

5G Fiziksel Yukarı Yönlü Kontrol Kanalları için Kanal Kestirim Yöntemleri Channel Estimation Methods for 5G Physical Uplink Control Channels

Doğa Gürgünoğlu^{1,2}, Sinan Gezici²

¹ASELSAN Inc. Communications and Information Technologies Group, Ankara, Turkey

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey

Email: gurgunoglu@ee.bilkent.edu.tr, gezici@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe —Beşinci nesil mobil ve telsiz haberleşme ile birlikte fiziksel kanallar alt taşıyıcı aralığından kaynak atama yapılarına kadar esneklik kazanmıştır. Bu değişimden etkilenen kanal yapılarından biri fiziksel yukarı yönlü kontrol kanalıdır (PUCCH'dir). PUCCH üzerinde fiziksel katman haberleşme prosedürlerinin işleyişi için kritik olan HARQ onayları, çizelgeleme talepleri (SR) ve kanal durum bilgisi (CSI) raporları taşınır. Bu bildiriye 5G'nin getirdiği esneklikten faydalanılarak farklı PUCCH formatları üzerinde bulunan demodülasyon referans sinyalleri kullanılarak yapılan kanal kestirimlerinin kanal parametreleri ile olan ilişkisi incelenmektedir. Kontrol kanallarının yüksek güvenilirlik gereksinimlerinden ötürü PUCCH'de taşınan bilginin doğru çözümü için kanal kestiriminin iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bildiriye farklı koşullarda en güvenilir kanal kestirimleri en küçük kareler kestirimi ve bir boyutlu ile iki boyutlu Wiener filtreleri yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmekte ve performans sonuçları sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler—Fiziksel Yukarı Yönlü Kontrol Kanalı (PUCCH), En Küçük Kareler Kestirimi, Wiener Filtresi, Demodülasyon Referans Sinyali (DMRS)

Abstract—In the fifth generation of wireless mobile communications, physical channel structures have gained significant flexibility, ranging from subcarrier spacing to resource allocation structures for data and reference signals. One particular group of channels affected from this change is the physical uplink control channel (PUCCH), carrying various critical control information such as HARQ acknowledgements, scheduling requests (SR) and channel state information (CSI) reports. In this paper we use the flexibility coming from the 5G standards to investigate the relationship between channel parameters and the reliability of channel estimates in different PUCCH formats using demodulation reference signals. Due to the high reliability requirements of control channels, improvement of channel estimation is crucial. In this paper, least squares estimation and Wiener filtering methods are utilized for channel estimation and the performance evaluation results are presented.

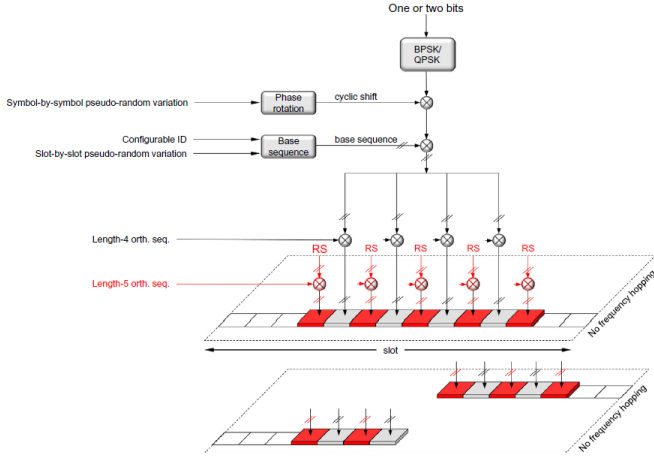
Keywords—Physical Uplink Control Channel (PUCCH), Least Squares Estimation, Wiener Filter, Demodulation Reference Signal (DMRS)

