}'_{LS-FDE}$ ,  $\vec{Y}'_{LTS}$  ile bilinen gönderim LTS sembolleri  $\vec{D}'_{LTS}$  işaretlerinin birbirleri ile karşılaştırılması sonucu elde edilir [6].  $\vec{H}'_{LS-FDE}$ 'nin zaman tabanındaki karşılığı  $\vec{h}'_{LS-FDE}$  dürtü yanıtı ile ifade edilir:  $\vec{H}'_{LS-FDE} = \frac{\vec{Y}'_{LTS}}{\vec{D}'_{LTS}} \rightarrow \vec{h}'_{LS-FDE} = \text{IFFT}\{\vec{H}'_{LS-FDE}\}$ . Bu ifadedeki  $\vec{H}'_{LS-FDE}$  veya  $\vec{h}'_{LS-FDE}$ , ÖG işaretinin frekans veya zaman tabanında yeniden oluşturulmasında (2) denkleminde kullanılabilir.

Zaman tabanında ise, alım işareti, (1)'deki gibi evrişim ile temsil edilmiştir. Bu ifade, bir matris çarpım şeklinde de ifade edilebilir. Bu durumda  $\vec{y}'_{LTS}$ , bilinen LTS sembolünün ( $\vec{d}'_{LTS}$ ) döngüsel olarak tekrarlanması ile elde edilen  $\mathbf{X}'_{LTS}$  matrisi ile kanal dürtü yanıtı  $\vec{h}'$ 'nin çarpımı şeklinde gösterilir [11]. Burada,  $\mathbf{X}'_{LTS}$  Toeplitz matrisidir. Zaman tabanlı ÖG kanalı dürtü yanıtı  $\vec{h}'_{LS-TDE}$  ve frekans tabanlı kanal kestirimi  $\vec{H}'_{LS-TDE}$  şu şekilde hesaplanır:  $\vec{h}'_{LS-TDE} = \mathbf{X}'_{LTS} \vec{y}'_{LTS} \rightarrow \vec{H}'_{LS-TDE} = \text{FFT}\{\vec{h}'_{LS-TDE}\}$ . Burada,  $\mathbf{X}'_{LTS}$ ,  $\mathbf{X}'_{LTS}$  matrisinin Moore-Penrose (sözde) tersidir. ÖG işareti yeniden oluşturma tekniğine bağlı olarak,  $\vec{H}'_{LS-TDE}$  veya  $\vec{h}'_{LS-TDE}$ 'den biri (2)'de kullanılmak üzere seçilebilir ve  $\vec{\lambda}'$  oluşturulur.

## III. DÖNGÜSEL ÖNEK GÜRÜLTÜSÜ VE AZALTILMASI

Şekil 2'de SÖGG teknikleri sonucunda (3) ile elde edilen  $\vec{x}^{res}$  kalıntı ÖG işaretleri incelendiğinde, DFBC sembolünün sonundan bir sonraki sembole ait DÖ'ye geçiş yapılan bölgelerde nispeten yüksek seviyelerde periyodik işaretler gözlenir. Geçişin bir sonucu olarak haberleşme kanalındaki koruyucu alt taşıyıcılarında artış oluşmaktadır. Mevcut LTS eğitim sembolü kullanılarak gerçekleştirilen ÖG kanal kestirimi geçiş

