

Milimetre Dalga Hibrit Çok-Kullanıcı MIMO Sistemlerde Ergodik Kapasite Analizi

Mehmet Hökelek, Tuğçe Özhan, Asuman Savaşçıhabeş
Nuh Naci Yazgan Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kayseri

hokelekmehmet@gmail.com, tugcem_254@hotmail.com, ahabes@nny.edu.tr,

Özet: Kablosuz haberleşme sistemlerinde, 60 GHz bandındaki milimetre dalga iletişimi, yüksek yol kaybına karşı koymak için ışın oluşturma kazançları elde etmede hem gönderme hem de alma terminallerinde büyük anten dizileri gerektirir. Tamamen dijital teknikler, bu tür frekanslardaki donanım kısıtlamaları nedeniyle büyük anten dizileri ile mümkün değildir, ancak tamamen analog çözümler ciddi performans sınırlamalarına maruz kalmaktadır. Hibrit analog / dijital ışın oluşturma (beamforming), özellikle çok kullanıcı bir senaryoya genişletildiğinde umut verici bir çözümdür. Bu çalışmada çok kullanıcı kanalda hibrit dijital ön kodlama için Kalman tabanlı bir modelleme ile spektral verimlilik analizi yapılmıştır. Hibrit ön kodlama ile, 5-dallı kanalda, alıcıda farklı detektör yapılarına karşı önerilen yaklaşımın spektral verimlilik açısından 7bps/Hz ergodik kapasite artışı sağladığı görülmektedir.

Abstract: In wireless communication systems, millimeter wave communication in the 60 GHz band requires large antenna arrays at both transmit and receive terminals to achieve beam forming gains to counter high path loss. All-digital techniques are not possible with large antenna arrays due to hardware constraints on such frequencies, but all-analog solutions are subject to severe performance limitations. Hybrid analog / digital beamforming is a promising solution, especially when extended to a multiuser scenario. In this study, spectral efficiency analysis with Kalman based modeling was performed for hybrid digital precoding in multi-user channel. With hybrid precoding, it is seen that the proposed approach against different detector structures in the receiver in the 5-branched channel provides a 7bps / Hz ergodic capacity increase in terms of spectral efficiency.