I. GİRİŞ

Kontrol kanallarında taşınan bilgilerin güvenilir olması, haberleşme sistemlerinin doğru çalışması için büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden kontrol bilgisi düşük kodlama oranları kullanılarak iletilmelidir. 5G haberleşme standartlarında yukarı yönlü kontrol bilgisi (UCI) taşıyan fiziksel kanala, fiziksel yukarı yönlü kontrol kanalı (PUCCH) adı verilmiştir. PUCCH'yi bir kanal ailesi olarak adlandırmak daha doğru olur. Çünkü 5G standartlarında beş farklı PUCCH formatı bulunmaktadır ve hepsinin kendine özgü özellikleri mevcuttur. Bu formatlar PUCCH Format 0, PUCCH Format 1, PUCCH Format 2, PUCCH Format 3 ve PUCCH Format 4 olarak belirtilmiştir. Bunlardan PUCCH Format 0'da demodülasyon referans sinyali (DMRS) yerleşimi bulunmamaktadır ve bu nedenle kanal kestirimi de yapılmamaktadır. Bu formatta taşınan kontrol bilgisi evre uyumsuz olarak çözümlenir. Diğer kanal türlerinin tamamında ise kontrol bilgisi evre uyumlu olarak çözümlenmektedir [1], [2]. Bu bildiriye ilk olarak farklı PUCCH yapılarının kullanım amaçları ve kaynak yerleşimleri anlatılmaktadır. Daha sonra kullanılan kanal kestirim yöntemleri açıklanmaktadır. Sonraki bölümde ise farklı PUCCH yapılarında gerçekleştirilen kanal kestirimlerinin başarımı, ortalama karesel hata (MSE) ölçütüne göre değerlendirilmekte ve sonuçlar sunulmaktadır.

II. PUCCH YAPILARI

- **PUCCH Format 0:** Bu kanal formatında 1 veya 2 bitlik HARQ onayları veya çizelgeleme talebi gönderilir. Aynı sembol için tek bir kaynak bloğu kullanılır ve bir ya da iki sembolde gönderilir. Herhangi bir DMRS yerleşimi olmadığı için taşınan bilgi, evre uyumsuz çözümleme yöntemleri ile çözümlenir [2].
- **PUCCH Format 1:** Bu kanal formatı, PUCCH Format 0'ın zaman düzleminde uzatılmış halidir (Şekil 1). 1 veya 2 bitlik HARQ onayları veya çizelgeleme talebi göndermek için kullanılır. Aynı sembolde tek kaynak bloğu olmak üzere 4 ila 14 arası sembol kullanılır. Ardışık iki sembolden birinde kontrol bilgisi diğerinde DMRS mevcuttur [3].
- **PUCCH Format 2:** Bu kanal formatı 1 veya 2 bitlik HARQ onayları, çizelgeleme ve kanal durum bilgisi raporları göndermek için kullanılır. Bir ya da iki



Şekil 1: PUCCH Format 1 kaynak yerleşimi [1]. Kırmızı ile işaretli sembollere DMRS'ler, gri ile işaretli sembollere kontrol bilgisi yerleşmektedir.

sembol kullanılır ve 1 ile 16 arasında kaynak bloğu üzerinden gönderilir. Her 3 alt taşıyıcıdan ikisinde kontrol bilgisi, birinde ise DMRS mevcuttur [3].

- **PUCCH Format 3:** Bu kanal formatı 1 veya 2 bitlik HARQ onayları, çizelgeleme ve kanal durum bilgisi raporları göndermek için kullanılır. En fazla veri taşıma kapasitesine sahip PUCCH formatıdır. 4 ile 14 arası sembol kullanılır ve her sembol 1 ile 16 arası kaynak bloğuna yayılmaktadır. Bir slotta ek DMRS olmadan en fazla 2 DMRS, ek DMRS ile birlikte en fazla 4 DMRS kullanılabilir. DMRS kullanılan sembollerde bütün kaynak blokları DMRS ile doludur [3].
- **PUCCH Format 4:** Bu kanal formatı 1 veya 2 bitlik HARQ onayları, çizelgeleme ve kanal durum bilgisi raporları göndermek için kullanılır [4]. PUCCH Format 3 ile neredeyse aynı kaynak yerleşimine sahiptir. Frekans düzleminde her sembol tek bir kaynak bloğu kullanır [1].