bölgelerini yeterince kapsayamadığından, ÖG işareti düzgün bir şekilde yeniden oluşturulamamaktadır ve bu da DÖ gürültüsü olarak adlandırılan dalgalanmalara neden olmaktadır [12]. Denklem (2)'nin son teriminde görüldüğü gibi, bilinen işaret kanal dürtü yanıtı ile evriştirilir. Bu durumda, kanalın yayma etkisi yeniden oluşturma sırasında geçiş bölgelerine rahatlıkla uygulanabilir. Bu nedenle, zaman tabanlı ÖG işareti yeniden oluşturmada, yalnızca gelişmiş kanal kestirimi yeterlidir. Bununla birlikte, (2)'nin ilk teriminde görüldüğü gibi, frekans tabanlı ÖG yeniden oluşturmada, kestirilen ÖG kanal katsayıları bilinen işarete sembol sembol uygulanarak yeniden oluşturma gerçekleşir ve zaman tabanına dönüştürüldükten sonra sembolün son kısmı kopyalanarak DÖ olarak başa eklenir. Bu durum, önceki DFBC sembolünün kanaldan kaynaklanan yayılma etkisini bozmaktadır. Bu nedenle, DÖ gürültüsünü azaltmak için, frekans tabanlı ÖG işareti yeniden oluşturmada, gelişmiş kanal kestiriminin yanı sıra gelişmiş bir yeniden oluşturma tekniği gereklidir.

DÖ gürültü azaltma (DÖGA) çözümü iki adımdan oluşmaktadır [12]. İlk adımda daha etkin bir ÖG kanal kestirimi için LTS sembolünde bant dışı kanallara girişimi önlemek için boş bırakılan koruma alt taşıyıcılarına fazladan eğitim sembolü tonları eklenmektedir. Bununla birlikte, mevcut filtre, geçiş bandındaki koruyucu alt taşıyıcılar için düz değildir. Bu nedenle, yukarı örnekleme ile oluşan işaret yansımaları baskılayan ve eklenen tonlar boyunca düz kalan başka bir keskin enterpolasyon filtresi kullanılmaktadır. Filtre, zaman alanındaki semboller arası girişimi önleyecek yapıdadır ve ideal filtre üzerinde genişlemeyi sağlayan bir bant sınırlama faktörü ( $\beta$ ) ile ayarlanmaktadır. İkinci adımda, frekans tabanlı ÖG işareti yeniden oluşturma işleminde, DÖ sembolü doğrudan yeniden oluşturulmuş OFDM sembolünün kendisinden kopyalanmak yerine, bir önceki DFBC sembolüyle birlikte yeniden oluşturulmaktadır.

#### IV. BAŞARIM ANALİZİ

MATLAB simülasyonlarıyla, ilave beyaz Gauss gürültüsü (İBG) ve çok yollu kanallarda tüm DÖGA'lı ve DÖGA'sız SÖGG teknikleri için farklı modülasyon tipleri ve kodlama oranları uygulanarak elde edilmiş sayısal ÖG giderim performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda, [14]'te sunulan kılavuzlanmış gecikmeli hat (Tapped Delay Line, TDL) kanal modeli kullanılmıştır. TDL modelinde çok yollu kanalın alçak geçiren dürtü yanıtı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$h = \sum_{p=0}^{P_{max}-1} \alpha_p \delta(t - \tau_p) \quad (4)$$

Burada, her birinin zamanla değişmez olduğu varsayımı altında,  $P_{max}$  çok yollu maksimum bileşen sayısına,  $\tau_p$  ise  $p$  yolunun çok yollu gecikmesine karşılık gelmektedir.  $p$ , ayrık yol indeksidir,  $\alpha_p$  hem genlik hem de faz etkilerini içeren alçak geçişli karmaşık kanal katsayısıdır. [15]'te önerilen IEEE 802.11 iç-ortam kanal modeli, TDL modeli ile birleştirilerek  $\alpha_p$  için güç gecikme profilini (Power Delay Profile, PDP) üretmek üzere üstel model olarak kullanılmıştır. Kanalın gücü çok yollu gecikme ile  $A(p) = \frac{1}{\sigma_\tau} \exp^{-pT_s/\sigma_\tau}$ ,  $p = 0, 1, \dots, P_{max} = [10\sigma_\tau/T_s]$  şeklinde katlanarak azalmaktadır. Burada  $\sigma_\tau$  rms gecikme yayılımı ve  $T_s$  örnekleme zamanıdır. Maksimum aşırı gecikme, rms gecikme yayılımının on katıdır [15]. Her bir  $\alpha_p$

katsayısı için  $p^{nci}$  kanal kılavuzlama gücüne ait ortalamasının sıfır ve varyansın  $\sigma_p^2/2$  olduğu varsayılmaktadır.