1. Giriş

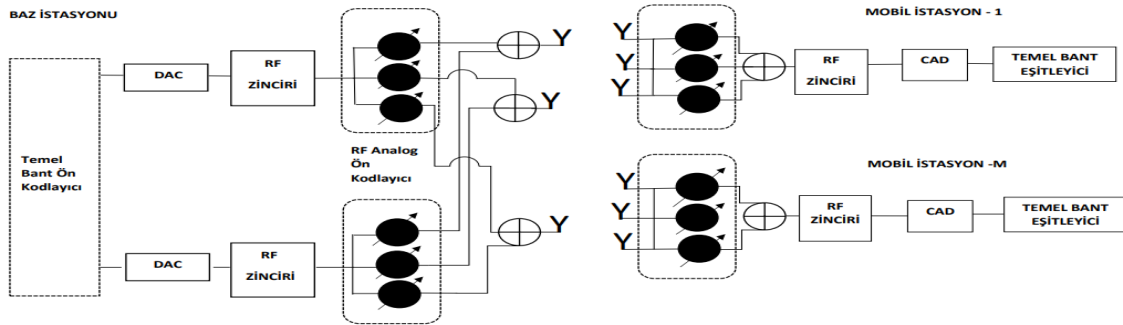
Milimetre dalga iletişimi, 5G sistemlerinde 6 GHz alt bandındaki sınırlı kullanılabilir spektrum nedeniyle, geleneksel hücreli ve WiFi tabanlı çözümlere alternatif olarak, ağ yoğunluğunun ve veri merkezleri ve mobil cihazlarla ilişkili yeni uygulamaların sürekli artan veri taleplerini karşılamak için geliştirilmiştir[1-2]. Literatürde lisanslı spektrumun kullanılması gibi yenilikçi çözümler önerilmiş olsa da, bu tür yaklaşımlar hala sık sık kesintiye maruz kalmaktadır ve TV bantları gibi lisanslı bantlarda bulunan kanal bant genişliği ile sınırlıdır. Bu bantlarda çalışan IEEE 802.11 standardı gibi mevcut standartlar, kısa mesafeli iletişim için 2 GHz genişliğinde kanallara izin verir [3]. Milimetre dalga bantlarını karakterize eden yüksek yol kaybı nedeniyle, hem baz istasyonunda (BS) hem de mobil istasyonlarda (MS) büyük anten dizilerini kullanan, yüksek kaliteli ve uzun mesafeli iletişim bantlarına olanak tanıyarak sinyal gücünü arttıran yönlü ışın oluşturma tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır[4]. Yüksek çalışma frekansı, tasarım açısından büyük çoklu anten mimarilerini de desteklerken, her antenin boyutunu küçültür ve birçoğunun küçük bir alanda toplanmasını sağlar. Işın oluşturma (beamforming) işlevleri için büyük anten dizilerinden donanım desteği hâlihazırda mevcut olsa da, yüksek çalışma frekansı, beklenen örnekleme oranları ve kanal bant genişlikleri tamamen geleneksel dijital ışın oluşturma çözümlerinin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, analog ışın oluşturma teknikleri, antenlerin sinyal fazlarını analog faz kaydırıcılar aracılığıyla koordine eden milimetre dalga sistemlerinde olası bir alternatif olarak geliştirilmiştir[5]. Hibrit şemalar, hibrit analog / dijital ışın oluşumu yöntemlerinin avantajlarını içerdikleri için sadece dijital veya analog ışın oluşturma sınırlamalarının üstesinden gelen umut verici aday çözümler olmaktadır. Bunun yanısıra birden fazla eşzamanlı ışın iletiminden yararlanarak yalnızca analog mimarilere kıyasla RF zincirlerinin sayısı anten sayısından çok daha düşük olabilmesi nedeniyle, tamamen dijital çözümlere kıyasla karmaşıklığı azaltılmaktadır. Aynı zamanda, çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) optimizasyon sürecini analog ve dijital alanlar arasında bölerek klasik analog ışın şekillendirmeden daha fazla özgürlük sağlamaktadır. Hibrid yaklaşımın bir diğer avantajı ise, dijital ön kodlayıcı / birleştiricinin analog alandaki hassasiyet eksikliğini çoklu akış parazitini iptal edebilmesidir [6]. Özellikle, tek bir kullanıcı için hibrit ön kodlama / birleştirme sinyalleri milimetre dalga sistemleri için analiz edilmiştir [7], bu da hibrid tasarımların tamamen dijital çözümlere kıyasla benzer performans elde edebildiğini göstermektedir. Örneğin, gönderme ve

alma yanıt vektörlerinin temel vektörleri temsil ettiği dikey bir eşleştirme arayışıyla optimum ön kodlama ve birleştirme matrisini ayırıştırır. Bununla birlikte, BS ve MS'lerin çoklu ışınlar oluşturduğu çok kullanıcı milimetre dalga sistemleri için uygun olan, aynı anda aktif olan birçok BS-MS bağlantısını sürdürmek için, kullanıcılar arası girişim (ICI) azaltma için yeni çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir. 6 GHz altı kanallar için çok kullanıcı çözümler, donanım kısıtlamalarını ve belirli milimetre dalga kanal özelliklerini dikkate almadığı için doğrudan uygulanamamakta, ancak bu bantlarda Hibrid çok kullanıcı milimetre dalga sistemleri için tek kullanıcı şemada olduğu gibi, BS ve MS ortak bir radyo frekansı (RF) ışın oluşturma ve RF birleştirici kombinasyonu ile kanal kazancını en üst düzeye çıkarmak için sıfır zorlamalı (ZF) bir temel bant ön kodlama algoritması uygulanarak kullanıcılardan açık kanal durumu bilgisi (CSI) geribildirimi alınarak, geri bildirim olmayarak, iteratif olmayan bir kanal kestirimi geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, çok kullanıcı milimetre dalga masif MIMO sistemlerinde Kalman tabanlı hibrid bir ön kodlama / birleştirme şeması tasarlanmıştır. Ön kodlama temel bant matrisinin Kalman formülasyonundaki durum matrisi kullanılarak, iletilen ve tahmin edilen veriler arasındaki hatayı analiz etmek için sadece ön kodlama, birleştirme ve kanal matrislerinin bir fonksiyonu kullanılmış ve veri tahminine ihtiyaç duyulmamıştır. Önerilen yaklaşımın diğer mevcut hibrid çözümlerden daha iyi performans gösterdiğini, spektral verimlilik performansı açısından karşılaştırmalı simülasyon sonuçları ile ortaya konulmuştur. Bölüm 2.'de sistem modeli sunulmuş, önerilen Kalman formülasyonunu ve önerilen Kalman hibrit analog / dijital ön kodlama algoritması açıklanmıştır. Bölüm 3. ergodik spektral verimlilik simülasyonlarının sonuçlarını içermektedir. Son olarak, Bölüm 6. da sonuçlar sunulmuştur.