III. KANAL KESTİRİM YÖNTEMLERİ

OFDM sembol ve alt taşıyıcı koordinat sistemi üzerinde kanal kestirilirken, öncelikle pilot konumlarında en küçük kareler (LS) yöntemi ile kanal ön kestirimi yapılır. Ancak DMRS'nin 5G'deki amacından ötürü kanalda iletilen verinin yerleştiği konumlarda da kanal bilgisi gerekmektedir. Bu yüzden interpolasyon yöntemlerinin kullanımına ihtiyaç vardır. Wiener filtresi bir boyutta (yalnızca frekans) gürültü standart sapması bilgisi, iki boyutta ise (frekans ve zaman) bu bilgiye ek olarak kanalın en yüksek Doppler saçılımı bilgisini kullanarak optimal interpolasyon gerçekleştirir. LS ve Wiener filtresi yöntemleri bu bölümde açıklanmaktadır.

A. En Küçük Kareler (LS) Kanal Kestirimi

PUCCH, tek katmanlı bir yapıya sahip olduğu için bir sembolün bir alt taşıyıcısının gördüğü kanal tepkisi skaler

ve karmaşık bir değer almaktadır. Kullanılan sinyal modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{n} \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{M-1}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{M-1}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = [n_0, n_1, \dots, n_{M-1}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = \text{diag}(\mathbf{x}) \quad (6)$$

Bu denklemlerde \mathbf{y} alınan sembolü, \mathbf{h} kanal frekans tepkisini, \mathbf{x} gönderilen sinyali, $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_n^2 \mathbf{I})$ ise karmaşık beyaz Gauss gürültüsünü ifade etmektedir. Ayrıca x_i , i numaralı alt taşıyıcıdaki referans sinyalini, h_i , x_i sinyalinin gördüğü kanal tepkisini; n_i , i numaralı alt taşıyıcıya eklenen gürültüyü ve y_i alınan sinyalin i numaralı alt taşıyıcıdaki değerini ifade etmektedir. \mathbf{X} matrisi ise \mathbf{x} vektörünün oluşturduğu köşegen matrisi ifade etmektedir. Bu kanal modelinde her bir alt taşıyıcıdaki işaret için sinyal modeli aşağıdaki gibidir:

$$y_i = x_i h_i + n_i \quad (7)$$

Bu model için skaler LS kanal kestirimi şu şekildedir:

$$\hat{h}_{LS,i} = \frac{y_i}{x_i} \quad (8)$$

Kanal kestiriminde kullanılan DMRS'lerin normu bir olduğu için bu kestirim aynı zamanda aşağıdaki gibi de ifade edilebilir:

$$\hat{h}_{LS,i} = y_i x_i^* \quad (9)$$

Burada x_i^* , x_i işaretinin karmaşık eşleniğini ifade etmektedir. Bu işlem bir slottaki bütün pilot konumlarında yapıldığında kanalın bu konumlardaki tepkisi kestirilmiş olur. Ancak hem bu konumlardaki kestirimin iyileştirilmesi hem de verinin yerleştiği konumlardaki kanal kestiriminin elde edilmesi için Wiener filtresi uygulanmalıdır.

B. Wiener Filtresi

Bir boyutlu Wiener filtresi her bir semboldeki kanal kestirimini frekans üzerinde gürültü varyans bilgisi kullanarak düzeltirken, iki boyutlu Wiener filtresi kanalı hem alt taşıyıcılar üzerinde hem de semboller üzerinde düzeltir. Tek boyutlu Wiener filtresi kanalın frekans seçiciliğinin daha iyi kestirilmesini sağlarken, iki boyutlu Wiener filtresi ise kanalın zamandaki değişiminin daha iyi kestirilmesini sağlar.