Simülasyonlar, Şekil 1'de gösterilen IEEE 802.11g standardı ile tanımlı yarı çift yönlü DFBC sistem modeli ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan temel parametrelerin bir listesi Tablo I'de sunulmaktadır. SÖGG performans sonuçları 100 adet simülasyon koşmasının ortalaması alınarak elde edilmiştir.

TABLO I. SİMULASYON PARAMETRELERİ

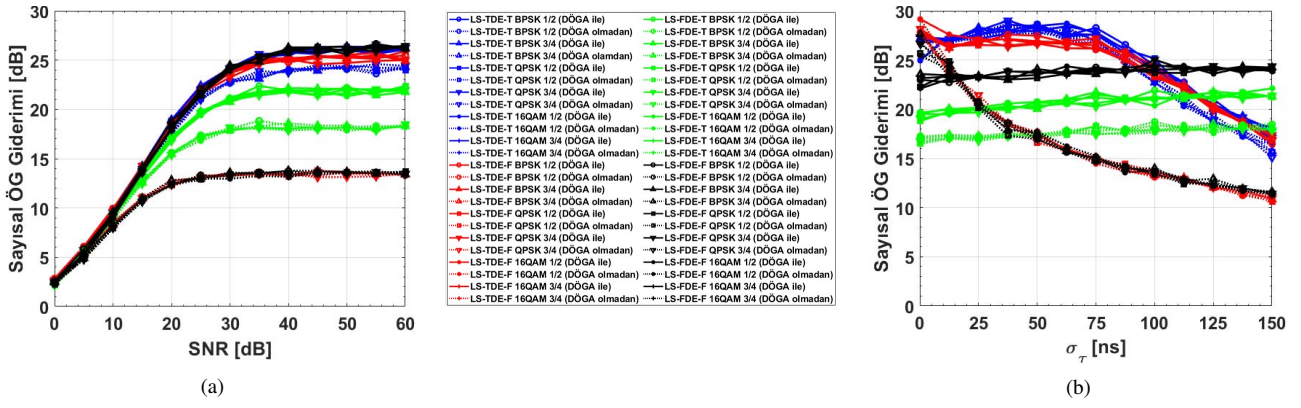
DFBC Sembol Sayısı ( $N$ )	100
LTS Sembol Sayısı ( $N_{LTS}$ )	4
STS Sembol Sayısı ( $N_{STS}$ )	30
Alt Taşıyıcı Sayısı ( $K$ )	64
DÖ Örnek Sayısı ( $K_{CP}$ )	16
DFBC Örnek Sayısı ( $K_{SYM}$ )	80
Örnekleme Zamanı ( $T_s$ )	25 ns
Filtre Yayma Faktörü ( $\beta$ )	0.93
Veri (veya LTS) Alt Taşıyıcı Sayısı	48
Pilot Alt Taşıyıcı Sayısı	4
Koruma Alt Taşıyıcı Sayısı	11
Doğru Akım Alt Taşıyıcı Sayısı	1
Eklenen Eğitim Alt Taşıyıcı Sayısı	8
Modülasyon Tipi	BPSK, QPSK, 16-QAM
Kodlama Oranı	1/2, 3/4

Kanal modelinin gerçekleştirilmesi için, ÖG işaret-gürültü oranı (SNR) değeri, 0-60 dB arasında değiştirilmiştir. Bu nedenle, simülasyonlarda İBG gücü buna göre sağlanmıştır. Temel bant sinyali 20 MHz bant genişliğine sahiptir ve 40 MHz işaret elde etmek için 2 ile örnekleme yapılmaktadır. Bu nedenle, örnekleme periyodu  $T_s$  25 ns'dir. PDP değeri,  $T_s$  ve 0-150 ns arasında değişen rms gecikme yayılımı  $\sigma_\tau$ 'ya bağlı olarak kanal modelindeki gibi hesaplanmaktadır.