2. Sistem Modeli

Kalman Filtresi taşıyıcı frekans senkronizasyonu ve faz geri kazanımı gibi çeşitli fiziksel katman uygulamaları için kullanılmaktadır. Kalman filtresi tabanlı bir yaklaşım ile ışın şekillendirme (beamforming) ve birleştirme (combining) sorunu formüle edilerek Kalman tabanlı bir hibrit ön kodlamaya çözüm sunulmaktadır.



Şekil 1. Milimetre dalga hibrid analog / dijital ön kodlamalı ve analog birleştirmeli çok kullanıcı sistem

Baz istasyonundaki hibrit bir analog ve dijital ön kodlayıcıdan ve sadece RF analog birleştirmeli basit mobil istasyon cihazlarının bir araya gelmesiyle bahsedilen sistemin mimari yapısını oluşturmaktadır. Başlangıç mesajı baz istasyonu tarafından gönderildikten sonra mobil istasyondaki tahmini sinyal $\hat{s} = [\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_M]^T$, mobil istasyonu- m'de element \hat{s}_m ögesi tekrarlandıktan sonra n olarak tanımlanabilen gözlem vektörü (1)'de temsil etmektedir;

$$\hat{s}_m(n) = (w_m^H H_m F_{RF} F_{BB})s(n) + n_m(n) \quad (1)$$

$s(n)$, bir eğitim vektörü olup denklem 1'de ifade edildiği gibi baz istasyonundan iletilmiş olup, $w_m^H H_m F_{RF} = h_m^H$, baz istasyonundan mobil istasyonu- m'ye kadar etkili aşağı bağlantı kanalını temsil eder; burada $H_e = [h_1, \dots, h_M]^H$, etkili kanal matrisidir ve gözlemci matrisini temsil eder.

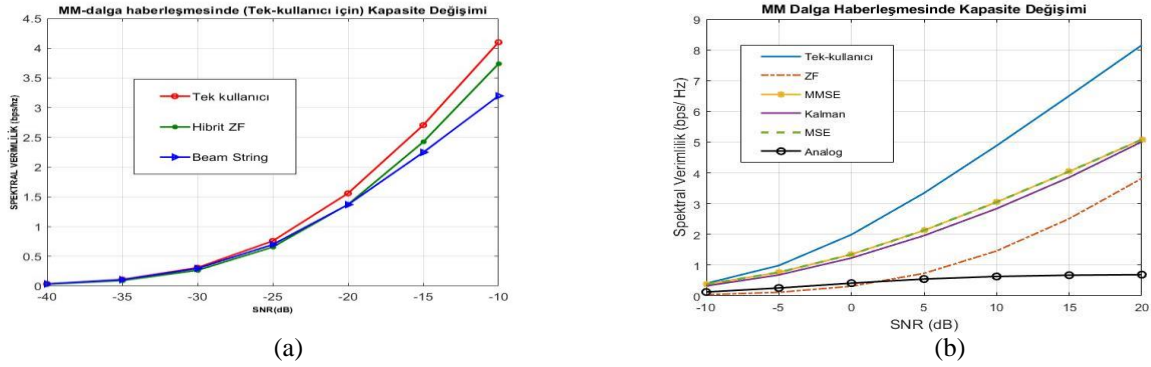
Kalman filtresi algoritması, denklem 1 'de ifade edildiği gibi baz istasyonu tarafından farklı ışınlarda iletilen sinyal arasındaki kare farkı olarak tanımlanan eğitim vektörünün toplam MSE $E\{\|s - \hat{s}\|^2\}$ değerini minimize eder ve tahmini mobil istasyonlarda sinyal, yani denklem 8 'de temsil edilen tüm tahmin edilen değerlerin toplanmasıdır. n - th Kalman yinelemesinde e(n) hatası böylece (2)'de gösterilmiştir:

$$e(n) = \frac{s(n) - \hat{s}(n)}{\|s(n) - \hat{s}(n)\|_2^2} \quad (2)$$

Dijital şemalarda bulunan RF zincirlerinin sayısı hibrit çözümlerinde ki anten sayılarına göre daha az görüldüğünden dolayı RF zincirlerinin enerji tüketiminin azaltma sebebi sinyal işleme karmaşıklığıdır [6]. Ağ mimarisi, baz istasyonunun N_{BS} akımları ve her biri N_{MS} antenleri ve bir RF zinciri olan $N_b < N_t < N_{BS}$ ile M mobil istasyonları sunmak için N_b akışları ve N_t RF zincirleri gönderdiği milimetre dalga tabanlı büyük bir MIMO hücresel sistemidir [7].

3. Benzetim Sonuçları

Hem tek kullanıcı sisteme ait spektral verimlilik hem de çoklu anten kullanımında elde edilen spektral verimlilik değişimleri Şekil 2. de sunulmuştur. Çoklu anten kullanmanın hem tek kullanıcı sistemine hem de ZF ve MMSE detektör kullanımında elde edilen sistem sonuçlarında analog tasarıma karşın üstünlükleri grafiklerde açıkça ortaya konulmuştur.



Şekil 2. Milimetre dalga haberleşmesinde hibrit yaklaşımın diğer tekniklere göre ergodik spektral verimlilik kazanç değişimi. (a): Tek kullanıcı SISO kanal (b): 4X4 MIMO kanal

4. Sonuçlar

Bu çalışmada çok kullanıcı kanalda hibrit digital ön kodlama için Kalman tabanlı bir modelleme ile spektral verimlilik analizi yapılmıştır. Şekil 2 de elde edilen benzetim sonuçlarına bakıldığında Hibrit ön kodlama ile tek kullanıcı SISO kanalda erişilebilir maksimum spektral verimlilik değeri 4.1 bps/Hz olarak elde edilmiştir. Buna karşın, çoklu anten kullanımının incelendiği 4 x 4 MIMO kanalda ise milimetre dalga haberleşmesi için farklı detektör yapılarına ait sonuçlar içerisinde en iyi sonuca MMSE ile erişilmiş olup 20dB SNR için erişilebilen maksimum spektral verimlilik 5bps/Hz olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak her iki kanal yapısı için milimetre dalga haberleşmesi ile erişilebilen en fazla kapasite değerleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve farklı filtre tekniklerinin ve farklı detektörlerin kapasite artışı üzerindeki etkileri incelenmiş en yüksek kapasite değerine MMSE detektör ve hibrit ZF detektörler ile erişilebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynaklar

- [1]. Wong V. S. R. ve Ng D. W. K., Key Technologies for 5G Wireless Systems, Cambridge Univ. Press, İngiltere, 2017.
- [2]. Boccardi F., Heath R. W. , Lozano A., Marzetta T. L., ve Popovski P., “Five disruptive technology directions for 5G”, IEEE Communications Magazine, cilt.52 no.2, s.74-80, 2014.
- [3]. Akyildiz I. F., Lee W.-Y., Vuran M. C., ve Mohanty S., “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey”, Computer Networks, cilt.50 no.1, s.2127-2159, 2006.
- [4]. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J. M., ve Koucheryavy Y., “Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas”, IEEE Transactions on Wireless Communications, cilt.16 no.3, s.1791-1808, 2017.
- [5]. Heath R. W., González-Prelcic Jr., N., Rangan S., Roh W., ve Sayeed A. M., “An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems”, IEEE Journal of Sel. Topics Signal Process., cilt.10 no.3, s.436–453, 2016.
- [6]. Alkhateeb A., Leus G., ve Heath R. W., “Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems”, IEEE Transactions on Wireless Communications, cilt.14 no.11, s.6481–6494, 2015.
- [7]. Nguyen D. H. N., Le L. B., ve Le-Ngoc T., “Hybrid MMSE precoding for mmWave multiuser MIMO systems”, Proceedings IEEE International Conference on Communications, Kuala Lumpur, Malezya, s.1–6 Mayıs 2016.