1) **Bir Boyutlu Wiener Filtresi:** Bir boyutlu Wiener filtresi tek bir OFDM sembolü üzerinde frekans düzlemindeki kanal kestirimini iyileştirmektedir. [5] numaralı çalışmada OFDM demodülasyonundan geçmiş olan sinyalden minimum MSE'yi (MMSE'yi) veren kestiricinin çıkarımı matris çarpımlarıyla yapılmıştır. Bu matris, alınan sinyalden MMSE kanal kestirimini çıkarmaktadır. Bu çalışmada ise MMSE kestirimi, LS kestiriminden üretilmektedir. Bunun için gelen pilot sembollerinin frekans düzlemindeki indisleri, gürültü varyansı ve kanaldaki baskın gecikme noktası sayısı gerekmektedir. Zayıf gecikme noktalarının katsayıları sıfır olarak kabul edilmiştir [5]. [6]'da ise MMSE matrisi, LS kestiriminden MMSE kestirimi elde edilecek şekilde düzenlenmiştir. Bu yöntemde bir OFDM sembolünün yerleştirildiği tüm alt taşıyıcılardaki sinyallerin bilgisi

kullanılır. Bu yüzden vektörel bir kanal kestirimi gerekmektedir. M alt taşıyıcının kullanıldığı bir OFDM sembolü için kanalın LS kestirimi $\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}}$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}} = \mathbf{X}^H \mathbf{y} \quad (10)$$

Gönderilen sinyal dizisinin elemanları bir köşegen matris üzerine dizildiğinde \mathbf{X} matrisi elde edilmektedir ve MMSE matrisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_{\text{hh}}[\sigma_n^2(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1} + \mathbf{R}_{\text{hh}}]^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{MMSE}} = \mathbf{W}\hat{\mathbf{h}}_{\text{LS}} \quad (12)$$

Burada $\mathbf{R}_{\text{hh}} = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H]$ kanal otokovaryansını temsil etmektedir. Demodülasyon referans sinyalleri birim normlu sinyaller olduğu için ve \mathbf{X} matrisi bir köşegen matrisi olduğu için $\mathbf{X}\mathbf{X}^H = \mathbf{I}$ eşitliği geçerlidir. Burada \mathbf{I} matrisi birim matristir. Bu yüzden \mathbf{W} matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_{\text{hh}}[\sigma_n^2\mathbf{I} + \mathbf{R}_{\text{hh}}]^{-1} \quad (13)$$

2) *İki Boyutlu Wiener Filtresi*: Bir boyutlu Wiener filtresi tek bir OFDM sembolü üzerindeki kanal kestiriminden birden çok alt taşıyıcı üzerindeki düzeltimini gerçekleştirmektedir. İki boyutlu Wiener filtresi ise bu düzeltimi zaman düzleminde de gerçekleştirmektedir ve bu yüzden birden çok OFDM sembolü üzerinde ve birden çok alt taşıyıcıda çalışmaktadır.

$$\mathbf{R}_{\text{hh}}^f = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H]$$

$$\mathbf{R}_{\text{hh}}^t = E[\tilde{\mathbf{h}}\tilde{\mathbf{h}}^H]$$

Burada $\tilde{\mathbf{h}}$, tek bir alt taşıyıcı ve birden çok semboldeki kanal tepkisini temsil etmektedir. Jakes modeline göre zaman düzlemindeki korelasyon değerleri aşağıdaki gibidir [7]:

$$C(k, l) = J_0(2\pi f_d T(k - l)) \quad (14)$$

Burada f_d Hz cinsinden maksimum Doppler kaymasını, $J_0(\cdot)$ ise sıfıncı dereceden Bessel fonksiyonunu ifade etmektedir. T ise saniye cinsinden sembol süresini ifade etmektedir. \mathbf{R}_{hh}^t matrisi $K \times L$ boyutundadır ve K bir slottaki toplam sembol sayısını ifade ederken L , bir slotta DMRS yerleşimi olan pilot sayısını ifade eder. 5G'de normal bir CP uzunluğunda bir slotta 14 sembol bulunur ve bu durumda \mathbf{R}_{hh}^t matrisinde 14 satır oluşur [3]. $l_p, p \in \{1, \dots, L\}$ ise DMRS yerleşimi olan sembol konumlarını ifade eder. Örneğin 14 sembolü bir PUCCH format 1 kanalında bu indisler $\{l_p\}_{p=1}^L = \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13\}$ şeklindedir. Zaman düzlemindeki korelasyon matrisine denklem (14)'teki ifade aşağıdaki gibi yerleşir:

$$\mathbf{R}_{\text{hh}}^t = \begin{bmatrix} J_0(2\pi f_d T(1 - l_1)) & \dots & J_0(2\pi f_d T(1 - l_L)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_0(2\pi f_d T(14 - l_1)) & \dots & J_0(2\pi f_d T(14 - l_L)) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Maksimum frekans kayması kullanıcı ekipmanının baz istasyonuna göre bağlı hareketinin radyal olduğu durumda gerçekleşir. Bu durumda ise Doppler kayması şu şekilde ifade edilebilir:

$$f_d = f_c \frac{v}{c} \quad (16)$$

Burada f_c Hz cinsinden taşıyıcı frekansını, c m/s cinsinden ışık hızını, v ise m/s cinsinden kullanıcı ekipmanı hızını ifade etmektedir. İki boyuttaki korelasyon matrisini elde etmek için

zaman ve frekans korelasyon matrislerinin Kronecker çarpımı aşağıdaki gibi alınır:

$$\mathbf{R}_{\text{hh}} = \mathbf{R}_{\text{hh}}^t \otimes \mathbf{R}_{\text{hh}}^f \quad (17)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_{\text{hh}}[\sigma_n^2\mathbf{I} + \mathbf{R}_{\text{hh}}]^{-1} \quad (18)$$

Elde edilen \mathbf{W} matrisi, denklem (12)'deki gibi LS kestirimi ile çarpıldığında MMSE kestirimini vermektedir. $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ matrisinin boyutları, bir slotta DMRS'lere ayrılan kaynak elemanı sayısı L' 'ye ve bir slotta DMRS'lere ve kontrol verisine ayrılan kaynak elemanı sayısı K' 'ye bağlıdır.

IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu kısımda 3GPP'nin teknik raporlarında [8], [9] öngörülen senaryolardan yüksek hızlı tren ve kentsel makro hücre senaryolarında kanal kestirim başarımı test edilmiştir.

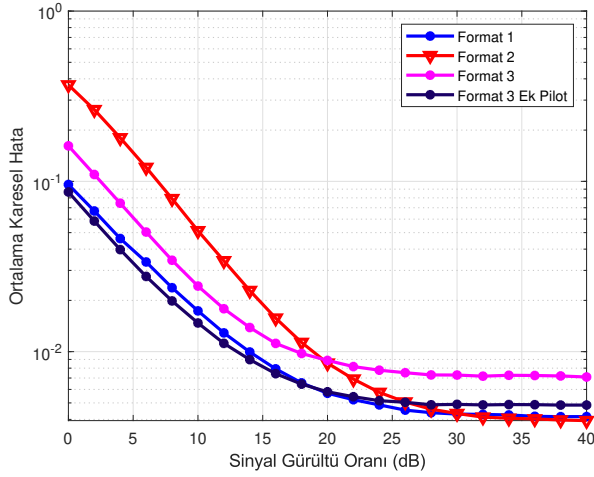
A. Yüksek Hızlı Tren Senaryosu

Bu senaryoda ön plana çıkan özellik, kullanıcı ekipmanının baz istasyonuna göre olan bağlı hızının yüksek olmasıdır. Yüksek hızlı trenlerde çok sayıda kullanıcının büyük bir hızla yolculuk boyunca hücreler arası geçiş yapması sebebiyle ağda oluşabilecek aksaklıkların önlenmesi amacıyla trenlere kullanıcı ekipmanı ile baz istasyonları arasında arayüz oluşturması için röleler kullanılması planlanmaktadır [9]. Tren rölesi ile baz istasyonları arası görülebilecek en yüksek bağlı hız, ilgili senaryoda 500 km/h (138.9 m/s) olarak tanımlanırken bu senaryoda kullanılan etkin gecikme yayılımı 93 ns'dir. Bu koşullar altında açık görüş hattı varsayılarak TDL-E gecikme profili kullanılmıştır [8]. Bu senaryoda ana taşıyıcı frekans olarak 4 GHz ve bant genişliği olarak 200 MHz kullanılmıştır. Alt taşıyıcı aralığı 60 kHz olarak seçilmiştir. Bu senaryo için farklı PUCCH formatlarının kanal kestirim başarımı test edilmiştir. Şekil 2'de test sonuçları gösterilmiştir.