IEEE 802.11g standardında, 20 MHz iletişim bandında 64 adet alt taşıyıcı bulunmaktadır ve LTS sembolleri 48 alt taşıyıcıya yerleştirilmiştir. Kanalda, standart DFBC işlemede faz düzeltmesinde kullanılmak üzere 4 adet pilot alt taşıyıcı ayrılmıştır. Kanaldaki koruma alt taşıyıcıları olarak toplam 11 alt taşıyıcı boş tutulmaktadır. Doğru akımdan (DC) kaçınmak için tam olarak kanalın ortasında bulunan 1 alt taşıyıcı da ayrıca boşta bırakılmıştır. İletilen işarete, bir önceki DFBC sembolünden bir sonraki DÖ sembolüne geçişteki etkiyi kestirmek için kanaldaki 8 koruma alt taşıyıcılarına (28, 29, 30, 31, 35, 36, 37 ve 38) eğitim tonları eklenmiştir. Bu şekilde, bitişik kanallara girişimin de engellenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, daha keskin bir filtre yanıtı elde etmek için enterpolatör filtresinin bant sınırlı faktörü  $\beta = 0.93$  olarak değiştirilmiştir.

Şekil 3'te, sayısal giderim miktarı, alınan ÖG işaret gücünün, giderimden sonra kalan ÖG işaret gücüne oranı olarak doğrusal ölçekte hesaplanmıştır ve grafiklerde dB ölçeğinde sunulmuştur.

Şekil 3 (a)'daki sonuçlar  $\sigma_\tau = 100$  ns sabit tutularak elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında, önerilen DÖGA çözümünün SÖGG tekniklerine dahil edilmesinin özellikle frekans tabanlı işlemler için etkili olduğu sonucuna varılabilir. Özellikle LS-FDE<sub>F</sub> için, DÖGA'lı SÖGG'nin DÖGA'sız SÖGG üzerindeki kazancı 13 dB civarında görülmektedir. Bununla birlikte, LS-TDE<sub>F</sub> için DÖGA'lı SÖGG eğrisi için kazanç 12



Şekil 3. Farklı SÖGG teknikleri için DÖGA ile ve DÖGA olmadan elde edilen sayısal ÖG giderimi (a) SNR'a göre,  $\sigma_\tau = 100$  ns (b)  $\sigma_\tau$ 'ya göre, SNR = 30 dB.

dB olmaktadır. Zaman tabanlı ÖG yeniden oluşturma işleminde, örneğin LS-FDE<sub>T</sub> ve LS-TDE<sub>T</sub> tekniklerinde yalnızca ton ekleme adımı uygulanır. LS-FDE<sub>T</sub> tekniği için DÖGA'lı giderim kazancı yaklaşık 4 dB'dir. LS-TDE<sub>T</sub> için kazanç yaklaşık 2.5 dB'dir. Şekil 3 (b)'de, *rms* gecikme yayılım değeri  $\sigma_\tau$ 'nın 0 ile 150 ns değerleri için elde edilen DÖGA'lı ve DÖGA'sız sayısal giderim performansını gözlemlenmektedir. Bu simülasyonda SNR = 30 dB olarak sabit tutulmuştur. Şekil 3 (b)'de görüldüğü gibi,  $\sigma_\tau$  artırdıkça, LS-FDE<sub>F</sub> ve LS-TDE<sub>F</sub> için 15 dB'ye yaklaşan bir iyileştirme elde edilmiştir. Bununla birlikte,  $\sigma_\tau$  arttıkça, LS-FDE<sub>F</sub> tekniğinde kazancın arttığı, LS-TDE<sub>F</sub> tekniğinde ise kazancın azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, LS-FDE<sub>F</sub>'nin LS-TDE<sub>F</sub>'e nazaran çok yollu gecikmelere karşı daha dayanıklı olmasıdır [6]. Bunun yanında, LS-FDE<sub>T</sub> ve LS-TDE<sub>T</sub> için sırasıyla 4.5 dB ve 2.8 dB iyileşme gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, DÖ gürültüsünün zaman tabanlı yeniden oluşturma tekniklerinde önemli bir problem teşkil etmemesidir (Şekil 2). Her iki grafikte de, kullanılan modülasyon tiplerinin ve kodlama oranlarının sayısal ÖG giderim performansını etkilemediği görülmektedir.