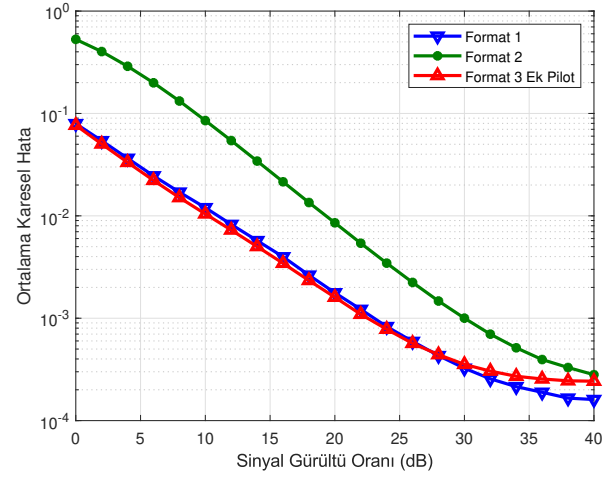
Düşük sinyal gürültü oranında temel bozucu etken gürültü olduğu için tek boyutlu Wiener filtresi kullanılan Format 2'nin başarımı diğer formatlara göre daha düşüktür ve Format 1, ek DMRS kullanılan Format 3 ile çok yakın performansa sahiptir. Yüksek sinyal gürültü oranlarında ise bütün senaryoların performansı Doppler etkisi sebebiyle kısıtlanmıştır, en iyi performansı zaman düzleminde kısa olan Format 2 ve zaman düzleminde sık pilotlara sahip olan Format 1 göstermiştir. En kötü performansı ise ek DMRS kullanılmayan Format 3 göstermiştir.

B. Kentsel Makro Hücre Senaryosu

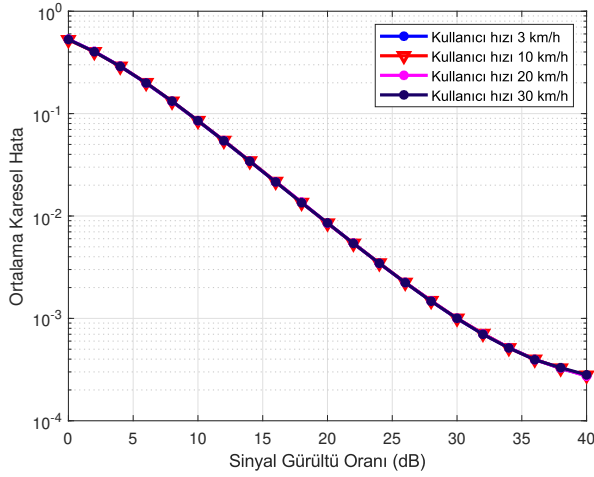
Bu senaryoda ise kullanıcılar bina içinde veya bina dışında olabilmektedir. Taşıyıcı frekans olarak 4 GHz, maksimum bant genişliği olarak 200 MHz kullanılırken, alt taşıyıcı aralığı 30 kHz'de tutulmuştur. Baskın etken gecikme profili uzunlukları iken kullanıcı hızları 3 ila 30 km/h arasında değişim göstermektedir. Kentsel makro hücre senaryosunda kullanıcı hızları fazla değişiklik göstermediği için sistem performansının kullanıcı hızı ile ilişkisi gözlenmemektedir. Bu yüzden farklı PUCCH formatlarının başarımlarını kıyaslamak daha anlamlı olmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi Format 2, diğer iki formata göre daha düşük bir performans sergilemektedir. Diğer iki formatta iki boyutlu Wiener filtresi kullanılırken Format 2'de bir boyutlu Wiener filtresi kullanılmıştır. Bu da zaman düzleminde kaplanan dar alana rağmen PUCCH Format



Şekil 2: Yüksek hızlı tren senaryosunda farklı PUCCH formatlarının kanal kestirim başarımları.