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, TÇY radyolarda SÖGG tekniklerini iyileştirmek için DÖ gürültüsünü ortadan kaldıran bir çözüm üzerinde IEEE 802.11g standardına uygun temel bant model kullanılarak BPSK, QPSK ve 16-QAM modülasyon tipleri ve 1/2 ve 3/4 kodlama oranları için performans testleri değerlendirilmiştir. MATLAB simülasyonları, DÖGA kullanımının SÖGG performansını, frekans tabanlı teknikler için 15 dB'ye kadar, zaman tabanlı teknikler için 4.5 dB'ye kadar iyileştirdiğini göstermiştir. Böylece, daha yüksek çok yollu kanallarda, frekans tabanlı SÖGG teknikleri performansındaki belirgin iyileşme yardımıyla zaman tabanlı SÖGG tekniklerinin önüne geçilmiştir. Bununla birlikte, uygulanan farklı modülasyon tipleri ve kodlama oranları sayısal ÖG giderim performansını değiştirmemektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Sabharwal, A., Schniter, P., Guo, D., Bliss, D. W., Rangarajan, S., and Wichman, R., "In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 9, pp. 1637–1652, 2014.
- [2] Zhang, Z., Long, K., Vasilakos, A. V., and Hanzo, L., "Full-Duplex Wireless Communications: Challenges, Solutions, and Future Research Directions," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 7, pp. 1369–1409, 2016.
- [3] Bharadia, D., McMillin, E., and Katti, S., "Full duplex radios," *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM - SIGCOMM '13*, vol. 43, no. 4, p. 375, 2013.
- [4] Duarte, M., Dick, C., and Sabharwal, A., "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, 2012.
- [5] Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P., and Katti, S., "Achieving single channel, full duplex wireless communication," *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '10*, p. 1, 2010.
- [6] Amjad, M. S. and Gurbuz, O., "Linear digital cancellation with reduced computational complexity for full-duplex radios," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, no. 215, 2017.
- [7] Ahmed, E., Eltawil, A. M., and Sabharwal, A., "Self-interference cancellation with nonlinear distortion suppression for full-duplex systems," *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 1199–1203, 2013.
- [8] IEEE, "802.11g - IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks- Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz," tech. rep., 2003.
- [9] Fazel, K. and Kaiser, S., *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, Ltd, second ed., oct 2008.
- [10] Jain, M., Choi, J. I., Kim, T., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S., and Sinha, P., "Practical, real-time, full duplex wireless," *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '11*, p. 301, 2011.
- [11] Amjad, M. S., Nawaz, H., Ozsoy, K., Gurbuz, O., and Tekin, I., "A Low-Complexity Full-Duplex Radio Implementation with a Single Antenna," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 3, pp. 2206–2218, 2018.
- [12] Ayar, H. and Gurbuz, O., "Reducing Cyclic Prefix Noise in OFDM Based Full-Duplex Systems," *Third International Balkan Conference on Communications and Networking Skopje, North Macedonia*, p. 6, June 10-12, 2019.
- [13] Edfors, O., Sandell, M., van de Beek, J. J., Wilson, S. K., and Borjesson, P. O., "OFDM Channel Estimation by Singular Value Decomposition," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 7, pp. 931–939, 1998.
- [14] Turin, G., Clapp, F., Johnston, T., Fine, S., and Lavry, D., "A statistical model of urban multipath propagation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 21, pp. 1–9, feb 1972.
- [15] Chayat, N., "Tentative criteria for comparison of modulation methods," *Doc. IEEE 802.11-97/96*, 1997.