Şekil 4: Kentsel makro hücre senaryosunda 30 km/h kullanıcı hızında üç farklı kontrol kanalı formatının kestirim başarımları.



Şekil 3: Kentsel Makro Hücre senaryosunda farklı kullanıcı hızları için Format 2 performans karşılaştırması.

2'de de iki boyutlu Wiener filtresinin kullanımının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Düşük sinyal gürültü oranlarında Format 2 ve diğer formatlar arası başarımların farkı fazlayken, yüksek sinyal gürültü oranlarında kestirim başarımlarındaki ana etken gürültü yerine kanal parametreleri olduğu için aradaki başarımların farkı kapanmıştır. Format 1 ve Format 3 düşük sinyal gürültü oranlarında birbirine çok yakın başarımlar sergilerken, yüksek sinyal gürültü oranlarında Format 1 daha yüksek bir performans sergilemektedir. Bunun sebebi ise Format 1'in ek pilotlu Format 3'e göre daha sık bir DMRS yapısı barındırmasıdır.

V. SONUÇ

Bu çalışmada 5G'de kullanılması öngörülen ve yukarı yönlü kontrol bilgisini taşıyacak olan PUCCH'ler üzerinde DMRS'ler kullanılarak kanal kestirimi yapılmıştır. Öncelikle farklı PUCCH formatları ve formatların hangi amaçlar için kullanılmasının öngörüldüğü anlatılmıştır. PUCCH Format 0 ve Format 1'de yalnızca HARQ onaylar ve çizelgelendirme

talepleri gönderilirken format 2, 3 ve 4'te ise bu temel işlemlere ek olarak kanal durum bilgisi raporlanabilmektedir. Farklı PUCCH yapılarında DMRS yerleşimleri de farklı olduğu için bu formatların çeşitli koşullarda gösterdikleri kanal kestirim başarımları da değişmektedir. Bu bildiride çeşitli PUCCH formatlarının kanal kestirim başarımları 3GPP tarafından öngörülen [8], [9] senaryolarda test edilmiştir. DMRS kullanılan PUCCH formatlarında alıcı tarafında telsiz kanal tarafından bozulmaya uğramış sinyallerin başarılı bir şekilde denkleştirilip çözülmesini, kanal kestirim başarımlarını doğrudan etkilemektedir. Belirtilen formatların doğru kanal koşullarında kullanımı ise kanal kestirim başarımlarını etkilemektedir. Bu da PUCCH kaynaklarının aşağı yönlü kanaldan alınan kanal ön bilgisi kullanılarak yönetilmesini gerekli kılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press, 2018.
- [2] C. Johnson, *5G New Radio in Bullets*, 07 2019.
- [3] 3GPP, "NR; Physical channels and modulation," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.211, 09 2019, version 15.7.0.
- [4] —, "NR; Physical layer procedures for control," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.213, 06 2018, version 15.2.0.
- [5] J. J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson, and P. O. Borjesson, "On channel estimation in OFDM systems," in *IEEE 45th Vehicular Technology Conference. Countdown to the Wireless Twenty-First Century*, vol. 2, July 1995, pp. 815–819 vol.2.
- [6] O. Edfors, M. Sandell, J. J. van de Beek, S. K. Wilson, and P. O. Borjesson, "OFDM channel estimation by singular value decomposition," in *Proceedings of Vehicular Technology Conference - VTC*, vol. 2, April 1996, pp. 923–927 vol.2.
- [7] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 1994.
- [8] 3GPP, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.901, 10 2019, version 16.0.0.
- [9] —, "Study on scenarios and requirements for next generation access technologies," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.913, 07 2018, version 15.0.0.